

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**INFORME FINAL**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la Descontaminación  
en Bolivia**

Contrato 21.06

**INFORME FINAL**

**CONTENIDO**

- I. Revisión Bibliográfica y visita a la planta de Puchuckollo
- II. Diagnóstico de Poblaciones a ser Beneficiarias y Descripción del Centro Poblado de Copacabana
- III. Expedientes Técnicos de Obra
- IV. Informe de Avance Físico, Conclusión de Obra y Puesta en Funcionamiento
- V. Programa de Investigación realizado en la Planta de tratamiento de Copacabana
- VI. Acciones de Difusión y Capacitación a Operadores en Copacabana y Desaguadero
- VII. Guías de Operación y Mantenimiento de las Plantas de Tratamiento de Copacabana y Desaguadero
- VIII. Guía de Monitoreo e Investigación para la Planta de Tratamiento de Desaguadero
- IX. Conclusiones Finales y Recomendaciones

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y VISITA A  
LA PLANTA DE PUCHUCKOLLO**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**

(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# TABLA DE CONTENIDO

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Revisión bibliográfica.....   | 4  |
| 1.1     | Bibliografía anotada de totora.....   | 4  |
| 1.2     | Bibliografía sobre totora en Bolivia.....   | 20 |
| 1.2.1   | Resumen bibliográfico .....   | 20 |
| 1.2.2   | Revisión detallada de los estudios.....   | 23 |
| 1.2.2.1 | Introducción .....  | 23 |
| 1.2.2.2 | Revisión detallada de los estudios sobre la totora como<br>descontaminante de aguas ..... | 23 |
| 2       | Visitas a microlagunas en funcionamiento .....  | 31 |
| 2.1     | Introducción .....  | 31 |
| 2.2     | Microlaguna de la Planta depuradora de aguas servidas de Puchuckollo.....                 | 31 |
| 2.2.1   | Ubicación de la laguna .....  | 31 |
| 2.2.2   | Descripción del sistema.....  | 32 |
| 2.2.2.1 | Sistema existente .....   | 32 |
| 2.2.2.2 | Laguna de totora .....  | 32 |
| 2.2.3   | Funcionamiento de la laguna .....   | 32 |
| 2.2.3.1 | Estudios realizados .....   | 32 |
| 2.2.3.2 | Caudales y cargas .....   | 33 |
| 2.2.3.3 | Eficiencia de la purificación .....   | 34 |
| 2.2.4   | Plantado y crecimiento de la totora.....  | 35 |
| 2.3     | Conclusiones de las visitas .....   | 35 |

# 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 Bibliografía anotada de totora

ACOSTA, J. de (1880) : The natural and moral history of the Indies, Vol. I.- The Hakluyt Society, London, Inglaterra

Uso en la economía nativa ; construcción de basas etc. ; forraje ; alimentación humana

ACOSTA, J. de (1940) : Historia natural y moral de las Indias, en que se tratan de las cosas notables del ciclo, elementos, metales, plantas y animales dellas : y los ritos, y las ceremonias, leyes y gobierno de los Indios.- 2da edición, 444 pp., Fondo de Cultura Económica, México (Originalmente publicado en 1590)

Uso en la economía nativa ; construcción de basas etc. ; forraje ; alimentación humana

ACOSTA-SOLIS, M. (1967) : Los bosques de Ecuador y sus productos.- Edit. Ecuador, Quito, Ecuador

Uso en la economía nativa ; construcción de basas etc. ; forraje ; alimentación humana

ALCEDO, A. de (1786 - 1789) : Diccionario geográfico de las Indias Occidentales o América : Es de saber ; de los reyes del Perú, Nueva España, Tierra Firme, Chile y Nuevo Reyno de Granada.- 5 volúmenes. Imprenta de B. Cano etc., Madrid, España

Uso en la economía andina

ALCEDO, A. de (1967) : Diccionario geográfico de las Indias Occidentales o América : Es de saber ; de los reinos del Perú, Nueva España, Tierra Firme, Chile y Nuevo Reino de Granada.- 5 volúmenes. Biblioteca de Autores Españoles desde la Formación del Lenguaje hasta Nuestros Días, Madrid, España

Uso en la economía andina

ALVAREZ, A. (1987) : Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de aguas por *Schoenoplectus tatora* .- Tesis de Lic. de Química, UMSA, La Paz, Bolivia, 148 pp.

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados, uso en laboratorio en sistema dinámico

ANÓNIMO (1984): Die Bedrohung der Umwelt durch Minenabfälle in hochandinen Regionen Boliviens.- SAGO 49, Oktober 1984, pp 13-20

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados, absorción de metales pesados

ARZE, C. (1983) : *Schoenoplectus tatora* (totora) como agente descontaminante de aguas.- Informe inédito UNESCO, La Paz, Bolivia, 74 pp.

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados, uso en laboratorio en sistema estático

ARZE, C. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a contaminaciones inorgánicas.- Informe inédito, UNESCO, La Paz, Bolivia, 87 pp.

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados (Mg/Cu/Zn/Pb), uso en laboratorio en sistema estático

ARZE, C. & ALVAREZ, A. (1987) : Diseño de una planta para la purificación de aguas mediante *Schoenoplectus tatora*.- Informe inédito, La Paz, Bolivia, 148 pp.

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados, (Pb/Fe/Cr/Mn/Zn/Cu/Hg/As), uso en laboratorio en sistema estático y dinámico

ARZE, C. & ALVAREZ, A. (1990) : Totora como descontaminante de aguas en movimiento.- Revista Boliviana de Química 9 (1), 3-8

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados, uso en laboratorio en sistema dinámico

ARZE, C., P. CRESPO, M. DIAZ, M. CALLICONDE & S. UZQUEDA (1989): Descontaminación de aguas con base en la *Schoenoplectus tatora* (totora).- Ingeniería Hidráulica en México, mayo a agosto

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados, uso en laboratorio en sistema estático y dinámico, distribución de contaminantes en diferentes tejidos de la totora

ARUHUANCA, G.P. (1983) : Efecto de fertilización y abonamiento sobre el rendimiento del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L. var. José A. Zapata).- Tesis UNTA, Puno, Peru, 57 pp.

Uso de bioabono de totora

BANDELIER, A.F. (1905) : The basin of lake Titicaca.- Scottish Geographic Magazine, Vol. XXI

Uso tradicional

BANDELIER, A.F. (1907) : La hoya del lago Titicaca.- Rev. Min. Col. Agric. 3, 31 - 33 783 - 794, La Paz, Bolivia

Uso tradicional

BANDELIER, A.F. (1910) : The islands of Titicaca and Koati.- The Hispanic Society of America, New York, E.E.U.U.

Uso tradicional

BANDELIER, A.F. (1916) : Las islas del Titicaca y Coati.- Dirección de Estadística y Estudios Geográficos, La Paz, Bolivia

Uso tradicional

BARROS, M. (1935) : Ciperáceas argentinas 2.- Anales Mus. Argent. Cienc. Nat. 38 (Scirpus riparius, Scirpus validus, p. 167 - 171)

Sistemática

BARROS, M. (1942) : Notas ciperológicas II.- Darwiniana 6, 122 - 126

Sistemática

BARROS, M. (1960) : Las ciperáceas del estado de Santa Catalina.- Sellowia 12

Sistemática

BEETLE, A.A. (1941) : Studies in the genus *Scirpus* L. III. The American species of the section Lacustres Clarke.- Amer. J. Bot. 28, 691 - 700

Sistemática

BEETLE, A.A. (1945) : Sedge boats in the Andes.- J. New York Bot. Garden 56 (541) ; 1 - 4

Uso en la economía nativa para construcción de balsas

BEETLE, A.A. (1949) : Annotated list of original descriptions in *Scirpus*.- Amer. Midl. Nat. 41, 453 - 493

Sistemática ; Distribución geográfica

BEETLE, A.A. (1950) : Bulrushes and their multiple use.- Econ. Bot. 4 (2), 132 - 138

Uso en la economía nativa para artesanía etc.

BEETLE, A.A. (1953) : Notes on the nomenclature of South American species of *Scirpus*.- Bol. Arg. Bot. 5 (1/2), 81 - 86

Sistemática

BOERO, H. (1980) : Bolivia mágica.- La Paz, Bolivia

Uso tradicional

BOERO, H. (1981) : El lago Titicaca y el origen de las culturas andinas.- Revista Geomundo 5 (11), 408 - 419

Uso tradicional

CALANCHO, E. (1984) : Economía de los Urus del Titicaca.- Tesis Ingeniería Economista, UNTA, Puno, Peru, 93 pp.

Uso en la economía nativa para la producción de basas etc., forraje y alimentación humana

CAMPANA, A. (1976) : Estudio preliminar de la influencia ambiental en contenido bromatológico de cinco especies forrajeras acuáticas del Departamento de Puno.- Tesis UNA, Puno, Peru, 65 pp.

Uso como forraje, análisis bromatológico

CANO, W. (1922 - 1952) : El lago Titicaca. El más alto navegable del mundo.- Edit. Moreno, Argentina, 74 pp.

Uso tradicional

CARDENAS, M. (1989) : Manual de plantas económicas de Bolivia.- Enciclopedia Boliviana, Edit. Los Amigos del Libro, 2da edición, La Paz, Bolivia, 333 pp.

Uso en la economía nativa para producción de balsas etc., alimentación humana

CARPIO, B.O. (1989): Distribución y abundancia de macrófitos litorales en la bahía interior de Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Peru

Biomasa y distribución en la bahía de Puno, lago Titicaca

CARVAJAL, H.E. (1987) : La totora como descontaminante de aguas.- II. Feria Científica Juvenil del Convenio Andrés Bello, Tacna, Peru, 88 pp.

Uso para tratamiento de aguas, contaminación con metales pesados (Cu/Pb/Zn/Fe), ensayos en laboratorio en sistema estático

CENFOR (1981) : La totora en la Reserva Nacional del Titicaca.- Informe inédito, Puno, Peru

Conservación etc.

CHIPARO, C. (1982) : Origen y cambios en la producción y consumo en la nacionalidad Aymara : los Yanaques.- Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Social del Altiplano (IIDS), Série : Teoría y Metodología 2, UNA, Puno, Peru

Uso en la economía nativa, para producción de balsas etc., forraje y alimentación humana

COBO, P.B. (1890) : Historia del Nuevo Mundo.- Sevilla, España (originalmente completado alrededor de 1653)

Uso en la economía nativa

COKER, R.E. (1911) : Lake Titicaca. "The most remarkable lake of the world".- Internat. Rev. Ges. Hydrobiol. 4, 175 - 182

Uso en la economía nativa

COLLOT, D. (1980) : Les macrophytes de quelques lacs andins (Lac Titicaca, Lac Poopó, Lacs des vallées d'Hichu Kkota et d'Ovejuyo).- Travaux réalisés au cours du VSNA en Bolivie, Convenio UMSA - ORSTOM, 115 pp., La Paz, Bolivia

Distribución en lagos altoandinos

COLLOT, D. (1982) : Vegetación acuática del lago Poopó.- Ecología en Bolivia 1, 47 - 55

Distribución en el lago Poopó

COLLOT, D. (1982) : Mapa de vegetación de la bahía de Puno.- Ecología en Bolivia 2, 49 - 64

Distribución en la bahía de Puno, lago Titicaca

COLLOT, D., F. KORIYAMA & E. GARCIA (1979) : Las plantas acuáticas del lago Titicaca (pequeño).- I. Congreso Boliviano de Biología 1, 6 - 7

Distribución en el lago Titicaca pequeño

COLLOT, D., F. KORIYAMA & E. GARCIA (1983) : Repartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca.- Rev. Hydrobiol. Trop. 16 (3), 241 - 261

Distribución en el lago Titicaca



CORDERO, L. (1950) : Enumeración botánica...de la República del Ecuador.- Afrondisio Aguado, 2da. Edición, Madrid, España

Uso en la economía nativa

CORNEJO, E. & H.A.N. ARAMAYO (1989) : Effects of eutrophication on periphyton and macrophytes.- En : Pollution in Lake Titicaca, Peru (eds. NORTHCOTE, MORALES, LEVY, GREAVEN), 73 - 80 ; Vancouver, Canadá ; Puno, Peru

Distribución y cobertura en la bahía de Puno, lago Titicaca

CORTÉZ, J. A. (1991): Evaluación parasitaria en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de las residencias de la UNA - Puno. Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Uso en el tratamiento de aguas domésticas, reducción de la carga parasitaria

COYLA, P.L. (1992): Determinación de los parámetros físico-químicos de aguas servidas para evaluar el tratamiento con el macrófito *Schoenoplectus tatora* en las pozas de sedimentación UNA- Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Uso en el tratamiento de aguas domésticas

CUTIPA, C. Z. (1988) : Contribución al conocimiento de sistemas de producción de forrajes acuáticos con tecnología campesina de "Pozas Forrajeras".- Tesis Ing. Agrónomo, UNA, Puno, Peru, 80 pp.

Uso como forraje

DE LOZA AVILA Y PALOMARES, B. (1983) : "De los árboles, frutos, plantas, aves y de otras cosas tiene este reino" Siglo XVIII.- Sociedad Geográfica de La paz, 285 pp., La Paz, Bolivia

Uso como planta medicinal y en la alimentación humana

DEL GRANADO, J.T. (1931) : Plantas bolivianas.- Edit. Arnó Hnos, 284 pp., La Paz, Bolivia

Descripción de la planta, uso tradicional de la totora

DE LUCCA, M. & J. ZALLES (1992): Flora medicinal boliviana.- Enciclopedia Boliviana, Edit. Los Amigos del Libro, La Paz, Bolivia, 498 pp.

Uso tradicional de la totora y su uso medicinal

DIAZ DEL CASTILLO, M. (1985) : Utilización de *Scirpus tatora* en la descontaminación de agua.- Tesis de Lic. en Farmacia, UMSA, La Paz, Bolivia, 74 pp.

Uso para tratamiento de aguas, contaminación con metales pesados (Cu/Zn/Mn/Pb), ensayos de laboratorio en sistema estático

ESPINOZA, G. (1994): Absorción de iones cobre, plomo y zinc por medio la *Schoenoplectus tatora* (totora) en medio dinámico.- Tesis Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia

Uso para purificación de aguas, contaminación con metales pesados, uso en laboratorio en sistema dinámico

ESTIVARIZ del CASTILLO, F.D. (1995): Determinación de la combinación óptima de llachu (*Elodea potamogeton*) y totora (*Schoenoplectus tatora*) para la producción lechera.- Tesis Agronomía, UMSA, La Paz, Bolivia

Uso como forraje

EDWARDS, C.R. (1965) : Aboriginal watercraft on the Pacific coast of South America.- Ibero - Americana 47

Uso en la economía nativa

ESPINOZA, R. (1949) : Estudios botánicos en el sur del Ecuador.- Vol. II, Edit. Universitario, Loja

Uso en la economía nativa

FERNANDEZ BACA & M.C. NOVDA (1966) : Estudio comparativo de la digestibilidad de los forrajes avena y totora en ovino y alpacas.- Revista de la Fac. De Med. Vet. De la UNMSA, Lima, Peru

Uso como forraje

FERNANDEZ, B.S. (1966) : Composición nutritiva de algunas especies de forrajeras del Departamento de Puno.- Boletín extraordinario del Instituto Veterinario de Investigaciones Tropicales y de Altura (IVITA), Lima, Peru, 101 - 103

Uso como forraje, análisis bromatológico

FOSTER, R.C. (1965) : Studies on the flora of Bolivia. III Cyperaceae, Part I.- Rhodora 67 (770), 97 - 138

Sistemática

FRANCO, A.M. (1981) : Evaluación bromatológica de las especies forrajeras del lago Titicaca.- Tesis UMSA, La Paz, Bolivia

Uso como forraje, análisis bromatológico

FRANKEN, M. (1988) : Experimentos con la totora como agente de purificación de aguas.-Taller sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales (eds. KISTRITZ, NORTHCOTE, RIVERA), 19 - 36, Puno, Perú

Uso para tratamiento de aguas, contaminación con metales pesados, contaminación microbiológica, especialmente con E. coli ; ensayos de laboratorio en sistemas estáticos y dinámicos, revisión de todos los trabajos anteriores realizados con la totora como agente descontaminante en la UMSA, La Paz

FRANKEN, M. (1990) : Macrófitas de los cuerpos de agua del valle de La Paz.- En : Guia de fauna, flora y ecología de los alrededores de La Paz.- Instituto de Ecología, UMSA, La Paz, Bolivia

Distribución en lagunas altoandinas

FRANKEN, M. (1990) : Purificación de aguas mediante plantas acuáticas.- Revista de Ingeniería Sanitaria (ABIS), 5 (6), 3 - 8

Uso de macrófitas para tratamiento de aguas en general

GALDO, P. (1981) : Artesanías y pequeñas industrias en el área colindante con el lago Titicaca.- En : Acerca de la Historia y el universo Aymara, 77 - 106, Centro de Información, Estudios y Documentación, Lima, Perú

Uso en la economía nativa, para producción artesanal

GALIANO, L.F. (1987) : Productividad primaria de la totora (*Scyrpus tatora* Kunth.) Sector Puno.- Tesis UNA, Puno, Peru, 48 pp.

Biomasa y productividad en ambiente natural

GARNICA, J., P. MORALES & W. ZEA (1988) : Contenido de nitrógeno en los macrófitas litorales de la bahía interior de Puno.- Taller sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales (eds. KISTRITZ, NORTHCOTE, RIVERA), 49 - 53, Puno, Perú

Contenidos de nitrógeno y fósforo en ambiente natural eutrofizado

GAVANCHO, M. (1975) : La totora, base de la economía Chimú y su repercusión en la escuela.- Tesis de la Escuela Normal Superior Mixta, Puno, Perú

Morfología ; uso en la economía nativa, para producción artesanal, forraje etc. ; uso como planta medicinal

GEHLER, E. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a hierro y plata.- Tesis de Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia, 46 pp.

Uso para tratamiento de aguas, contaminación con Fe y Ag ; ensayos de laboratorio en sistema estático

GEHLER, E. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a hierro y plata en soluciones acuosas.- Revista Boliviana de Química 5 (1), 21 - 31

Uso para tratamiento de aguas, contaminación con Fe y Ag ; ensayos de laboratorio en sistema estático

GILSON, H.C. (1964) : Lake Titicaca.- Verh. Internat. Verein. Limnol. 15, 112 - 127

menciona la totora

GOYZUETA, C.G. (1983) : Estudio de los recursos de flora y fauna silvestre de la Reserva Nacional del Titicaca.- Informe inédito de Prácticas Pre-Profesionales, Facultad de Ciencias Biológicas, UNA, Puno, Perú

Biología y uso de la totora

GOYZUETA, C.G. (1989) : Zonificación y estimación de biomasa de totorales en el sector de la Reserva Nacional del Titicaca.- Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT), Ministerio de la Presidencia, Instituto Nacional de Desarrollo (INADE), Puno, Perú, 46 pp.

Zonificación y productividad

GUERRA, M.A. (2000) : Efecto descontaminante de la totora en las lagunas de estabilización de Puchuckollo Bajo.- Tesis Ingeniería Civil, UMSA, La Paz, Bolivia

Uso para descontaminación de aguas domésticas en una laguna de estabilización

HUANACUNI, V. (1991): Factore ambientales en el tratamiento con totora *Schoenoplectus tatora* de aguas servidas en Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Uso en el tratamiento de aguas urbanas

HEISER, C.B. (1974) : Totoras, Taxonomy and Thor.- Plant Science Bulletin 20 (2), 22 - 26

Uso en la economía nativa ; reproducción ; cultivo ; distribución en Latino América y "Osterinseln" ; sistemática

HEISER, C.B. (1979) : The totora (*Scirpus californicus*) in Ecuador and Perú.- Economic Botany 32, 222 - 236

Uso en la economía nativa, para construcción de balsas, artesanías etc., forraje, alimentación humana ; cultivo ; sistemática ; distribución en Latino América y "Osterinseln" ; genética ; nombres comunes

HERBAS, C.P. (1978) : Evaluación preliminar de la producción de totora (*Scirpus tatora* Kunth. ) del lago Titicaca, sector peruano.- Tesis UNTA, Puno, Perú, 58 pp.

Biomasa y producción en ambiente natural

HERNANDEZ, F. (1942) : Historia de las plantas de Nueva España.- Imprenta Universitaria (reprint), México, D.F.

Uso en la economía nativa

Hi, R. & A. ZIRENA (1979) : Distribución de la vegetación acuática (Macrophyta) en la bahía de Puno.- Lago Titicaca Boletín, IMARPE, Puno, Perú

Distribución en la bahía de Puno, lago Titicaca

HICKMAN, J.M. (1963) : The Aymaras of Chinchera, Peru : Persistence and change in a bicultural context.- Unpubl. Ph.D. Dissertation, Cornell University

Uso en la economía nativa

INADE, PELT (1988) : Caracterización de primera aproximación mediante el sondeo de las comunidades campesinas del distrito de Coata, Provincia de Puno.- Puno, Perú, 108 pp.

Uso tradicional

INSTITUTO DEL MAR DEL PERU (IMARPE) & UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES (UMSA) (1985) : Referencias bibliográficas sobre el lago Titicaca y sus recursos hidrobiológicos.- Publicación Especial No. 1, 67 pp., Callao, Perú

Bibliografía

JAEN, R.J. (1988) : Utilización de trigo duro, remojado, pregerminado, germinado, como suplemento de la totora (*Scirpus tatora* Kunth.) en el engorde de cuyes.- Tesis UNA, Puno, Perú

Uso como forraje

JAVERA, M. (1992): Demanda bioquímica de oxígeno en el tratamiento experimental de aguas residual con *Schoenoplectus tatora* .- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Uso en el tratamiento de aguas domésticas, eficiencia en la reducción de la DBO

KISTRITZ, R.U. (1984) : Primer borrador de un programa para el desarrollo de un banco de datos sobre la totora (*Scirpus tatora*) para su manejo en la cuenca del lago Titicaca, Perú.- Documento preliminar, Vancouver B.C., Canadá, 8 pp.

Uso para purificación de aguas

KNOCHE, W. (1930) : Binsenboote auf den Seen von Ecuador.- Zeitschr. F. Ethnol. 62, 205 - 206

Uso en la economía nativa

KOYAMA, T. (1963) : The genus *Scirpus* L. Critical species of the section *Pterolepis*.- Canadian Journal of Botany 41, 1107 - 1131

Sistemática

LA BARRE, W. (1948) : The Aymara Indians of the lake Titicaca plateau, Bolivia.- American Anthropologist

Uso en la economía nativa

LA BARRE, W. (1951) : Aymara biologicals and other medicins.- J. Am. Folk. 64, 171 - 178, Austin, E.E.U.U.

Uso como planta medicinal

LA BARRE, W. (1959) : "Materia médica" of the Aymara leke Titicaca plateaux, Bolivia.- Webbia 15 (1), 47 - 94, Firenze, Italia

Uso como planta medicinal

LANDA, A. (1974) : Cambios estacionales de la productividad primaria en el lago Titicaca y su significado ecológico.- Lima, Perú

Biomasa y producción en ambiente natural

LARICO, C. & H. ROMERO (1994): Utilización de *Schoenoplectus tatora* de pozas de tratamiento de aguas servidas para la elaboración del compost.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Uso de totora para la elaboración de compost

LEVIEIL, D., Q.C. CUTIPA, C.G. GOYZUETA & F.P. PAZ (1989) : Importancia socio-económica de la extracción de macrófitos en la bahía de Puno.- En : Contaminación en el lago Titicaca, Perú (eds. NORTHCOTE, MORALES, LEVY, GREAVEN), 81 - 100, Vancouver, Canada ; Puno, Perú

Uso en la economía nativa ; métodos de extracción y transplante

LEVIEIL, D., Q.C. CUTIPA, C.G. GOYZUETA & F.P. PAZ (1989) : The socio-economic importance of macrophyte extraction in Puno bay.- En : Pollution in Lake Titicaca, Peru (eds. NORTHCOTE, MORALES, LEVY, GREAVEN), 81 - 100, Vancouver, Canada ; Puno, Perú

Uso en la economía nativa ; métodos de extracción y transplante

LEVIEIL, D. & C.G. GOYZUETA (1984) : Evaluación de la extracción de totora para fines de subsistencia en la Reserva Nacional del Titicaca, sector Puno.- Informe inédito, Ministerio de Agricultura y Alimentación, CENFOR, Puno, Perú

Uso en la economía nativa ; conservación

MACBRIDE, J.F. (1936) : Flora of Peru. Part 1, No. 1.- Field Museum of Natural History, Botanical Series Vol. XIII, 320 pp., Chicago, E.E.U.U.

Sistemática

MALDONADO, A.N. (1987) : Digestibilidad in vivo con seis subproductos de la zona en ovinos.- Tesis Ingeniería Agronómica, UNA, Puno, Perú, 88 pp.

Uso como forraje

MAMANI, M.G. (1971) : Botánica de la totora.- La Paz, Bolivia

Biología

MAMANI, M.G. (1977) : Evaluación de la superficie y rendimiento de la totora (*Scyrpus californicus*) en el lago Titicaca.- Tesis Ingeniería Agronómica, UNA, Puno, Perú, 23 pp.

Distribución, cobertura y biomasa en ambiente natural

MANRIQUE, J. & P. RIVERA (1982) : Análisis bromatológico del “chullo” de la totora.- Problemática Sur-Andina 2, 91 - 100

Uso para alimentación humana ; análisis bromatológico

McINTYRE, L. (1973) : Lost empire of the Incas.- Nat. Geogr. Mag. 144, 729 - 786

Uso en la economía nativa

MILAN, DIMITRI & PARODI (1970) : Enciclopedia argentina de agricultura y ganadería.- Vol. I, 2da edición, Edit. Acna S.A., Buenos Aires, Argentina

Morfología etc. ; construcción de balsas etc.

MINISTERIO DE AGRICULTURA (R.A.XII) (1978) : Estudio sobre productividad primaria de la totora.- Convenio M.A. Z.A., UNA, Puno, Perú

Biomasa y producción en ambiente natural

MONROY, T. (1941) : La totora es una cyperácea.- Tesis, Universidad de Cuzco, Perú

Morfología ; uso en la economía nativa ; uso como planta medicinal ; sistemática

MONTOYA, C.S., F.P. RAMOS & C.V. CARCARI (1988) : Evaluación y observaciones de los recursos : flora y fauna silvestre en la Reserva Nacional del Titicaca y en el criadero de chinchillas.- Informe inédito de Prácticas Pre-Profesionales, Facultad de Ciencias Biológicas, UNA, Puno, Perú, 47 pp.

Conservación

MORALES, C.B. de (1988) : Manual de Ecología.- Instituto de Ecología, UMSA, 323 pp., La Paz, Bolivia

Morfología y distribución en una laguna altoandina

MORALES, P. & W. ZEA (1988) : Determinación de la biomasa de los macrófitos litorales de la bahía interior de Puno.- Taller sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales (eds. KISTRITZ, NORTHCOTE RIVERA), 37 - 42

Biomasa en ambiente natural eutrofizado

NEVEU-LEMAIRE, M. (1906) : Les lacs des hauts-plateaux de l’Amerique du Sud.- Mission Scientifique G. de Créqui Montfort et E. Sénéchal de la Grange, Imp. nationale VI, 197 pp., il., carte, París, Francia

Uso tradicional

NEVEU-LEMAIRE, M. (1909) : Los lagos de los altiplanos de la América del Sur.- Traducción de Belisario Diaz Romero, Lib. Argote, V, II, 154 pp., CIV, 4 pp., il., mapa, La Paz, Bolivia

Uso tradicional

NORIEGA, G. (1989) : Tecnología de totorales en el lago Titicaca, uso, recuperación y manejo.- Proyecto, Puno, Perú, 38 pp.

## Manejo y recuperación de totorales, transplante y uso tradicional

NORTHCOTE, T.G. (1979) : A review of literature on the lake Titicaca system and its hydrological resources.- Informe inédito, Puno, Perú

### Bibliografía

NORTHCOTE, T.G., P. MORALES, D.A. LEVY & M.S. GREAVEN (eds.) (1989) : Pollution in lake Titicaca, Peru : Training, research and management.- Westwater Research Center, University of British Columbia, Vancouver, Canada ; Instituto de Aguas Alto Andinas, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 262 pp.

Distribución y cobertura en la bahía de Puno, lago Titicaca ; uso en la economía nativa ; métodos de extracción y transplante

NUÑEZ, M.T. (1971) : Contribución al estudio de la producción de ensilaje de avena en comparación con ensilaje de totora en el altiplano.- Revista de la UNTA 3 (4), 158 - 165, Puno, Perú

Uso como forraje, ensilaje

OCOLA, Y. & R. BEROLATTI (1995): Tratamiento de aguas servidas en la ciudad de Puno mediante el uso de totora.- Informe inédito, PELT/EMSAPUNO

Uso en la purificación de aguas domésticas en lagunas de estabilización, adaptación de la totora, crecimiento en aguas servidas

OLAGUIBEL, J.A. (1984) : Digestibilidad in vivo de los residuos vegetales de cocina, heno de avena, totora y llachu en cuyes (*Cavia porcellus* L.).- Tesis UNTA, Puno, Perú, 63 pp.

Uso como forraje

ONERN & CORPUNO (1965) : Programa de inventario y evaluación de los recursos naturales del Departamento de Puno, sector de prioridad no. 1.- Ecología y Agrostología, Ca. VI, Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Edit. Litográfica, Lima, Perú

Distribución geográfica

ORDEPUNO (1980) : Región agraria Puno.- Series históricas No. 1, Producción Agrícola, Puno, Perú

Uso como forraje

OYANGUREN, F. (1968) : Ensayo comparativo de la digestibilidad de ensilaje de avena (*Avena sativa*) variedad mantaro 15 y de totora (*Scyrpus sp.*) en ovinos y alpacas.- Tesis UNA, Puno, Perú, 33pp.

Uso como forraje, ensilaje

OYANGUREN, F. & M. TAPIA (1971) : Ensayo comparativo de la digestibilidad de ensilaje de avena y de totora en ovinos y alpacas.- Informe inédito, UNA, Puno, Perú

Uso como forraje, ensilaje

PALOMINO, J.C: (1998): Efectividad de la planta de tratamiento Espinar en la depuración parasitaria de aguas residuales captadas de la ciudad de Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Peru

Uso en tratamiento de aguas urbanas en lagunas de estabilización, efectividad en la eliminación de parásitos

PARODI, L. (1932) : Las balsas usadas por los Aymaras en el lago Titicaca.- Physis 11, 145 - 149

Uso en la economía nativa, para la construcción de balsas

PASANO DEL CARPIO, M. Y. (1997): Evaluación parasitaria de la planta de tratamiento de las aguas servidas de la UNA.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Reducción de la carga parasitaria en lagunas de tratamiento de aguas con totora

PELT (1978) : Productividad primaria de la totora *Scyrpus sp.*, Vol. I.- Ministerio de Agricultura y Alimentación, Puno, Perú

Biomasa y producción

PELT (1988) : Reforestación de las islas y riberas del lago Titicaca, Vol. I.- Puno, Perú

Conservación y transplante

PELT (1993) : Superficie y biomasa de los totorales en el lago Titicaca e influencia del nivel del agua.- Informe inédito, enero de 1993, sin notación de paginas, con 8 mapas, Puno, Perú

Biomasa y distribución

PEREZ de BARRADOS, J. (1951) : Los muiscas de la conquista, Vol. II.- Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Uso en la economía nativa, construcción de balsas, en Colombia

PEREZ, M. ( ) : Análisis bromatológico, bacteriológico del chullo de la totora.- Tesis de Lic. en Bioquímica, UMSA, La Paz, Bolivia

Uso en la alimentación humana ; análisis bromatológico ; riesgos por microorganismos asociados

PLAN MAESTRO RESERVA NACIONAL TITCACA (1979) : Centro de Estudios de Inversión y Desarrollo.- Universidad Nacional Agraria, Lima, Perú

Conservación etc.

LA PUENTE, I. (1891 - 1892) : Estudio monográfico del lago Titicaca, bajo su aspecto físico e histórico.- Bol. Soc. Geográfica, Lima, Perú, Tomo I, 263 - 391

Uso en la economía nativa ; distribución en el lago Titicaca

PUMA, G. (1983) : Instalación de una planta de biogas en el Campus Universitario de la UNA.- Informe inédito, UNA, Puno, Perú

Uso para la producción de biogas, junto con estiércol

QUISPE, J. (1997): Análisis aproximal en la vegetación de macrófitos acuáticos forrajeros del L. T. Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Análisis bromatológico y valor nutritivo como forraje



QUISPE, M.G. (1997): Determinación poblacional de estreptococos fecales en la planta piloto de tratamiento de aguas servidas UNA – Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Uso para tratamiento de aguas domésticas, reducción de microorganismos fecales

RAMIREZ, C. & N. AÑAZCO (1982) : Variaciones estacionales en el desarrollo de *Scirpus californicus*, *Typha angustifolia* y *Phragmites communis* en pantanos valdicianos.- Agro Sur 10 (2), 111 - 123, Chile

Distribución en pantanos chilenos, fenología y desarrollo estacional

RAMIREZ, C. & S. BECK (1981) : Makrophytische Vegetation und Flora in Gewaessern der Umgebung von La Paz, Bolivien.- Arch. Hydrobiol. 91 (1), 82 - 100

Distribución en lagunas altoandinas

RAMIREZ, V.T. (1990) : Reposición y ampliación de nuevas áreas de totorales en la Reserva Nacional del Titicaca.- Proyecto Propuesta Reserva Nacional del Titicaca, Puno, Perú, 7 pp.

Transplante de totora y manejo y recuperación de totorales

RAMOS, C.T. (1984) : Efecto del bioabonamiento y fertilización sobre el rendimiento de papa (*Solanum andigenum* Juz et Buk, var. Imilla Negra).- Tesis UNA, Puno, Perú, 70 pp.

Uso de bioabono de totora

RAMOS, O.D. (1975) : Evaluación nutritiva de especies forrajeras perennes en el Departamento de Puno.- Tesis Ingeniería Agronómica, UNA, Puno, Perú, 58 pp.

Uso como forraje, análisis bromatológico

RESERVA NACIONAL DEL TITICACA (1980) : Producción primaria en la Reserva Nacional del Titicaca.- Documento de Trabajo, Puno, Perú, 12 pp.

Producción primaria

REYES, M. (1988): Contenido de nitrógeno y fósforo en macrófitos litorales de la bahía interior de Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Fijación de nitrógeno y fósforo

REYES, M.C. (1988) : Contenido de nitrógeno y fósforo en macrófitos litorales de la bahía interior de Puno.- Tesis Lic. en Biología, UNA, Puno, Perú, 65 pp.

Contenido de nutrientes en ambiente eutrofizado

RIVERA, C., R.U. KISTRITZ, P. MORALES, J. GARNICA, W. ZEA & T.G. NORTHCOTE (1989) : Assessing the use of aquatic plants for wastewater treatment in a high elevation tropical lake.- Paper held at SIL-Congress, Munich, 16 pp.

Uso para el tratamiento de aguas domésticas, planificación de una planta piloto

RIVERA, C., P. MORALES & W. ZEA (1988) : Determinaciones bacteriológicas de las aguas y los macrófitos de la bahía interior de Puno.- Taller sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales (eds. KISTRITZ, NORTHCOTE, RIVERA), 43 - 48, Puno, Perú

Concentración de bacterias en la superficie de las plantas en ambiente natural eutrofizado

RIVERA, R.A.P. (1979) : Análisis bromatológico y microbiológico de “chullo” de totora.- Tesis Médico Veterinario y Zootecnista, UNA, Puno, Perú, 37 pp.

Valor nutritivo y seguridad higiénica en la alimentación humana

ROBINSON, S.R. (1966) : The Indians and the tules.- En : The Indians of Colta (ed. E. MAYNARD), 57 - 80, Cornell University, Ithaca N.Y.

Uso en la economía nativa

ROMERO, E. (1934) : Balseros del Titicaca.- Lima, Perú

Uso en la economía nativa, para producción de balsas etc.

SAENZ, M. (1982) : El lago Titicaca. Situación geográfica.- En : El lago Titicaca (ed. MUÑOZ REYES, J.).- Edición Juvenil de Biografías Breves 18, 27 - 53, Biblioteca Popular Boliviana de “Ultima Hora”, La Paz, Bolivia

Uso en la economía nativa, para producción artesanal y en la alimentación humana

SALM, H. (1980) : La absorción de cianuro de soluciones acuosas por *Scirpus tatora*.- Tesis Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia

Uso para tratamiento de aguas ; cianuro ; regulación de pH

SALM, H. (1983) : Plantas acuáticas superiores para la purificación de aguas contaminadas.- Revista Boliviana de Química 4 (1), 16 – 21

Purificación de aguas, contaminación con metales pesados

SALM, H. & C. ARZE (1982) : *Schoenoplectus tatora* (totora) para la purificación de aguas contaminadas.- Ecología en Bolivia 2, 41 - 48

Uso para tratamiento de aguas ; contaminación con metales pesados (Mn/Cu/Zn/Pb) ; ensayos en laboratorio en sistema estático

SEIDEL, K. (1955) : Die Flechtbinse bei aussereuropaeischen Voelkern.- En : Die Flechtbinse, 138 - 171, Edit. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Alemania

Distribución geográfica ; transplante ; cosecha ; uso para la producción debalsas etc. ; forraje ; alimentación humana

SEIDEL, K. (1980) : Kurzer Bericht ueber eine naturwissenschaftliche Exkursion nach Bolivien, La Paz und den Titicacasee zur Erkundung der Vorkommen und der Verwertung von *Schoenoplectus lacustris* (Totora) und anderen Wasserpflanzen, vom 18. Oktober bis 9. November 1978.- Informe inédito, 14 pp., Krefeld, Alemania

Distribución ; cosecha ; transplante ; uso en la economía nativa ; discusión de usos adicionales a los tradicionales

SOEHNER, S. (1989): Forschungsarbeit über naturnahe Abwasserreinigung.- Informe inédito, Institut für Pflanzenökologie, Universität Giessen, Alemania

Uso de la totora para la descontaminación de aguas domésticas y mineras

SOEHNER, S. (1991): Resultados preliminares sobre la evaluación de macrófitas bolivianas para la purificación de aguas.- Informe inédito, Frankfurt, Alemania

Uso de la totora para la descontaminación de aguas domésticas y mineras

SOTO, F. (sin año): Evaluación de plantas de tratamiento de aguas servidas en Bolivia.- Informe inédito, La Paz, Bolivia

Uso de la totora para la descontaminación de aguas domésticas en lagunas de estabilización

SMYTH, J.A. (1966) : Report of lake Titicaca resources study.- USAID Mission, 21 pp., Lima Perú

Uso tradicional

SOLC, V. (1969) : Los Aymaras de las islas del Titicaca.- Serie : Antropología Social 12, Instituto Indigenista Interamericano, México

Uso en la economía nativa

SOTO, F. (sin año) : Evaluación de plantas de tratamiento de aguas servidas en Bolivia.- Informe inédito

Influencia de la totora en el proceso de purificación ; uso de la totora en lagunas de pulimento ; lagunas de El Kenko, Ciudad El Alto

SOUKUP, J. (1959) : Biota No. 18, Vol II

SOUKUP, J. (1964) : Biota No. 38, Vol. V

Instituto Salesiano "Pablo Albera, Lima, Perú

Uso en la economía nativa, alimentación humana, construcción de balsas

STAB, S. (1990) : Vegetation und Hydrochemie tropischer Hochgebirgslagunen in der Cordillera Real, Bolivien.- Tesis de Diploma, Universidad de Muenster, 99 pp.

Distribución en lagunas altoandinas

TAPIA, M. (1970) : Alimentación del cobaya (*Cavia porcellus*) con llacho (*Elodea sp.*) y totora (*Scyrpus sp.*).- Tesis UNA, Lima, Perú

Uso como forraje

TAPIA, M. (1970 -71) : Pastos naturales del altiplano de Perú y Bolivia.- Programa de Investigación Zona Andina (IICA), Publicación Miscelánea No. 85, Quito, Ecuador

Uso como forraje

TAPIA, M. (1971) : Contribución al estudio de la producción de ensilaje de avena en comparación con ensilaje de totora en el altiplano.- Revista de la UNTA 3 (4), 158 - 165, Puno, Perú

Uso como forraje, ensilaje

TAUCER, E. (1990) : Transplante y desarrollo posterior de helófitos en lagunas con contaminación minera.- Informe inédito, La Paz, Bolivia

Métodos de transplante, uso para tratamiento de aguas mineras

TAUCER, E. (1991) : Planta de purificación de aguas con macrófitas.- Revista de Ingeniería Sanitaria (ABIS) 8, La Paz, Bolivia

Uso para purificación de aguas

TAUCER, E. (1993) : Biología, trasplante y desarrollo de cuatro helófitos en la zona andina de La Paz. Su uso en sistemas de purificación de aguas.- Tesis de Lic. en Biología, UMSA, La Paz, Bolivia

Métodos de trasplante, construcción de planta de purificación, uso en la purificación de aguas domésticas

TICONA, J. (1980) : Determinación del cariotipo de la totora en el lago Titicaca.- Tesis UNA, Puno, Perú, 41 pp.

Genética

TOWLE, M.A. (1961) : The ethnobotany of pre-Columbian Perú.- Viking Fund Publications in Anthropology 30

Uso en la economía nativa

TRIGOS, C. I. (1997): Presencia de bacterias enteropatógenas en aguas residuales de la planta de tratamiento de Chejoña.- Tesis Biología UNA, Puno, Perú

Uso en el tratamiento de aguas domésticas, reducción de microorganismos patógenos

TROLL, C. (1927) : Vom Titicacasee zum Poopósee und zum Salar von Coipasa.- Petermanns Geogr. Mitteilungen 73, 218 – 222

Uso tradicional

TUERO, E. (1970) : Alimentación del cobaya (*Cavia porcellus*) con llacho (*Elodea sp.*) y totora (*Scyrpus sp.*).- Tesis UNA, Puno, Perú

Uso como forraje

TUR, N.M. & J.B. ROSSI (1976) : Autecología de *Scirpus californicus*. I. Crecimiento y desarrollo de la parte aérea.- Bol. Soc. Argent. Bot. 7 (1/2), 73 - 82

Autecología

TUTIN, T.G. (1940) : The macrophytic vegetation of the lake Titicaca.- The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937, No. 10, Trans. Linn. Soc. Lond. Ser. 3, 1 (2), 161 - 189

Distribución en el lago Titicaca

VARGAS, G. (2000): Evaluación técnica de la eficiencia de tratamiento de las lagunas de aguas servidas Puchuckollo bajo (Serie II).- Tesis Ingeniería Civil UMSA, La Paz, Bolivia

Uso para purificación de aguas domésticas en una laguna de estabilización

VARGAS, I. (1989): Posibilidad del uso de plantas acuáticas en el tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Puno.- Tesis Biología UNA, Puno, Peru

Descontaminación de aguas urbanas en ambiente natural en la ribera de la bahía de Puno

WEBERBAUER, A. (1943) : El mundo vegetal de los Andes.- Estación Experimental de la Molina, Min. Agric. 146 - 325, Lima, Perú

Construcción de balsas etc.

WIDMER, C. (1973) : La investigación de la productividad primaria del lago Titicaca.- Reporte de la UNTA No. 1, Puno, Perú, 8 pp.

Biomasa y producción en ambiente natural

YACOVLEFF, E. & F. HERRERA (1934 - 35) : El mundo vegetal de los antiguos peruanos.- Revista del Museo Nacional 3 (3) y 4 (1)

Uso en la economía nativa

ZEBALLOS, L. (1975) : Artesanía boliviana.- Instituto Boliviano de Cultura, Edit. Don Bosco, 16 - 23, La Paz, Bolivia

Uso en la economía nativa, producción de artesanía

## 1.2 Bibliografía sobre totora en Bolivia

### 1.2.1 Resumen bibliográfico

ALVAREZ, A. (1987) : Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de aguas por *Schoenoplectus tatora* .- Tesis de Lic. de Química, UMSA, La Paz, Bolivia, 148 pp.

ANONIMO (1984) : Die Bedrohung der Umwelt durch Minenabfalle in hochandinen Regionen Boliviens.- SAGO 49, Oktober 1984

ARZE, C. (1983) : *Schoenoplectus tatora* (totora) como agente descontaminante de aguas.- Informe inédito UNESCO, La Paz, Bolivia, 74 pp.

ARZE, C. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a contaminaciones inorgánicas.- Informe inédito, UNESCO, La Paz, Bolivia, 87 pp.

ARZE, C. & ALVAREZ, A. (1987) : Diseño de una planta para la purificación de aguas mediante *Schoenoplectus tatora*.- Informe inédito, La Paz, Bolivia, 148 pp.

ARZE, C. & ALVAREZ, A. (1990) : Totora como descontaminante de aguas en movimiento.- Revista Boliviana de Química 9 (1), 3 - 8

ARZE, C., P. CRESPO, M. DIAZ, M. CALLICONDE & S. UZQUEDA (1989) : Descontaminación de aguas con base en la *Schoenoplectus tatora* (totora).- Ingeniería Hidráulica en México, mayo a agosto

CARDENAS, M. (1989) : Manual de plantas económicas de Bolivia.- Enciclopedia Boliviana, Edit. Los Amigos del Libro, 2da edición, La Paz, Bolivia, 333 pp.

CARVAJAL, H.E. (1987) : La totora como descontaminante de aguas.- II. Feria Científica Juvenil del Convenio Andrés Bello, Tacna, Peru, 88 pp.

COKER, R.E. (1911) : Lake Titicaca. "The most remarkable lake of the world".- Internat. Rev. Ges. Hydrobiol. 4, 175 - 182

COLLOT, D. (1980) : Les macrophytes de quelques lacs andins (Lac Titicaca, Lac Poopó, Lacs des vallées d'Hichu Kkota et d'Ovejuyo).- Travaux réalisés au cours du VSNA en Bolivie, Convenio UMSA - ORSTOM, 115 pp., La Paz, Bolivia

- COLLOT, D. (1982) : Vegetación acuática del lago Poopó.- Ecología en Bolivia 1, 47 - 55
- COLLOT, D., F. KORIYAMA & E. GARCIA (1979) : Las plantas acuáticas del lago Titicaca (pequeño).- I. Congreso Boliviano de Biología 1, 6 - 7
- COLLOT, D., F. KORIYAMA & E. GARCIA (1983) : Repartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca.- Rev. Hydrobiol. Trop. 16 (3), 241 - 261
- DEL GRANADO, J.T. (1931) : Plantas bolivianas.- Edit. Arnó Hnos, 284 pp., La Paz, Bolivia
- DE LUCCA, M. & J. ZALLES (1992) : Flora medicinal boliviana.- Enciclopedia Boliviana, Edit. Los Amigos del Libro, La Paz, Bolivia, 498 pp.
- DIAZ DEL CASTILLO, M. (1985) : Utilización de *Scirpus tatora* en la descontaminación de agua.- Tesis de Lic. en Farmacia, UMSA, La Paz, Bolivia, 74 pp.
- ESPINOZA, G. (1994) : Absorción de iones cobre, plomo, y zinc por medio la *Schoenoplectus tatora* (totora) en medio dinámico.- Tesis Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia
- ESTIVARIZ del CASTILLO, F.D. (1995) : Determinación de la combinación óptima del llachu (*Elodea potamogeton*) y totora (*Schoenoplectus tatora*) para la producción lechera.- Tesis Agronomía, UMSA, La Paz, Bolivia
- FOSTER, R.C. (1965) : Studies on the flora of Bolivia. III Cyperaceae, Part I.- Rhodora 67 (770), 97 - 138
- FRANCO, A.M. (1981) : Evaluación bromatológica de las especies forrajeras del lago Titicaca.- Tesis UMSA, La Paz, Bolivia
- FRANKEN, M. (1988) : Experimentos con la totora como agente de purificación de aguas.-Taller sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales (eds. KISTRITZ, NORTHCOTE, RIVERA), 19 - 36, Puno, Perú
- FRANKEN, M. (1990) : Macrófitas de los cuerpos de agua del valle de La Paz.- En : Guia de fauna, flora y ecología de los alrededores de La Paz.- Instituto de Ecología, UMSA, La Paz, Bolivia
- FRANKEN, M. (1990) : Purificación de aguas mediante plantas acuáticas.- Revista de Ingeniería Sanitaria (ABIS), 5 (6), 3 - 8
- GEHLER, E. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a hierro y plata.- Tesis de Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia, 46 pp.
- GEHLER, E. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a hierro y plata en soluciones acuosas.- Revista Boliviana de Química 5 (1), 21 - 31
- GUERRA, M.A. (2000) : Efecto descontaminante de la totora en las lagunas de estabilización de Puchuckollo Bajo.- Tesis Ingeniería Civil, UMSA, La Paz, Bolivia
- HEISER, C.B. (1974) : Totoras, Taxonomy and Thor.- Plant Science Bulletin 20 (2), 22 - 26
- HEISER, C.B. (1979) : The totora (*Scirpus californicus*) in Ecuador and Perú.- Economic Botany 32, 222 - 236
- MAMANI, M.G. (1971) : Botánica de la totora.- La Paz, Bolivia
- MANRIQUE, J. & P. RIVERA (1982) : Análisis bromatológico del “chullo” de la totora.- Problemática Sur-Andina 2, 91 - 100

- PEREZ, M. ( ) : Análisis bromatológico, bacteriológico del chullo de la totora.- Tesis de Lic. en Bioquímica, UMSA, La Paz, Bolivia
- SAENZ, M. (1982) : El lago Titicaca. Situación geográfica.- En : El lago Titicaca (ed. MUÑOZ REYES, J.).- Edición Juvenil de Biografías Breves 18, 27 - 53, Biblioteca Popular Boliviana de "Última Hora", La Paz, Bolivia
- SALM, H. (1980) : La absorción de cianuro de soluciones acuosas por *Scirpus tatora*.- Tesis Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia
- SALM, H. (1983) : Plantas acuáticas superiores para la purificación de aguas contaminadas.- Revista Boliviana de Química 4 (1), 16 - 21
- SALM, H. & C. ARZE (1982) : *Schoenoplectus tatora* (totora) para la purificación de aguas contaminadas.- Ecología en Bolivia 2, 41 - 48
- SEIDEL, K. (1980) : Kurzer Bericht ueber eine naturwissenschaftliche Exkursion nach Bolivien, La Paz und den Titicacasee zur Erkundung der Vorkommen und der Verwertung von *Schoenoplectus lacustris* (Totora) und anderen Wasserpflanzen, vom 18. Oktober bis 9. November 1978.- Informe inédito, 14 pp., Krefeld, Alemania
- SOEHNER, S. (1989) : Forschungsarbeit ueber naturnahe Abwasserreinigung.- Informe inédito, Institut fuer Pflanzenoekologie, Universitaet Giessen, Alemania
- SOEHNER, S. (1991) : Resultados preliminares sobre la evaluación de macrófitas bolivianas para la purificación de aguas.- Informe inédito, Frankfurt, Alemania
- SOTO, F. (sin año) : Evaluación de plantas de tratamiento de aguas servidas en Bolivia.- Informe inédito, La Paz, Bolivia
- TAUCER, E. (1990) : Transplante y desarrollo posterior de helófitos en lagunas con contaminación minera.- Informe inédito, La Paz, Bolivia
- TAUCER, E. (1991) : Planta de purificación de aguas con macrófitas.- Revista de Ingeniería Sanitaria (ABIS) 8, La Paz, Bolivia
- TAUCER, E. (1993) : Biología, transplante y desarrollo de cuatro helófitos en la zona andina de La Paz. Su uso en sistemas de purificación de aguas.- Tesis de Lic. en Biología, UMSA, La Paz, Bolivia
- TUR, N.M. & J.B. ROSSI (1976) : Autecología de *Scirpus californicus*. I. Crecimiento y desarrollo de la parte aérea.- Bol. Soc. Argent. Bot. 7 (1/2), 73 - 82
- TUTIN, T.G. (1940) : The macrophytic vegetation of the lake Titicaca.- The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937, No. 10, Trans. Linn. Soc. Lond. Ser. 3, 1 (2), 161 - 189
- VARGAS, G. (2000) : Evaluación técnica de la eficiencia de tratamiento de las lagunas de aguas servidas Puchuckollo Bajo (Serie II).- Tesis Ingeniería Civil UMSA, La Paz, Bolivia
- ZEBALLOS, L. (1975) : Artesanía boliviana.- Instituto Boliviano de Cultura, Edit. Don Bosco, 16 - 23, La Paz, Bolivia

## 1.2.2 Revisión detallada de los estudios

### 1.2.2.1. Introducción

Desde la conquista de los Españoles los historiadores y científicos mencionan la totora en sus estudios, principalmente su uso en la economía nativa, para la construcción de balsas, techos, como forraje y alimento humano.

Respecto al **uso de la totora** se reportan muchos diferentes usos tradicionales : la más importante es la construcción de balsas, que ha bajado notablemente en nuestros días, también la construcción de techos y su uso para muebles está rebajando. Por otro lado se la usa para la producción de esteras y muchos diferentes artesanías. Se la usa como forraje para los animales domésticos, en forma fresca, deshidratada y en menor frecuencia en ensilaje. La parte blanca subacuática, el chullo, se consume como alimento humano. También la planta es conocida como planta medicinal, como medio astringente y para la rápida cicatrización de heridas.

En la **sistemática** botánica la totora pertenece a las ciperáceas. Durante el tiempo adquirió varios nombres científicos, *Scirpus tatora* Kunth, *Scirpus californicus* (C.A.Meyer) Steudel , *Scirpus californicus* Steud. var. *tatora* (Kunth), *Schoenoplectus tatora* y finalmente *Schoenoplectus californicus ssp. tatora* (Kunth) T. Koyama.

Los estudios sobre la **eficiencia de la totora en la descontaminación de aguas** en Bolivia comienzan en el año 1978 con la visita de la Dra. Kaethe Seidel del Instituto Max Planck en Krefeld Huelsberg, Alemania. La Dra. Seidel viene trabajando en el tratamiento de aguas servidas mediante macrófitas y entre ellos especialmente *Schoenoplectus lacustris*, desde los años cincuenta en Alemania. Ella implantó la idea de utilizar la totora para este fin por el parentesco cercano de la totora del lago Titicaca con *Schoenoplectus lacustris*.

### 1.2.2.2. Revisión detallada de los estudios sobre la totora como descontaminante de aguas

**Nota:** Algunos trabajos en el medio boliviano que citan la totora como agente descontaminante de las aguas servidas, no se refieren a *Schoenoplectus californicus ssp. tatora* sino a *Typha*, que no solo pertenece a otro género sino a otra familia en la sistemática botánica. Estos son los estudios realizados en Santa Cruz en las lagunas de estabilización de Viru-Viru y del parque industrial en Montero. En la revisión siguiente no se toman en cuenta.

ALVAREZ, A. (1987) : Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de aguas por *Schoenoplectus tatora* .- Tesis de Lic. de Química, UMSA, La Paz, Bolivia, 148 pp.

**Ubicación del estudio :** Laboratorio del Instituto de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Andrés, Cota-Cota, Calle 28, La Paz

**Período del estudio :** ??

**Objetivo del estudio :** Probar un sistema dinámico experimental con aguas fluyentes para la evaluación de la absorción de metales pesados por la totora.

**Metodología :** Se diseño un sistema dinámico pequeño de laboratorio.

Se plantó la planta experimental con totora.

Se aplicaron diferentes soluciones de agua con metales pasados dejándolas pasar por el sistema.

Se analizó la disminución de metales pesados en el agua después de su paso por el sistema.

**Resultados :** Se comprobó la retención de los metales por el sistema.

ARZE, C. (1983) : *Schoenoplectus tatora* (totora) como agente descontaminante de aguas.- Informe inédito UNESCO, La Paz, Bolivia, 74 pp.

**Ubicación del estudio :** Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27, La Paz

**Período de estudio:** ¿?



**Objetivos del estudio:** Estudio del comportamiento de la totora frente a diferentes metales y su capacidad de absorción de estos metales, en diferentes medios de cultivo.

**Metodología :** Tratamiento de soluciones acuosas (agua del lago Titicaca, agua potable de La Paz, agua destilada, solución nutritiva) con metales (Mn, Cu, Zn, Pb) en diferentes concentraciones, en recipientes de polietileno con plantas de totora.

**Resultados :** La totora se desarrolla muy bien en cultivos hidropónicos, es decir, en medios acuosos sin tierra u otro sólido. Puede sobrevivir también varias semanas en agua destilada.

En todos los ensayos había absorción de metales por las plantas de totora.

La absorción de los metales es más lenta en soluciones nutritivas.

Manganeso y cinc son eliminados con menor rapidez que cobre y plomo.

ARZE, C. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a contaminaciones inorgánicas.- Informe inédito, UNESCO, La Paz, Bolivia, 87 pp.

**Ubicación del estudio:** Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27, La Paz

**Período de estudio:** ¿?

**Objetivos del estudio:** Estudio del comportamiento de la totora frente a diferentes metales y su capacidad de absorción de estos metales, en diferentes medios de cultivo.

**Metodología :** Tratamiento de soluciones acuosas (agua del lago Titicaca, agua potable de La Paz, agua destilada, solución nutritiva) con metales (Mn, Cu, Zn, Pb) en diferentes concentraciones, en recipientes de polietileno con plantas de totora.

**Resultados :** La totora se desarrolla muy bien en cultivos hidropónicos, es decir, en medios acuosos sin tierra u otro sólido. Puede sobrevivir también varias semanas en agua destilada.

En todos los ensayos había absorción de metales por las plantas de totora.

La absorción de los metales es más lenta en soluciones nutritivas.

Manganeso y cinc son eliminados con menor rapidez que cobre y plomo.

ARZE, C. & ALVAREZ, A. (1987) : Diseño de una planta para la purificación de aguas mediante *Schoenoplectus tatora*.- Informe inédito, La Paz, Bolivia, 148 pp.

**Ubicación del estudio:** Laboratorio del Instituto de Hidráulica, Cota-Cota, Calle 28, La Paz

**Período de estudio:** ¿?

**Objetivos del estudio:** Probar un sistema dinámico de purificación plantado con totora para evaluar su eficiencia de absorción de metales en agua corriente.

**Metodología:** Se diseñó un sistema dinámico pequeño de laboratorio.

Se plantó la planta experimental con totora.

Se aplicaron diferentes soluciones de agua con metales pasados dejándolas pasar por el sistema.

Se analizó la disminución de metales pesados en el agua después de su paso por el sistema.

**Resultados :** Se comprobó la retención de los metales por el sistema.

ARZE, C. & ALVAREZ, A. (1990) : Totora como descontaminante de aguas en movimiento.- Revista Boliviana de Química 9 (1), 3 - 8

**Ubicación del estudio:** Laboratorio del Instituto de Hidráulica, Cota-Cota, Calle 28, La Paz

**Período de estudio:**

**Objetivos del estudio:** Disminuir la concentración de metales pesados (Fe, Pb) en solución de corrientes de aguas polutas mediante totora, en un lecho de grava.

**Metodología:** Plantación de totora en los tanques llenado con un substrato de grava de dos a cinco centímetros de granulometría. Uso de soluciones de metales semejantes a las aguas de la laguna Milluni. Tiempo de experimentación: dos meses.

**Resultados:** Eliminación sustancial de los metales por el sistema de totora y grava.

Incremento del pH ácido hacia neutro durante el experimento.

ARZE, C., P. CRESPO, M. DIAZ, M. CALLICONDE & S. UZQUEDA (1989) : Descontaminación de aguas con base en la *Schoenoplectus tatora* (totora).- Ingeniería Hidráulica en México, mayo a agosto

**Ubicación del estudio :**

**Período de estudio :**

**Objetivos del estudio :** Verificar la eficiencia de la totora en la absorción de metales de soluciones acuosas en medio estático y dinámico.

**Metodología :** Aplicar diferentes soluciones de metales pesados a plantas de totora en aguas estáticas y aguas en movimiento y analizar la eliminación de metales de las soluciones y su acumulación en los diferentes partes de la planta.

**Resultados :** Se verificó que la totora absorbe metales y los deposita en todos los tejidos. La mayor concentración de plomo, zinc y cobre se encontró en las raíces, mientras el manganeso se encontró en mayor concentración en los tallos.

CARVAJAL, H.E. (1987) : La totora como descontaminante de aguas.- II. Feria Científica Juvenil del Convenio Andrés Bello, Tacna, Perú, 88 pp.

**Ubicación del estudio :** Laboratorio en La Paz

**Período de estudio :** 1986

**Objetivos del estudio :** Determinar la capacidad de la totora de absorber diferentes metales.

Determinar la distribución de los contaminantes en las diferentes partes de la planta.

**Metodología :** Tiempo de ensayo 5 meses. Se trabajó en medio hidropónico, sistema estático, plantado con totora, con cuatro metales (Fe, Cu, Pb, Zn) en diferentes concentraciones y diferentes medios de cultivo, solución nutritiva, agua del lago Titicaca, agua potable de La Paz, agua destilada.

**Resultados :** La acción descontaminante de la totora era buena en todos los ensayos.

La planta no devuelve los iones contaminantes al medio.

DIAZ DEL CASTILLO, M. (1985) : Utilización de *Scirpus tatora* en la descontaminación de agua.- Tesis Lic. en Farmacia, UMSA, La Paz, Bolivia, 74 pp.

**Ubicación del estudio :** Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27, La Paz

**Período de estudio :** ??

**Objetivos del estudio :** Comprobar la absorción de metales por la totora y verificar su asimilación en los diferentes tejidos de la planta.

**Metodología :** Tratamiento de soluciones acuosas de metales (Pb, Cu, Mn, Zn) de diferentes concentraciones en cultivos hidropónicos, sistema estático, plantados con totora. Análisis de los metales en los diferentes tejidos de la planta (tallos, rizomas, raíces). El tiempo del experimento es de 48 días.

**Resultados :** La afinidad de la planta por cada uno de los metales, en forma decreciente es : Pb, Cu, Zn, Mn.

Una vez que el contaminante ha sido absorbido por la planta, no es devuelto a la solución durante el tiempo de observación.

Mientras que la planta absorbe los metales, libera iones alcalinos y alcalino-térreos (K, Na, Ca, Mg).

La absorción de los elementos utilizados es mayor en las raíces.

ESPINOZA, G. (1994) : Absorción de iones cobre, plomo, y zinc por medio la *Schoenoplectus tatora* (totora) en medio dinámico.- Tesis Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia

**Ubicación del estudio :** Laboratorio del Instituto de Hidráulica, Cota-Cota, Calle 28

**Período de estudio :**

**Objetivos del estudio :** Estudiar la eliminación de metales en soluciones acuosas en un sistema dinámico (ver ALVAREZ 1987), por un conjunto de substrato y plantas de totora.

**Metodología :** Plantar la totora en el sistema dinámico en diferentes substratos, dejar fluir diferentes soluciones de metales por el sistema, y analizar finalmente las aguas efluentes, las plantas de totora y el substrato para definir la suerte de los metales en el sistema.

**Resultados** : Los metales aplicados se eliminaron por intercambio con sodio y potasio en el suelo en los primeros diez centímetros del sistema. Así que no llegaron a ser absorbidos por la totora.

FRANKEN, M. (1988) : Experimentos con la totora como agente de purificación de aguas.-Taller sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales (eds). KISTRITZ, NORTHCOTE, RIVERA), 19 - 36, Puno, Perú

**Ubicación del estudio** : Revisión bibliográfica

**Período de estudio** : 1987 - 1988

**Objetivos del estudio** : Recopilar los conocimientos adquiridos con la totora como agente descontaminante de aguas, desarrollados en la ciudad de La Paz.

**Metodología** : Revisión de los trabajos existentes en forma de publicaciones e informes inéditos.

**Resultados** : Los trabajos realizados son escasos y se trata de ensayos de laboratorio en medio estático y en medio dinámico. La mayoría de los trabajos se refiere a la capacidad de la totora de absorber metales.

FRANKEN, M. (1990) : Purificación de aguas mediante plantas acuáticas.- Revista de Ingeniería Sanitaria (ABIS), 5 (6), 3 - 8

**Ubicación del estudio** : Revisión bibliográfica y trabajos inconclusos en el Campus Universitario, Cota-Cota, Calle 27 y una casa privada en Sopocachi, la Paz

**Período de estudio** : 1987 - 1990

**Objetivos del estudio** : Recopilación de toda información accesible sobre la totora como planta descontaminante, en el ámbito boliviano.

**Metodología** : Revisión bibliográfica accesible en forma de publicaciones e informes inéditos, y recopilación de información preliminar de los estudios en desarrollo.

**Resultados** : Además de los resultados plasmados en publicaciones e informes inéditos, que se encuentran en esta revisión bibliográfica bajo los autores originales, se pueden adicionar los resultados siguientes :

Se comprobó la acción de la totora sobre colis fecales en recipientes con aguas provenientes del río Choqueyapu, altura de la Avenida del Ejército. Estos recipientes se mantenían en un lugar soleado, con y sin plantas de totora. En los recipientes sin plantas de totora se mantuvieron las bacterias en su cantidad inicial, mientras en los recipientes de totora disminuyeron hasta cero.

En cascadas de recipientes plásticos con substrato y totora se comprobó la purificación de aguas del río Choqueyapu (altura Avenida del Ejército) en varios parámetros.

También en una pequeña planta piloto en el Campus Universitario de Cota-Cota, que recibía las aguas servidas domésticas de una vivienda, se podía comprobar el efecto descontaminante de la totora.

GEHLER, E. (1984) : Comportamiento de *Schoenoplectus totora* (totora) frente a hierro y plata.- Tesis de Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia, 46 pp.

**Ubicación del estudio** : Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27

**Período de estudio** : ??

**Objetivos del estudio** : Estudiar la remoción de hierro y plata de soluciones acuosas por la totora en un sistema estático.

Determinar la distribución de hierro y plata en las diferentes partes de la planta (raíz, rizoma, tallos).

**Metodología** : Acondicionamiento de las plantas en el laboratorio.

Tratamiento de soluciones acuosas de hierro y plata de diferentes concentraciones en recipientes con plantas de totora.

División de las plantas en sus diferentes partes (raíz, rizoma, tallos) para posterior análisis de contenido de los metales.

Análisis de sedimentos para análisis de concentración de plata.

**Resultados** : La remoción fue exitosa en el caso del hierro y no así en el de la plata.

La planta absorbe iones de plata en cantidades muy pequeños. La plata precipita predominantemente como cloruro.

La mayor parte de hierro se acumula en las raíces y los rizomas. La mayor parte de la plata se acumula en las raíces.

La presencia de plata y hierro en la solución acelera la eliminación de ambos iones, por precipitación (plata) y absorción (hierro).

GEHLER, E. (1984): Comportamiento de *Schoenoplectus tatora* (totora) frente a hierro y plata en soluciones acuosas.- Revista Boliviana de Química 5 (1), 21 - 31

**Ubicación del estudio** : Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27

**Período de estudio** : ? ?

**Objetivos del estudio** : Estudiar la remoción de hierro y plata de soluciones acuosas por la totora en un sistema estático.

Determinar la distribución de hierro y plata en las diferentes partes de la planta (raíz, rizoma, tallos).

**Metodología** : Acondicionamiento de las plantas en el laboratorio.

Tratamiento de soluciones acuosas de hierro y plata de diferentes concentraciones en recipientes con plantas de totora.

División de las plantas en sus diferentes partes (raíz, rizoma, tallos) para posterior análisis de contenido de los metales.

Análisis de sedimentos para análisis de concentración de plata.

**Resultados** : La remoción fue exitosa en el caso del hierro y no así en el de la plata.

La planta absorbe iones de plata en cantidades muy pequeños. La plata precipita predominantemente como cloruro.

La mayor parte de hierro se acumula en las raíces y los rizomas. La mayor parte de la plata se acumula en las raíces.

La presencia de plata y hierro en la solución acelera la eliminación de ambos iones, por precipitación (plata) y absorción (hierro).

GUERRA, M.A. (2000) : Efecto descontaminante de la totora en las lagunas de estabilización de Puchuckollo Bajo.- Tesis Ingeniería Civil, UMSA, La Paz, Bolivia

**Ubicación del estudio** : Laguna de maduración N° 5 de la Serie II, de las lagunas de estabilización de Puchuckollo, ciudad de El Alto

**Período de estudio** : junio hasta septiembre de 1999

**Objetivos del estudio** : Análisis de la incidencia de la totora como agente descontaminante de las aguas servidas que se descargan en las lagunas de estabilización de Puchuckollo Bajo.

Observación y diagnóstico del desarrollo de las helófitas (totora) bajo condiciones actuales de servicio de la planta de tratamiento.

Análisis de parámetros físico-químicos, microbiológicos, de metales pesados y parasitológicos para cuantificar el grado de remoción adicional como consecuencia del uso de totoras.

**Metodología** : Análisis del afluente y efluente de la laguna N° 5.

Parámetros analizados : Temperatura, pH, conductividad, Oxígeno disuelto, Turbiedad, Sólidos (varios parámetros), Fósforo (varios parámetros), Nitrógeno (varios parámetros), Sulfatos, Sulfuros, DBO, DQO, Coliformes fecales, varios parásitos, plomo, cadmio, hierro, manganeso.

**Resultados** :

La cobertura de la laguna con totora es de 20 %.

La eficiencia de remoción de la DBO varió con el caudal de entrada :

68 - 93 % con un caudal de entrada de 13 l/s

28 - 78 % con un caudal de entrada de 25 l/s

máximo 31 % con un caudal de entrada de 50 l/s.

En un 50 % de las muestras tomadas la DQO se incrementó en el efluente. Las explicaciones dadas por el autor del trabajo no parecen válidas.

No se logró una eficiencia adecuada en la remoción de N y P.

Siempre había formación de sulfuros en el sistema.

Remoción de Colis Fecales de  $10^5$  a  $10^4$ , es decir la remoción es de 10 %.

Parece que la laguna está sobrecargada.

SALM, H. (1980) : La absorción de cianuro de soluciones acuosas por *Scirpus tatora*.- Tesis Lic. en Química, UMSA, La Paz, Bolivia

**Ubicación del estudio** : Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27, La Paz

**Período de estudio**

**Objetivos del estudio** : Comprobar la capacidad de la totora de eliminar cianuros de soluciones acuosas, en cultivos hidropónicos, sistema estático.

**Metodología** : Tratamiento de soluciones acuosas de cianuro de diferente concentración en recipientes con plantas de totora.

Se usan como soluciones base : solución nutritiva, agua del lago Titicaca, agua potable de La Paz, agua destilada.

**Resultados** : La totora es una planta muy resistente. Aguanta valores de pH de hasta 11.

Tiene la capacidad de neutralizar soluciones básicas hacia un pH de 7.

Se comprobó que la totora es capaz de eliminar cianuro de soluciones alcalinas.

SALM, H. (1983) : Plantas acuáticas superiores para la purificación de aguas contaminadas.- Revista Boliviana de Química 4 (1), 16 - 21

**Ubicación del estudio**: Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27, La Paz

**Período de estudio**: ¿?

**Objetivos del estudio**: Obtener conocimientos del estado actual científico sobre la utilización de *Schoenoplectus* en la descontaminación de aguas.

**Metodología**: Revisión bibliográfica

**Resultados**: Principalmente en Alemania y también en la NASA existen experiencias exitosas que comprueban la eficacia de esta planta en la purificación de aguas.

También los primeros experimentos de laboratorio realizados en La Paz con *Schoenoplectus tatora* (totora) son prometedores.

SALM, H. & C. ARZE (1982) : *Schoenoplectus tatora* (totora) para la purificación de aguas contaminadas.- Ecología en Bolivia 2, 41 - 48

**Ubicación del estudio** : Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota, Calle 27, La Paz

**Período de estudio**

**Objetivos del estudio** : Estudio del comportamiento de la totora frente a diferentes metales y su capacidad de absorción de estos metales, en diferentes medios de cultivo.

**Metodología** : Tratamiento de soluciones acuosas (agua del lago Titicaca, agua potable de La Paz, agua destilada, solución nutritiva) con metales (Mn, Cu, Zn, Pb) en diferentes concentraciones, en recipientes de polietileno con plantas de totora.

**Resultados** : La totora se desarrolla muy bien en cultivos hidropónicos, es decir, en medios acuosos sin tierra u otro sólido. Puede sobrevivir también varias semanas en agua destilada.

En todos los ensayos había absorción de metales por las plantas de totora.

La absorción de los metales es más lenta en soluciones nutritivas.

Manganeso y cinc son eliminados con menor rapidez que cobre y plomo.

SEIDEL, K. (1980) : Kurzer Bericht ueber eine naturwissenschaftliche Exkursion nach Bolivien, La Paz und den Titicacasee zur Erkundung der Vorkommen und der Verwertung von *Schoenoplectus lacustris* (Totora) und anderen Wasserpflanzen, vom 18. Oktober bis 9. November 1978.- Informe inédito, 14 pp., Krefeld, Alemania

**Ubicación del estudio** : Lago Titicaca y alrededores de la ciudad de La Paz, estancia Huancaroma cerca de Oruro

**Período de estudio** : Octubre y noviembre de 1978

**Objetivos del estudio** : Comparación de la totora con *Schoenoplectus lacustris*, revisión del uso de la totora y recomendación de usos adicionales.

**Metodología** : Visita de instituciones estatales bolivianas y de cooperación técnica, universidades y personas privadas, trabajos de campo, entrevistas a campesinos, muestreo de aguas y plantas

**Resultados** : La totora es una planta ideal por sus varias posibilidades de uso. Se debería crear una organización para el mantenimiento y uso de los totorales. Se recomienda la cría de patos con harina de totora y totora prensada. Además se recomienda la plantación de totora en el río Choqueyapu para mejorar su calidad de agua especialmente la disminución de microorganismos patógenos.

SOEHNER, S. (1989 y 1991) : Forschungsarbeit ueber naturnahe Abwasserreinigung.- Informes inéditos, Universitaet Giessen, y Frankfurt, Alemania

Se trata de dos informes realizados en diferente estado de avance y de dos diferentes plantas piloto.

**Ubicación del estudio 1 :** Campus Universitario, Cota-Cota, Calle 27, La Paz

**Período de estudio :** 1989

**Objetivos del estudio :** Probar un pequeño sistema piloto plantado con totora, en su capacidad de descontaminar aguas domésticas.

**Metodología :** Construir una pequeña planta piloto con dos estanques paralelos de 3 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de profundidad, plantados con totora. Para el sistema 1 se utilizó totora del lago Titicaca, para el sistema 2 totora de una laguna muy eutrofizada. Los primeros dos meses entró agua limpia a la planta, después se comenzó con la entrada de aguas servidas de una vivienda. Análisis de temperatura, pH, conductividad, color, oxígeno disuelto, PO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, Cl, dureza, DBO, DQO, coliformes.

**Resultados :** Las plantas del lago Titicaca se desarrollaron mas rápido, en altura y en densidad.

No se observa una reducción de los nutrientes en la planta piloto. Una causa puede ser la alta evapotranspiración de la totora.

**Ubicación del estudio 2 :** Casa en Sopocachi, La Paz

**Período de estudio :** 1987 - 1989

**Objetivos del estudio :** Comprobar la capacidad de la totora en la descontaminación de aguas contaminadas de diferente origen (Represa de Milluni, río Choqueyapu).

**Metodología :** Se construyó un sistema de cascadas mediante recipientes de plástico plantados con totora en substrato y unidos por mangueras, en una grada. El agua se estanca una semana en cada recipiente y se vacía artificialmente al recipiente siguiente mediante las mangueras.

Se realizan los mismos análisis como en el estudio 1.

**Resultados :** La planta se desarrollo bien en las aguas ácidas de Milluni y en las aguas del río Choqueyapu.

El pH se regula de un valor inicial de 3 hacia neutro en las aguas de Milluni. En estas aguas se observan lesiones del tallo en el transcurso de una semana.

Se reportan buenos resultados en la disminución de la carga orgánica y los coliformes en las aguas del río Choqueyapu.

SOTO, F. (sin año) : Evaluación de plantas de tratamiento de aguas servidas en Bolivia.- Informe inédito, La Paz, Bolivia

**Ubicación del estudio :** Lagunas de estabilización de SAMAPA en la ciudad de El Alto (lagunas de El Kenko y de Puchuckollo)

**Período de estudio :** 1988 a 1993

**Objetivos del estudio :** Evaluar la eficiencia de tratamiento en las lagunas de estabilización y evaluar la influencia de la totora en el proceso de tratamiento.

**Metodología :** Análisis de parámetros físico-químicos y microbiológicos en el afluente y el efluente de las lagunas de estabilización.

**Resultados :**

El Kenko (1991), 3 lagunas en serie :

Tiempo de retención > 20 días.

Eficiencia de remoción de la DBO de alrededor de 80 % en promedio.

Eficiencia en la remoción de Colis Fecales entre 99.1 y 99.99 % en promedio.

El Kenko (1993), 5 lagunas en serie :

Tiempo de retención > 20 días.

Eficiencia de remoción de la DBO en promedio 94 % (sin totora) y 90 % (con totora).

Eficiencia de remoción de Colis Fecales en promedio 99.855 % (sin totora) y 99.998 % (con totora).

Influencia de la totora en la eficiencia de la eliminación bacteriana, de parásitos y de nutrientes :

Se observó una mayor eliminación de bacterias y de parásitos. No se hicieron análisis de N y P por falta de laboratorio, solo de DBO. Se espera que la remoción de la DBO se aumente con el crecimiento de la totora que todavía mostraba baja densidad.

Puchuckollo : No se reportan datos exactos de remoción. Se indica que la eliminación de la DBO, Colis Fecales y Parásitos es muy pobre, debido a la sobrecarga de las lagunas.

TAUCER, E. (1990) : Transplante y desarrollo posterior de helófitos en lagunas con contaminación minera.- Informe inédito, La Paz, Bolivia

**Ubicación del estudio:** Milluni, Departamento de La Paz, Bolivia

**Período de estudio:** 1988 - 1990

**Objetivos del estudio:** Transplante en lagunas con contaminación minera y estudio fenológico de cuatro diferentes helófitos (*Schoenoplectus californicus* spp. *tatora*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis* y *Juncus* sp.)

Metodología: Análisis de parámetros físico-químicos de las aguas de las lagunas, observaciones mediciones de los helófitos.

**Resultados:** De los cuatro helófitos utilizados solamente la totora se adaptó al medio, mostrando un buen desarrollo con cambios en épocas de invierno. El tipo de sustrato del fondo de las lagunas es determinante para el transplante y el posterior desarrollo.

TAUCER, E. (1991) : Planta de purificación de aguas con macrófitas.- Revista de Ingeniería Sanitaria (ABIS) 8, La Paz, Bolivia

**Ubicación del estudio:** La Paz, Bolivia

**Período de estudio:** 1990 - 1991

**Objetivos del estudio:** Construir una planta de purificación de aguas servidas con flujo superficial utilizando cuatro diferentes helófitos (*Schoenoplectus californicus* spp. *tatora*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis* y *Juncus* sp.) y medir las variaciones en cuanto a la calidad de las aguas y el desarrollo de los helófitos.

**Metodología:** Análisis de parámetros físico-químicos, observaciones y mediciones fenológicas de los cuatro helófitos.

**Resultados:** De acuerdo a las condiciones climáticas el helófito que se adapta mejor al sistema es la totora. Existiendo un desarrollo parcial de *Typha* y *Phragmites*, mientras que *Juncus* necesita un mayor tiempo de acondicionamiento, pero logra mantener las aguas más clarificadas.

TAUCER, E. (1993) : Biología, transplante y desarrollo de cuatro helófitos en la zona andina de La Paz. Su uso en sistemas de purificación de aguas.- Tesis de Lic. en Biología, UMSA, La Paz, Bolivia

**Ubicación del estudio :** Campus Universitario, Cota-Cota, Calle 27, planta piloto consistente de 3 estanques de concreto

**Período de estudio :** 1988 - 1993

**Objetivos del estudio :** Estudiar los mejores métodos de implante de cuatro macrófitas de los alrededores de La Paz y su adaptación a las aguas contaminadas.

Capacidad de la totora de descontaminación de las aguas servidas provenientes de la zona residencial de Cota-Cota y de los institutos universitarios.

**Metodología :** Construcción de una planta piloto de tratamiento de 3 estanques paralelos de concreto con compuertas para la regulación del flujo. La profundidad de los estanques es de alrededor de 1 m.

Plantación de los estanques con cuatro diferentes macrófitas, en un sustrato de un espesor de alrededor de 10 cm.

Seguimiento del desarrollo de las macrófitas : crecimiento, densidad, floración.

Seguimiento de la calidad de las aguas servidas en el afluente y los efluentes por métodos físico-químicos y microbiológicos.

Cosecha de los tallos de la totora por lo menos una vez al año.

**Resultados :** Los mejores resultados de aclimatación a las aguas servidas mostró la totora.

Los resultados de eficiencia se refieren por eso solo a los estanques con totora.

Se verificó la capacidad de la totora de alcanzar niveles de tratamiento secundario y avanzado.

Se verificó la debilitación de los tallos de la totora por el gran contenido de nutrientes en las aguas servidas, recomendando varias cosechas de la biomasa verde por año para evitar el doblamiento de los tallos.

Cuando la lenteja de agua (*Lemna* sp.) invade los estanques, el sistema se vuelve anaeróbico y disminuye drásticamente su capacidad.

## 2. VISITAS A MICROLAGUNAS EN FUNCIONAMIENTO

### 2.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo de resumir las experiencias hechas con lagunas de con totora para el tratamiento de aguas en Bolivia. La única planta en funcionamiento en Bolivia que utiliza la totora (*Schoenoplectus tatora*) para la purificación de aguas servidas está integrado al sistema de lagunas de estabilización para el tratamiento de las aguas servidas de El Alto. El objetivo de esta laguna es experimental. Se quiere averiguar la utilidad de lagunas con totora para mejorar la eficiencia del sistema existente. En un experimento similar se investigará la posibilidad de utilizar lentejas de agua (*Lemna*) para los mismos fines.

### 2.2. Microlaguna de la Planta depuradora de aguas servidas de Puchuckollo

#### 2.2.1. Ubicación de la laguna

La planta de tratamiento está integrado la planta purificadora de Puchukollo, en la afueras de la ciudad de El Alto, departamento La Paz, provincia Murillo.



*Ilustración 1: Vista de la planta depuradora de Puchuckollo*



## **2.2.2. Descripción del sistema**

### **2.2.2.1. Sistema existente**

La planta depuradora de Puchuckollo tiene como función principal la depuración de las aguas servidas de la ciudad de El Alto, recolectadas mediante un sistema centralizado de colectores principales de gran diámetro y redes que reciben las descargas domiciliarias e industriales de todas las zonas que cuentan actualmente con el servicio de alcantarillado y de las que en el futuro se incorporen al sistema. La población conectada actualmente se estima a unos 400'000 habitantes, lo que corresponde a una cobertura de 64%.

Llega a la planta un caudal medio de unos 250 l/s, que aumenta hasta 1.800l/s en tiempos de lluvia. Pues aunque se trata de un sistema separador, existen conexiones de aguas pluviales que aumentan el caudal cuando llueve.

La planta consiste en 48 hectáreas de lagunas de estabilización dispuestas en dos series (II y III), formadas cada una por seis lagunas: la primera anaeróbica, los dos subsiguientes de tipo facultativo, dos de maduración y una final de pulimento. El sistema garantiza un tratamiento biológico con una retención de las aguas servidas de 28 días, lo que elimina casi en 99.9% la contaminación orgánica y bacteriológica. Las aguas purificadas se devuelven al punto de descarga en el Río Seco, cumpliendo así con las condiciones definidas en al Ley del Medio ambiente.

En la Ilustración 1 se puede observar el afluente y algunas lagunas del sistema de tratamiento.

### **2.2.2.2. Laguna de totora**

Según el diseño original de la planta Puchuckollo, se tenía previsto plantar totoras en las lagunas de maduración 4 y 5. Sin embargo, una evaluación externa recomendó de proveer solamente una laguna experimental con totora para monitorear los parámetros por confirmarse y aplicarlos recién en las futuras ampliaciones. Con este objetivo, se separó una laguna de 0,8

hectáreas de la quinta laguna de la serie II mediante un dique, en que se plantó la totora. La profundidad del agua en la laguna varía entre 0,7 m (zona del afluente) y 1.3 m (zona del efluente). La laguna de la totora puede ser separada del resto de las seis lagunas en serie para no sobrecargar a la totora con agua contaminada.

Antes de llegar a la laguna de totora el agua pasa por cuatro lagunas de estabilización con diferentes profundidades, en los cuales toman lugar procesos de purificación tanto aeróbicos como anaeróbicos. Por lo tanto de la laguna de totora se trata de un “pulido” de aguas servidas tratadas.

La totora está plantado sobre un sustrato de 20cm de tierra. El agua pasa por el sistema en un flujo subsuperficial. La laguna de totora se muestra en la Ilustración 2.

## **2.2.3. Funcionamiento de la laguna**

### **2.2.3.1. Estudios realizados**

El más reciente estudio realizado sobre el funcionamiento de esta laguna de totora es la tesis de GUERRA, M.A. (2000), (véase 1.2.1 Resumen bibliográfico, capítulo 0). Este estudio se realizó durante los meses julio a octubre del año 1999.



Ilustración 2: Vista de la laguna de totora en la planta depuradora de Puchuckollo

### 2.2.3.2. Caudales y cargas

El caudal de afluente a la laguna fue variado para investigar la capacidad de la laguna. Los caudales y cargas así como algunos parámetros de diseño que resultaron de estas cargas se muestran en la Tabla 1 por los tres diferente períodos de experimentación:

| Período  | Caudal (l/s) | Número de habitantes <sup>1</sup> | Superficie por habitante (m <sup>2</sup> /hab.) <sup>2</sup> | Carga (kg BOD <sub>5</sub> /ha/día) <sup>3</sup> | Período de retención (días) <sup>4</sup> |
|--|--------------|-----------------------------------|--|--|--|
| 1. Primeras 2 semanas de julio                               | 13           | 14.976                            | 0.65   | 147  | 8.42                                     |
| 2. 2º mitad de julio y agosto                                | 24-27        | 27.648-31.104                     | 0.31-0.35  | 272-307  | 4.0-4.5                                  |
| 3. Septiembre  | 50           | 57.600                            | 0.17   | 568  | 2.2                                      |
| Recomendado para sistemas con flujo superficial <sup>5</sup> |              |                                   | 2-5  | <112   | 5 - 15                                   |

Tabla 1: Caudales, cargas orgánicas y parámetros de diseño de la laguna con totora en la planta de tratamiento de Puchockollo

<sup>1</sup> Suponiendo que los aportes pluviales eran pequeños durante la época seca, el número de habitantes se puede calcular a partir de la dotación estimada de 75l/hab./día: caudal en l/s / (75 l/hab./día\*24 h/día\*3.600 s/h)

<sup>2</sup> La superficie de la laguna con totora es de 0.97 ha

<sup>3</sup> Esta carga se calcula a partir del caudal, de la carga orgánica media de 127.94 mg BOD<sub>5</sub>/l y la superficie de la laguna de 0.9 ha.

<sup>4</sup> El volumen de la laguna es de 9457 m<sup>3</sup>

<sup>5</sup> Resumen en VYMAZAL, J., H. BRIX., P.F. COOPER, R. HABERL, R. PERFLER y J. LABER: Removal mechanisms and types of constructed wetlands

La Tabla 1 demuestra que la carga de materia orgánica de la laguna estuvo por encima de las recomendaciones de diseño que se encuentran en la literatura durante todo el período de experimentación. En los períodos dos y tres la carga orgánica estuvo 2 a 6 veces más elevada que lo recomendado. Sin embargo, estas recomendaciones se refieren a sistemas en Europa y EE.UU con plantas emergentes de las familias *Scirpus* y *Phragmites*. Para sistemas con totora en zonas climáticas parecidos al altiplano no existen tales recomendaciones de diseño.

### **2.2.3.3. Eficiencia de la purificación**

La eliminación de la carga orgánica varía entre 68-93% en el primer periodo, cuando la carga estaba un 30% por encima de la carga máxima recomendada. En el segundo período (véase Tabla 1) la remoción varía entre 28 y 78% y en la tercera no superó los 30%, debido a la alta carga orgánica en el afluente.

La remoción de nutrientes fue muy baja durante todo el período de experimentación. Se supone que los procesos de eliminación del nitrógeno (nitrificación/desnitrificación y volatilización) se vieron afectados por el pH constantemente alcalina y las bajas temperaturas alrededor de 12°C.

Se encontraban altas concentraciones de sulfuros en el afluente, que no se reducían en la laguna. Los valores encontrados son un indicador que la laguna trabajaba como “facultativa”: aeróbica en las capas superiores y anaeróbica en los estratos inferiores durante desde julio a agosto. En septiembre se volvió anaeróbica por la alta carga de materia orgánica.

En general, la remoción de coliformes fecales fue satisfactoria para tiempos de retención entre 4 y 8 días, es decir durante los primeros dos períodos.



*Ilustración 3: Plantas de totora en la laguna con totora de la planta depuradora de Puchuckollo*

#### **2.2.4. Plantado y crecimiento de la totora**

Los trabajos de plantado se iniciaron el 5 de enero de 1998 y concluyeron dos semanas más tarde. Se eligieron plantas con alturas de entre 0.6 a 0.7m que formaban macizos o ramilletes de 5 a 10 tallos. Se plantó una planta por metro cuadrado cubriendo el sustrato con 2 cm de agua. Después la laguna se dejó inundar poco a poco.

El 15 de julio y el 1º de octubre del mismo año se realizaron las primeras cosechas de tallos. La cobertura con totora disminuye hacia el efluente, donde la profundidad es mayor. La cobertura en estas fechas variaba entre 20 y 30%. Se desarrollaron entre 21 y 51 tallos por planta y entre 50 y 70% de las plantas llegaron a floración.

En julio del año 2000 se realizó el primer podado de la totora a diez centímetros por debajo del agua. Cuatro meses después del podado, en noviembre 2000, las plantas ya alcanzaron alturas de 30 a 70 centímetros por encima del agua. El desarrollo de las plantas en estas fechas se muestra en la Ilustración 3.

Tanto el plantado como la cosecha de tallos y el podado se realizaron por los especialistas de la totora.

### **2.3. Conclusiones de las visitas**

Aunque la laguna con totora visitada en Puchuckollo es de otro tipo que las plantas piloto por construir, es decir de flujo superficial en vez de subsuperficial horizontal, es posible sacar algunas conclusiones de las experiencias hechas.

Las plantas piloto por construir tienen como objetivo de purificación la remoción de la carga orgánica, de los nutrientes y de los patógenos. La experiencia hecha en Puchuckollo demuestra que es preciso mantenerse a las recomendaciones en cuanto a la carga orgánica (<150 kg BOD<sub>5</sub>/ha/día para sistemas con flujo subsuperficial horizontal). En las plantas piloto esta carga se podrá regular conectando más o menos lagunas en serie, es decir, variando la superficie, y/o variando el caudal del afluente mediante un “bypass” que permite mandar una parte de las aguas servidas sin tratamiento secundario al cuerpo receptor.

La laguna de Puchuckollo se volvió anaeróbica con altas cargas orgánicas y las plantas de totora empezaron a morir. Para aumentar la eficiencia de la remoción de la carga orgánica e impedir que el sistema se vuelva anaeróbico, el agua se puede oxigenar entre dos sistemas mediante rápidos artificiales. Sin embargo, para ello hace falta disponer de un desnivel suficiente en el terreno de construcción.

La experiencia de Puchuckollo demuestra que el trasplante, la cosecha de tallos y el podado tienen que ser realizados por especialistas en el tema. Para el trasplante se elegirá el método más adaptado para sustratos que no son nativos, como los sustratos arenosos de sistemas con flujo subsuperficial horizontal. En el caso que no existe la experiencia de trasplante sobre tales sustratos, sería bueno probar varios métodos y de esta manera experimentar este parámetro.

Para el trasplante se recomienda el período de invierno. Sin embargo, es posible plantar en marzo/abril, como es previsto para el proyecto.

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**DIAGNÓSTICO DE POBLACIONES A SER  
BENEFICIARIAS Y DESCRIPCIÓN DEL  
CENTRO POBLADO DE COPACABANA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# ***Informe de Diagnóstico de Poblaciones a ser Beneficiarias***

## PRUEBAS DEL USO DE TOTORALES PARA DESCONTAMINACION EN EL AMBITO BOLIVIANO

### CONTENIDO

|  |   |
|--|---|
| 1. Antecedentes.....   | 1 |
| 2. Ejecución de actividades en los últimos dos meses y medio.....  | 1 |
| Aspectos Legales<br>Coordinación   |   |
| 2.3. Resultados.....   | 2 |
| Recorrido de identificación de lugares potenciales<br>Definición del área de acción<br>Acuerdos con la alcaldía de Desaguadero<br>Acuerdos con la Alcaldía de Copacabana |   |
| 4. Justificación de retrasos en la ejecución y estado del proyecto.....  | 5 |
| Justificación de retrasos<br>Estado actual del proyecto en Copacabana<br>Estado actual del proyecto en Desaguadero   |   |
| 5. Conclusión.....   | 6 |

## **ANEXOS**

- Anexo 1 Mapas de recorrido
- Anexo 2 Actas y Acuerdos firmados en Desaguadero
- Anexo 3 Actas y Acuerdos firmados en Copacabana
- Anexo 4 Descripción gráfica del recorrido
- Anexo 5
  - Carátula de l expediente técnico enviado a la ALT (Desaguadero)]
  - Cartas enviadas ala Gerencia de Biodiversidad y Alcaldías
  - Recortes de prensa en los días del conflicto campesino

# ***Informe de Diagnóstico de Poblaciones a ser Beneficiarias***

## **1. Antecedentes**

El proyecto Pruebas del Uso de Totorales para la Descontaminación en el Ámbito Boliviano, se inicio el 20 de octubre de 2000 debiendo finalizar el 20 de octubre de 2001. Sin embargo, debido a los supuestos importantes que no lograron cumplirse y que se detallan más adelante, aún no se logró comenzar con las obras.

## **2. Principales actividades en los últimos dos meses y medio**

### Aspectos Legales

En la primera semana de junio de 2001, la Responsable legal del Proyecto Lic. Evelyn Taucer M. presenta sus renuncia a la Gerencia de la Fundación MEDMIN. A partir de ese momento y debido a los retrasos en el Proyecto, la Fundación toma contacto con el Gerente de Biodiversidad de la ALT Ing. Antonio Bazoberry para determinar el curso legal a seguir.

En este sentido la Fundación MEDMIN a través de su Directorio nombra al Lic. Danilo Bocángel como responsable del proyecto y el 8 de junio de 2001, la Dirección del Proyecto de Biodiversidad, Gerencia de Biodiversidad y MEDMIN firman la enmienda al contrato BOL/98/G31. En esta enmienda los términos de referencia del contrato no son cambiados, simplemente cambia el nombre del Representante Legal del Proyecto por parte del contratista.

### Coordinación

A partir de esta modificación en el contrato, la Gerencia de Biodiversidad a través del Ing. Bazoberry y el Representante Legal Contratista Lic. Danilo Bocángel, coordinan nuevas actividades a seguir con el fin de iniciar las obras de construcción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El contratista se compromete a realizar un recorrido por toda la cuenca alta del sistema TDPS del sector boliviano con el fin de identificar nuevos lugares en lo que pudiera establecerse el proyecto debido a los problemas legales de adquisición del terreno en la ciudad de Copacabana (lugar inicial proyectado de establecimiento del proyecto).

Paralelamente al recorrido, se logran citas con los alcaldes de los municipios identificados como lugares que reúnen las condiciones para la ejecución del proyecto (sistema de alcantarillado en funcionamiento, pendiente adecuada, terreno libre de conflictos legales y otros, ver modelo de carta a los municipios en el anexo 4).

Finalmente se logra establecer acuerdos con el Gobierno Municipal de Desaguadero por ser la única ciudad que reúne las condiciones necesarias para llevar en adelante el proyecto.

Se toma contacto con los responsables y técnicos de la ALT Desaguadero para que proporciones a MEDMIN toda la información necesaria del sistema de alcantarillado y las características técnicas del área donde se construirá el sistema de tratamiento de aguas residuales.

En esta etapa, se realiza un viaje a Desaguadero en el cual se decepciona los expedientes del sistema de colección de aguas servidas y se realiza un reconocimiento junto con los técnicos de la ALT a los “bancos de préstamo” de construcción.

MEDMIN, dentro del plazo acordado en el municipio de Desaguadero en reunión de 27 de julio de 2001, hace entrega a la ALT del Expediente de Obra para la construcción de sistemas de tratamiento de aguas para ciudad de Desaguadero.

Por otro lado, en la ciudad de Copacabana, se reanuda con el Consejo Municipal a través de la Sra. Alicia Monje y junto a algunos miembros de l Consejo se realiza un recorrido por los terrenos en donde será construida la planta.

### **3. Resultados**

#### **3. RECORRIDO DE IDENTIFICACIÓN DE LUGARES POTENCIALES**

Se elaboró un modelo de carta para ser presentada a los alcaldes (Anexo 4)  
Se acodaron entrevistas con los Honorables Concejales y oficiales técnicos de los municipios.

El recorrido se inicio el 14 de junio hasta el 20 de junio y abarcó las siguientes localidades y poblaciones.

### **3.1. Provincia Los Andes**

Peñas  
Huancané  
Puerto Pérez  
Batallas  
Pucarani

#### *Provincia Omasuyos:*

Achacachi  
Ancoraimes  
Jankho Amaya  
Santiago de Huanta  
Chua Cacani  
Huatajata  
Huarian

#### *Provincia Camacho:*

Puerto Acosta  
Puerto Pajarachi  
Escoma  
Chaguaya

#### *Provincia Ingavi:*

Desaguadero  
Guaqui

#### *Provincia Carcado (Depto Oruro)*

Eucaliptos  
La Joya  
Sillota Belén

(Ver mapas de recorrido, Anexo 1)



El objetivo principal de esta actividad era identificar in situ los probables centros poblados donde se establecerían las plantas piloto debido a los problemas legales de terreno en Copacabana. Asimismo, obtener un compromiso preliminar de las autoridades municipales para colaborar con la maquinaria pesada durante la ejecución del proyecto.

Las poblaciones visitadas no cumplen con las siguientes condiciones:  
Sistema básico de alcantarillado para la conducción de aguas servidas  
Relieve y Topografía adecuados para el establecimiento del sistema  
Área de terreno que permitirá el establecimiento del sistema que sea propiedad municipal

Si bien todos los centros poblados cuentan con un sistema de agua potable, ninguno cuenta con un sistema de alcantarillado adecuado /ver descripción gráfica, anexo 5)

Definición del área de acción

Como resultado de este diagnóstico presentado en el acápite anterior se arribó a cuatro probables alternativas:

- a. *Construir la planta piloto en Batallas*
- b. *Construir la planta a la altura de la desembocadura de la mina Matilde*
- c. *Construir la planta en Copacabana*
- d. *Construir la planta piloto en Desaguadero*

Las alternativas a. y b. quedaron descartadas; Mina Matilde debido a que el problema de pertenencias de tierras es poco claro y al momento este sector constituye una zona de conflicto entre campesinos y Gobierno; Batallas fue descartado porque hace cuatro años que no pueden concluir la construcción de la red de alcantarillado y es muy poco probable que lo hagan hasta fin de año.

De ello se concluye que la mejor alternativa sigue siendo la de Copacabana, teniendo en cuenta que ya se cuenta con el terreno y los estudios para realizar las obras. Sin embargo, Desaguadero es también una buena alternativa si la alcaldía coordina actividades y corre con los gastos de maquinaria pesada y otros junto a la ALT que viene ejecutando diferentes obras en ese sector.

Finalmente Desaguadero y Copacabana son las mejores alternativas.

### **3.1.1. Acuerdos con la alcaldía de Desaguadero**

A lo largo de reuniones con el Sr. Daniel Ticona se logra concretar una reunión final con miembros de la ALT, Gerencia de Biodiversidad, MEDMIN-SER ECO, Alcalde y Concejales de Desaguadero.

Los concejales pidieron a la Gerencia de Biodiversidad ya MEDMIN que les sea entregado un detalle de los requerimientos hacia la Alcaldía y la ALT para ejecutar las obras del sistema de tratamiento de aguas. En este sentido MEDMIN se compromete a entregar en un lapso no mayor a 20 días un expediente técnico o en su caso en detalle de los requerimientos. El Expediente técnico fue entregado a la Gerencia de Biodiversidad y el detalle de los requerimientos al Honorable Alcalde de Desaguadero (ver anexo 4, carta del 17 de agosto dirigida a Daniel Ticona H. Alcalde de Desaguadero)

El acta del 27 de julio de 2001 y otros documentos de acercamiento y censo se presentan en el anexo 2.

#### ***Acuerdos con la alcaldía de Copacabana.***

Se estableció contacto con la Sra. Alicia Monje Presidenta del Consejo de Copacabana, la cual se mostró desde un principio muy interesada en que el proyecto finalmente se estableciera en esta ciudad.

Luego de gestiones realizadas por esta señora y los otros Concejales de Copacabana finalmente se logra obtener el permiso para ingresar a iniciar las obras de construcción en los predios de la Prefectura que quedan en la Bahía Turística (ver nota dirigida a Zenon Cori de 24 de julio de 2001, anexo 3).

El miércoles 8 de agosto, MEDMIN concerta una cita previa con los concejales de Copacabana para explicar los detalles del proyecto y se establece una reunión para el 10 de agosto en la que también participa la Gerencia de Biodiversidad a través de su Gerente Ing. Antonio Bazoberry. Como resultado de esta reunión, la Alcaldía se compromete a facilitar a MEDMIN en nueve días o a más tardar hasta el fin del mes de agosto la maquinaria y equipos que el contratista requiera para la construcción de las plantas de acuerdo al detalle que expone el Lic. Danilo Bocángel (ver Acta de 10 de agosto de 2001, anexo 3).

#### **4. Justificación de retrasos en la ejecución y estado del proyecto.**

Justificación de los retrasos

El proyecto a sufrido un desfase en su cronograma de ejecución debido a los siguiente aspectos fundamentales.

Tanto MEDMIN como el Proyecto de Biodiversidad de la ALT han firmado un convenio con la Alcaldías de Copacabana un mes después de haber firmado el contrato. Sin embargo al momento de la firma de este convenio, las autoridades de l Gobierno Municipal de de Copacabana, no tenían conocimiento d que aquellos terrenos pertenecían a la Prefectura de La Paz.

Esto ocasiona que durante siete meses y medio la Alcaldía realice gestiones para que esos terrenos sean transferidos al municipio. Aunque legalmente no se ha logrado la transferencia, se cuenta con la autorización de la Prefectura par ejecutar las obras.

Paralelamente la primera semana de junio MEDMIN realiza un recorrido de identificación de sitios alternativos en donde pueda establecerse el proyecto y como resultado se logra identificar a Desaguadero como la única ciudad alternativa que reúne las condiciones requeridas por el proyecto.

Posteriormente las actividades del proyecto se ven gravemente afectadas por los bloqueos campesinos que se inician el 21 de junio y terminan después de 38 días, en los que la ciudad de Copacabana se encontraba prácticamente sitiada.

Estado actual del proyecto en Copacabana

De acuerdo al acta del 10 de agosto firmado en Copacabana, ya se ha cumplido el plazo para la entrega de maquinaria por parte de la Alcaldía a MEDMIN. Sin embargo, la Alcaldía ha solicitado un tiempo adicional para la entrega de la maquinaria hasta fines de mes debido a que aun les falta una cotización par cumplir con las exigencias legales.

Estado actual del proyecto en Desaguadero

Una vez presentado los requerimientos al Gobierno Municipal, esta instancia tiene 10 días para revisarlos y evaluarlos. El miércoles 29 de agosto se cumple este plazo, momento en el cual se tomará contacto con el Alcalde para conocer su decisión.

Si la Alcaldía decide comprometerse a proporcionar la maquinaria e insumos requeridos, se elaborará un convenio de las características del convenio elaborado para Copacabana en el que se edificarán plazos y compromisos por parte de la Gerencia de Biodiversidad a través de MEDMIN y la Alcaldía en coordinación con la ALT.

## **5. Conclusión**

El retraso en el inicio de las obras se debió a dos razones fundamentales:

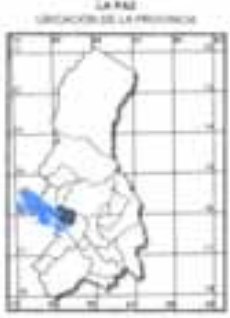
- Falta de cumplimiento del convenio por parte de la alcaldía de Copacabana en cuanto a la entrega de un terreno libre de conflictos legales y a la entrega de maquinaria pesada.
- Bloqueos de campesinos en el área de intervención

Si a las Alcaldías de Copacabana y Desaguadero proporcionan al proyecto la maquinaria pesada y otros requerimientos de MEDMIN establecidos en los acuerdos, MEDMIN ejecutará las obras de construcción y el programa de investigación en ambas ciudades a los expedientes técnicos elaborados y aprobados.

# **ANEXO 1: MAPAS DE RECORRIDO**



# Provincia OMASUYOS



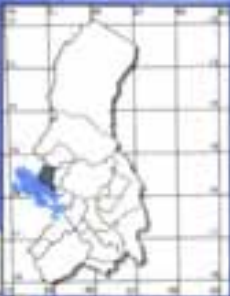
|                      |                       |                     |
|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Límite Departamental | Capital Departamental | Río                 |
| Límite Provincial    | Capital Provincial    | Límite de Municipio |
| Límite de Cantón     | Cantón                | Ruta Nacional       |
| Límite de Comunidad  | Comunidad             | Ruta Provincial     |
| Límite de Barrio     | Barrio                | Ruta Cantonal       |
| Límite de Finca      | Finca                 | Ruta Comunal        |
| Límite de Parcela    | Parcela               | Ruta de Vecindario  |
| Límite de Parcela    | Parcela               | Ruta de Barrio      |
| Límite de Parcela    | Parcela               | Ruta de Finca       |
| Límite de Parcela    | Parcela               | Ruta de Parcela     |

El presente mapa fue elaborado por el MOPC en el año 2005, con base en el catastro municipal de la provincia de Omasuyos, y en el catastro de la zona de influencia del aeropuerto de Omasuyos, con el fin de actualizar el mapa de la provincia de Omasuyos.

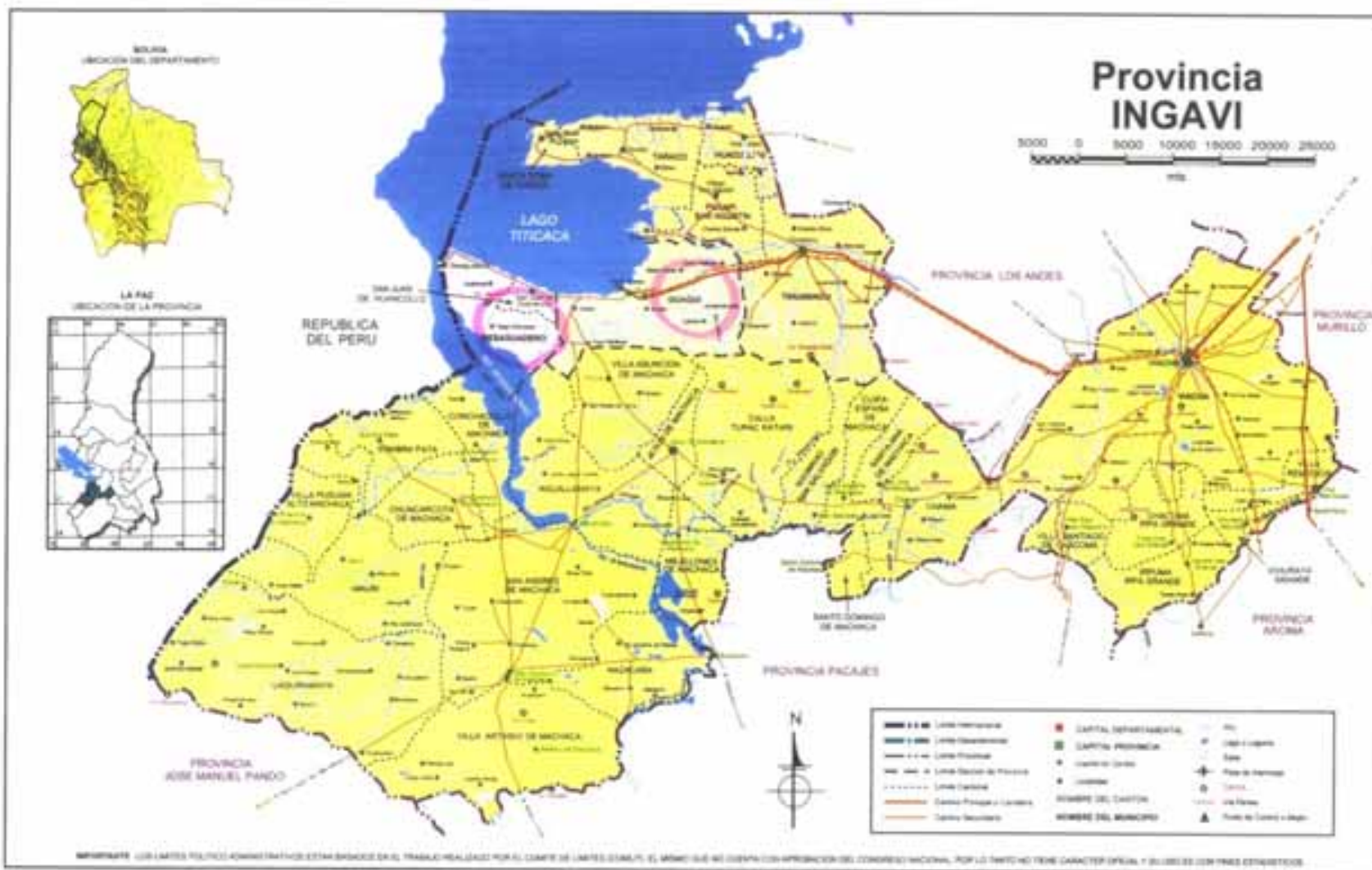
# Provincia CAMACHO



REPUBLICA DEL PERU



|  |                 |  |            |
|--|-----------------|--|------------|
|  | DISTRICTOS      |  | MUNICIPIOS |
|  | PROVINCIAS      |  | DISTRICTOS |
|  | RUTA NACIONAL   |  | DISTRICTOS |
|  | RUTA PROVINCIAL |  | DISTRICTOS |
|  | DISTRICTOS      |  | DISTRICTOS |
|  | DISTRICTOS      |  | DISTRICTOS |







## **ANEXO 2: DESCRIPCIÓN GRÁFICA DEL RECORRIDO**



Figura 1: La plaza principal de los pueblos visitados tienen obras de infraestructura que no prevén una futura construcción de alcantarillado.



Figura 2: En los pocos pueblos que tienen un sistema de alcantarillado, éste comprende únicamente a las familias que viven alrededor de la plaza principal y su funcionamiento es totalmente deficiente.



Figura 3: Vista general de una de las población aledaña al Lago Titicaca y que vierten sus aguas servidas directamente al lago.



Figura 4: En la mayoría de los casos las aguas servidas corren indirectamente hacia el Lago Titicaca a través de sus afluentes.



Figura 5: La zona de ribera del Lago Titicaca dónde obviamente el agua muestra una enorme producción de biomasa por razón de la contaminación orgánica causada por aguas servidas provenientes de las próximas poblaciones.



Figura 6: Zanjas construidas para colectar las aguas servidas de los domicilios. Es un sistema común en todas las poblaciones aledañas al lago.



Figura 7: Las aguas servidas de los pueblos son colectadas en pequeños canales que desembocan en un cuerpo receptor que finalmente llega al lago.



Figura 8: Uno de los problemas más serios son las aguas provenientes de minas abandonadas con gran poder contaminante como en el caso de las aguas provenientes de Mina Matilde que corren directamente hacia el Lago Titicaca.

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**DESCRIPCIÓN DEL CENTRO POBLADO DE  
COPACABANA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**

(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# TABLA DE CONTENIDO

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Información general .....   | 3  |
| 2       | Caracterización del centro poblado.....                                 | 4  |
| 2.1     | Climatología .....  | 4  |
| 2.1.1   | Temperatura.....  | 4  |
| 2.1.2   | Precipitación.....  | 4  |
| 2.1.3   | Evaporación.....  | 5  |
| 2.1.4   | Humedad ambiental .....   | 5  |
| 2.2     | Fisiografía.....  | 5  |
| 2.2.1   | Elevaciones sobre el nivel del lago Titicaca.....                       | 5  |
| 2.2.1.1 | Altitudes .....   | 5  |
| 2.2.1.2 | Niveles del lago .....  | 6  |
| 2.2.2   | Topografía .....  | 6  |
| 2.2.3   | Pendiente .....   | 7  |
| 2.3     | Población.....  | 7  |
| 2.3.1   | Población permanente.....   | 7  |
| 2.3.2   | Población flotante .....  | 7  |
| 2.3.3   | Definición de la población actual y futura.....                         | 8  |
| 3       | Caracterización del sistema de agua potable y alcantarillado.....       | 9  |
| 3.1     | Sistema de agua Potable .....   | 9  |
| 3.1.1   | Introducción.....   | 9  |
| 3.1.2   | Fuentes.....  | 9  |
| 3.1.3   | Conexiones y abastecimiento .....                                       | 9  |
| 3.1.4   | Tipos de conexiones y tarifas .....                                     | 9  |
| 3.2     | Sistema de alcantarillado.....  | 10 |
| 3.2.1   | Descripción del sistema .....   | 10 |
| 3.2.2   | Población conectada y caudal de las aguas servidas .....                | 10 |
| 3.2.2.1 | Población conectada .....   | 10 |
| 3.2.2.2 | Caudal de las aguas servidas .....                                      | 11 |
| 3.2.3   | Peines de infiltración .....  | 11 |
| 4       | Implementación de plantas piloto de descontaminación con totora .....   | 13 |
| 4.1     | Área destinada para el sistema de tratamiento y zona de evacuación..... | 13 |
| 4.1.1   | Introducción.....   | 13 |
| 4.1.2   | Área del subsistema 1 .....   | 13 |



|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.1.3   | Área del subsistema 2 .....                                     | 15 |
| 4.2     | Viabilidad del establecimiento de sistemas de tratamiento ..... | 16 |
| 4.2.1   | Planta piloto integrado al subsistema No. 1 .....               | 16 |
| 4.2.1.1 | Viabilidad técnica .....  | 16 |
| 4.2.1.2 | Viabilidad social y económica .....                             | 17 |
| 4.2.1.3 | Viabilidad institucional .....                                  | 17 |
| 4.2.1.4 | Viabilidad ambiental .....                                      | 17 |
| 4.2.2   | Planta piloto integrado al subsistema No. 2 .....               | 18 |
| 4.2.2.1 | Viabilidad técnica .....  | 18 |
| 4.2.2.2 | Viabilidad social y económica .....                             | 18 |
| 4.2.2.3 | Viabilidad institucional .....                                  | 19 |
| 4.2.2.4 | Viabilidad ambiental .....                                      | 19 |
| 5       | Conclusiones y recomendaciones .....                            | 20 |
| 6       | Anexos .....  | 21 |

Anexo 1: Estimación del tiempo de bombeo y del caudal medio entre el 12.12.00 y el 28.12.00

Anexo 2: Estimación de la conductividad hidráulica en los campos de infiltración y de los caudales en función de la altura hidráulica

# 1. INFORMACIÓN GENERAL

- **Nombre de proyecto/obra**

Se propone construir dos plantas piloto con totora en la ciudad de Copacabana:

1. Planta de descontaminación con totora integrado al sistema No. 1 (bahía turística)
2. Planta de descontaminación con totora integrado al sistema No. 2 (bahía agrícola)

- **Ubicación del centro poblado**

La ciudad de Copacabana está ubicada en:

|               |             |
|---------------|-------------|
| Departamento: | La Paz      |
| Provincia:    | Manco Kapac |
| Sección:      | 1ª sección  |

- **Ubicación geográfica**

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| Latitud sur:    | 16° 9' 49'' |
| Longitud oeste: | 69° 5' 7''  |

- **Autoridades**

El alcalde de Copacabana con quién se ha firmado el convenio es:

H. Zenon Cari Cruz  
Alcalde Municipal de Copacabana  
Plaza 2 de febrero  
Copacabana

Tel./Fax.: 086 22 19 0/22 23 7

- **Personas de contacto**

El encargado técnico del alcantarillado y de los sistemas de tratamiento es:

Ing. Edwin Ticona  
Alcaldía Municipal de Copacabana  
Tel: 012 46 46 8/015 71 0 94

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL CENTRO POBLADO

### 2.1. Climatología

#### 2.1.1. Temperatura

El mes más caluroso es Noviembre, con una temperatura media de 11°C, el mes más frío es Julio con una temperatura media de 8°C.

Eventos meteorológicos tal como heladas, granizos y nevadas son ocasionales, siendo los meses de Junio, Julio y Agosto los que presentan mayor incidencia de heladas.

#### 2.1.2. Precipitación

*En la zona de Copacabana, las lluvias son de pequeña* magnitud, tanto de intensidad como de duración. El promedio de las precipitaciones mensuales durante el período 1943 a 1986 medido en la estación meteorológica de Copacabana:

| Mes:                               | Precipitaciones (mm/mes) |        |              |
|------------------------------------|--------------------------|--------|--------------|
|                                    | Máxima                   | Mínima | Media        |
| Enero                              | 447.0                    | 26.5   | 194.8        |
| Febrero                            | 263.0                    | 85.6   | 155.3        |
| Marzo                              | 184.0                    | 17.0   | 118.7        |
| Abril                              | 120.2                    | 9.0    | 61.6         |
| Mayo                               | 140.0                    | 0.0    | 26.8         |
| Junio                              | 43.0                     | 0.0    | 7.8          |
| Julio                              | 51.0                     | 0.0    | 9.5          |
| Agosto                             | 82.1                     | 0.0    | 14.7         |
| Septiembre                         | 125.6                    | 1.5    | 42.6         |
| Octubre                            | 117.0                    | 0.3    | 47.3         |
| Noviembre                          | 213.9                    | 15.5   | 70.4         |
| Diciembre                          | 332.0                    | 50.0   | 132.0        |
| Precipitación media anual (mm/año) |                          |        | <b>881.5</b> |

El período lluvioso abarca los meses entre diciembre a febrero, existiendo un período relativamente seco entre mayo y agosto. La precipitación media anual del período era de 881.5 mm/año, lo que caracteriza la zona como semiárida a sub-húmeda.

### 2.1.3. Evaporación

Los registros de evaporación mensual en la estación meteorológica son:

| Mes:                               | Evaporación (mm/mes) |        |               |
|------------------------------------|----------------------|--------|---------------|
|                                    | Máxima               | Mínima | Media         |
| Enero                              | 99.8                 | 35.6   | 66.1          |
| Febrero                            | 106.9                | 39.3   | 62.7          |
| Marzo                              | 84.2                 | 45.1   | 62.3          |
| Abril                              | 112.4                | 40.5   | 88.3          |
| Mayo                               | 151.6                | 62.2   | 106.7         |
| Junio                              | 152.6                | 76.8   | 122.1         |
| Julio                              | 137.5                | 46.5   | 122.7         |
| Agosto                             | 156.0                | 78.6   | 109.0         |
| Septiembre                         | 158.2                | 71.9   | 108.5         |
| Octubre                            | 1162.0               | 53.7   | 111.7         |
| Noviembre                          | 128.8                | 93.0   | 109.6         |
| Diciembre                          | 112.4                | 67.4   | 91.1          |
| Precipitación media anual (mm/año) |                      |        | <b>1051.8</b> |

### 2.1.4. Humedad ambiental

Los valores de la humedad relativa registrada entre 1973 y 1986 son:

| Mes:       | Humedad relativa |        |       |
|------------|------------------|--------|-------|
|            | Máxima           | Mínima | Media |
| Enero      | 75               | 59     | 69    |
| Febrero    | 77               | 63     | 68    |
| Marzo      | 76               | 64     | 69    |
| Abril      | 74               | 58     | 62    |
| Mayo       | 68               | 42     | 53    |
| Junio      | 65               | 42     | 51    |
| Julio      | 59               | 44     | 51    |
| Agosto     | 69               | 42     | 51    |
| Septiembre | 71               | 40     | 55    |
| Octubre    | 67               | 43     | 56    |
| Noviembre  | 70               | 47     | 63    |
| Diciembre  | 70               | 50     | 63    |

## 2.2. Fisiografía

### 2.2.1. Elevaciones sobre el nivel del lago Titicaca

#### 2.2.1.1. Altitudes

La zona más alta de la ciudad se encuentra la Plaza 2 de Febrero y el cerro “horca del inca”, con su punto más alto a 3.868 metros sobre el nivel del mar. La plaza misma está a una altura de 3.839 metros. En la bahía turística (alcantarillado: subsistema No. 1) la ciudad se extiende hasta la orilla del lago Titicaca, dónde las casas se encuentran a una altura de 3.812,5 metros sobre el nivel del mar. Del otro lado, en la bahía agrícola (alcantarillado: subsistema No. 2) las últimas casas están a una altura de 3.811,5 metros, sin alcanzar la orilla del lago.

### 2.2.1.2. Niveles del lago

Los niveles del lago cambian con la estación del año. Por lo tanto, las elevaciones de las casas y de las instalaciones del alcantarillado sobre el nivel del lago no son constantes. Hubía años muy lluviosos en que el nivel del lago subía hasta 3.815 metros sobre el nivel del mar, mientras que durante años muy secos bajaba por debajo de 3.805 metros.

Con el nuevo dique y las compuertas de control en Desaguadero estas fluctuaciones se controlarán y se estabilizarán. Para poner en funcionamiento este sistema, sólo queda por terminar la corrección de la pendiente del lecho del río Desaguadero. Sin embargo, el sistema de control sólo amortigua las fluctuaciones del nivel del lago. En simulaciones informáticas se determinaron las frecuencias acumuladas de los niveles futuros del lago Titicaca (Ilustración 4<sup>6</sup>).

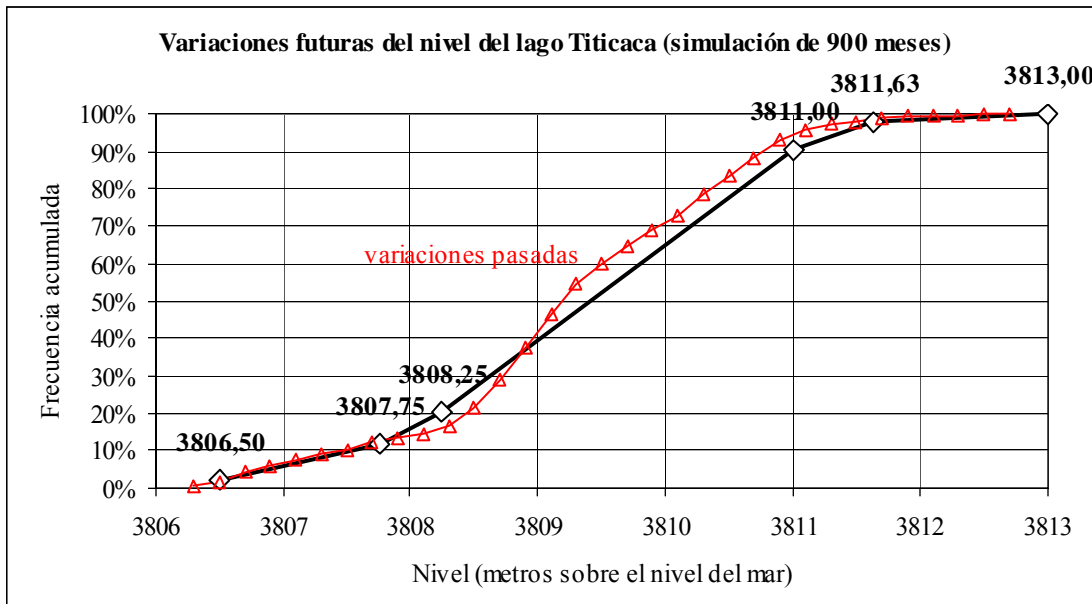


Ilustración 4: Frecuencias acumuladas de los niveles del lago Titicaca, cuando la regulación del nivel a través de las compuertas en Desaguadero funcione como planificado. En rojo: frecuencias acumuladas de las variaciones pasadas de los niveles del lago.

En la Ilustración 4 no se pueden observar muchas diferencias entre las frecuencias de niveles pasadas y futuras. Sin embargo, en de los niveles simulados existe una clase de frecuencia que abarca un gran rango de niveles (entre 3.808,25 y 3.811,00). La interpelación lineal entre los dos limites de esta clase puede no estar muy correcto. Habría que conseguir datos más detallados de las simulaciones para poder calcular puntos de la frecuencia acumulada entre estos niveles.

### 2.2.2. Topografía

La población de Copacabana está situada en un pequeño valle, que limita al norte con el calvario y al sur con elevaciones considerables que circundan hasta la parte este, donde se tiene una planicie que favorece el crecimiento futuro de la ciudad.

El centro de la ciudad es plano y se encuentra en el punto más elevado. Hacia el oeste el terreno baja hacia la orilla del lago Titicaca, que en este lugar forma una pequeña bahía (Alcantarillado: Subsistema No. 1).

<sup>6</sup> Datos: Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT), La Paz

Hacia el este la ciudad termina al borde de una planicie, que está casi al nivel del lago y que por esta razón es frecuentemente inundada en época de lluvias desde la orilla del lago Titicaca (Alcantarillado: Subsistema No. 2). Esta planicie se utiliza actualmente para la agricultura, pero es muy probable que con el crecimiento futuro de Copacabana las casas ocuparán estos terrenos.

### 2.2.3. Pendiente

Desde el centro de la localidad, dónde se encuentra la Plaza 2 de febrero y la iglesia, las pendientes en las cuatro direcciones son las siguientes:

- Bajada hacia el oeste (subsistema No. 1): 1,4% a 10.5%
- Bajada hacia el este (subsistema No. 2): 1,8% a 22.3%
- Subida hacia el sur (línea de división de las subsistemas) 3.5% a 7.1%
- Subida hacia el norte (línea de división de las subsistemas) 3.3% a 15.4%

De manera general, las pendientes son más fuertes en el subsistema No. 2 que en el subsistema No. 1.

## 2.3. Población

### 2.3.1. Población permanente

La población de Copacabana ha sido objeto de varios censos, realizados por diferentes instituciones. Sin embargo, ninguno ha tomado en cuenta la población flotante, la cual merece un estudio específico por ser de gran importancia para la ciudad.

Se mencionan la falta de infraestructura y de saneamiento básico como posibles causas por las cuales la ciudad no haya alcanzado mayor desarrollo.

Los censos que se han levantado en Copacabana han obtenido los siguientes resultados:

| Año  | Habitantes | Instituto responsable |
|------|------------|-----------------------|
| 1950 | 1.981      | I.N.E                 |
| 1966 | 3.751      | M.A.U.                |
| 1969 | 2.299      | CORPAGUAS             |
| 1975 | 3.807      | D.I.U.                |
| 1976 | 2.919      | I.N.E                 |
| 1988 | 3.768      | C.U.                  |
| 1995 | 4.633      | G.C:F.                |

En el futuro se espera un crecimiento acorde con el crecimiento nacional. El desarrollo de Copacabana está condicionado a que el Gobierno Nacional aplique planes para incentivar el turismo y el comercio, apoyando planes de inversión hotelera y de promover la exportación de productos de industrias nacionales.

### 2.3.2. Población flotante

El instituto Boliviano de Turismo levantó en el año 1980 un censo mensual de población flotante y de sus resultados se obtuvo que los meses pico o de mayor densidad de población flotante son Enero, Agosto y Diciembre. La población flotante máxima se alcanza en el mes de Diciembre con 8.213 habitantes.

### **2.3.3. Definición de la población actual y futura**

Teniendo en cuenta la población del último censo de 4.633 habitantes y un crecimiento de 0.3%, la población a finales del año 2000 sería de 4.717 habitantes. Suponiendo la misma tasa de crecimiento, en el año 2.015 la población alcanzaría 4.919 habitantes.

## 3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO

### 3.1. Sistema de agua Potable

#### 3.1.1. Introducción

El sistema de agua potable de Copacabana se inauguró en 1970. Desde entonces se administra por el Comité de Agua Potable. El comité se reúne una vez por semana para efectuar las labores administrativas, siendo el personal remunerado solamente la secretaria y el plomero.

#### 3.1.2. Fuentes

Todas las fuentes son vertientes ubicadas en la cordillera al sudeste de Copacabana y cuyos caudales son los siguientes:

|                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| 1. Vertiente Huallaker: | $Q = 2,67 \text{ l/s}^7$ |
| 2. Vertiente Umajalsu   | $Q = 4,67 \text{ l/s}^8$ |
| 3. Vertiente Charapura  | Q: no se conoce          |
| 4. Vertiente Jiftani    | Q: no se conoce          |

#### 3.1.3. Conexiones y abastecimiento

La red de distribución abarca el 80% de la población. El sistema de distribución tiene varias categorías de conexiones, sin contar de medidores. Existen 1.500 conexiones a la red de agua potable, según el comité de agua. Las conexiones clandestinas se estiman a 2%, lo que significaría un total de conexiones de 1.530.

El abastecimiento es de 1 hora por día, entre las 7 y las 8h de la mañana.

#### 3.1.4. Tipos de conexiones y tarifas

Existen varias categorías de tarifas, que se clasifican en función al tipo del usuario<sup>9</sup>:

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Hoteles            | 40 Bs./mes |
| Residenciales      | 16 Bs./mes |
| Alojamiento tipo A | 12 Bs./mes |
| Alojamiento tipo B | 10 Bs./mes |
| Alojamiento tipo C | 8 Bs./mes  |
| Pensiones          | 8 Bs./mes  |
| Domicilios         | 2 Bs./mes  |

Se intentará conseguir la información sobre la cantidad de conexiones en cada categoría en el Comité de Agua. Por la relación de tarifas se podría estimar el consumo de cada tipo de conexión, con respecto al consumo de los domicilios, lo cual debe ser estimado. De esta manera se podrá estimar el consumo actual de la población de Copacabana.

<sup>7</sup> Datos del FIS

<sup>8</sup> Datos del FIS

<sup>9</sup> Información del presidente del Comité de Agua de Copacabana



## 3.2. Sistema de alcantarillado

### 3.2.1. Descripción del sistema

El alcantarillado de Copacabana está dividido en dos subsistemas. El subsistema No. 1 tiene una longitud total de los colectores de 7.101 metros, el subsistema No. 2 de 8.008 metros.

En el subsistema No. 1 las aguas servidas de la parte oeste del pueblo llegan al cárcamo de bombeo, desde dónde son bombeadas al sistema de tratamiento que consiste de un tanque de sedimentación (7.50m x 21.75m x 2.90m) y de peines de infiltración de una longitud total de 250m (Ilustración 5).

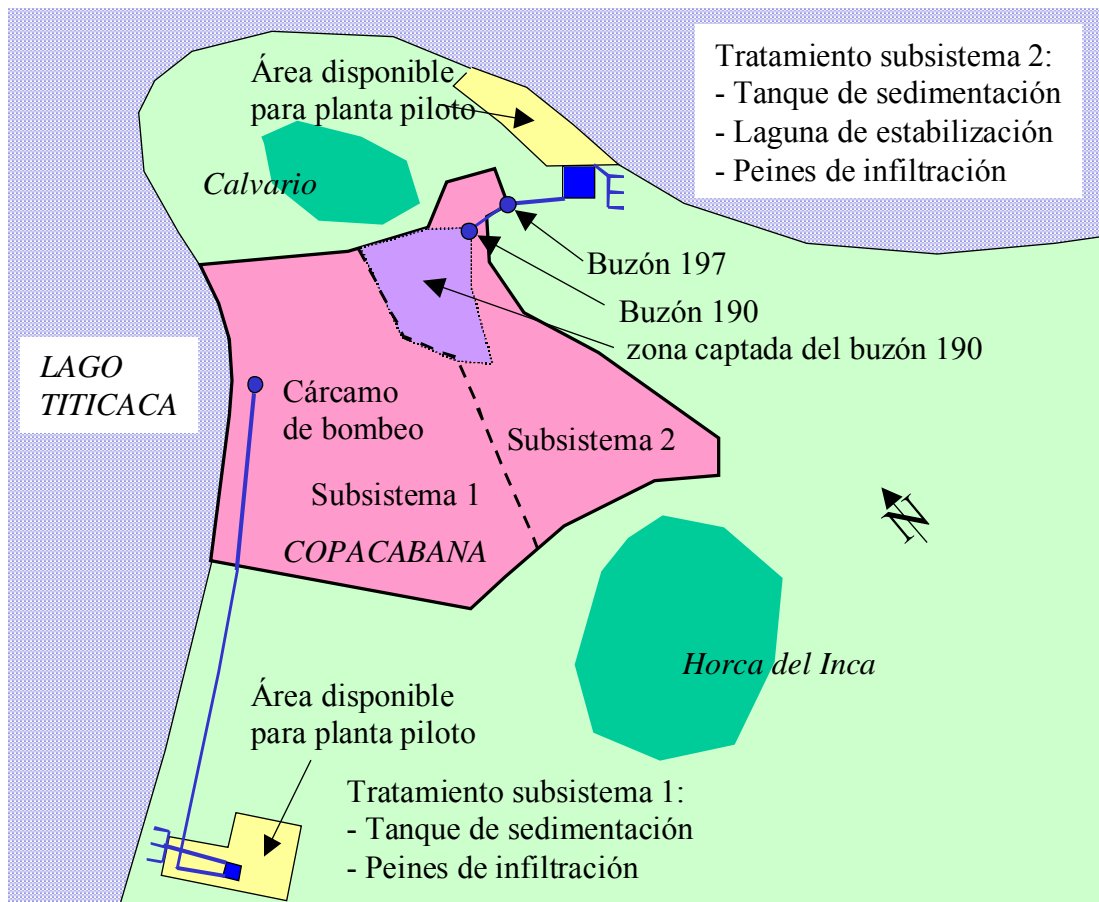


Ilustración 5: Esquema de Copacabana, de su alcantarillado y de los sistemas de tratamiento existentes

Las aguas servidas del subsistema No. 2 confluyen en el buzón No. 197 y desde allí llegan por gravedad al tanque de sedimentación (44m<sup>2</sup>) y después a la laguna de estabilización (1.200 m<sup>2</sup>), desde donde se infiltran por peines de infiltración.

### 3.2.2. Población conectada y caudal de las aguas servidas

#### 3.2.2.1. Población conectada

No se sabe exactamente cuántas casas están conectadas a la red del alcantarillado. Sin embargo, se puede suponer que todas las casas conectadas a la red de agua potable también están conectadas al alcantarillado.

El diseño inicial del proyecto del tratamiento de aguas servidas del FIS (1995) preveía una población de 17.000 habitantes, para un período de diseño de 20 años y 100% de la población conectada. Sin embargo, el proyecto no ha sido realizado como diseñado inicialmente, como se pudo comprobar en la visita. Lamentablemente todavía no se ha tenido acceso a los documentos del diseño que finalmente ha sido realizado.

### 3.2.2.2. Caudal de las aguas servidas

En el proyecto inicial del FIS se calculó un caudal máximo de 81,1 l/s, con los siguientes suposiciones y parámetros:

- 17.000 habitantes (población proyectada para el año 2015, mas población flotante, véase capítulo 0)
- Consumo de agua potable de 120 l/habitante/día
- Coeficiente de reducción agua potable/aguas servidas: 0,8
- Cálculo del caudal máximo según el método de Harmon: =>  $Q_{max}=62.7$  l/s
- Infiltración lineal de 0,0008 l/s/m de tubería: => 12,09 l/s
- Aporte por malas conexiones de 10%: => 6,27 l/s

El caudal máximo de 81,1 l/s se repartía sobre los subsistemas de manera proporcional a la longitud total del alcantarillado, lo que resulta en 38,1 l/s para el subsistema No. 1 y en 43 l/s para el subsistema No. 2.

Sin embargo, en el proyecto finalmente adoptado y realizado se ha considerado otro caudal de diseño mucho más pequeño. Todavía no se ha tenido acceso a estos datos en el FIS.

Se ha realizado una estimación del caudal total bombeado en el subsistema No. 1 entre el 12.12.00<sup>10</sup> y el 18.12.00 a través de la energía consumido durante este período y la potencia necesaria para bombear el caudal de impulsión, con los siguientes resultados (cálculo véase Anexo 1):

- |  |            |
|--|------------|
| • Caudal de impulsión con las dos bombas en funcionamiento:                                | 4,30 l/s   |
| • Tiempo diario de funcionamiento de las bombas entre el 12. y el 18.12.00:                | 9,52 h/día |
| • Estimación del caudal medio bombeado en este período (subsistema No. 1) <sup>11</sup> :  | 1,71 l/s   |
| • Estimación del caudal medio de las aguas servidas en el subsistema No. 2 <sup>12</sup> : | 1,95 l/s   |

En el proyecto inicial se preveía un tiempo medio de funcionamiento diario de 16 h/día. El caudal bombeado en el subsistema No. 1 en 16 horas diarias sería de 2,9 l/s. La diferencia entre este caudal “de diseño” estimado y el caudal de diseño de 38,1 l/s inicialmente planificado es bastante grande.

### 3.2.3. Peines de infiltración

Las aguas sedimentadas en ambas subsistemas se infiltran por peines de infiltración. Es importante conocer el diseño de estos sistemas, para averiguar si se pueden seguir utilizando con las plantas piloto con totora. Pues la integración de las plantas piloto entre los tanques de sedimentación y los peines de infiltración reducirá el desnivel hidráulico disponible y por lo tanto el caudal que puede infiltrar disminuirá.

<sup>10</sup> fecha de la instalación del contador de electricidad en la estación de bombeo

<sup>11</sup> Se trata de una aproximación suponiendo que la eficiencia del bombeo con 1 bomba en funcionamiento es igual a la eficiencia con 2 bombas en funcionamiento.

<sup>12</sup> Se supone que los caudales de las aguas servidas son proporcionales a las longitudes totales de los colectores en los subsistemas

Para el diseño del proyecto del FIS se realizaron ensayos de infiltración, que permiten estimar la conductividad hidráulica y el caudal que puede infiltrar en función de la altura hidráulica (cálculos véase Anexo 2):

| Parámetro   | unidad | Valores          |                  |
|---|--------|------------------|------------------|
|   |        | Subsistema No. 1 | Subsistema No. 2 |
| Conductividad hidráulica $K_D$                                  | m/s    | 9,16E-05         | 9,90E-05         |
| Desnivel hidráulica necesaria para infiltrar un caudal de 1 l/s | s/l    | 0,04             | 0,03             |

Con estos datos se pueden calcular los desniveles hidráulicas necesarias para la infiltración de diferentes caudales en los sistemas de infiltración (Ilustración 6).

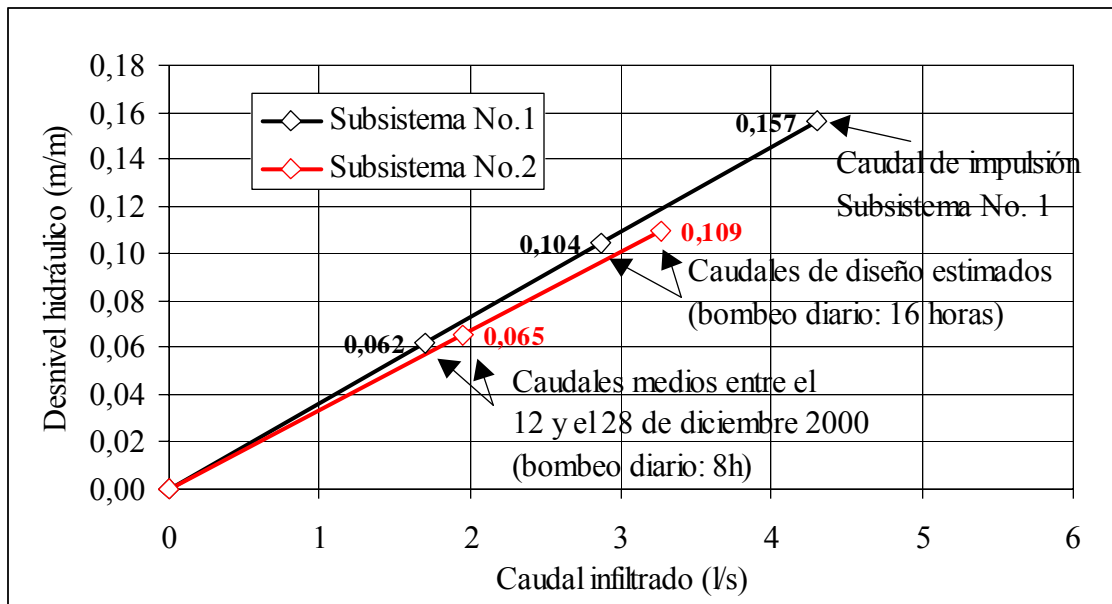


Ilustración 6: Desniveles hidráulicas para la infiltración de caudales de agua servida en los sistemas de infiltración

En la Ilustración 6 se puede observar que para la infiltración a través de los peines de infiltración del subsistema No. 1 es necesario una presión hidráulica (desnivel entre entrada a los peines y el lago Titicaca) de 16cm, ya que el caudal máximo de infiltración es igual al caudal de impulsión con dos bombas en funcionamiento. En cambio, el caudal máximo de infiltración en el subsistema No. 2 es igual al caudal de diseño estimado, lo que corresponde a una presión hidráulica necesaria de 11cm.

En el subsistema No. 1 la infiltración funciona bien. En cambio, en el subsistema No. 2 el agua no filtra. Puede ser que haya algún tapado, pero también es posible que la conductividad hidráulica sea más baja que la conductividad determinada en el ensayo. Por esto es recomendable confirmar los valores estimados de la conductividad hidráulica con análisis de laboratorio.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS PILOTO DE DESCONTAMINACIÓN CON TOTORA

### 4.1. Área destinada para el sistema de tratamiento y zona de evacuación

#### 4.1.1. Introducción

Potencialmente existen dos áreas dónde se pueden implantar las plantas piloto de descontaminación con totora. Una planta con totora puede ser conectada al subsistema No. 1 y la otra al subsistema No. 2. Sin embargo, por razones hidráulicas (véase capítulo 4.2.2.1), económicas (véase capítulo 4.2.2.2) y problemas de aceptación por parte de la población (véase capítulo 4.2.1.2), la implementación de la planta con totora conectada al subsistema No. 2 se puede dificultar o hasta imposibilitar. En los siguientes párrafos se describen las dos áreas destinadas a las plantas piloto con totora, pero se reserva la posibilidad de implantar sólo una planta piloto en el área del subsistema No. 1, si los problemas mencionados no favorecen la implementación de una planta piloto en el área del subsistema No. 2 (véase discusión en el capítulo 5)

#### 4.1.2. Área del subsistema 1

El área prevista para la construcción de la planta piloto se encuentra alrededor del tanque de sedimentación. Se sitúa a un kilómetro del centro urbano siguiendo la orilla hacia el sur oeste en dirección al Perú. Las aguas servidas son bombeadas al tanque de sedimentación desde la estación de bombeo en la bahía turística.

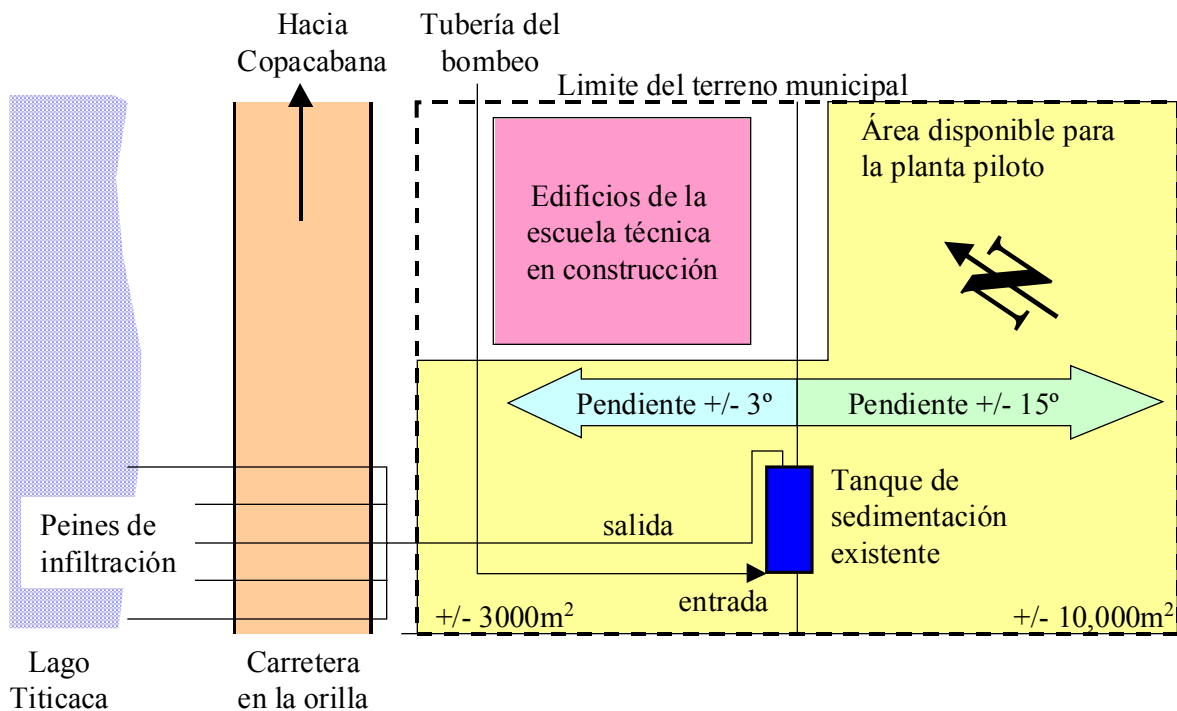


Ilustración 7: Esquema del área disponible para la planta piloto integrado al subsistema No. 1

En la Ilustración 7 se muestra un esquema del área disponible para la planta piloto en el subsistema No. 1. El área disponible entre el tanque de sedimentación y la carretera en la orilla del lago abarca más o menos 3.000 m<sup>2</sup>. Hacia el norte esta área está limitado por los edificios de una escuela técnica en construcción. Del otro lado del tanque el área disponible para la purificación de las aguas servidas tiene una superficie de más o menos 10.000 m<sup>2</sup> (vista fotográfica en la Ilustración 8).



*Ilustración 8: Vista fotográfica del área disponible para la planta piloto integrado al subsistema No. 1, desde el tanque de sedimentación hacia la orilla del lago Titicaca.*

El terreno por debajo del tanque tiene una pendiente alrededor de 3°. En cambio, por encima del tanque de sedimentación el terreno tiene una pendiente más fuerte alrededor de 15°. Para construir lagunas de la planta piloto en esta área hay que excavar un terraplén al nivel del tanque de sedimentación. Movimientos de tierra cuestan caro, por lo que se limita la extensión de la planta piloto en arriba del tanque existente.

Todo el área pertenece a la municipalidad y constituye la reserva para ampliaciones del sistema de tratamiento. En la actualidad, las áreas disponibles para la construcción de la planta piloto no tienen uso.

Las cotas del tanque de sedimentación del subsistema No. 1 son las siguientes<sup>13</sup>:

- Ingreso al tanque de sedimentación 3.816,14
- Salida del tanque de sedimentación 3.815,94

<sup>13</sup> Estos niveles se midieron desde el nivel del buzón No. 91, cuya tapa está a 3,812.192 m.s.n.d.m. Estas mediciones se han realizado con un teodolito. Existe un margen de error de más o menos 50cm. Se han obtenido planes de los tanques de sedimentación y de la laguna de estabilización del FIS. Sin embargo, estos planes no contienen cotas. Para la elaboración del proyecto se intenta obtener acceso a estos las cotas determinados por el contratista.

### 4.1.3. Área del subsistema 2

El área dónde se podría construir la planta piloto del subsistema No. 2 se encuentra al norte de la laguna de tratamiento existente. Las aguas servidas llegan al tanque de sedimentación y a la laguna de estabilización por gravedad.

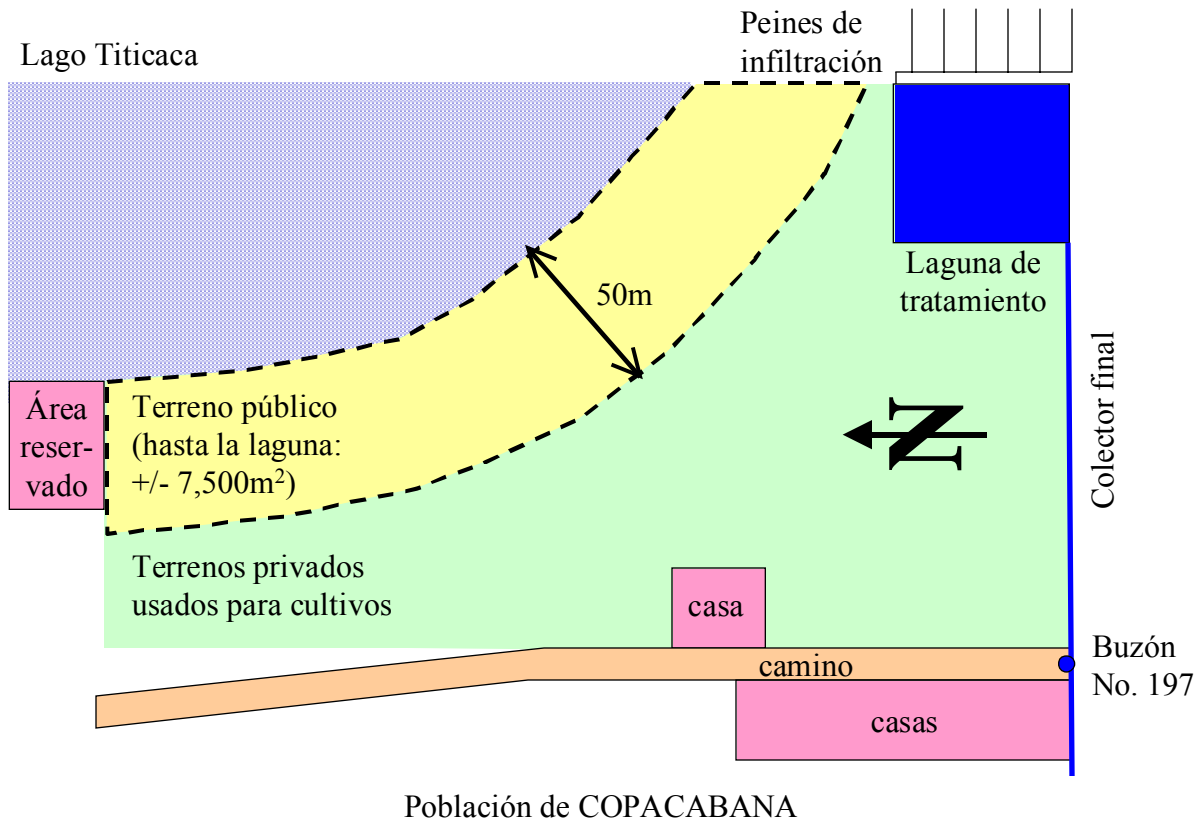


Ilustración 9: Esquema del área disponible para la planta piloto integrado al subsistema No. 2

En la Ilustración 9 se muestra un esquema del área disponible para la planta piloto en el subsistema No. 2. Una franja de 50m desde la orilla del lago Titicaca es terreno municipal. Entre la laguna de estabilización existente y un terreno reservado para otros usos existe un área de más o menos 7.500m<sup>2</sup>, que sería disponible para la construcción de la planta piloto. Si la municipalidad está dispuesta a expropiar los terrenos privados adyacentes a esta franja, el área de construcción se podría expandir a más o menos 11.000m<sup>2</sup>, respetando una distancia de alrededor de 30m desde las últimas casas de la población.

La pendiente en la franja de 50m desde la orilla no supera 2°. La cota del agua en la laguna de estabilización del subsistema No. 2 es de 3.810,56 metros sobre el nivel del mar<sup>14</sup>. El buzón al inicio del colector final, dónde confluyen todas las aguas del subsistema No. 2, tiene las siguientes cotas:

- Cota solera: 3.810,24
- Cota tapa (terreno) 3.811,49

Ilustración 10: Vista fotográfica del área disponible para la planta piloto integrado al subsistema No. 2. En el primer plan se ve parte de la laguna de estabilización, en el fondo se puede distinguir la muralla del terreno reservado por otros usos.

<sup>14</sup> Cota indicada en el plan del alcantarillado del FIS

## 4.2. Viabilidad del establecimiento de sistemas de tratamiento

### 4.2.1. Planta piloto integrado al subsistema No. 1

#### 4.2.1.1. Viabilidad técnica

Sería conveniente captar las aguas servidas después del tanque de sedimentación existente y llevarlas a las lagunas de la planta piloto. De esta manera se aprovecha del tanque de sedimentación existente. Captar las aguas antes del tanque no tiene sentido, porque las aguas son bombeadas hasta el tanque, que se encuentra en buen estado.

Por debajo del tanque se dispone de un área de 3.000m<sup>2</sup>, donde se podrían construir lagunas con una superficie total alrededor de 2.500m<sup>2</sup> (véase Ilustración 7). La construcción de lagunas en esta área no pone mayores problemas técnicas. Sin embargo, esta superficie es demasiado pequeño y sólo se podrían tratar las aguas servidas de 500 a 1.250 habitantes<sup>15</sup>.

El uso del área por encima del estanque de sedimentación se dificulta por la fuerte pendiente del terreno (alrededor de 15°). Existen dos posibilidades para poder utilizar esta área para la construcción de lagunas:

1. Tapar el estanque de tratamiento existente y bombear las aguas a la primera laguna con totora, que se construiría a una cota superior a la del tanque
2. Excavar el terreno para poder llevar las aguas por gravedad desde el tanque a la primera laguna con totora.

La primera opción no parece muy factible, ya que implicaría aumentar el desnivel del bombeo y reducir el caudal bombeado. En el diseño inicial del sistema de tratamiento se preveía un caudal de impulsión de casi 60 l/s, tomando en cuenta un horizonte de 20 años (desde 1995) y un consumo de agua potable de 120 l/habitante. Sin embargo, el caudal de impulsión medido con las dos bombas en funcionamiento era de sólo 4.3 l/s. En el período entre el 12 y el 28 de diciembre se estimó un tiempo de bombeo diario de 9.5 h/día (véase Anexo 1). Para los caudales actuales de aguas servidas del subsistema No. 1 el bombeo parece ya estar cerca del límite de su capacidad (véase 3.2.2.2).

La opción de excavar el terreno para poder llevar las aguas por gravedad desde el tanque de sedimentación a la primera laguna con totora es más factible. Para hacer un terraplén de 50m de ancho, habría que excavar unos 20.000m<sup>3</sup> para obtener un terreno de construcción de 50x50m<sup>2</sup> (2.500 m<sup>2</sup>). El talud tiene que tener una pendiente menor de 45°, para impedir deslizamientos y la erosión.

Si se considera un nivel del lago Titicaca “de diseño” de 3.811m, el funcionamiento hidráulico de la planta sería garantizada durante 90% del tiempo (véase Ilustración 4). Con este nivel de diseño se dispondría de casi 6 metros de desnivel entre la salida del tanque de sedimentación y el lago. Esto es suficiente para poder construir rápidos artificiales entre las lagunas con el fin de oxigenar el agua y aumentar la eficiencia de la planta de tratamiento y para seguir usando los peines de infiltración (véase capítulo 3.2.3).

---

<sup>15</sup> La superficie de diseño es de 2 a 5m<sup>2</sup>/habitante

#### **4.2.1.2. Viabilidad social y económica**

La población de Copacabana aceptaría fácilmente la implementación de una planta piloto en el área de tratamiento del subsistema No. 1, porque el área es bastante alejada de las zonas habitadas y porque no hay que expropiar terrenos. Todo el área pertenece a la municipalidad y está previsto para fines de tratamiento de las aguas servidas. El único problema en este sentido podría consistir en la escuela técnica en construcción en la vecindad. Sin embargo, la plantación de arboles alrededor de las lagunas evitaría cualquier molestia por malos olores<sup>16</sup>.

El mayor costo de la construcción en esta área es causado por el movimiento de tierra. La hora maquina de una excavadora cuesta alrededor de 30 US\$. El costo de la excavación de un terraplén a ras del tanque de sedimentación de 50x50 m<sup>2</sup> podría costar alrededor de los 10,000 US\$. Sin embargo, es posible que el material excavado contenga lo suficiente arcilla para ser utilizado en la construcción de las lagunas en el área por debajo del tanque y en el área del subsistema No. 2. La utilización del material excavado evitaría su transporte y el transporte de material de construcción, lo que bajaría los costos de construcción. Se analizará el subsuelo para saber si el material está apto para la construcción de las lagunas.

#### **4.2.1.3. Viabilidad institucional**

La planta piloto de tratamiento con totora se integra al sistema actual de tratamiento, que es propiedad de la municipalidad y manejado por la alcaldía. Después del año inicial de manejo e investigación por MEDMIN, la planta piloto será entregada a la alcaldía, cuyo responsable técnico asegurará la continuación de su funcionamiento.

#### **4.2.1.4. Viabilidad ambiental**

El sistema de tratamiento actual sólo cuenta con un tanque de sedimentación y peines de infiltración. Con este sistema no se logra una purificación satisfactoria de las aguas servidas. Con la implementación de la planta piloto la purificación mejoraría, ya que se las integraría al sistema existente. Se podría observar que la planta piloto imposibilitará una futura ampliación del sistema de tratamiento con lagunas de oxidación /estabilización. Esto es cierto. Sin embargo, se espera lograr una mayor eficiencia del tratamiento con las lagunas con totora que con lagunas de oxidación. Por lo tanto, los terrenos disponibles para futuras ampliaciones del sistema de tratamiento se utilizarán con mayor eficiencia. Del punto de vista ambiental y económico, la integración de lagunas con totora en el actual sistema de tratamiento significa una mejora.

La disponibilidad de desniveles hidráulicas limitadas obligan a determinar un nivel de diseño del lago Titicaca. En otras palabras, se admitiría que en casos extremos de niveles muy altas la planta piloto no puede funcionar y las aguas servidas se llevan desde el tanque de sedimentación a los peines de infiltración, como en la actualidad. Con la fijación de un nivel de diseño se determina la frecuencia con que esto sucede (véase Ilustración 4). Para fijar el nivel de diseño hay que tomar en cuenta el desnivel hidráulico disponible y la mejora del tratamiento que se puede lograr mediante rápidos artificiales para la oxigenación, que necesitan un cierto desnivel hidráulico (véase capítulo 4.2.1.1)

---

<sup>16</sup> Una planta de tratamiento con totora no emite olores, si no se la sobrecarga con materia orgánica.



## 4.2.2. Planta piloto integrado al subsistema No. 2

### 4.2.2.1. Viabilidad técnica

El mayor problema para la construcción de una planta piloto de descontaminación con totora en el área de tratamiento del subsistema No. 2 es el pequeño desnivel hidráulico disponible. La cota del agua en la laguna de estabilización está a 3.810,56 metros sobre el nivel del mar. Esto significa, que durante 22% del tiempo el nivel del lago está igual o superior a este nivel y el sistema desborda (véase Ilustración 4).

Por estas razones hidráulicas no es recomendable captar las aguas servidas en la salida del tanque de estabilización y llevarlas por gravedad a la planta piloto con totora. Para poder asegurar un funcionamiento de la planta piloto durante el 90% del tiempo, el agua tiene que salir de la última laguna a una cota de 3.811 metros y llegar directamente al lago, sin pasar por los peines de infiltración (véase Ilustración 4). Para una planta piloto de 4.000m<sup>2</sup> hace falta un desnivel entre la entrada a la primera laguna y la salida de la última de por lo menos 1.1m<sup>17</sup>. Como consecuencia, el agua tendría que entrar a la primera laguna con totora a una cota igual o mayor a 3.812,1m. Esto se podría lograr captando el agua en el buzón No. 190, en que confluyen las aguas servidas de la parte del norte del pueblo (véase Ilustración 5). La longitud total de los colectores de esta parte del alcantarillado correspondería a 13% de la longitud total de la red de Copacabana. De esta manera se captaría las aguas servidas de 649 personas, suponiendo el número de habitantes conectados a la red es proporcional a la longitud de los colectores<sup>18</sup>. La superficie total de las lagunas con totora para descontaminar este agua debería alcanzar 3.250m<sup>2</sup>.

La alternativa consiste en captar el total de las aguas servidas del subsistema No. 2 en el Buzón No. 197, cuya tapa tiene una cota de 3.811,5 metros (véase Ilustración 5). Lamentablemente sólo se dispone de la cota de la solera del buzón, y habría que averiguar las cotas de los colectores en la entrada al buzón. En el mejor de los casos, los colectores entran al buzón justo por debajo de la tapa. Si la tapa es de 10cm y el diámetro de los colectores de 25cm, la solera de los colectores en la entrada al buzón tendría una cota de 3.811,15. En los 50 metros de tubería para llevar las aguas a la primera laguna con totora y en las lagunas se perderían por los menos 1.35m<sup>19</sup>. Es decir que la cota de salida de la última laguna con totora sería a 3.809,8 metros de altura. En el 40% del tiempo, el lago estaría por encima de esta cota y el sistema sólo funcionaría en promedio durante 6 días por 10 (véase Ilustración 4).

### 4.2.2.2. Viabilidad social y económica

En el taller de capacitación con la población de Copacabana del 10.12.00 los participantes expresaron su preocupación por la cercanía del sistema de tratamiento No. 2 de las últimas casas de la población. Se observó que el futuro desarrollo del pueblo ocuparía las zonas agrícolas alrededor de la laguna, que de esta manera se integraría poco a poco al pueblo. La preocupación es por los malos olores que desprende la laguna existente. Sin embargo, un sistema de tratamiento en buen funcionamiento, y más si se trata de una laguna con totora, no debería oler. Pero el actual sistema está sobrecargado y huele, y la preocupación de la gente es justificada.

A pesar de la cercanía del pueblo, la actual zona de tratamiento de las aguas parece bien situada, ya que cualquier lugar más alejado del pueblo en la bahía pondría las mismas problemas a medida que el pueblo se desarrolle y que las casas se acerquen al tratamiento. La cuesta del terreno facilitaría también la elevación del sistema de tratamiento a una cota más alta. Es probable que los problemas hidráulicos del sistema existente hagan necesario un bombeo de las aguas servidas en el futuro.

<sup>17</sup> Para llegar a esta cifra, se supone que la relación largo/ancho de las lagunas es de 1:3 y la pendiente hidráulica de 1%

<sup>18</sup> 13% de la población actual de 4,717 habitantes

<sup>19</sup> 0.5%\*50m + 1.1m (para 4,000m<sup>2</sup> de lagunas)

La construcción de la planta piloto no resolverá los problemas del actual sistema de tratamiento, aunque se captaría una parte del caudal de las aguas servidas que hoy llegan a la laguna de estabilización. Hay que averiguar si es posible construir la planta piloto de tal manera que modificaciones futuras del sistema de tratamiento no obstaculicen su funcionamiento.

#### **4.2.2.3. Viabilidad institucional**

En cuanto a la viabilidad institucional vale lo mencionado en el capítulo 4.2.1.3.

#### **4.2.2.4. Viabilidad ambiental**

El actual sistema de tratamiento no funciona de manera satisfactoria. Los peines de infiltración parecen tapados, ya que desde la laguna de estabilización el agua tratada fluye por la superficie del terreno hacia el lago. La superficie de la laguna existente es demasiado pequeño para asegurar una buena purificación de las aguas servidas. A esto se deben los malos olores. La implementación de la planta piloto mejoraría esta situación. El caudal captado para la planta piloto aliviaría la laguna existente. Sin embargo hay que estar consciente que por razones hidráulicas no sería posible tratar todas las aguas servidas del subsistema No. 2 (véase 4.2.2.1).

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Algunos datos y cálculos realizados para este informe son preliminares. Esto incluye los caudales de diseño de los sistemas de tratamiento existentes. Estos caudales se han estimado a partir de una medición del caudal de impulsión del bombeo en el subsistema No. 1 y el consumo de energía en un período de 16 días en diciembre (capítulo 3.2.2.2). Para confirmar estas estimaciones, se intentará conseguir la descripción del diseño final adoptado. También sería recomendable confirmar las mediciones de la conductividad hidráulica en las zonas de infiltración por mediciones en laboratorio, para averiguar si el agua que sale de las lagunas de totora puede ser infiltrada por los peines de infiltración (capítulo 3.2.3). Esto es imprescindible para el tratamiento del subsistema No. 2, donde “cada centímetro de desnivel cuenta”. Por las mismas razones de la hidráulica es necesario complementar las frecuencias de los niveles futuros del lago Titicaca, que se han interpolado por un largo rango de niveles (capítulo 0). Estos datos, de los cuales sólo se ha obtenido un resumen, deben existir en el ALT.

La construcción de una planta piloto para las aguas servidas del subsistema No. 2 es problemática por razones hidráulicas y socioeconómicas (capítulos 4.2.2.1 y 4.2.2.3). En vez de construir dos plantas piloto se podría construir una sola planta integrada al subsistema No. 1. Con un mayor presupuesto a disposición, esta planta se podría construir con una superficie total más grande. Del punto de vista científico esta solución ofrece la ventaja de mayor flexibilidad para la adaptación de parámetros y para la experimentación. Es probable que una planta piloto más grande para el subsistema No. 1 tenga la capacidad suficiente para tratar todas las aguas de este subsistema, y de esta manera resolver de una vez los problemas de las aguas servidas de la parte oeste de la ciudad.

Sin embargo, la implementación de una sola planta piloto más grande en el subsistema No. 1 podría provocar el descontento de la población, por dar la preferencia a barrio turístico del pueblo. Esta preocupación fue expresada en el taller de capacitación del 10.12.00. Sin embargo, esta observación se basa también en la falsa idea que las plantas piloto resolverían todos los problemas de las aguas servidas de Copacabana. Hay que tomar en cuenta que es posible que una planta piloto en el área del subsistema No. 2 ya no se pueda utilizar después de un par de años por causa de la renovación y mejora del sistema existente (establecimiento de un bombeo de las aguas servidas).

La decisión sobre la construcción de una o dos plantas piloto se debe basar en un análisis costo/beneficio. Es posible que no se pueda aumentar mucho la superficie total de la planta piloto con la construcción de una sola planta en el subsistema No. 1, debido a la necesidad de excavar un terraplén más grande para poder aumentar la superficie, a costos muy elevados (capítulos 4.1.2, 4.2.1.1 y 4.2.1.2).

El análisis costo/beneficio y los aspectos técnicos y socio/económicos se debería discutir con los responsables del ALT y con la alcaldía para poder decidirse por una o dos plantas piloto.

## **6. ANEXOS**

## Anexo 1: Estimación del tiempo de bombeo y del caudal medio entre el 12.12.00 y el 28.12.00

| Período  | duración |          |                    | consumo         |                |                  | bombeo       |                   | caudales                   |                |                |                    |
|--|----------|----------|--------------------|-----------------|----------------|------------------|--------------|-------------------|----------------------------|----------------|----------------|--------------------|
|  | de       | a        | duración<br>(días) | inicio<br>(kWh) | final<br>(kWh) | consumo<br>(kWh) | total<br>(h) | diario<br>(h/día) | Subsistema 1               |                | Subs.2         | Buzón 190          |
|  |          |          |                    |                 |                |                  |              |                   | total<br>(m <sup>3</sup> ) | medio<br>(l/s) | medio<br>(l/s) | Buzón 190<br>(l/s) |
| 1  | 12/12/00 | 28/12/00 | 16                 | 0               | 530            | 530              | 152,30       | 9,52              | 2358                       | <b>1,71</b>    | <b>1,95</b>    | <b>0,43</b>        |
| Caudal bombeado con 2 bombas en funcionamiento |          |          |                    |                 |                |                  |              |                   |                            |                |                |                    |
| Duración de la medición                        |          |          |                    |                 |                | 5 min.           |              |                   |                            |                |                |                    |
| Revoluciones observadas                        |          |          |                    |                 |                | 29 r             |              |                   |                            |                |                |                    |
| Consumo de energía/revolución                  |          |          |                    |                 |                | 10 Wh/r          |              |                   |                            |                |                |                    |
| Potencial                                      |          |          |                    |                 |                | 3480 W           |              |                   |                            |                |                |                    |
| Caudal de impulsión subsistema 1               |          |          |                    |                 |                | 4,3 l/s          |              |                   |                            |                |                |                    |
| Longitud subsistema 1                          |          |          |                    |                 |                | 7939 m           |              |                   |                            |                |                |                    |
| Longitud subsistema 2                          |          |          |                    |                 |                | 9061 m           |              |                   |                            |                |                |                    |
| Longitud subsistema buzón 190                  |          |          |                    |                 |                | 2000 m           |              |                   |                            |                |                |                    |

## Anexo 2: Estimación de la conductividad hidráulica en los campos de infiltración y de los caudales en función de la altura hidráulica

Para la prueba se hicieron excavaciones en las áreas de infiltración de 45cm x 45 cm de sección y de una profundidad de 75 cm. Se humedeció el fondo para obtener condiciones de saturación y se vertió agua hasta una altura de 15 cm sobre el fondo. En tres ensayo se midió el tiempo que tarda el nivel en bajar 2,5cm y se tomó el promedio. Estos ensayos permiten estimar la conductividad hidráulica del subsuelo en las dos áreas de infiltración.

La superficie total de infiltración se obtiene por la multiplicación de la longitud total de los peines de infiltración y el ancho efectivo, que se estima a 1,20 m<sup>2</sup>/m. Los resultados están resumidos en la siguiente tabla.

| <b>Prueba de infiltración</b>            |                   | <b>Valores</b> |              |
|--|-------------------|----------------|--------------|
| <b>Parámetro</b>                         | <b>unidad</b>     | Subsistema 1   | Subsistema 2 |
| dH/dz                                    | m/m               | 1,1375         | 1,1375       |
| profundidad de la infiltración           | m                 | 0,025          | 0,025        |
| Duración media de la infiltración        | minutos           | 4              | 3,7          |
| flujo q                                  | m/s               | 1,04E-04       | 1,13E-04     |
| Constante de Darcy K <sub>D</sub>        | m/s               | 9,16E-05       | 9,90E-05     |
| Longitud de las tuberías de infiltración | m                 | 250,00         | 252,00       |
| Ancho efectivo                           | m <sup>2</sup> /m | 1,20           | 1,20         |
| Superficie de la infiltración            | m <sup>2</sup>    | 300            | 302          |
| (dH/dz)/Q                                | s/l               | <b>0,04</b>    | <b>0,03</b>  |
| Caudales de impulsión/máximo             | l/s               | 4,30           | 4,91         |
| dH/dz                                    | m/m               | <b>0,157</b>   | <b>0,164</b> |

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**EXPEDIENTES TÉCNICOS DE OBRA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**

(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para  
la Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**EXPEDIENTES TÉCNICOS DE OBRA  
EXPEDIENTE DE COPACABANA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**

(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003



# TABLA DE CONTENIDO

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Información General .....  | 2  |
| 2       | Memoria descriptiva .....  | 3  |
| 2.1     | Caracterización de la problemática a resolver .....                                      | 3  |
| 2.1.1   | Terreno disponible.....  | 3  |
| 2.1.1.1 | Extensión 3  |    |
| 2.1.1.2 | Topografía y desnivel disponible 3   |    |
| 2.1.2   | Integración de la planta piloto al sistema de tratamiento existente .....                | 4  |
| 2.1.2.1 | Captación del agua en el tanque de sedimentación.....                                    | 4  |
| 2.1.2.2 | Alimentación del agua tratada al sistema de infiltración.....                            | 5  |
| 2.1.3   | Optimización del uso del terreno para la planta piloto .....                             | 5  |
| 2.2     | Descripción de la Obra.....  | 6  |
| 2.2.1   | Vista del conjunto.....  | 6  |
| 2.2.2   | Sistema de captación, control y medición de caudal en la entrada a la planta piloto..... | 6  |
| 2.2.3   | Sistema de entrada y salida de las lagunas .....   | 7  |
| 2.2.3.1 | Alimentación de las lagunas por sistemas de infiltración .....                           | 7  |
| 3       | Procedimientos y especificaciones técnicas.....  | 10 |
| 3.1     | Caudales de diseño.....  | 10 |
| 3.1.1   | Caudal de diseño para la carga orgánica .....  | 10 |
| 3.1.2   | Caudal de diseño hidráulico .....  | 10 |
| 3.1.2.1 | Metodología de cálculo.....  | 10 |
| 3.1.2.2 | Estimación del tiempo medio de bombeo y del caudal medio bombeado.....                   | 10 |
| 3.1.2.3 | Hidrograma del caudal de salida a las lagunas y caudal de diseño hidráulico.....         | 11 |
| 3.2     | Perfil hidráulico de la planta piloto .....  | 13 |
| 3.2.1   | Bases de los cálculos .....  | 13 |
| 3.2.1.1 | Medidores de caudal.....   | 13 |
| 3.2.1.2 | Tuberías de conexión entre las lagunas.....  | 14 |
| 3.2.1.3 | Flujo a través del sustrato en las lagunas.....  | 15 |
| 3.2.2   | Perfil hidráulico.....   | 16 |
| 3.2.2.1 | Introducción.....  | 16 |
| 3.2.2.2 | Vista conjunta de todo el sistema.....   | 16 |
| 3.2.2.3 | Detalles entrada y salida del sistema.....   | 18 |
| 3.2.3   | Materiales de relleno para las lagunas (sustratos) .....                                 | 21 |
| 3.2.3.1 | Tipos de sustratos requeridos.....   | 21 |
| 3.2.3.2 | Materiales analizados.....   | 21 |

**1.**

# 1.- Información General

**Nombre del proyecto:**

Planta piloto de descontaminación con totora para las aguas servidas del subsistema No 1 de alcantarillado de Copacabana

**Localización:**

La planta se construye en el terreno de la municipalidad reservado para estos fines, en la orilla del lago Titicaca, a 200m de la playa azul (bahía turística):

|               |             |
|---------------|-------------|
| Departamento: | La Paz      |
| Provincia:    | Manco Kapac |
| Sección:      | 1ª sección  |

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| Latitud sur:    | 16° 9' 49'' |
| Longitud oeste: | 69° 5' 7''  |

**Costo total de la obra**

El costo total de la construcción es de 24'800 US\$ (sin el costo del personal de MEDMIN y SER-ECO)

**Fuente de financiamiento**

|                                    |   |       |
|------------------------------------|---|-------|
| Financiamiento del proyecto 21.06: | 24'800  | US \$ |
| Valor del terreno:                 | Puesto a disposición de la alcaldía de Copacabana |       |

**Duración:**

3 meses

**Entidad ejecutora:**

MEDMIN/SER-ECO

## 2 MEMORIA DESCRIPTIVA

### 2.1 Caracterización de la problemática a resolver

#### 2.1.1 Terreno disponible

##### 2.1.1.1 Extensión

El terreno de construcción disponible por debajo del tanque de sedimentación es rectangular y comprende una superficie de 3'828m<sup>2</sup> (véase Ilustración 11). Sin embargo, el aprovechamiento de toda la superficie disponible para la construcción de lagunas con totora es limitado por las siguientes razones:

1. Es preciso dejar un espacio entre las lagunas y la escuela técnica en construcción, para poder plantar arbustos y arboles que reducirán eventuales malos olores.
2. Es necesario posibilitar el acceso de camiones al tanque de sedimentación para su limpieza. Por ello se deja libre una franja del terreno, por dónde se podrán acceder con camiones al tanque.

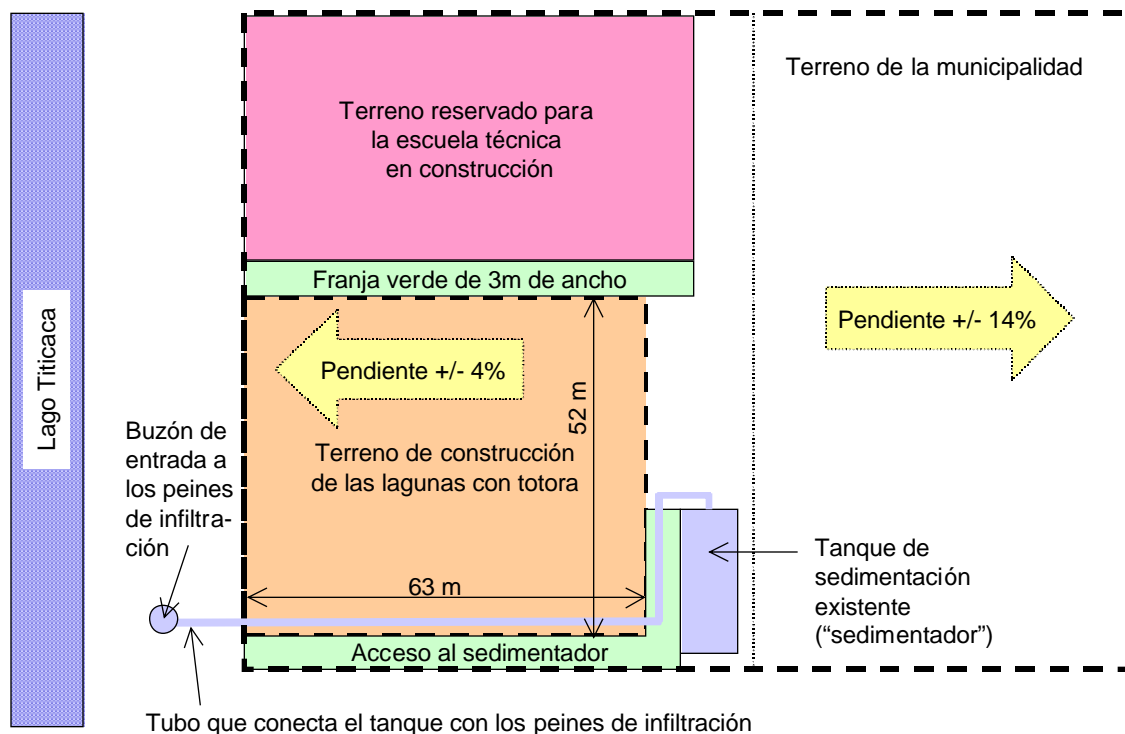


Ilustración 11: esquema del terreno de construcción y de las lagunas

##### 2.1.1.2 Topografía y desnivel disponible

El terreno de construcción sube desde de la orilla del lago Titicaca hacia el tanque de sedimentación con una pendiente más o menos regular de alrededor de 4°.

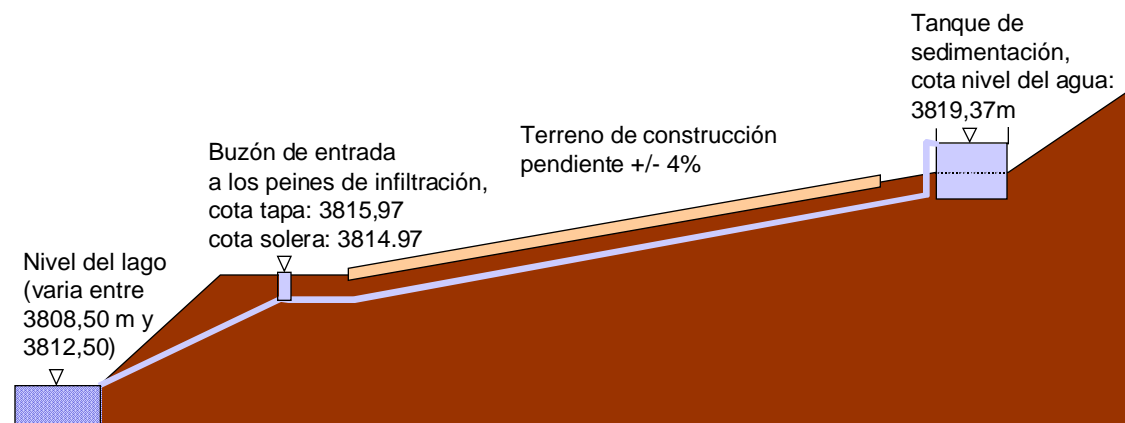


Ilustración 12: esquema del perfil del terreno de construcción

El desnivel entre el punto más bajo del terreno cerca del lago y el nivel del agua en el tanque de sedimentación es de 340cm. Sin embargo, la entrada a los peines de infiltración está a 1 m por debajo del terreno. Para poder infiltrar el caudal de impulsión con las dos bombas en marcha por los peines de infiltración existentes, se necesita una presión hidráulica de 4.5 cm (Tabla 2).

|   |                   |              |
|---|-------------------|--------------|
| Cota del nivel del agua en el tanque de sedimentación   | m                 | 3819,37      |
| Cota del terreno en el buzón de alimentación del sistema de infiltración  | m                 | 3815,97      |
| Profundidad de la entrada al sistema de infiltración  | cm                | 100          |
| Desnivel total disponible   | cm                | 440          |
| Presión hidráulica necesaria para infiltrar el caudal del subsistema No. 1:   |                   |              |
| <i>Conductividad determinada en laboratorio (<math>K_s</math>)</i>  | m/s               | 3,20E-04     |
| <i>Longitud de las tuberías de infiltración</i>   | m                 | 250,00       |
| <i>Ancho efectivo</i>   | m <sup>2</sup> /m | 1,20         |
| <i>Superficie del sistema de infiltración</i>   | m <sup>2</sup>    | 300          |
| <b><i>Caudal de impulsión de 2 bombas en funcionamiento (caudal máximo de entrada y salida del tanque de sedimentación)</i></b> | l/s               | <b>4.3</b>   |
| Presión hidráulica necesaria para este caudal   | cm                | 4.5          |
| <b>Desnivel hidráulico disponible</b>   | <b>cm</b>         | <b>435,5</b> |

Tabla 2: Cálculo del desnivel total disponible. La presión hidráulica necesaria para la infiltración se calculó según la fórmula de Darcy. La conductividad hidráulica del suelo alrededor de los peines de infiltración se determinó en laboratorio.

## 2.1.2. Integración de la planta piloto al sistema de tratamiento existente

### 2.1.2.1. Captación del agua en el tanque de sedimentación

El sistema actual de tratamiento de las aguas servidas del subsistema No. 1 del alcantarillado de Copacabana comprende un sistema de bombeo, un tanque de sedimentación y un sistema de infiltración con peines de infiltración (véase Informe No. 2).

El agua para la planta piloto se captará en la salida del tanque de sedimentación. Como la superficie disponible no permitirá tratar todas las aguas servidas del subsistema No. 1, se debe prever un caño de reboso. El agua no captada seguirá pasando desde el tanque de sedimentación a los peines de infiltración, sin tratamiento adicional.

El problema consiste en alimentar las lagunas con totora con un flujo de agua más o menos constante. Este flujo no debe superar en ningún momento el **caudal de diseño hidráulico**, para asegurar que las lagunas no se inundan (véase capítulo 0). El sistema de captación de caudal tiene que permitir además, que el caudal captado en promedio se puede adaptar a la capacidad de tratamiento de las lagunas (**caudal de diseño para la carga**

**orgánica**). El caudal de entrada al tanque de sedimentación no es constante, porque las aguas servidas llegan diluidas por las aguas de lluvia en el período húmedo (diciembre a febrero). Aunque se trata de un sistema de alcantarillado separado, el agua de las lluvias entra al alcantarillado por malas conexiones y por infiltración.

### **2.1.2.2. Alimentación del agua tratada al sistema de infiltración**

Es conveniente mandar las aguas tratadas en las lagunas con tatora al sistema de infiltración existente, en vez de llevarlas directamente al lago, ya que se trata de un proceso adicional de purificación.

En el sistema actual los peines de infiltración son alimentados desde un buzón, que es conectado al tanque de sedimentación por un tubo de PVC de 16cm de diámetro interno. Cuando este tubo se llena hasta el nivel del tanque de sedimentación, se alcanza una presión máxima de más de 4m de columna de agua. Al conectar la salida de la planta piloto al sistema de infiltración a una cota menor que la salida del tanque, la presión máxima posible es reducida. Sin embargo, los peines permiten infiltrar el caudal máximo de entrada al tanque de sedimentación (4.3 l/s) con una presión de sólo 4.5 cm, como lo demuestra el cálculo a partir de la conductividad hidráulica del suelo alrededor de los peines, medido en laboratorio (Tabla 2).

Si la salida de la planta piloto se conecta al sistema de infiltración a 50cm por encima de la entrada a los peines, la presión máxima posible es suficientemente grande para garantizar la infiltración de todo el caudal. Además, los peines son inclinados hacia el lago y si se llenan, la presión aumenta de 2,5 a 5m, según el nivel del lago (véase Ilustración 12).

### **2.1.3. Optimización del uso del terreno para la planta piloto**

Para aprovechar a lo máximo el terreno disponible, se construirá una sola serie de tres lagunas. Esto permite maximizar la superficie total de las lagunas, que será de 1789m<sup>2</sup>. Si en el futuro se consigue un terreno adyacente al terreno actual, se podrá construir la segunda serie en paralelo.

Si la salida del medidor de caudal al final de la serie se encuentra a 50 cm sobre la entrada al buzón del sistema de infiltración, se dispone de un desnivel desde la salida del tanque de sedimentación de 390cm (véase Ilustración 12 y Tabla 2).

La pendiente de la solera de las lagunas no puede superar el 1%, para evitar el deslizamiento del sustrato arenoso. Sin embargo, el desnivel hidráulico máximo posible dentro de una laguna se alcanza si la salida se coloca a ras de la solera (véase capítulo 0). Si las tres lagunas se construyen de tal forma que se pueda alcanzar el desnivel hidráulico máximo, y tomando en cuenta el desnivel disponible para las conexiones entre las lagunas, aún se dispone de desnivel suficiente para introducir saltos de aireación. La aireación favorecerá la degradación biológica en las lagunas.

## 2.2 Descripción de la Obra

### 2.2.1. Vista del conjunto

Las tres lagunas en serie tienen la misma forma y superficie. Para poder desconectar lagunas como en el caso de dos series, se prevén tubos de “bypass” en cada laguna.

El sistema total comprende un medidor y controlador de caudal al inicio, tres lagunas en serie y un medidor de caudal al final (Ilustración 13). Los medidores de caudales consisten en vertederos triangulares de 60°. Por razones hidráulicas el flujo a través de las lagunas se realiza a lo ancho. Esto permite el uso de un material de relleno (sustrato) con una conductividad hidráulica mucho menor que un flujo a lo largo (véase capítulo 0)

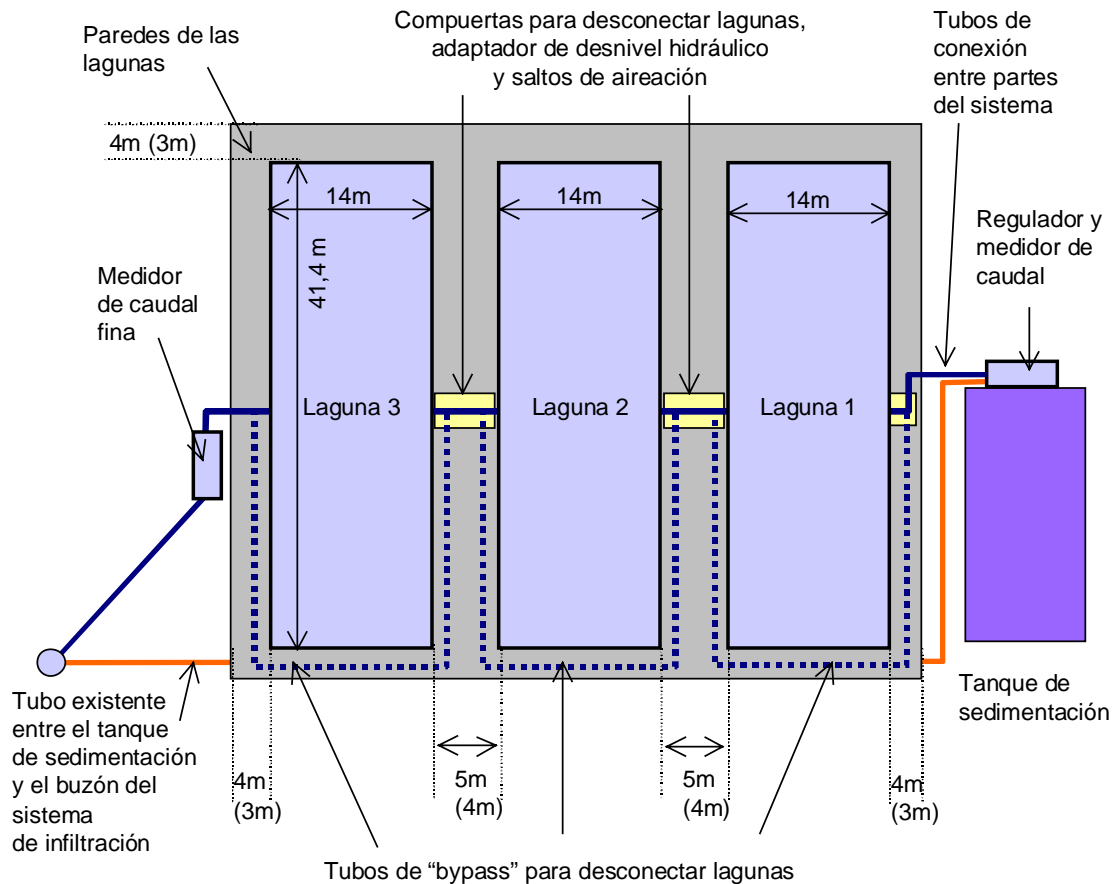
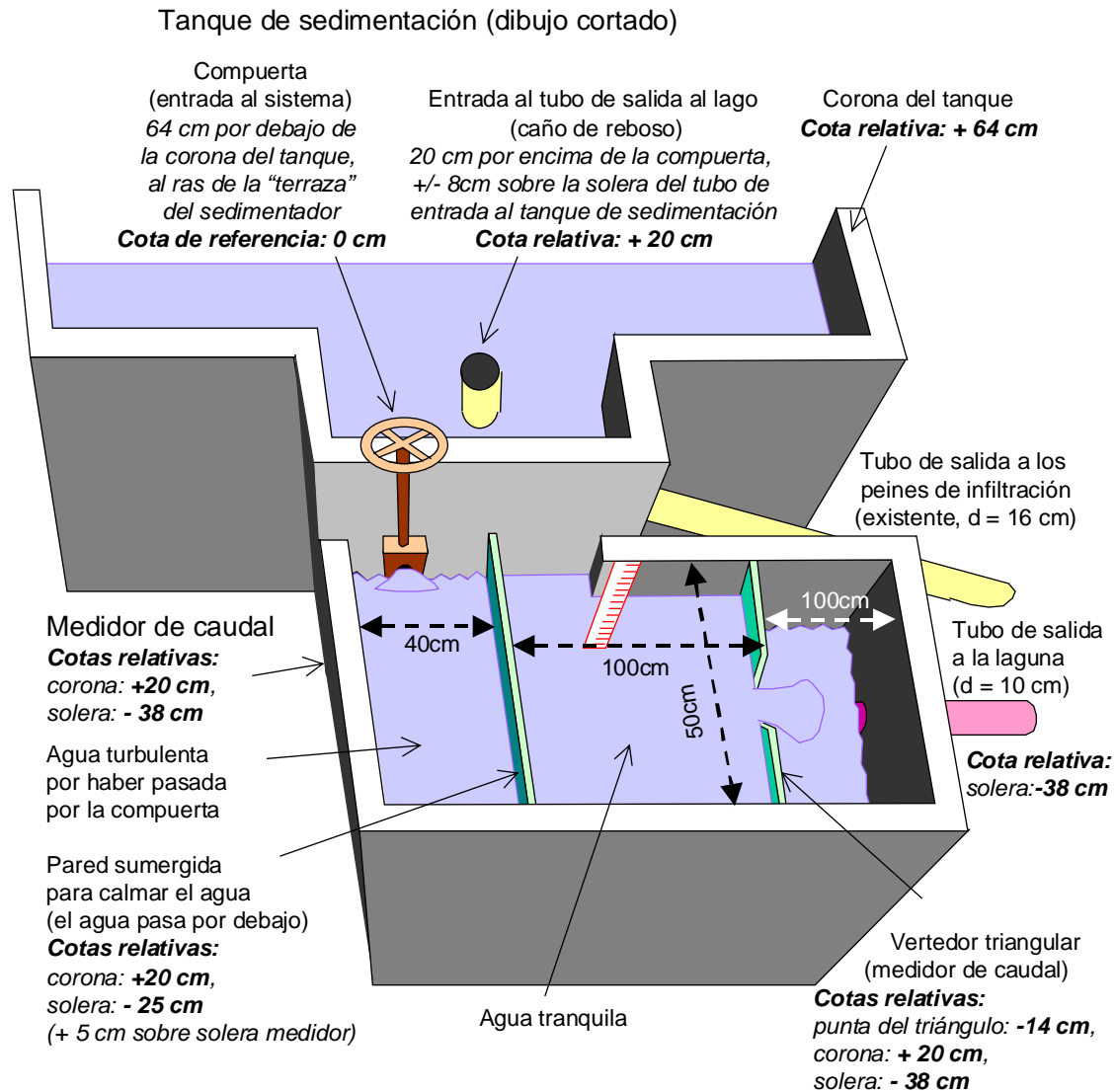


Ilustración 13: Vista de conjunto de la planta piloto. Las dimensiones son indicadas por las cotas de las soleras de las obras. Entre paréntesis se indican las dimensiones a las cotas de las coronas

### 2.2.2. Sistema de captación, control y medición de caudal en la entrada a la planta piloto

El sistema de captación, control y medición de caudal comprende una válvula para la regulación del caudal y un vertedor triangular para la medición del caudal. El caño de reboso del tanque de sedimentación se encuentra a 20cm por encima del orificio de la válvula de control, lo que permite limitar el caudal a las lagunas a 1,5 l/s máximo (véase caudal de diseño hidráulico, capítulo 0). El agua almacenada en el volumen del tanque comprendido entre el orificio de la válvula y el caño de reboso es captada para las lagunas. Este caudal puede ser repartido de manera más o menos regular en el tiempo mediante la regulación de la válvula (véase 0).



*Ilustración 14: Sistema de captación, regulación y medición de caudal en la entrada a la planta piloto. Las cotas relativas se refieren al nivel del orificio de la válvula de salida del tanque de sedimentación (cota cero).*

## 2.2.3. Sistema de entrada y salida de las lagunas

### 2.2.3.1. Alimentación de las lagunas por sistemas de infiltración

Al entrar a las lagunas, el agua debe ser distribuida sobre todo lo ancho de la laguna (frente de infiltración). Por ello se prevé un sistema de infiltración con tubos con agujeros, protegidos por un lecho de piedras gruesas (d=10-12cm), que se ubica por encima del lecho de piedras "manzana" (d=4-8cm) adyacente al sustrato de arena (Ilustración 15). Las piedras gruesas protegen los tubos de infiltración de la irradiación solar y permiten adaptar la pendiente de los tubos para lograr una buena distribución del agua.

Como la pendiente de la solera de las lagunas no puede superar el 1% para evitar el deslizamiento del sustrato, sobra desnivel para poder construir saltos de aireación antes de cada laguna (véase capítulos 0 y 0). Estos saltos consisten de lechos cimentados con piedras, para provocar la turbulencia y aireación del agua (Ilustración 15).

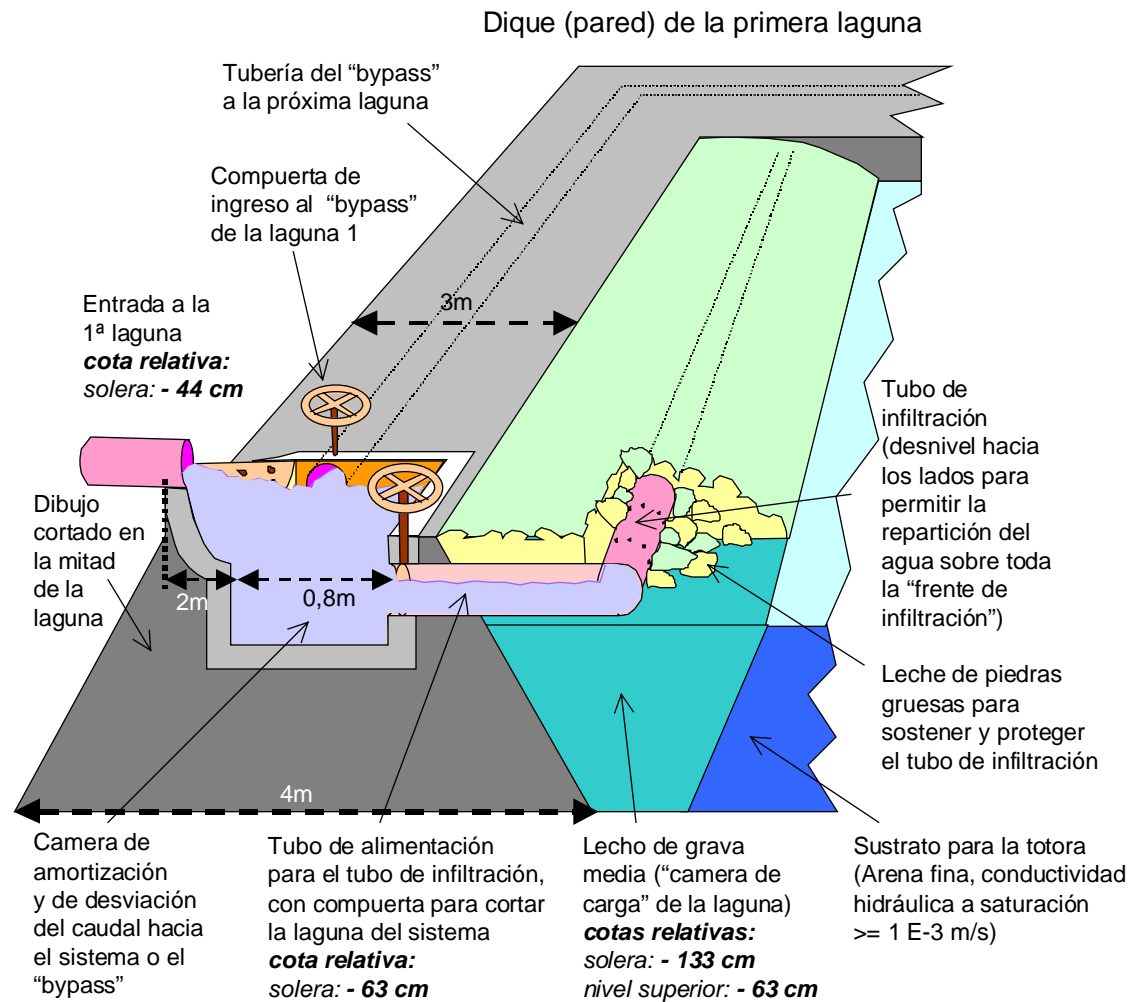


Ilustración 15: Salto de aireación y tubo de infiltración a la primera laguna. Se ve la camera de distribución del caudal a la laguna y el tubo del "bypass". Las cotas relativas se refieren al nivel del orificio de la válvula de salida del tanque de sedimentación (cota cero).

Al final de cada laguna el agua confluye por un tubo de drenaje hacia la salida. El tubo de la salida está conectado a un brazo móvil que permite adaptar el desnivel hidráulica dentro de la laguna. Cuando el brazo está en su posición más baja, el desnivel hidráulico es máximo, mientras que en su posición más alta, el desnivel es mínimo (véase capítulo 0). Desde el brazo móvil el agua pasa otra vez por un lecho de cemento con piedras ("salto") a la próxima laguna (Ilustración 16).



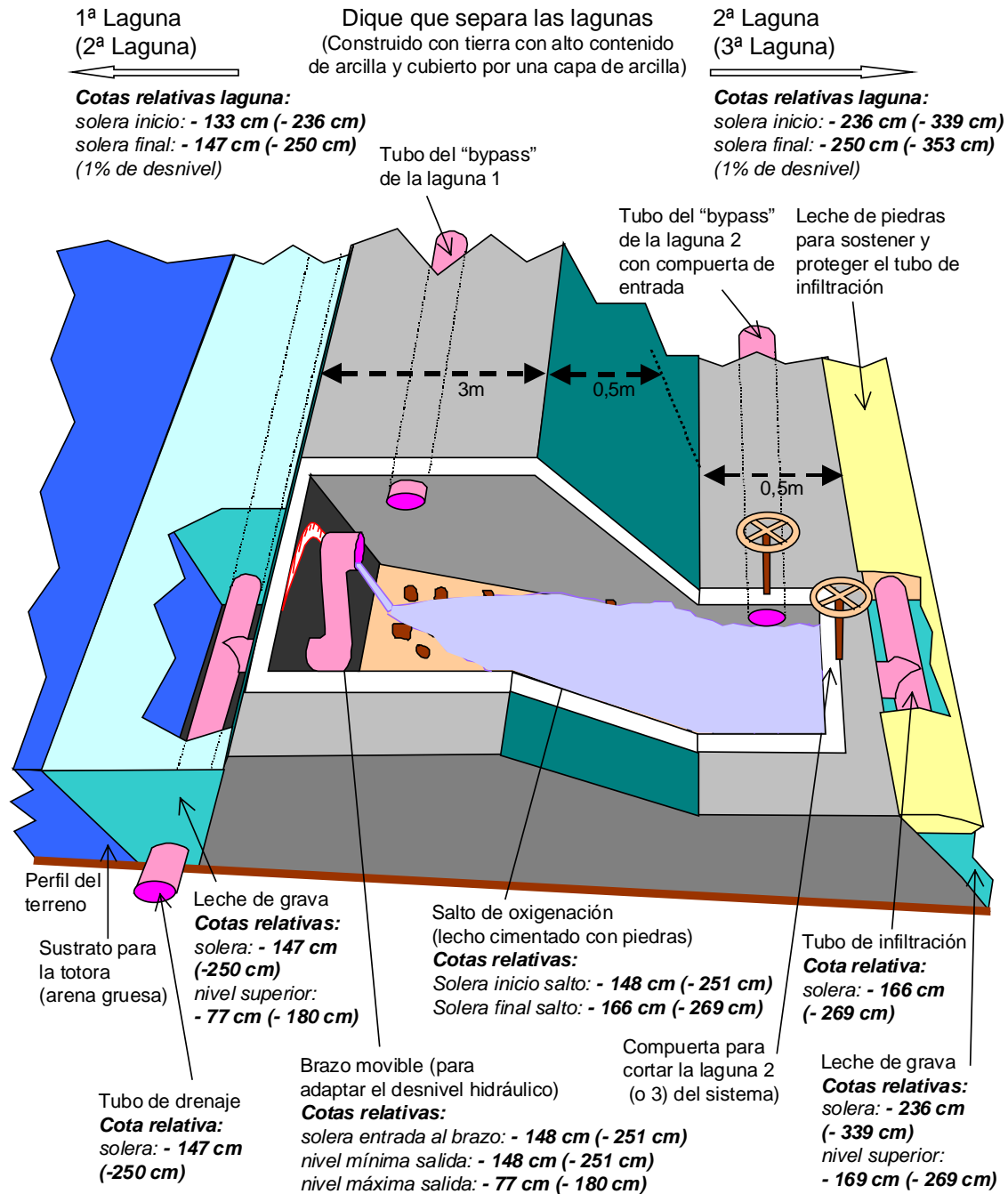


Ilustración 16: Sistema de drenaje al final de una laguna, adaptador de desnivel hidráulico, distribuidor de caudal entre la laguna y el "bypass", salto de aireación y sistema de infiltración a la próxima laguna. Las cotas relativas se refieren al nivel del orificio de la válvula de salida del tanque de sedimentación (cota cero). Están indicadas las cotas relativas de las obras entre la primera y la segunda laguna y entre la segunda y la tercera laguna (cotas entre paréntesis)

### 3. PROCEDIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

#### 3.1. Caudales de diseño

##### 3.1.1. Caudal de diseño para la carga orgánica

Las experiencias hechas con lagunas con plantas acuáticas muestran que se necesita una superficie total entre 2.5-5m<sup>2</sup> por habitante conectado. Para poder estimar el caudal de diseño que se puede tratar con las lagunas con una superficie total de 1789 m<sup>2</sup>, se supone que los caudales por habitante de Copacabana son los siguientes:

- 120 l/día/habitante en época húmeda (diciembre a febrero)
- 80 l/día/habitante en época seca (marzo a noviembre)

Si la estimación se realiza a partir de la superficie por habitante mínima (2.5m<sup>2</sup>/habitante) y el caudal por habitante máximo (120 l/día/habitante), se obtiene el caudal promedio máximo que puede ser tratado por las lagunas (caudal de diseño para la carga orgánica):

$$\text{Caudal}_{\text{ medio}_{\text{ diseño}}} = \frac{1789 \text{ m}^2 \cdot 120 \frac{\text{l}}{\text{habitante} \cdot \text{día}}}{2,5 \frac{\text{m}^2}{\text{habitante}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 1 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Esto es el caudal máximo que se puede llevar a la planta piloto en promedio de algunos días (tiempo de residencia), para no sobrecargarlas biológicamente. Sin embargo, si el sistema resulta ser menos eficaz, es decir, si se necesitan más de 2.5m<sup>2</sup> de superficie por habitante, el caudal de diseño para la carga orgánica será menor.

El caudal de entrada al tanque de sedimentación varía en función del número de bombas en funcionamiento (una o dos bombas) o es igual a cero cuando las bombas están apagadas. Las variaciones del caudal de entrada resultan en cambios del nivel del agua dentro del tanque de sedimentación, lo que influye sobre el caudal captado para alimentar a las lagunas. El caudal instantáneo captado puede ser mayor que el caudal de diseño de la carga orgánica de 1 l/s, siempre y cuando este caudal no se sobrepase en promedio de algunos días (tiempo de residencia). Por ello, en el próximo capítulo se estimará el caudal instantáneo máximo que puede llegar a la laguna, para el caso de un caudal medio captado de 1 l/s. Este caudal se tomará como caudal de diseño hidráulico.

##### 3.1.2. Caudal de diseño hidráulico

###### 3.1.2.1. Metodología de cálculo

Para estimar el caudal instantáneo máximo captado para las lagunas se debe conocer el hidrograma del caudal de entrada al tanque de sedimentación. Como no se dispone de registros de caudales bombeados, se considera el caso de un hidrograma “extremo”, en el cual el caudal de diseño hidráulico alcanza su máximo. Por ello se supone:

- que se bombea siempre con las dos bombas en marcha
- que se bombea de manera ininterrumpida durante el tiempo medio de bombeo diario

La toma en cuenta de un ciclo diario se justifica por el hecho de que el consumo de agua potable y la producción de aguas servidas están también sometidos a un ciclo diario.

A partir del hidrograma de entrada “extremo” se estiman las variaciones del nivel del agua en el tanque de sedimentación, lo que permite determinar el hidrograma del caudal captado para las lagunas por un determinado caudal medio captado (1 l/s).

###### 3.1.2.2. Estimación del tiempo medio de bombeo y del caudal medio bombeado

El caudal medio bombeado se estima a partir del consumo de electricidad de la estación de bombeo en época húmeda, de la potencia de las dos bombas en marcha y del caudal bombeado (caudal de impulsión), también para las dos bombas en marcha (véase Tabla 3). Esta aproximación es más exacta, si la eficiencia del bombeo varía poco con una o dos bombas en marcha.

El consumo de electricidad en los períodos considerados permite estimar el tiempo medio de bombeo, suponiendo que siempre se está bombeando con dos bombas. Las simulaciones han mostrado que de esta manera el caudal instantáneo captado alcanza su valor máximo. El hidrograma de entrada “extremo” es el siguiente:

- 11,5 horas de bombeo diario con un caudal de impulsión de 4,3 l/s
- 12,5 horas sin bombeo

| Tiempo de bombeo diario medio y del caudal medio bombeado en época húmeda |          |          |          |         |       |   |        |              |              |             |
|---|----------|----------|----------|---------|-------|---|--------|--------------|--------------|-------------|
| Período observado   | duración |          |          | consumo |       |   | bombeo |              | Subsistema 1 |             |
|   | de       | a        | duración | inicio  | final | total   | total  | diario       | total        | medio       |
|   | (fecha)  | (fecha)  | (días)   | (kWh)   | (kWh) | (kWh)   | (h)    | (h/día)      | (m³)         | (l/s)       |
| 1   | 12/12/00 | 28/12/00 | 16       | 0       | 530   | 530   | 152,30 | <b>9,52</b>  | 2358         | <b>1,71</b> |
| 2   | 28/12/00 | 26/01/01 | 29       | 530     | 1696  | 1166  | 335,06 | <b>11,55</b> | 5187         | <b>2,07</b> |
| Datos bombeo con 2 bombas en funcionamiento                               |          |          |          |         |       | comentario  |        |              |              |             |
| Duración de la medición   |          |          |          | 5 min.  |       | Lectura en el contador de electricidad de la estación de bombeo, con 2 bombas en funcionamiento |        |              |              |             |
| Revoluciones observadas   |          |          |          | 29 r    |       |   |        |              |              |             |
| Consumo de energía/revolución   |          |          |          | 10 Wh/r |       |   |        |              |              |             |
| Potencia  |          |          |          | 3480 W  |       | Valor calculado   |        |              |              |             |
| Caudal de impulsión subsistema 1  |          |          |          | 4,3 l/s |       | Caudal medido en la entrada al tanque de sedimentación, con 2 bombas en funcionamiento          |        |              |              |             |

Tabla 3: Estimación del tiempo de bombeo diario medio y del caudal medio bombeado en época húmeda, con dos bombas en funcionamiento

### 3.1.2.3. Hidrograma del caudal de salida a las lagunas y caudal de diseño hidráulico

Para obtener valores aceptables para el caudal de diseño hidráulico y para el nivel máximo del agua en el tanque de sedimentación, es preciso prever un caño de reboso, por el cual el agua puede pasar directamente al lago. Los hidrogramas en la Ilustración 17 se basan en los siguientes parámetros:

- hidrograma de entrada “extremo” (11,5 horas diarias de bombeo, 4,3 l/s).
- caño de reboso a 20cm sobre la solera de la salida a las lagunas (perdidas hidráulicas: coeficiente de la pérdida hidráulica única en la entrada a la tubería  $k = 0.5$ ; pérdidas lineares en la tubería, diámetro interno = 16cm, según la formula de Hazen-Williams con el coeficiente  $C = 150$ ).
- Salida a las lagunas a 10cm por debajo de la solera de la tubería de entrada (el coeficiente de la pérdida hidráulica única en la válvula de control de caudal depende de la posición de la llave de la válvula. Se tiene que elegir una válvula que permita pasar un caudal de 1,5 l/s con un tirante de 22cm (el Instituto de Hidrología e Hidráulica recomienda una válvula de 2 pulgadas que cumple con este requisito).

Las pérdidas hidráulicas únicas se calculan según la siguiente formula:

$$h_s = k \cdot \frac{Q^2}{S^2 \cdot 2 \cdot g}$$

con:

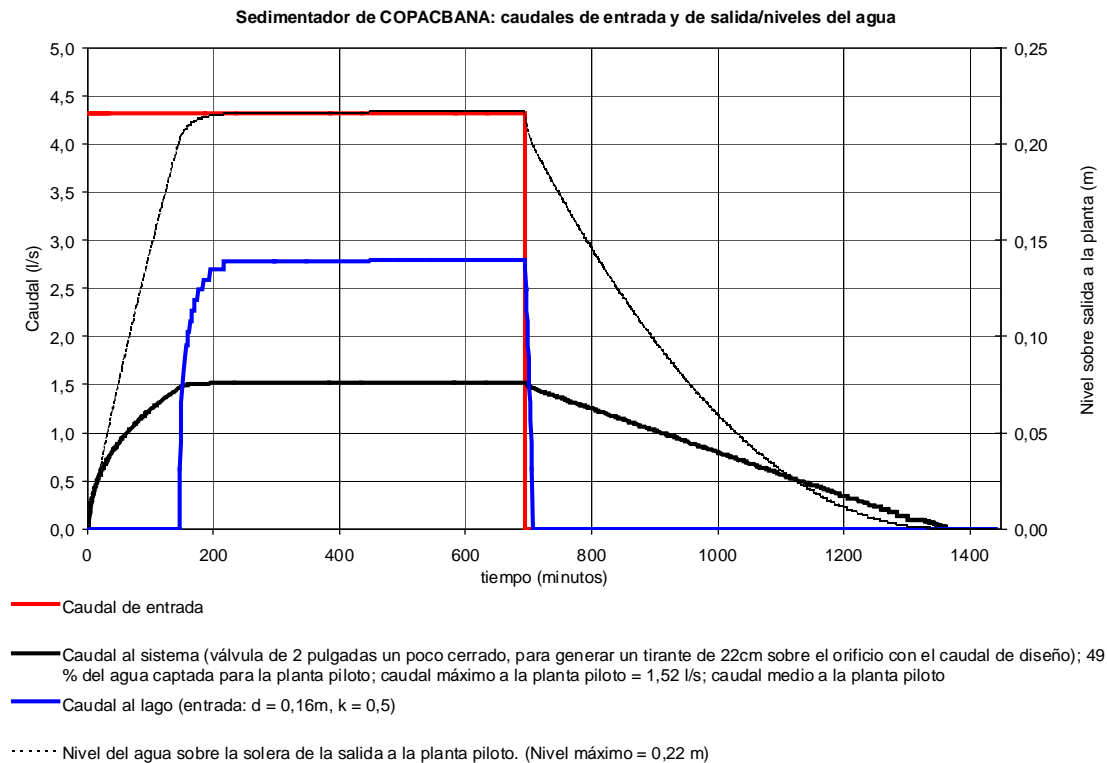
|       |   |  |
|-------|---|--|
| $h_s$ | = | Pérdida hidráulica única (m)                   |
| $k$   | = | Coeficiente de la pérdida hidráulica única (-) |
| $Q$   | = | Caudal (m³/s)                                  |
| $S$   | = | Área de la sección de la tubería (m²)          |
| $g$   | = | Constante gravitacional (9.81 m/s)             |

Las pérdidas hidráulicas lineares en la tubería que alimenta los peines de infiltración al lago se estiman según la fórmula de Hazen-Wiliams:

$$h_L = \frac{10.9 \cdot L \cdot Q^{1.85}}{C^{1.85} \cdot D^{4.87}}$$

con:

- $h_L$  = Pérdida hidráulica linear en tuberías bajo presión (m)
- $C$  = Coeficiente de Hazen-Wiliams (-)
- $Q$  = Caudal (m<sup>3</sup>/s)
- $D$  = Diámetro interno de la tubería (m)
- $L$  = Longitud de la tubería (m)



*Ilustración 17: Hidrogramas de entrada, de salida al lago y caudales captados para las lagunas con titora. Simulación a partir del hidrograma de entrada “extremo” (4,3 l/s durante 11,5 horas diarias seguidas). El caño de rebose se encuentra a 20cm sobre el orificio de la válvula de salida a las lagunas.*

En la Ilustración 17 se puede observar que el caudal de 1,5 l/s no es sobrepasado. Este caudal se elige como caudal de diseño hidráulico. La posibilidad de “almacenar” agua en el tanque de sedimentación entre el nivel del caño de rebose y la válvula permite repartir el caudal irregular de entrada en el tiempo, para obtener a un caudal de alimentación de las lagunas más regular. La Ilustración 17 muestra que el hidrograma de salida a las lagunas se extiende casi sobre todo el día, con un caudal de entrada sólo durante la mitad del día.

La válvula de entrada al sistema permite adaptar el caudal captado y asegurar que siempre llegue agua a las lagunas (véase 0). En época húmeda la mitad del caudal que llega al tanque de sedimentación es rebosado al lago. Sin embargo, en época seca el caudal de entrada al tanque de sedimentación es menor, porque las aguas servidas no son diluidas por la infiltración de aguas de lluvias. Por esto es probable que el caudal en época seca sólo alcanza la mitad del caudal en época húmeda. Esto permitiría que todo el caudal de las aguas servidas se puede llevar a las lagunas, desde el punto de vista hidráulico. Si el sistema puede degradar la carga orgánica contenido en este caudal habrá que ver.

## 3.2. Perfil hidráulico de la planta piloto

### 3.2.1. Bases de los cálculos

#### 3.2.1.1. Medidores de caudal

Las dimensiones del medidor de caudal están indicadas en el siguiente esquema (Ilustración 18). Se expresan como múltiplos de la diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero.

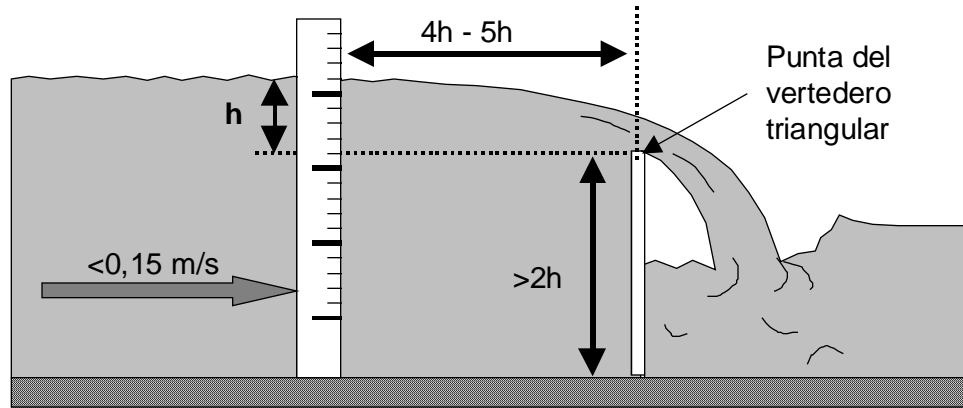


Ilustración 18: Dimensiones del medidor de caudal, expresado en múltiplos de  $h$  (la diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero)

La diferencia de altura  $h$  es una función del caudal  $Q$ , expresado por la siguiente ecuación:

$$Q = 0,533 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot C \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{2,5}$$

con:

|          |   |  |
|----------|---|--|
| $Q$      | = | Caudal ( $m^3/s$ )   |
| $h$      | = | Diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero   |
| $C$      | = | Coefficiente del vertedero que depende de otros parámetros del medidor. Para mediciones en el campo se puede usar un valor constante de 0,59 (-) |
| $g$      | = | Constante gravitacional (9.81 m/s)   |
| $\theta$ | = | Ángulo del vertedero triangular  |

Para el caudal de diseño hidráulico de 1.5 l/s, la diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular (ángulo = 60°) y el nivel del agua antes del vertedero ( $h$ ) es igual a 8 cm. El medidor de caudal se diseña de tal manera que la diferencia de altura entre el nivel del agua antes del vertedero y entre la salida del medidor sea de  $3 \cdot h$ , es decir de 24 cm.

Para garantizar un buen flujo sobre el vertedero, el ancho total del vertedero debe ser igual o mayor a  $5 \cdot h$ , es decir, igual o mayor a 40 cm. Si la cámara del medidor de caudal tiene la misma anchura (40 cm), la velocidad límite del flujo del agua ( $v_{max}$ ) antes del vertedero no es sobrepasada:

$$v = \frac{Q}{\text{Ancho} \cdot 3 \cdot h} = \frac{1,5 \frac{l}{s} \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{l}}{0,40m \cdot 0,24m} = 0,0156 \frac{m}{s} \leq v_{max}$$

### 3.2.1.2. Tuberías de conexión entre las lagunas

Se desea que las tuberías de conexión entre las lagunas no se metan bajo presión, es decir que el flujo sea libre. La fórmula usada para calcular las pérdidas hidráulicas lineares en este caso es la ecuación de Manning-Strickler:

$$Q = k \cdot S \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}}$$

$$R = \frac{S}{P}$$

con:

|     |   |   |
|-----|---|---|
| $Q$ | = | Caudal (m <sup>3</sup> /s)  |
| $k$ | = | Coficiente de Manning-Strickler. Para materiales muy lisas como PVC se elige un valor de 60 |
| $R$ | = | Rayón hidráulico  |
| $S$ | = | Área de la sección "mojada"   |
| $P$ | = | Perímetro de la sección "mojada"  |
| $J$ | = | Pendiente de la tubería   |

Los parámetros de la fórmula de Manning-Strickler se muestran en la Ilustración 19. El área (S) y el perímetro (P) de la sección mojada se pueden aproximar con la siguientes fórmulas:

$$S = \frac{h \cdot (32 \cdot r \cdot h - 13 \cdot h^2)}{6 \cdot \sqrt{8 \cdot r \cdot h - 4 \cdot h^2}}; h \leq r$$

$$P = 2 \cdot r \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right)$$

con:

|     |   |                               |
|-----|---|-------------------------------|
| $h$ | = | Altura del agua en la tubería |
| $r$ | = | Radio de la tubería           |

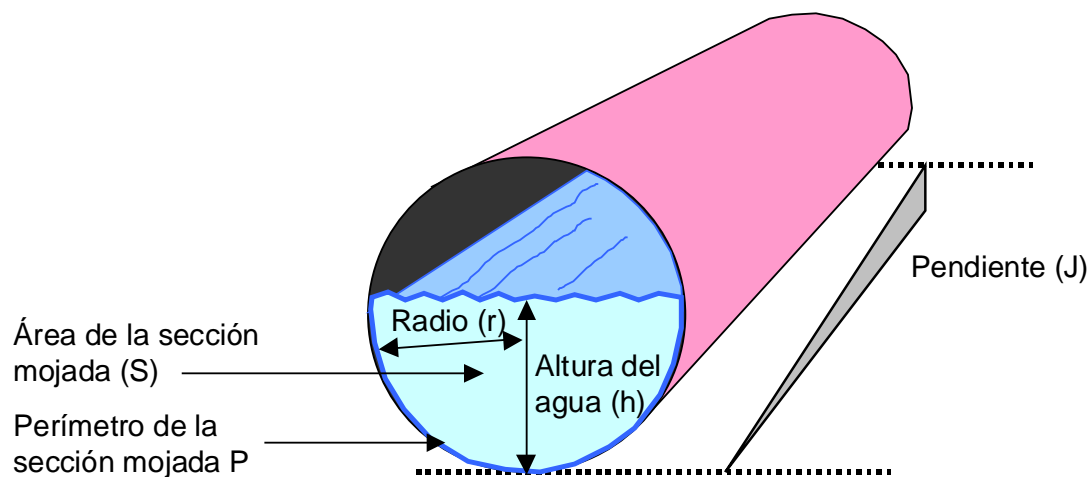


Ilustración 19: Definiciones para calcular el flujo libre en una tubería según la fórmula de Manning-Strickler

Para las tuberías de conexión entre las lagunas los siguientes parámetros permiten un flujo óptimo del caudal de diseño, que evite la sedimentación de partículas:

- Diámetro de la tubería:  $r = 12 \text{ cm}$
- Pendiente de la tubería:  $J = 0.4\%$

Con estos parámetros se alcanzan los siguientes parámetros del flujo **para el caudal de diseño de 1,5 Vs**:

- Altura del agua en la tubería:  $h = 6 \text{ cm}$
- Velocidad del flujo de agua en la tubería:  $v = 26 \text{ cm/s}$

### 3.2.1.3. Flujo a través del sustrato en las lagunas

El flujo de agua a través del sustrato en las lagunas depende de la conductividad hidráulica del material, del gradiente hidráulico y de la superficie de la sección vertical de la laguna, perpendicular al flujo de agua. Se utiliza la fórmula de Darcy:

$$Q = -S \cdot K_s \cdot \frac{dH}{dL} = -S \cdot K_s \cdot \frac{\Delta z + \Delta h}{\Delta L}$$

con:

- $Q$  = Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $K_s$  = Conductividad hidráulica del sustrato saturado de agua ( $\text{m/s}$ )
- $S$  = Superficie de la sección vertical perpendicular al flujo de agua ( $\text{m}^2$ )
- $\frac{dH}{dL}$  = Gradiente hidráulico
- $\Delta z$  =  $z_1 - z_0$  = diferencia de altura entre la entrada y la salida a la laguna
- $\Delta h$  =  $h_1 - h_0$  = diferencia de la presión hidráulica entre la entrada y la salida a la laguna
- $\Delta L$  = Distancia entre la entrada y la salida, medida a lo largo del flujo de agua

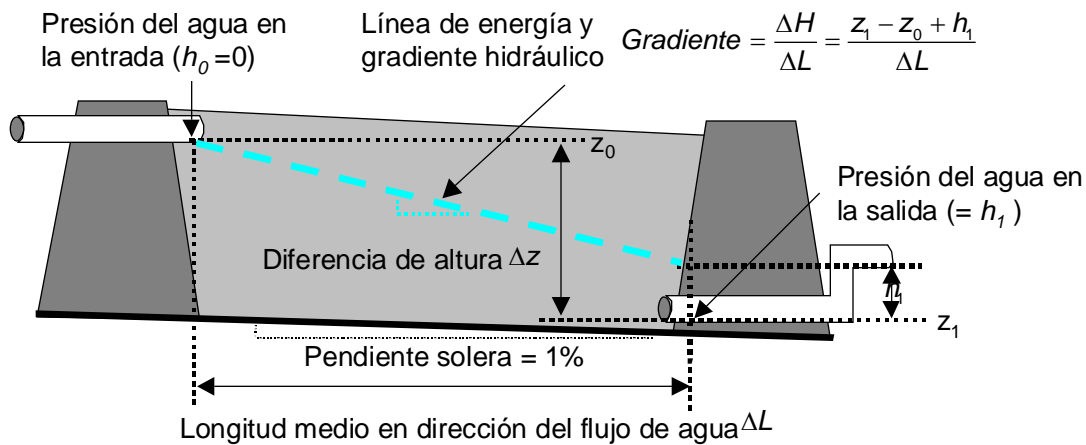


Ilustración 20: Cálculo del flujo de agua a través del sustrato de las lagunas. Corte esquemático de una laguna y definición de los parámetros de la fórmula de Darcy

En la Ilustración 20 se visualizan los parámetros de la ecuación de Darcy. En las lagunas los parámetros tienen los siguientes valores:

- El gradiente hidráulico máximo se alcanza cuando el brazo movable en la salida está en su posición más baja, al nivel de la solera de la laguna (véase capítulo 0). En este caso la presión de agua en la salida ( $h_1$ ) es igual a cero (presión atmosférica) y el gradiente es el siguiente:

$$\frac{dH}{dL} = \frac{\Delta z}{\Delta L} = J_{Laguna} + \frac{D_{Laguna} + h_{tubo}}{L_{Laguna}} = -1\% + \frac{-0,7m + 0,06m}{14,4m} \cdot 100\% = -5,44\%$$

con:

|              |   |  |
|--------------|---|--|
| $J_{Laguna}$ | = | Pendiente de la solera de la laguna  |
| $D_{Laguna}$ | = | Profundidad del sustrato en la laguna  |
| $h_{tubo}$   | = | Nivel del agua sobre la solera del tubo de salida, para el caudal de diseño hidráulico |
| $L_{Laguna}$ | = | Longitud de la laguna en el sentido del flujo de agua                                  |

- La superficie de la sección vertical perpendicular al flujo de agua es:

$$S = D_{Laguna} \cdot W_{Laguna} = 0,7m \cdot 41,4m = 29m^2$$

con:

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| $W_{Laguna}$ | = | Ancho de la laguna (perpendicular a la dirección del flujo de agua) |
|--------------|---|---|

- Aplicando la formula de Darcy, se calcula la conductividad hidráulica necesaria para que el caudal de diseño hidráulico de 1,5 l/s pase por el sistema:

$$K_s = \frac{Q}{-S \cdot \frac{dH}{dL}} = \frac{1,5 \frac{l}{s} \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{l} \cdot 100\%}{-29m^2 \cdot (-5,44\%)} = 10^{-3} \frac{m}{s}$$

## 3.2.2. Perfil hidráulico

### 3.2.2.1. Introducción

El perfil hidráulico se ha establecido a partir de los cálculos en el capítulo 0. En los siguientes párrafos se muestran los perfiles de las soleras de las instalaciones así como el perfil del nivel del agua para el caudal de diseño hidráulico de 1,5 l/s. Las distancias indicadas desde la entrada al tanque de sedimentación se miden a lo largo del flujo de agua.

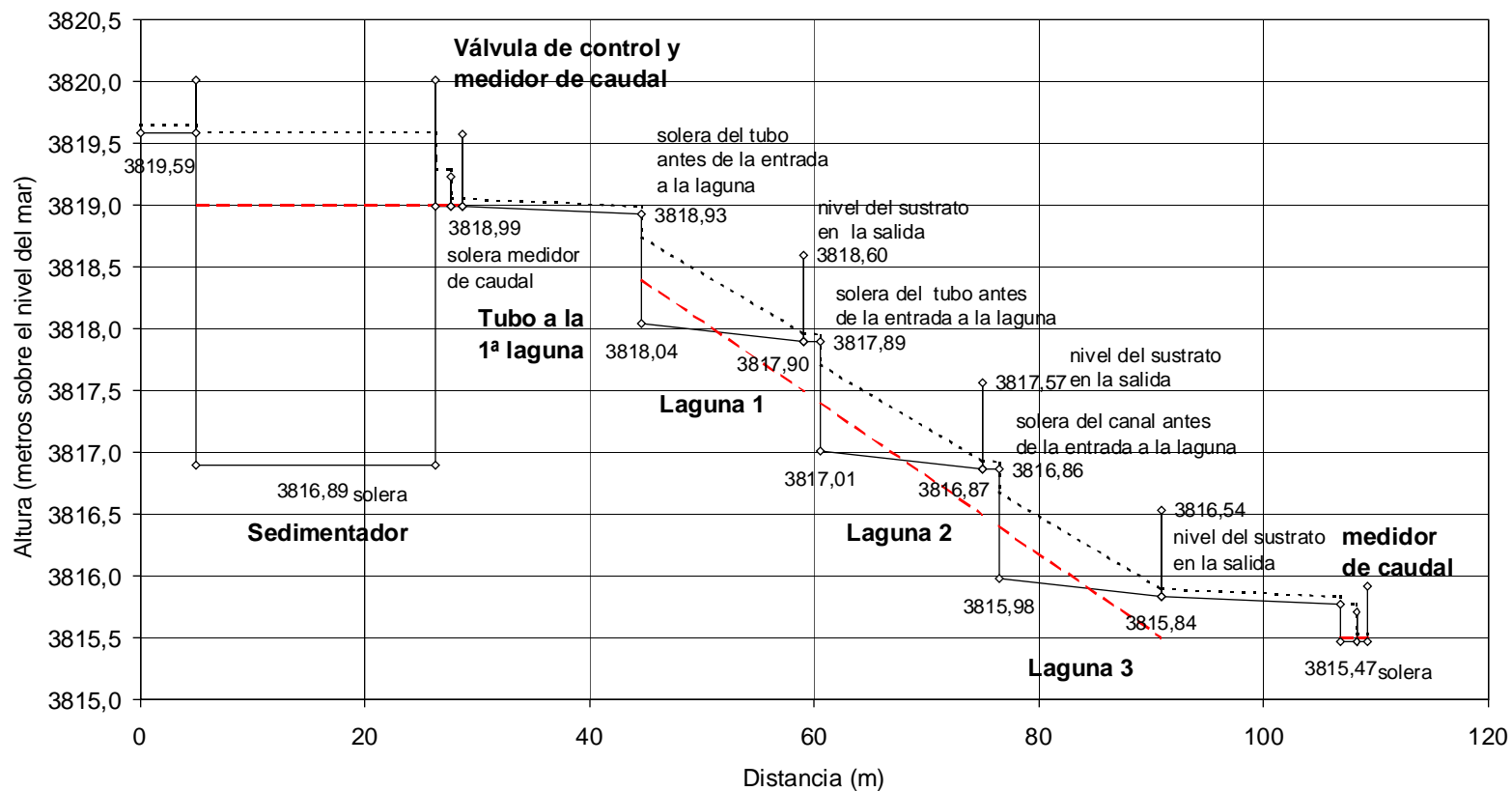
En las ilustraciones se indican los niveles sobre el nivel del mar. Entre dos niveles indicados la altura cambia de manera lineal. Para tener una idea de cómo las instalaciones se adaptan al terreno, se indica el perfil del terreno. Este perfil está interrumpido en las partes del sistema en que el flujo de agua no es unidireccional (por ejemplo tubería a la primera laguna).

### 3.2.2.2. Vista conjunta de todo el sistema

La siguiente ilustración muestra el perfil hidráulico de todo el sistema. Están indicadas las cotas (niveles sobre el nivel del mar) de algunos puntos importantes. Las demás cotas se pueden leer en los perfiles de detalle de los medidores de caudales al inicio y al final de la serie o en los bosquejos de las obras (Ilustración 14, Ilustración 15 y Ilustración 16)



### Perfil hidráulico planta piloto COPACABANA



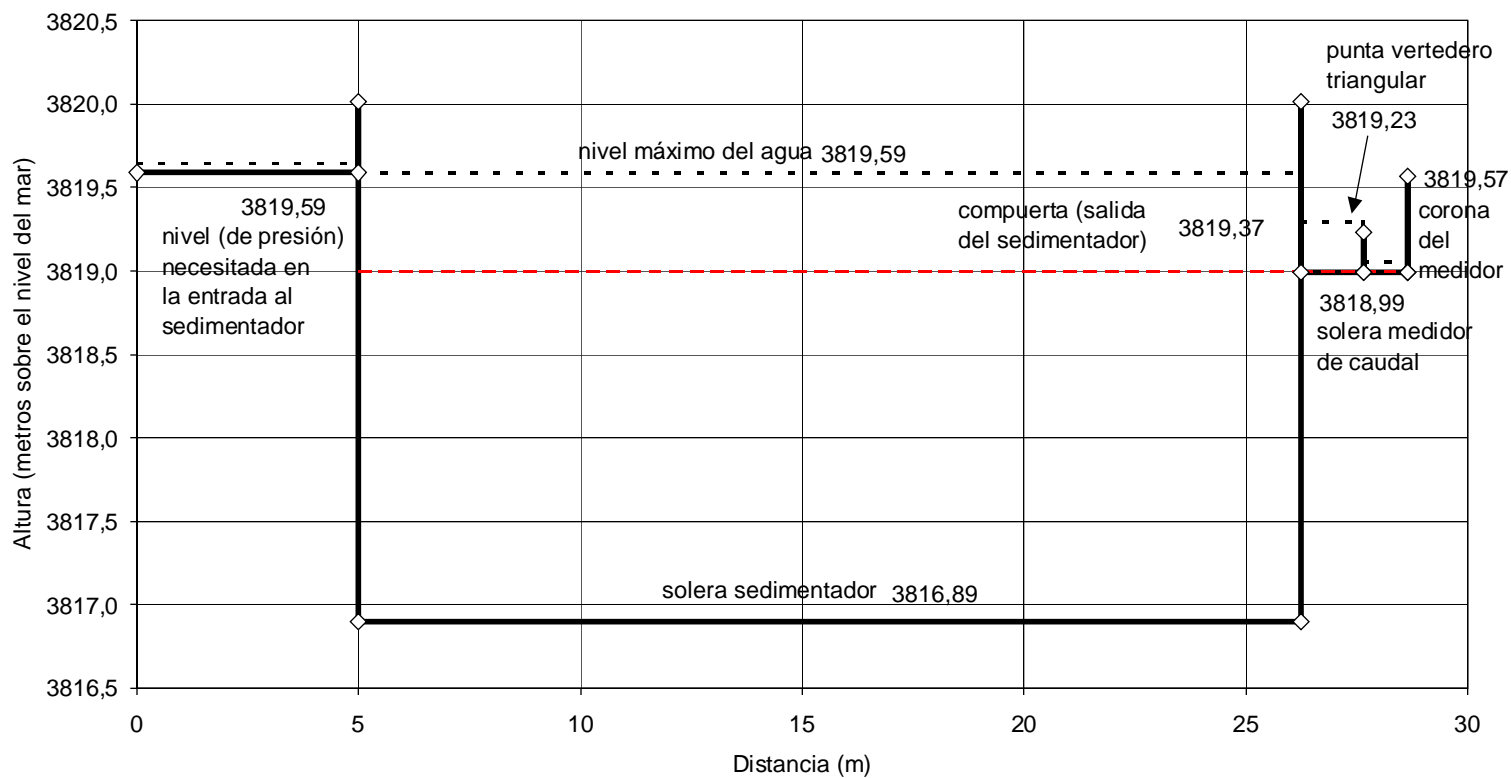
..... Perfil hidráulico: la conductividad hidráulica (Ks) necesaria para el caudal de diseño (1,5 l/s) es de 0,001 m/s; el caudal Q para Ks = 0,005 m/s es de 7,89 l/s; el caudal Q para Ks = 0,001 m/s es de 1,58 l/s

—◇— Perfil de las instalaciones

- - - Terreno (aproximativo)

**3.2.2.3. Detalles entrada y salida del sistema**

**Perfil hidráulico COPACABANA (sedimentador y medidor de caudal)**

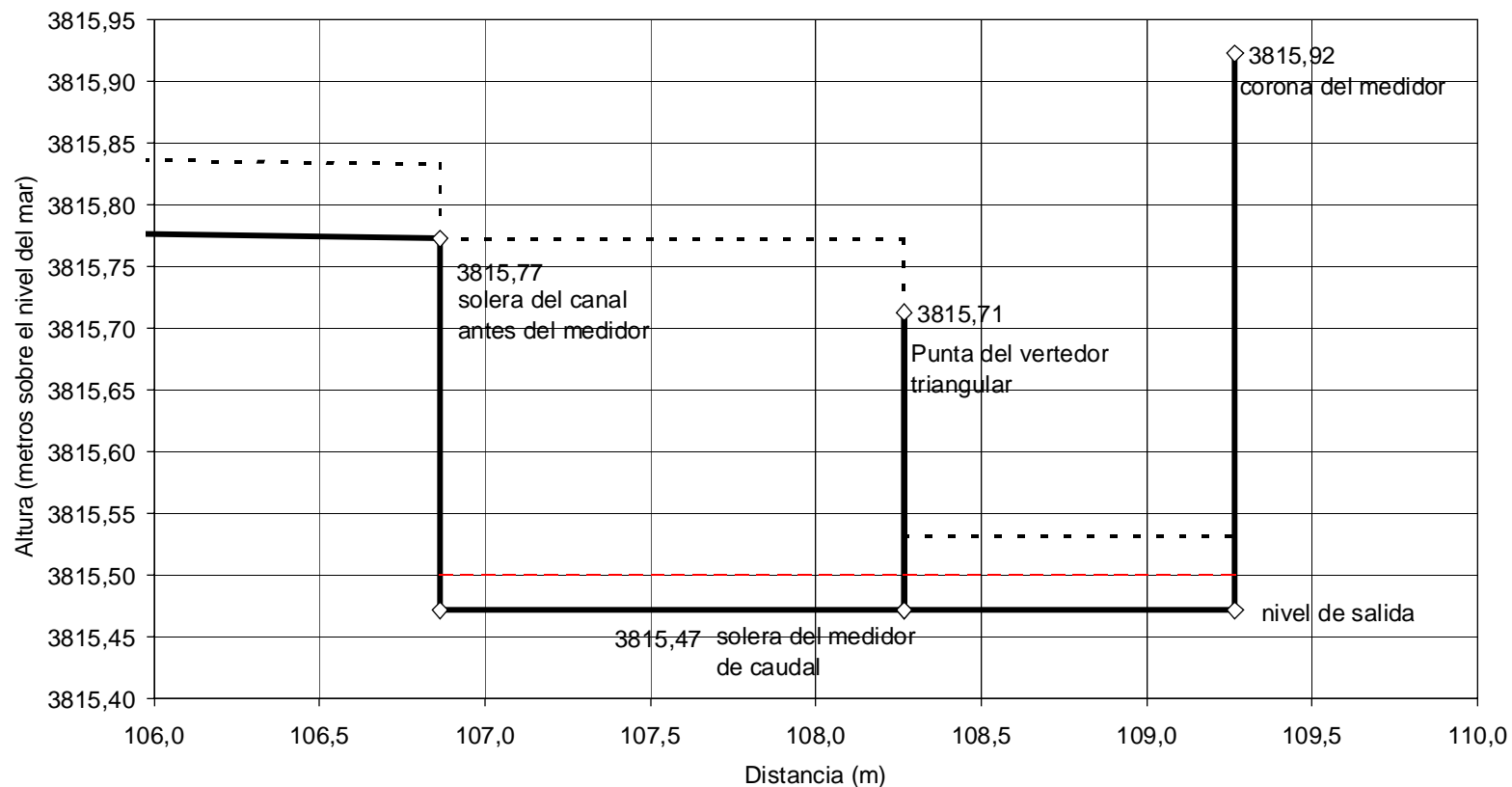


- - - Perfil hidráulico: la conductividad hidráulica (Ks) necesaria para el caudal de diseño (1,5 l/s) es de 0,001 m/s; el caudal Q para Ks = 0,005 m/s es de 7,89 l/s; el caudal Q para Ks = 0,001 m/s es de 1,58 l/s

—◇— Perfil de las instalaciones

- - - Terreno (aproximativo)

### Perfil hidráulico COPACABANA (medidor de caudal al final de la serie)



- - - Perfil hidráulico: la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) necesaria para el caudal de diseño (1,5 l/s) es de 0,001 m/s; el caudal  $Q$  para  $K_s = 0,005$  m/s es de 7,89 l/s; el caudal  $Q$  para  $K_s = 0,001$  m/s es de 1,58 l/s

—◇— Perfil de las instalaciones

- - - Terreno (aproximativo)



### 3.2.3. Materiales de relleno para las lagunas (sustratos)

#### 3.2.3.1. Tipos de sustratos requeridos

Como se ha mostrado en el capítulo 0, se necesita un sustrato para las lagunas que tenga una conductividad hidráulica a saturación de 0,001 m/s. Sin embargo, la conductividad hidráulica inicial del material disminuye por la acumulación de lodos, que provienen de las aguas servidas o que se forman por la descomposición de la materia orgánica. Las experiencias hechas en Europa y EE.UU. muestran, que la conductividad disminuye hasta 10 veces durante los primeros años de funcionamiento. Por esta razón se requería un material de relleno que tenga una conductividad hidráulica de alrededor de 0.01 m/s.

Los lodos son acumulados sobre todo en los primeros metros de la primera laguna. Por ello se utilizará un material más gruesa con una conductividad más elevada como relleno en esta parte de la primera laguna.

Otro parámetro importante del sustrato es la uniformidad de su granulometría. Ésta se expresa de la siguiente manera:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

con:

|          |   |  |
|----------|---|--|
| $U$      | = | Uniformidad de la granulometría                          |
| $d_{60}$ | = | 60% de los granos tienen un diámetro menor de este valor |
| $d_{10}$ | = | 10% de los granos tienen un diámetro menor de este valor |

Cuanto más el valor U se acerca a 1, tanto más uniforme es la granulometría. Como sustrato para las lagunas se debe elegir una material que sea lo más uniforme posible.

#### 3.2.3.2. Materiales analizados

La cantera de donde proviene el sustrato debe encontrarse lo más cerca posible del terreno de la planta piloto, para reducir los costos y el tiempo de construcción, ya que se necesitan grandes cantidades de sustrato (1'252m<sup>3</sup>). El material debe cumplir con los requisitos en cuanto a la conductividad hidráulica y la uniformidad de la granulometría expuesto en el último capítulo.

Para encontrar un material idóneo, se tomaron muestras de varios canteras cerca de Copacabana. De estas muestras estableció la curva granulométrica y se midió la conductividad hidráulica a saturación. Ésta también se puede estimar a partir del  $d_{10}$ , lo que permite una comparación de los valores:

$$K_s \approx \frac{d_{10}^2}{100}$$

con:

|          |   |  |
|----------|---|--|
| $K_s$    | = | Conductividad hidráulica a saturación                    |
| $d_{10}$ | = | 10% de los granos tienen un diámetro menor de este valor |

Los resultados de los análisis están presentados en la Ilustración 21 y en la Ilustración 22.

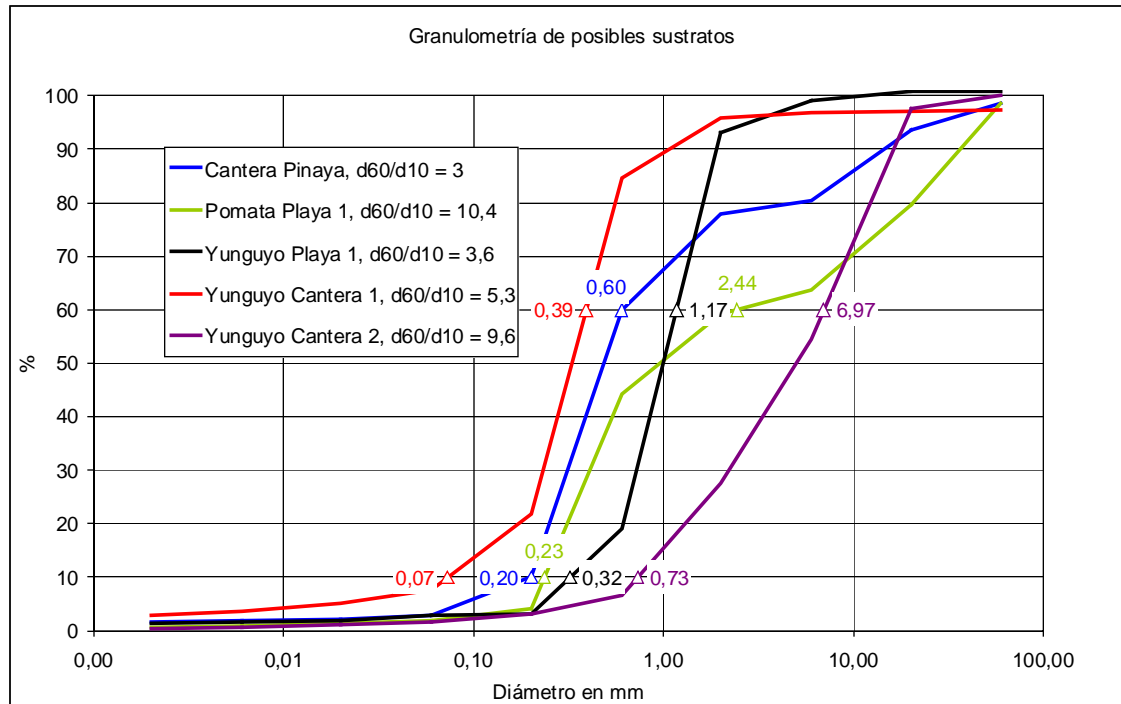


Ilustración 21: Curvas granulométricas de posibles sustratos para las lagunas. Eje X en escala logarítmica.

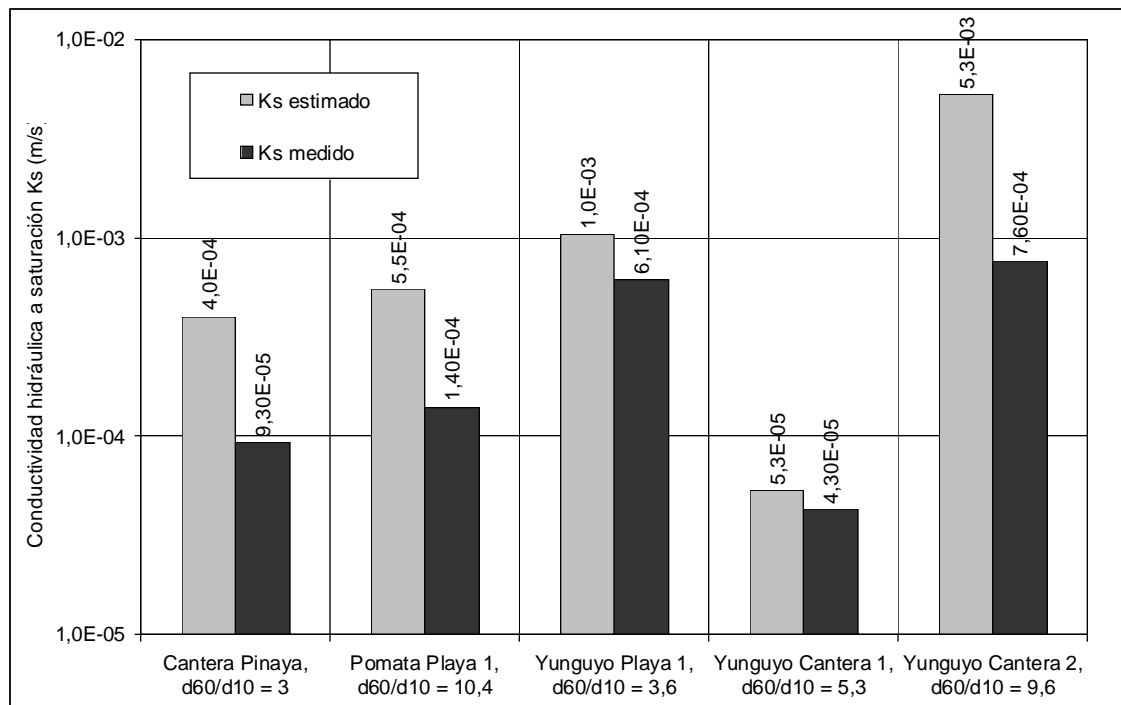


Ilustración 22: Conductividades hidráulicas estimadas a partir de la relación d60/d10 y conductividades medidas en laboratorio de los diferentes sustratos. Escala logarítmica

Se ve que ninguna de las muestras cumple con el requisito de una conductividad hidráulica de alrededor de 0,01 m/s. Los materiales con la conductividad más elevada alcanzan valores alrededor de 0,001 m/s (“Yunguyo playa” y “Yunguyo cantera 2”). El material de “Yunguya playa” es bien uniforme, mientras que la granulometría del material de “Yunguya” cantera 2 es demasiado variado.

Habría que ver si en el lugar “Yunguya playa” se encuentran yacimientos un poco más gruesos y realizar nuevos análisis.

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**EXPENDIENTE TÉCNICO  
DE LA  
PLANTA PILOTO DE DESAGUADERO**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, septiembre de 2001



# **EXEDIENTE TÉCNICO “LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN CON PRUEBAS DEL USO DE TOTORALES PARA LA DESCONTAMINACION EN EL ÁMBITO BOLIVIANO”**

## **INDICE**

### **1. INFORMACIÓN GENERAL**

- A. Nombre del proyecto
- B. Localización
- C. Costo de obra
- D. Duración
- E. Entidad ejecutora

### **2. MEMORIA DESCRIPTIVA**

- 2.1. Generalidades
  - 2.1.1. Antecedentes
  - 2.1.2. Objetivos
  - 2.1.3. Metas
  - 2.1.4. Descripción de los componentes
  - 2.1.5. Beneficiarios
- 2.2. Características de los componentes
- 2.3. Descripción de la obra

### **3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LOS ESTANQUES Y PURIFICACIÓN DE AGUAS SERVIDAS**

#### **A. Obras preliminares**

- 1.1. Trazos y replanteo
- 1.2. Lastrado de caminos
- 1.3. Mantenimiento de caminos
- 1.4. Control de compactación
- 1.5. Movilización

#### **B. Movimiento de tierras**

- 1.1. Desbroce
- 1.2. Conformación de diques compactados
- 1.3. Refine de taludes
- 1.4. Mejoramiento
- 1.5. Relleno con material impermeable ((talud y fondo)
- 1.6. Excavación estructural
- 1.7. Enchapado de piedra
- 1.8. Cámara de inspección
- 1.9. Concreto F°cK = 175 Kg/cm<sup>2</sup>
- 1.10. Acero estructural
- 1.11. Cobertura vegetal (talud exterior)

## **1. INFORMACIÓN GENERAL**

### **A. Nombre del Proyecto**

Planta Piloto de descontaminación con totora para las aguas servidas de alcantarillado de Desaguadero

### **B. Localización**

La planta se construye en el terreno de la Municipalidad, reservado para estos fines en la orilla del Lago Titicaca.

|                 |          |
|-----------------|----------|
| Departamento:   | La Paz   |
| Provincia:      | Ingavi   |
| Latitud Sur:    | 16°9'49" |
| Longitud Oeste: | 69°5'7"  |

### **C. Costo de la Obra**

El costo de la obra, se presenta en el presupuesto cuyo monto es US\$ 61.550.53 (Sesenta y un mil quinientos cincuenta con 53/100 dolares estadounidenses).

### **D. Duración**

La duración de la obra en el cronograma general de la obra, la cual es de tres meses.

### **E. Unidad Ejecutora**

ALT en convenio con la Municipalidad de Desaguadero.

## **2. MEMORIA DESCRIPTIVA**

### **2.1. GENERALIDADES**

#### **2.1.1. ANTECEDENTES**

Los gobiernos del Perú y de Bolivia han suscrito con el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el convenio de asistencia técnica y financiera para la ejecución del Proyecto “Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS), financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial GEF, a ser ejecutado por la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT)

En el marco de ejecución del proyecto PER/98/G-32, Conservación de la biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS), se viene ejecutando el Sub proyecto “Pruebas de uso de totorales para la descontaminación en el ámbito Peruano”, a cargo del convenio MEDMIN y SER-ECO.

#### **2.1.2. OBJETIVOS**

Establecer un sistema de tratamiento de aguas servidas con el uso de totora, en la localidad de Desaguadero.

Rel objetivo del convenio para la presente actividad es la de construir y oerar un sistema de tratamiento de aguas servidas con la finalidad de demostrar el uso de la totora para la descontaminación de afluentes domésticos en desaguadero.

#### **2.1.3. METAS**

Construir un sistema de tratamiento de aguas servidas.

#### **2.1.4. DESCRIPCION DE LOS COMPONENTES**

El sistema de la planta piloto tendrá los siguientes componentes:

- Un emisor de 4” (afluente), el mismo que proviene de la cámara de bombeo, en vista de que el nivel del fondo de los buzones estás a 1.60m y teniendo estas características es necesario construir una cámara de bombeo para elevar a la cota de entrada.
- Una cámara de rejillas que permita retener materiales gruesos y demás objetos extraños a la poza de purificación de aguas servidas; esta estructura es importante ya que del funcionamiento de ésta dependerá la eficiencia y el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas servidas. Para su mantenimiento se requiere personal, que retiren materiales extraños que se acumulen y no obstaculicen el normal ingreso de aguas servidas hacia el sistema proveniente del colector principal.
- Una cámara de distribución y control de caudales, en la que se distribuirá el caudal en dos partes proporcionales hacia los sedimentadores, la misma que estará construida con mampostería de piedra, asentada en concreto 140 kg/cm<sup>2</sup> y emboquillada con mortero de cemento y arena 1:5. Como su nómbrelo indica en un dispositivo en donde se controlará el caudal de ingreso y repartición; dentro del a cámara se construirán los repartidores en forma de vertedero triangular que servirán para controlar el ingreso de l caudal antes de los sedimentadores.

- Dos tanques de sedimentación, en donde se sedimentarán los materiales sólidos en suspensión como arcilla, limos y arenillas, los cuales perjudicarán la eficiencia de la purificación y consecuentemente afectarán la capacidad de tratamiento y fluidez de caudal.
- Un dispositivo de medición de caudales. Una vez que el caudal pase por los sedimentadores se construirán dos dispositivos de medición de caudales, con la finalidad de registrar los caudales de ingreso a los estanques de purificación y sus comportamientos, luego se medirán caudales a las salidas de los mismos.

Según el proyecto inicial se proyectan seis estanques de purificación interconectados.

Respetando al principio del proyecto inicial presentado por MEDMIN, se han construido solamente dos lagunas de purificación, por razones económicas y por condiciones del terreno, pero el funcionamiento será eficiente mientras se cumpla el principio de que a mayor recorrido del flujo del agua será mejor el proceso de oxigenación y por ende la purificación, en cada laguna se realizará con el tratamiento de la totora.

Un pozo de control y medición de caudal por donde se evacuarán las aguas tratadas.

### **2.1.5. BENEFICIARIOS**

Los beneficiarios de esta obra serán 1950 pobladores de la localidad de Desaguadero (BOLIVIA).

## **2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA A RESOLVER**

En los últimos años la población en las diferentes localidades se ha incrementado considerablemente, llegando a constituirse en una fuente de contaminación para el Lago Titicaca por falta de servicios de agua y alcantarillado.

Los problemas a resolver se concentran en el tratamiento de aguas residuales que evacúan las poblaciones cercanas al Lago Titicaca.

En la actualidad la evacuación de aguas servidas son directamente al Lago Titicaca, sin ningún tipo de tratamiento, lo que está ocasionando deterioro ecológico en diversas bahías de Titicaca, con todos estos antecedentes MEDMIN y SER-ECO, preocupados en solucionar estos males plantean la necesidad de construir un sistema de tratamiento de aguas servidas con fines de investigación u demostración, al cual deberá ser de costos de inversión bajos y logre la purificación de sus aguas en forma eficiente, mediante el uso de totorales. También la operación y mantenimiento deberán ser lo más sencillas posible, de tal forma que el sistema funcione con bajos costos y de forma independiente.

### 2.3. DESCRIPCION DE LA OBRA

La obra consta de un conjunto de diques construidos con maquinaria y obras de concreto que son los siguientes.

- Enrocado de material de fundación. Dentro del proceso constructivo es una parte importante, que permitirá mejorar las condiciones del terreno de fundación donde se va a construir la obra, se tendrá que enrocar la base a una altura promedio de 0.50m que servirá para mejorar la capacidad portante del terreno de fundación como se indica en los planos respectivos, tomando en consideración que la máxima subida del lago se produjo en el año de 1986 a la cota de 3812.118 m.s.n.m. la cota de coronación de los diques se han diseñado a las 8313.300.
- Relleno con materia de préstamo. Una vez culminado con el enrocado se deben conformar los diques con material de préstamo de cantera, de acuerdo a los niveles establecidos, los mismos que se encuentran indicados en los planos del proyecto. El material que se utilizará será el más adecuado, es decir con bastante contenido de arcilla, PATRA que se impermeabilice. También se pueden construir los diques con material permeable y luego impermeabilizar los taludes mojado con arcilla.
- Cámara de Rejas. Esta cámara de rejas se construirá de concreto armado, la misma que esta compuesta de 2 pequeñas cámaras y tiene como dimensiones en planta 1.50m x 1.30 y una altura de 1.25m. y la otra de 0.60m x 1.45m en planta y una altura de 1.05m en todo el contorno de la misma, la rejilla será construida de acero corrugado protegido con pintura anticorrosiva, espaciadas a cada 5 cm. Y en ambos sentidos; serán de unidas con soldadura eléctrica y empotradas a la estructura de la cámara y las características del concreto a emplearse será de  $f_c=175 \text{ kg/cm}^2$ , también deberán revestirse el interior de la cámara con un espesor de 1", con mortero cemento; arena de 1:3 Esta estructura tendrá la función de controlar el ingreso de desperdicios, como plásticos, botellas descartables y otros que pondrían en peligro el funcionamiento del sistema, el recojo de los desperdicios será en forma manual y con rastrillo adecuado para el sistema.
- Cámara de distribución y control de caudales. Esta cámara será construida de concreto simple y tiene como dimensiones en planta de 1.30m x 1.05m con una altura de dos niveles de 0.75 y 0.60m respectivamente. El ancho de las paredes de este compartimiento será de 0.10m., dentro de la cámara existe un dispositivo que distribuye en dos partes iguales el caudal de ingreso y además de distribuir, mide y regula el caudal de ingreso, será construido de plancha metálica de 1/16" de espesor y compuerta tipo tarjeta, es de forma triangular y para la distribución de caudales el parapeto será construido de concreto con una resistencia de  $f_c=175 \text{ g/cm}^2$  y revestido con mortero de cemento: arena 1:3.
- Sedimentadores. Primeramente en el proceso de excavación en los sedimentadores se realizaran en forma manual y las dimensiones de la estructura serán como sigue: la coronación en forma longitudinal tendrá 9.00m y la transversal 5.00m con una profundidad de 1.70m, el talud del sedimentador es de 1 : 0.5, el interior de la estructura será revestido con emboquillado de piedra y mortero  $f_c=140 \text{ km/cm}^2$  con un espesor de 0.30m en lo que respecta a la parte superior, la coronación también deberá ser revestida, como consta en los planos respectivos.
- Estanques de purificación. Para las dos lagunas de estabilización cuyas medidas son de 22.95m en la posición longitudinal y 35.20m en la posición transversal como se puede ver en los planos; las alturas de las mismas varían de acuerdo a la pendiente de fondo de los estanques, todos estos detalles se puede observar en los planos del proyecto. La pendiente de fondo de los estanques es de 0.50% en el sentido longitudinal. El material a emplearse en la conformación de la base de los terraplenes será con material de cantera con una

considerable proporción de arcilla, la misma que dará condiciones de impermeabilidad de la misma, todo esto se logrará con una buena compactación de acuerdo a las normas de construcción, en este caso se asemejan a las condiciones de una carretera por lo que deberá aplicar Norma ASTM D – 1556, el cual indica que la compactación deberá aproximarse al 95° de lo ensayado en el laboratorio.

- Dispositivo de filtración. Para el presente trabajo de investigación y de demostración este dispositivo debe jugar un papel importante en la purificación de aguas servidas. De acuerdo al esquema presentado el ingreso de las aguas servidas ya sedimentadas pasa a los estanques de purificación por medio de una tubería de PVC de 4”, el agua servida se distribuye en todo el ancho del estanque por medio de otra tubería de PVC de 3” con una longitud de 35.20m en todos los casos, dicha tubería será cribada; después las aguas servidas pasan a otro sistema de filtración, el cual consta de grava seleccionada y apilada en todo el ancho del estanque, esta grava se seleccionará y apilará en la sección correspondiente de acuerdo a las indicaciones expuestas en los planos y la tubería irá encima de la grava, de tal forma que la filtración sea eficiente. Todo esto concierne aguas arriba del estanque en el sentido del flujo, en aguas abajo del estanque también se colocará grava seleccionada y debajo de ésta irá tubería PVC de 3”, la misma que será cribada, está recogerá el agua filtrada y purificada, por medio de la tubería en forma de U invertida una vez en el siguiente estanque las aguas seguirán el mismo ciclo hasta llegar al último estanque, todo esto se indica en los planos respectivos.
- Dispositivo de evacuación y medición de caudales. Una que se ha recorrido el agua por todo el sistema, llegará a un cámara de la cual servirá para la medición de caudales de salida y toma de muestras para las diferentes etapas de la investigación. Tiene dimensiones de 1.10m x 1.00m en planta y una altura de 0.70m, está conformado de dos pequeñas cámaras, las mismas con una medida de 0.50m. x 1.00m respectivamente. Toda la estructura será construida de concreto simple de una resistencia de 175 Kg/cm<sup>2</sup>, un espesor de la paredes de 1.10 con un espesor de 1”. El dispositivo de medición del caudal será de plancha metálica en forma de triangular y las medidas estará de acuerdo a las indicadas en los planos respectivos.
- Recubrimiento de taludes con emboquillado de piedra y mortero. Inicialmente se planteó recubrir todo el contorno de los taludes con emboquillado de piedra y mortero y por cuestiones presupuestales no será posible ejecutar dicha partida. Solo se realizarán las pozas de sedimentación.
- El manual de funcionamiento, procedimientos y técnicas, justificación de la tecnología propuesta y cálculos de ingeniería; se respeta de acuerdo al proyecto inicial presentado por MEDMIN

### **3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LOS ESTANUES DE PURIFICACIÓN DE AGUAS SERVIDAS.**

#### **A. OBRAS PRELIMINARES**

##### **1.1. Trazos y replanteo**

Comprende los trabajos topográficos, que permiten replantear la obra de acuerdo al plano en el terreno, de modo tal que la obra se lleve a cabo sin ningún tipo de problema, al inicio y durante el proceso de las obras.

Medición y pago. Los trabajos topográficos de trazo y replanteo de obras durante la construcción del sistema de tratamiento de aguas servidas se valorizará por (Glb), de acuerdo a la partida descrita en el presupuesto.

##### **1.2. Lastrado de caminos.**

Como la vía donde se transporta el material es fangoso y accidentado, por tal motivo es necesario lastrar los caminos y confortar una capa de rodadura por donde circulen los volquetes. El material a utilizarse será de la misma cantera de Acero Marca.

El material de relleno, se explana con la moto niveladora, y se humedece con el camión cisterna, para luego nivelarlo y semicompactarlo. Este material tiene 0.30m. de espesor por un ancho de 5m.

Medición y pago. La medición de pago será en (km).

##### **1.3. Mantenimiento de caminos.**

Para una facilidad de circulación de los volquetes se realizó el mantenimiento de caminos hacia la cantera y la obra y se debe realizar este trabajo en forma constante, computándose un metrado total de 5.60km.

Medición y pago. La medición de pago será en (km).

##### **1.4. Control de compactación**

El control de compactación, se realizara por capas de 0.20 a 0.30m de espesor, y se sacarán pruebas en diferentes lugares del coronamiento de cada capa y en donde el supervisor de obras lo señale. El control se verificará de acuerdo a las normas ASTM D-1556, las cuales indican que la compactación deberá aproximarse al 95% de lo ensayado en el laboratorio.

Medición y pago. La medición de pago será en (Glb.).

##### **1.5. Movilización y Desmovilización**

En esta partida se consideran los gastos que se efectuarán en movilizar y desmovilizar todo el equipo que se requiera para la construcción de la obra.

Medición y pago. La medición de pago será en (Glb.).

## B. MOVIMIENTOS DE TIERRA

### 1.1. Desbroce

El desbroce, consiste en eliminar la materia orgánica, raíces de plantas y materiales extraños, para luego realizar el mejoramiento del terreno de fundación de los diques.

La profundidad máxima considerada en esta partida es de 20 a 25 cm, en toda el área de construcción de la estructura.

Medición y pago. La medición de pago será en ( Ha.).

### 1.2. Conformación dediques compactados

Los diques que se construirán, constan de dos pozas de purificación, que tienen una dimensión de 22.95m. x 35.20m. de base con un talud de 1:2 el talud mojado y 1:1.5 el talud seco, con una altura variable de acuerdo a la pendiente de la base tal como se muestra en los planos de igual forma tenemos dos pozas de sedimentación que tienen un talud mojado de 1:1.5. Estos elementos estarán conformados por terraplenes compactados de material de préstamo de la cantera acero marca, cuya distancia a la obra es de 2.8 km.

La coronación de los diques tendrán 4.10m. de anchom cuya cota es de 3.813.30 m.s.n.m.

El material de relleno de tierra sera proveniente de préstamo aprobado por el Residente de Obra, en el que el contenido de finos (material que pasa la malla N°4) es más suficiente para rellenar los intersticios entre las partículas de piedra o roca.

Los terraplenes en tierra deberán ser construidos en capas horizontales a todo lo ancho de la sección y en longitudes que hagan factible los métodos de acarreo, mezcla, riego o secado y compactación usados, las capas serán de 20 cm de espesor máximo, capas de espesor mayor, no serán usados sin su autorización del Ing. Residente de Obra.

Este material para conformación de los terraplenes deberá tener las características Físico – químicos y mecanismos que se indican a continuación:

|  |              |
|--|--------------|
| – Límite líquido (ASTM D - 423)                                      | Máximo 25%   |
| – Índice plástico (ASTM D – 424)                                     | Máximo 6 %   |
| – Equivalente de arena (ASTM D – 2419)                               | Máximo 35 %  |
| – Abrasión (ASTM DC – 131)   | Máximo 25 %  |
| – Partículas chatas y alargadas (ASTM D – 693)                       | Máximo 20 %  |
| – Valor relativo de soporte C.B.R. 2 días                            |              |
| – Inmersión de agua (ASTM D – 1883)                                  | Mínimo 80 %  |
| – Sales solubles totales   | Máximo +/-1% |
| – Porcentaje de compactación del proctor Modificado (ASTM D – 1556)  | Mínimo 100%  |
| – Variación en el contenido óptimo de humedad del proctor modificado | +/- 1.5 %    |

Todo material de la capa de 0.20m será colocado en una superficie debidamente preparada y será compactada en capas de máximo de 30cm de espesor final compactado.



El material será colocado y esparcido en una capa uniforme y sin segregación de tamaño con un espesor tal que después de compactado tenga el espesor requerido.

Se efectuara el extendido con equipo mecánico apropiado o desde vehículos en movimiento, equipados de manera que sea esparcidos en hileras, si el equipo así lo requiera.

Inmediatamente después de terminadas la distribución y el emparejamiento del material, cada capa de este deberá compactarse en un ancho total por medio de rodillos lisos vibratorios, con un peso mínimo de 8 toneladas.

Cada 80 m<sup>3</sup> de material, medido después de compactado, deberán ser sometidos a por lo menos una hora de rodillado continuo.

Dicho rodillado deberá progresar gradualmente desde los contactos hacia el centro en sentido paralelo al eje del camino, y deberá continuar así hasta que toda la superficie haya recibido este tratamiento. Cualquier irregularidad o depresión que surja durante la compactación deberá corregirse aflojando el material en estos sitios y agregando o quitando el material hasta que la superficie resulte pareja y uniforme. A lo largo de las curvas colectores, muros y en todos los sitios no accesibles a el rodillo, el material deberá compactarse íntegramente mediante el empleo de apisonadores mecánicos. El material será tratado con moto niveladora y rodillo hasta que se haya obtenido una superficie lisa y pareja. LA cantidad de cilindrado y apisonado que se indica se considera la mínima, necesaria para obtener una compactación adecuada. Durante el progreso de la operación en Residente de Obra deberá efectuar ensayos de control de densidad, humedad de acuerdo con el método ASTM D – 1556. El Ing. Residente podrá autorizar la compactación mediante el empleo de otros tipos de equipos que los especificados arriba, siempre que se determine que el empleo de otros tipos de equipos alternativos producirá fehacientemente densidades no menores del 100% arriba especificados. El permiso del Ing. Para usar un equipo de compactación diferente deberá otorgarse por escrito y de ha de indicar las condiciones bajo las cuales el equipo deberá ser utilizado.

Medición y pago. La medición de pago será en ( M3.).

### **1.3. Refine de taludes.**

El refine de los taludes de los terraplenes o diques se efectuará con el auxilio de una moto niveladora, es conveniente hacer un retoque manualmente, agregando material faltante y retirando el excedente con el propósito de obtener el perfil y las secciones proyectadas.

Medición y pago. La medición de pago será en ( M2.).

### **1.4. Mejoramiento del terreno de fundación.**

El mejoramiento del terreno de fundación tendrá que ser con material recoso, ya que esto servirá para el mejoramiento de las condiciones de l terreno donde se va ha construir la laguna, el espesor como mínimo que se debe considerar es de 0.50 mtr.

Medición y pago. La medición de pago será en ( M3.).

### **1.5. Relleno con material Impermeable (talud y fondo)**

Esta especificación se refiere al relleno de una capa, en los taludes interiores de las pozas de purificación para impermeabilizarlas según se indica en los planos.

Los materiales serán construidos por limos arcillosos así como con materiales asignados como CL y SC en la clasificación U.S.B.R. que cumplan con los requisitos siguientes, provenientes de canteras disponibles indicadas en los planos.

- Limite liquido: 25 LL 45
- Índice de plasticidad: 5 IP 20
- Permeabilidad: 10 exp.-5 cm/seg
- Materia orgánica: 5%

Medición y pago. La medición de pago será en ( M3.).

### **1.6. Excavación estructural.**

Consiste en la excavación de material suelto a mano para la construcción de las diferentes estructuras, como distribuidor de caudal, cámara de rejillas, medidor de caudal, pozas de sedimentación, por las dimensiones de estas estructuras la excavación se realizará en forma manual.

Medición y pago. La medición de pago será en ( M3.).

### **1.7. Enchapado de piedra**

El enchapado de piedra (el material de la piedra será de basalto negro o de granito de buena calidad), se realizará en los taludes interiores de las pozas de sedimentación, con piedra plana y con mortero de 140 Kg/cm<sup>2</sup>.

Medición y pago. La medición de pago será en ( M2.).

### **1.8. Cámara de Inspección**

Esta cámara de inspección será construida a la salida de la pozas de purificación, que a partir de la cual saldrá e agua hacia el río Desaguadero.

Medición y pago. La medición de pago será en ( und.).

### **1.9. Concreto F'cK=175kg/cm<sup>2</sup>**

Los trabajos de concreto se ejecutarán de conformidad a las especificaciones técnicas establecidas por los siguientes códigos y normas que siguen el orden secuencial de prioridad.

- ACI 318.77 Building Code Requirements
- Concrete Manual – Bureau of Reclamation (octava edición)
- STM
- RNCP
- Norma Boliviana del Hormigón Armado

La calidad del concreto cumplirá con los requisitos de resistencia a la rotura ( $f'c$ ), especificada y durabilidad establecida en los planos.

Medición y pago. La medición de pago será en ( M3.).

### **1.10. Acero estructural**

Todas las varillas de refuerzo se conformarán al os requisitos de las especificaciones ASTM, el acero deberá tener un límite de fluencia de 4200 Kg/cm<sup>2</sup>.

Antes de efectuar la colocación de las varillas la superficie de éstas y la superficie de cualquier soporte metálico de varilla será limpiada de todos los óxidos y escamas, suciedad, grasa y cualquier otra sustancia ajena en pa opinión del inspector será rechazable.

Medición y pago. La medición de pago será en ( KG.).

### **1.11. Cobertura vegetal (talud exterior)**

Este trabajo consiste en la protección del talud exterior con cobertura vegetal, para proteger los taludes, de las lluvias ya que estas provocarán erosiones en los taludes.

Medición y pago. La medición de pago será en ( KG.).

**PRESUPUESTO**

**PRESUPUESTO DE LAGUNA DE ESTABILIZACION  
CON PRECIO UNITARIO PROPUESTO POR EL CONTRATISTA L.C.I.**

| ITEM                                | DESCRIPCION DE LA PARTIDA          | UND. | CANTIDAD | P.U.<br>\$us. | PARCIAL<br>\$us |
|-------------------------------------|------------------------------------|------|----------|---------------|-----------------|
| 1.00                                | OBRAS PRELIMINARES                 |      |          |               |                 |
| 1.01                                | TRAZO Y REPLANTEO                  | GLB  | 1.00     | 2000.230      | 2000.23         |
| 1.02                                | LASTRADO DE CAMINOS                | KM   | 1.00     | 5002.270      | 5002.27         |
| 1.03                                | MANTENIMIENTO DE CAMINOS           | KM   | 5.60     | 90.040        | 504.22          |
| 1.04                                | CONTROL DE COMPACTACION            | GLB  | 1.00     | 499.500       | 499.50          |
| 1.05                                | MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION     | GLB  | 1.00     | 5500.000      | 5500.00         |
| 2.00                                | MOVIMIENTO DE TIERRAS              |      |          |               |                 |
| 2.01                                | DESBROCE                           | HA   | 0.53     | 3998.710      | 2119.32         |
| 2.02                                | CONFORMACION DE DIQUES COMPACTA.   | M3   | 9200.00  | 1.310         | 12052.00        |
| 2.03                                | REFINE DE TALUDES                  | M2   | 3200.00  | 0.500         | 1600.00         |
| 2.04                                | MEJORAMIENTO TERRENO DE FUNDACION  | M3   | 2733.81  | 3.330         | 9103.59         |
| 2.05                                | RELLENO CON MATERIAL IMPERM. TALUD | M3   | 440.44   | 14.97         | 6593.39         |
| 2.06                                | RELLENO CON MATERIAL IMPERM. FONDO | M3   | 337.38   | 7.92          | 2672.05         |
| 2.07                                | EXCAVACION ESTRUCTURAL             | M3   | 469.38   | 3.96          | 1858.74         |
| 2.08                                | ENCHAPADO DE PIEDRA                | M2   | 149.04   | 6.60          | 983.66          |
| 2.09                                | CAMARA DE INSPECCION               | UND  | 1.00     | 219.60        | 219.60          |
| 2.10                                | CONCRETO F'CK= 210 KG/CM2          | M3   | 1.20     | 59.69         | 71.63           |
| 2.11                                | ACERO ESTRUCTURAL                  | KG   | 200.00   | 0.71          | 142.00          |
| 2.12                                | COBERTURA VEGETAL (TALUD EXTERIO)  | M2   | 1300.00  | 2.00          | 2600.00         |
| <b>SUB - TOTAL</b>                  |                                    |      |          |               | <b>53522.20</b> |
| <b>G . G . Y UTILIDADES ( 15% )</b> |                                    |      |          |               | <b>8028.33</b>  |
| <b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>          |                                    |      |          |               | <b>61550.53</b> |

## ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

| ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS                            |                                     |        |          |                   |           |              |
|--|-------------------------------------|--------|----------|-------------------|-----------|--------------|
| PROYECTO : Laguna de Estabilización                      |                                     |        |          | MONEDA DE CALCULO |           | \$us         |
| ITEM : relleno con material impermeable (arcilla ) talud |                                     |        |          | PRECIO ADOPTADO : |           | 17.97        |
| UNIDAD : m3 R = 15 m3/día                                |                                     |        |          | FECHA :           |           | 08/05/02     |
| COMPOSICION GENERAL                                      |                                     |        |          |                   |           |              |
| COD  | DESCRIPCION INSUMOS                 | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO UNITARIO    |           | PARCIAL      |
|  |                                     |        |          | NACIONAL          | IMPORTADO |              |
| 1.00   | <b>MAQUINARIA Y EQUIPO</b>          |        |          |                   |           |              |
| 1.10   | Camión cisterna                     | HM     | 0.009    | 5.00              |           | 0.04         |
| 1.20   | Rodillo liso, manual 0.8 - 1.00Tn.  | HM     | 0.533    | 5.00              |           | 2.67         |
| 1.30   | Herramientas menores (5%)           | %      | 0.050    | 9.11              |           | 0.46         |
| <b>SUB TOTAL MAQUINARIA Y EQUIPO</b>                     |                                     |        |          |                   |           | <b>3.17</b>  |
| 2.00   | <b>MANO DE OBRA</b>                 |        |          |                   |           |              |
| 2.10   | Capataz (0.1)                       | HH     | 0.053    | 3.39              |           | 0.18         |
| 2.20   | Operario (1)                        | HH     | 0.533    | 2.22              |           | 1.18         |
| 2.30   | Oficial (2)                         | HH     | 1.067    | 0.96              |           | 1.02         |
| 2.40   | Peón (15)                           | HH     | 8.000    | 0.84              |           | 6.72         |
| <b>SUB TOTAL MANO DE OBRA</b>                            |                                     |        |          |                   |           | <b>9.11</b>  |
| 3.00   | <b>MATERIALES E INSUMOS EQUIPOS</b> |        |          |                   |           |              |
| 3.10   | Tractor oruga 140 - 160 HP          | HM     | 0.022    | 45.00             |           | 1.00         |
| 3.20   | cargador con llantas 125 HP         | HM     | 0.014    | 42.00             |           | 0.59         |
| 3.30   | Camión volquete 12 m3               | HM     | 0.015    | 25.00             |           | 0.38         |
| 3.40   | Material ( arcilla )                | M3     | 1.300    | 0.57              |           | 0.74         |
| <b>SUB TOTAL MATERIALES E INSUMOS</b>                    |                                     |        |          |                   |           | <b>2.70</b>  |
| <b>COSTO DIRECTO</b>                                     |                                     |        |          |                   |           | \$us 14.97   |
| <b>GASTOS GENERALES (10%)</b>                            |                                     |        |          |                   |           | \$us 1.50    |
| <b>UTILIDADES (10%)</b>                                  |                                     |        |          |                   |           | \$us 1.50    |
| <b>COSTO TOTAL</b>                                       |                                     |        |          |                   |           | <b>17.97</b> |

| ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS                            |                                     |        |          |                   |           |             |
|--|-------------------------------------|--------|----------|-------------------|-----------|-------------|
| PROYECTO : Laguna de Estabilización                      |                                     |        |          | MONEDA DE CALCULO |           | \$us        |
| ITEM : Relleno con material impermeable (arcilla ) fondo |                                     |        |          | PRECIO ADOPTADO : |           | 9.51        |
| UNIDAD : m3 R = 30 m3/día                                |                                     |        |          | FECHA :           |           | 08/05/02    |
| COMPOSICION GENERAL                                      |                                     |        |          |                   |           |             |
| COD  | DESCRIPCION INSUMOS                 | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO UNITARIO    |           | PARCIAL     |
|  |                                     |        |          | NACIONAL          | IMPORTADO |             |
| 1.00   | <b>MAQUINARIA Y EQUIPO</b>          |        |          |                   |           |             |
| 1.10   | Camión cisterna                     | HM     | 0.009    | 5.00              |           | 0.04        |
| 1.20   | Rodillo liso, manual 0.8-1.00Tn.    | HM     | 0.267    | 3.00              |           | 1.33        |
| 1.30   | Herramientas menores (5%)           | %      | 0.050    | 3.63              |           | 0.18        |
| <b>SUB TOTAL MAQUINARIA Y EQUIPO</b>                     |                                     |        |          |                   |           | <b>1.56</b> |
| 2.00   | <b>MANO DE OBRA</b>                 |        |          |                   |           |             |
| 2.10   | Capataz (0.1)                       | HH     | 0.027    | 3.39              |           | 0.09        |
| 2.20   | Operario (1)                        | HH     | 0.267    | 2.22              |           | 0.59        |
| 2.30   | Oficial (1)                         | HH     | 0.267    | 0.96              |           | 0.26        |
| 2.40   | Peón (12)                           | HH     | 3.200    | 0.84              |           | 2.69        |
| <b>SUB TOTAL MANO DE OBRA</b>                            |                                     |        |          |                   |           | <b>3.63</b> |
| 3.00   | <b>MATERIALES E INSUMOS EQUIPOS</b> |        |          |                   |           |             |
| 3.10   | Tractor oruga 140 - 160 HP          | HM     | 0.022    | 45.00             |           | 1.00        |
| 3.20   | cargador con llantas 125 HP         | HM     | 0.015    | 42.00             |           | 0.63        |
| 3.30   | Camión volquete 10 m3               | HM     | 0.015    | 25.00             |           | 0.38        |
| 3.40   | Material ( arcilla )                | M3     | 1.300    | 0.57              |           | 0.74        |
| <b>SUB TOTAL MATERIALES E INSUMOS</b>                    |                                     |        |          |                   |           | <b>2.74</b> |
| <b>COSTO DIRECTO</b>                                     |                                     |        |          |                   |           | \$us 7.92   |
| <b>GASTOS GENERALES (10%)</b>                            |                                     |        |          |                   |           | \$us 0.79   |
| <b>UTILIDADES (10%)</b>                                  |                                     |        |          |                   |           | \$us 0.79   |
| <b>COSTO TOTAL</b>                                       |                                     |        |          |                   |           | <b>9.51</b> |

| ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS        |                           |        |          |                   |           |            |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|----------|-------------------|-----------|------------|
| PROYECTO : Laguna de Estabilización  |                           |        |          | MONEDA DE CALCULO |           | \$us       |
| ITEM : Excavación estructural        |                           |        |          | PRECIO ADOPTADO : |           | 4.75       |
| UNIDAD : m3 R = 25 m3/día            |                           |        |          | FECHA :           |           | 08/05/02   |
| COMPOSICION GENERAL                  |                           |        |          |                   |           |            |
| COD.                                 | DESCRIPCION INSUMOS       | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO UNITARIO    |           | PARCIAL    |
|                                      |                           |        |          | NACIONAL          | IMPORTADO |            |
| 1.00                                 | MAQUINARIA Y EQUIPO       |        |          |                   |           |            |
| 1.10                                 | Herramientas menores (5%) | %      | 0.050    | 3.77              |           | 0.19       |
| SUB TOTAL MAQUINARIA Y EQUIPO .....  |                           |        |          |                   |           | 0.19       |
| 2.00                                 | MANO DE OBRA              |        |          |                   |           |            |
| 2.10                                 | Capataz (1)               | HH     | 0.320    | 3.39              |           | 1.08       |
| 2.20                                 | Peón (10)                 | HH     | 3.200    | 0.84              |           | 2.69       |
| SUB TOTAL MANO DE OBRA .....         |                           |        |          |                   |           | 3.77       |
| 3.00                                 | MATERIALES E INSUMOS      |        |          |                   |           |            |
| SUB TOTAL MATERIALES E INSUMOS ..... |                           |        |          |                   |           | 0.00       |
| COSTO DIRECTO                        |                           |        |          |                   |           | \$us. 3.96 |
| GASTOS GENERALES (10%)               |                           |        |          |                   |           | \$us. 0.40 |
| UTILIDADES (10%)                     |                           |        |          |                   |           | \$us. 0.40 |
| COSTO TOTAL                          |                           |        |          |                   |           | 4.75       |

| ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS        |                           |        |          |                   |           |            |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|----------|-------------------|-----------|------------|
| PROYECTO : Laguna de Estabilización  |                           |        |          | MONEDA DE CALCULO |           | \$us       |
| ITEM : Enchapado de piedra           |                           |        |          | PRECIO ADOPTADO : |           | 7.91       |
| UNIDAD : m2                          |                           |        |          | FECHA :           |           | 08/05/02   |
| COMPOSICION GENERAL                  |                           |        |          |                   |           |            |
| COD.                                 | DESCRIPCION INSUMOS       | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO UNITARIO    |           | PARCIAL    |
|                                      |                           |        |          | NACIONAL          | IMPORTADO |            |
| 1.00                                 | MAQUINARIA Y EQUIPO       |        |          |                   |           |            |
| 1.10                                 | Herramientas menores (5%) | %      | 0.050    | 3.39              |           | 0.17       |
| SUB TOTAL MAQUINARIA Y EQUIPO .....  |                           |        |          |                   |           | 0.17       |
| 2.00                                 | MANO DE OBRA              |        |          |                   |           |            |
| 2.10                                 | Capataz (0.1)             | HH     | 0.080    | 3.39              |           | 0.27       |
| 2.20                                 | Operario (1)              | HH     | 0.800    | 2.22              |           | 1.78       |
| 2.30                                 | Peón (2)                  | HH     | 1.600    | 0.84              |           | 1.34       |
| SUB TOTAL MANO DE OBRA .....         |                           |        |          |                   |           | 3.39       |
| 3.00                                 | MATERIALES E INSUMOS      |        |          |                   |           |            |
| 3.10                                 | Piedra mediana            | m3     | 0.117    | 5.43              |           | 0.64       |
| 3.20                                 | Arena Gruesa              | m3     | 0.053    | 3.88              |           | 0.20       |
| 3.30                                 | Cemento                   | Bls    | 0.400    | 5.49              |           | 2.20       |
| SUB TOTAL MATERIALES E INSUMOS ..... |                           |        |          |                   |           | 3.04       |
| COSTO DIRECTO                        |                           |        |          |                   |           | \$us. 6.60 |
| GASTOS GENERALES (10%)               |                           |        |          |                   |           | \$us. 0.66 |
| UTILIDADES (10%)                     |                           |        |          |                   |           | \$us. 0.66 |
| COSTO TOTAL                          |                           |        |          |                   |           | \$us. 7.91 |

| ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS                         |                           |                |          |                   |           |             |
|---|---------------------------|----------------|----------|-------------------|-----------|-------------|
| PROYECTO : Laguna de Estabilización                   |                           |                |          | MONEDA DE CÁLCULO |           | \$us        |
| ITEM : Hormigón tipo "A" fck = 210 kg/cm <sup>2</sup> |                           |                |          | PRECIO ADOPTADO : |           | 71.62       |
| UNIDAD : m <sup>3</sup>                               |                           |                |          | FECHA :           |           | 08/05/02    |
| R = 10 m <sup>3</sup> /día                            |                           |                |          |                   |           |             |
| COMPOSICIÓN GENERAL                                   |                           |                |          |                   |           |             |
| COD.  | DESCRIPCIÓN INSUMOS       | UNIDAD         | CANTIDAD | COSTO UNITARIO    |           | PARCIAL     |
|   |                           |                |          | NACIONAL          | IMPORTADO |             |
| 1.00  | MAQUINARIA Y EQUIPO       |                |          |                   |           |             |
| 1.10  | Hormigonera de 500 lt.    | HM             | 0.800    | 4.21              |           | 3.37        |
| 1.20  | Vibrador                  | HM             | 0.800    | 2.28              |           | 1.82        |
| 1.30  | Herramientas menores (5%) | %              | 0.060    | 8.62              |           | 0.52        |
| SUB TOTAL MAQUINARIA Y EQUIPO                         |                           |                |          |                   |           | 5.71        |
| 2.00  | MANO DE OBRA              |                |          |                   |           |             |
| 2.10  | Capataz (0.1)             | HH             | 0.080    | 3.39              |           | 0.27        |
| 2.20  | Operario (2)              | HH             | 1.600    | 2.22              |           | 3.55        |
| 2.30  | Oficial (1)               | HH             | 0.800    | 0.96              |           | 0.77        |
| 2.40  | Peón (6)                  | HH             | 4.800    | 0.84              |           | 4.03        |
| SUB TOTAL MANO DE OBRA                                |                           |                |          |                   |           | 8.62        |
| 3.00  | MATERIALES E INSUMOS      |                |          |                   |           |             |
| 3.10  | Cemento portland IP       | kg             | 360.000  | 0.11              |           | 39.60       |
| 3.20  | Arena                     | m <sup>3</sup> | 0.470    | 4.80              |           | 2.26        |
| 3.30  | Grava                     | m <sup>3</sup> | 0.720    | 4.80              |           | 3.46        |
| 3.40  | Agua                      | m <sup>3</sup> | 0.140    | 0.30              |           | 0.04        |
| 3.50  | Aditivos                  | kg             | 0.000    | 0.00              |           | 0.00        |
| SUB TOTAL MATERIALES E INSUMOS                        |                           |                |          |                   |           | 45.36       |
| COSTO DIRECTO   |                           |                |          |                   |           | \$us. 59.69 |
| GASTOS GENERALES (10%)                                |                           |                |          |                   |           | \$us. 5.97  |
| UTILIDADES (10%)                                      |                           |                |          |                   |           | \$us. 5.97  |
| COSTO TOTAL   |                           |                |          |                   |           | 71.62       |

| ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS                       |                           |        |          |                   |           |            |
|---|---------------------------|--------|----------|-------------------|-----------|------------|
| PROYECTO : Laguna de Estabilización                 |                           |        |          | MONEDA DE CÁLCULO |           | \$us       |
| ITEM : Habitación y colocación de acero de refuerzo |                           |        |          | PRECIO ADOPTADO : |           | 0.85       |
| UNIDAD : kg   |                           |        |          | FECHA :           |           | 08/05/02   |
| R = H-370 kg/día                                    |                           |        |          |                   |           |            |
| R = C- 370 kg/día                                   |                           |        |          |                   |           |            |
| COMPOSICIÓN GENERAL                                 |                           |        |          |                   |           |            |
| COD.  | DESCRIPCIÓN INSUMOS       | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO UNITARIO    |           | PARCIAL    |
|   |                           |        |          | NACIONAL          | IMPORTADO |            |
| 1.00  | MAQUINARIA Y EQUIPO       |        |          |                   |           |            |
| 1.10  | Cizalla (corta 3/4")      | HM     | 0.023    | 0.58              |           | 0.01       |
| 1.20  | Herramientas menores (5%) | %      | 0.050    | 0.19              |           | 0.01       |
| SUB TOTAL MAQUINARIA Y EQUIPO                       |                           |        |          |                   |           | 0.02       |
| 2.00  | MANO DE OBRA              |        |          |                   |           |            |
| 2.10  | Capataz (0.1)             | HH     | 0.004    | 3.39              |           | 0.01       |
| 2.20  | Operario (1)              | HH     | 0.043    | 2.22              |           | 0.10       |
| 2.30  | Oficial (2)               | HH     | 0.086    | 0.90              |           | 0.08       |
| SUB TOTAL MANO DE OBRA                              |                           |        |          |                   |           | 0.19       |
| 3.00  | MATERIALES E INSUMOS      |        |          |                   |           |            |
| 3.10  | Alambre de amarrar        | kg     | 0.05     | 0.86              |           | 0.04       |
| 3.20  | Fierro corrugado          | kg     | 1.05     | 0.43              |           | 0.45       |
| SUB TOTAL MATERIALES E INSUMOS                      |                           |        |          |                   |           | 0.49       |
| COSTO DIRECTO                                       |                           |        |          |                   |           | \$us. 0.71 |
| GASTOS GENERALES (10%)                              |                           |        |          |                   |           | \$us. 0.07 |
| UTILIDADES (10%)                                    |                           |        |          |                   |           | \$us. 0.07 |
| COSTO TOTAL   |                           |        |          |                   |           | 0.85       |

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para  
la Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**INFORME DE AVANCE FÍSICO,  
CONCLUSIÓN DE OBRA Y PUESTA EN  
FUNCIONAMIENTO**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003



*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**INFORME DE AVANCE FÍSICO Y  
VALORIZACIÓN DE OBRA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**

(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

## *Informe de avance físico de la Obra* **MEMORIA DESCRIPTIVA DE LA VALORIZACIÓN**

PROYECTO: 21.06 PUEBAS DEL USO DE TOTORALES PARA DESCONTAMINACIÓN EN EL AMBITO BOLIVIANO.

OBRA: SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS “COPACABANA”

1.0 INFORMACION GENERAL

1.1 NOMBRE DEL PROYECTO:

SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS “COPACABANA”

1.2 COSTO TOTAL

VEINTE Y CUATRO MIL QUINIENTOS NEINTE Y UNO 45/100 DÓLARES AMERICANOS (\$us. 24.521.45)

1.2 FINANCIAMIENTO

APORTE PNUD: BOL/98/G32 :\$us. 11.575.22

1.3 UBICACIÓN DEL PROYECTO

UBICACIÓN

LOCALIDAD :COPACABANA

SECCION :PRIMERA

PROVINCIA :MANKO KAPAC

DEPARTAMENTO :LA PAZ

1.4 VIAS DE ACCESO A LA OBRA

SE LLEGA A LA OBRA POR LA CARRETERA ALTERNA A COPACABANA – KASANI Y SE ENCUENTRA A 2 KM. DE COPACABANA.

1.5 ENTIDAD EJECUTORA

Convenio MEDMIN-SER ECO

1.6 MODALIDAD DE EJECUCIÓN

En convenio con la Municipalidad de Copacabana y en Convenio MEDMIN-SER ECO

## **DESCRIPCIÓN DE TRABAJOS EJECUTADOS EN EL PROYECTO**

### **PARTIDA 1.00 . TRABAJOS PRELIMINARES**

Se realizaron los trabajos de trazo y replanteo según el expediente técnico de obra para ello se han utilizado puntos de referencia en el terreno con apoyo de un teodolito, nivel, mira, wincha, flexo metro, cordel, libreta de campo y otros.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 475.20 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 380.00 lo que significa un avance del 80 % de la partida en mención en relación a lo programado.

### **PARTIDA 2.00: MOVIMIENTO DE TIERRAS**

Partida 2.21: excavación Instalación para Tuberías.  
Esta partida no se ha ejecutado

En esta partida se utilizó maquinaria pesada como: tractor oruga, con la finalidad de extraer el material no apropiado para la base del sistema; así mismo en cantera se ha extraído material el cual también ha sido acumulado para la construcción de obra.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$ 3.405.60 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$3405.60 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

Partida: 2.23: Carguio de material para base y taludes.

Una vez que el material de cantera ha sido extraído y acumulado, se procede al carguío el material acumulado en la cantera a las volquetas, para ello se utilizo un cargador frontal.

De acuerdo al metrado, el presupuesto de la obras es de \$ 1.732.51 y de acuerdo a l avance físico que se tiene a la fecha su valorización es de \$ 1.732.51 lo que representa el 100 % de la meta programada.

Partida 2.24: Transporte de material para base y taludes.

Este material se transportó desde la cantera hasta el lugar de la construcción de la obra.  
Se utilizaron tres volquetes de 12 m<sup>3</sup>.

De acuerdo al metrado, lo presupuestado en esta partida es de \$ 6.518.09 y la valorización del avance físico es de \$ 6.518.09 que representa el 100 % del avance físico programado.

Partida 2.25: Perfilado y Compactado de base y taludes.

Consiste en el perfilado y compactado de la base de todo el sistema, una vez enrocado se colocó el material de relleno primario el mismo que fue compactado de acuerdo a las especificaciones técnicas.

De acuerdo al metrado, lo presupuestado es de \$ 2.580.36 y de acuerdo al avance físico la valorización es de \$ 2.580.36 lo que representa el 100 % según lo programado.

En los montos indicados en esta valorización se incluye por partida efectuada el 10 % que corresponde a gastos generales de obra.



## CONVENIO SER-ECO MEDMIN MUNICIPALIDAD DE COPACABANA VALORIZACION DE OBRAS

**PROYECTO:** CONSTRUCCIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO  
AGUAS SERVIDAS "COPACABANA

**SECCIÓN:** PRIMERA  
**PROVINCIA:** MANKO KAPAC  
**DEPART.:** LA PAZ

Fecha 10/12/01

| DESCRIPCION<br>PARTIDA                   | AVANCES     |          |        |             |          |            |         |            |           |            | %     | SALDO   |            |
|--|-------------|----------|--------|-------------|----------|------------|---------|------------|-----------|------------|-------|---------|------------|
|  | PRESUPUESTO |          |        |             | ANTERIOR |            | ACTUAL  |            | ACUMULADO |            |       | METRADO | VALORIZADO |
|  | UNL         | METRADO  | P.U.   | PRESUPUESTO | METRADO  | VALORIZADO | METRADO | VALORIZADO | METRADO   | VALORIZADO |       |         |            |
|  |             | \$       | \$     |             | \$       |            | \$      |            | \$        |            | \$    |         |            |
| <b>OBRAS DE CONCRETO ARMADO</b>          |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>Obras en Cámara de Rejas</b>          |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Concreto fc=175 Kg/cm2 entrada salida    | M3          | 6,250    | 65,018 | 406,36      |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Acero de entrada y salida del caudal     | KG          | 76,800   | 1,212  | 93,08       |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Encofrado en entrada y salida de caudal  | M2          | 19,200   | 4,608  | 88,47       |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>INSTALACION DE TUBERIAS</b>           |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>Instalacion de tuberias de PVC 6"</b> |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Preparación cama de apoyo                | M3          | 16,70    | 12,236 | 204,34      |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Instalación de tubería PVC 4"            | ML          | 84,00    | 8,227  | 691,07      |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>SISTEMAS DE FILTRACIÓN</b>            |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>Filtros con Piedra y Canto Rodado</b> |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Piedra Canto Rodado d=2" max.            | M3          | 240,00   | 3,819  | 916,56      |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Colocación de tubería PVC 4"             | ML          | 220,00   | 3,324  | 731,28      |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>PREPAR. SUSBT. Y TOTALES</b>          |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>Substrato y Plantación Totoraes</b>   |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Preparación de Substrato p/plantación    | M3          | 1,010,00 | 2,135  | 2,156,35    |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Plantación de Totoraes en estanques      | M2          | 1,100,00 | 0,498  | 547,80      |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>COMPUERTAS</b>                        |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>Compuertas Metálicas</b>              |             |          |        |             |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| Compuertas metálicas en dispositivos     | UNI         | 6,00     | 80,206 | 481,24      |          |            |         |            |           |            |       |         |            |
| <b>COSTO DIRECTO</b>                     | SUS         |          |        | 22,292,21   |          |            |         | 13,289,16  |           | 13,289,16  | 59,61 |         |            |
| <b>GASTOS GENERALES</b>                  | SUS         |          |        | 2,229,22    |          |            |         | 1,328,92   |           | 1,328,92   | 10,00 |         |            |
| <b>VALOR TOTAL</b>                       | SUS         |          |        | 24,521,43   |          |            |         | 14,618,07  |           | 14,618,07  | 69,61 |         |            |

## CONVENIO SER-ECO MEDMIN MUNICIPALIDAD DE COPACABANA VALORIZACION DE OBRAS

PROYECTO: CONSTRUCCIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO  
AGUAS SERVIDAS "COPACABANA

SECCIÓN: PRIMERA  
PROVINCIA: MANKO KAPAC  
DEPART.: LA PAZ

Fecha 10/12/01

| DESCRIPCION                                  | AVANCES     |          |            |                   |          |                  |          |                  |           |                  | %      | SALDO   |            |
|--|-------------|----------|------------|-------------------|----------|------------------|----------|------------------|-----------|------------------|--------|---------|------------|
|  | PRESUPUESTO |          |            |                   | ANTERIOR |                  | ACTUAL   |                  | ACUMULADO |                  |        | METRADO | VALORIZADO |
|  | UNI.        | METRADO  | P.U.<br>\$ | PRESUPUESTO<br>\$ | METRADO  | VALORIZADO<br>\$ | METRADO  | VALORIZADO<br>\$ | METRADO   | VALORIZADO<br>\$ |        |         |            |
| <b>TRABAJOS PRELIMINARES</b>                 |             |          |            |                   |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| <b>Trazo, Niveles y Replanteo</b>            |             |          |            |                   |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| Trazo, Niveles y Replanteo                   | M2          | 3,276,00 | 0,132      | 432,43            |          |                  | 2,620,80 | 345,95           | 2,620,80  | 345,95           | 80,00  |         |            |
| Excavaciones Manuales                        |             |          |            |                   |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| Excavación Instalación Tuberías              | M3          | 10,870   | 8,316      | 90,390            |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| <b>Conform. de Relleno, Base y Terraplen</b> |             |          |            |                   |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| Extrac. Mater p/relleno base y terraplen     | M3          | 2,656,00 | 1,166      | 3,096,90          |          |                  | 2,656,00 | 3,096,90         | 2,656,00  | 3,096,90         | 100,00 |         |            |
| Carguío de Mater. Relleno, base, terrap.     | M3          | 2,656,00 | 0,593      | 1,575,01          |          |                  | 2,656,00 | 1,575,01         | 2,656,00  | 1,575,01         | 100,00 |         |            |
| Transp. de Mater. Relleno, base, terrap.     | M3          | 2,656,00 | 2,231      | 5,925,54          |          |                  | 2,656,00 | 5,925,54         | 2,656,00  | 5,925,54         | 100,00 |         |            |
| Perfilado de Mater. Relleno, base, terrap.   | M2          | 8,852,00 | 0,265      | 2,345,78          |          |                  | 8,852,00 | 2,345,78         | 8,852,00  | 2,345,78         | 100,00 |         |            |
| <b>OBRAS DE CONCRETO SIMPLE</b>              |             |          |            |                   |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| Obras en Sispositivos de Aireación           | M2          | 4,40     | 66,886     | 294,30            |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| Concreto fc=175 Kg/cm2 entrada, salida       | M2          | 15,60    | 4,962      | 77,410            |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| Encofrado en sistemas de aireación           | M2          | 6,10     | 5,783      | 35,280            |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| <b>Recubrimiento de Taludes</b>              |             |          |            |                   |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |
| Concreto fc=175 Kg/cm2 entrada, salida       | M2          | 240,00   | 8,761      | 2,102,64          |          |                  |          |                  |           |                  |        |         |            |

## Resumen gráfico del avance de obra



1. Obra de respaldo del área de establecimiento del sistema concluida (Gestión Alcalde Zenón Cori).





2. Explotación de material en Cantera I (Gestión Alcalde Gumercindo Paye).



3. Explotación de material en la Cantera II (Gestión Alcalde Gumercindo Paye).



4. Transporte y acumulación de tierra a la base del sistema de tratamiento.



5. Distribución del material an base del sistema de tratamiento.



6. Compactación de la base del sistema.



7. Aplicación de agua con tanque cisterna en todo el área del sistema de tratamiento.



8. Construcción de los terraplenes y de las celdas de tratamiento. Nótese la altura de los mismos comparado con la altura de una persona.



9. Acumulación de sustrato filtro para su colocación en las celdas y el posterior sembrado de totora.

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**INFORME DE CONCLUSIÓN DE OBRA Y  
PUESTA EN FUNCIONAMIENTO**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**

(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# MEMORIA DESCRIPTIVA DE VALORIZACIÓN

PROYECTO: 21.06 PRUEBAS DEL USO DE TOTORALES PARA  
DESCONTAMINACION EN EL ÁMBITO BOLIVIANO

OBRA: SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS COPACABANA

## INFORMACIÓN GENERAL:

### 1.1. NOMBRE DEL PROYECTO:

SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS "COPACABANA".

### 1.2. COSTO TOTAL DE OBRA:

SESENTA MIL DOSCIENTOS 75/100 DOLARES AMERICANOS ( \$/.60,200.75).

### 1.3. FINANCIAMIENTO:

APORTE PNUD – MEDMIN : \$ 34,076.81

APORTE MUNICIPALIDAD : \$ 26,123.93

### 1.4. UBICACIÓN DEL PROYECTO.

LOCALIDAD : BAHIA DE COPACABANA

CIUDAD : COPACABANA

PROVINCIA : MANCO CÁPAC

DEPARTAMENTO : LA PAZ

### 1.5. VIAS DE ACCESO A LA OBRA

Para acceder a la obra, primeramente se llega a la ciudad de Copacabana a través de la vía La Paz – Copacabana y Kasani – Copacabana, la obra se encuentra a una distancia de 5 Km del centro de Copacabana a la obra con dirección Sur.

### 1.6. ENTIDAD EJECUTORA:

Fundación MEDMIN ( Medio Ambiente Minería e Industria)

### 1.7. MODALIDAD DE EJECUCIÓN

En convenio del Gobierno Municipal de Copacabana y MEDMIN – SERECO.

DESCRIPCIÓN DE OBRAS EJECUTADAS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO  
TRABAJOS PRELIMINARES

Partida: 1.11: Trazo, Replanto y Nivelación Preliminar

Se realizaron los trabajos de trazo y replanteo según el expediente técnico de obra para ello se ha utilizado puntos de referencia en el terreno con apoyo de un teodolito, nivel, mira, brújula, wincha, flexo metro, cordel, libreta de campo y otros, este proceso se realiza al inicio de las obras.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 461.92 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 461.92 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención en relación a lo programado.

Partida: 1.12: Nivelación y control de cotas durante el proceso.

Se realizaron trabajos de trazo de medición y control de cotas, durante la ejecución de la obra, para lo cual se ha utilizado, teodolito, wincha, flexo, cordeles y todo lo necesario para estos trabajos.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 1,592.14 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 1,592.14 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención a lo programado.

## MOVIMIENTO DE TIERRAS Y EXPLANACIONES

### **Partida 2.11 Excavaciones en medidores de caudal**

Consiste en la excavación para la cimentación de los medidores de caudal, las mismas que están al inicio y final del sistema, es allí donde se medirán los caudales de entrada y salida del sistema, para ello se ha utilizado las herramientas respectivas.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 3.44 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 3.44 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención en relación a lo programado.

### **Partida 2.12 Excavaciones en dispositivos de aireación**

Estos dispositivos están ubicados en los terraplenes intermedios, cumplirán una función de aireación la misma que incidirá en la purificación de las aguas servidas.

Estos trabajos se realizaron una vez que se terminó con la compactación de los terraplenes.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 9.03 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 9.03 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención en relación a lo programado.

### **Partida : 2.13 Excavación para tubería de evacuación**

Consiste en la excavación de una zanja para la instalación de la tubería de evacuación del medidor de caudal que esta al final del sistema hasta el punto de control que se encuentra a 25 m de la misma.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 13.76 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 13.76 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención en relación a lo programado.

### **Partida 2.14 Perfilado y Nivelado del primer substrato tamizado**

El cargador frontal, tamiza la grava para clasificar que pase la malla "I", una vez realizado este trabajo, el mismo cargador se traslada el material tamizado a las lagunas de tratamiento, la misma que es nivelado y perfilado con mano de obra no calificado, este trabajo se hace en relación a lo programado.

**Partida 2.15 Perfilado y Nivelación del segundo substrato**

El material adecuado para el funcionamiento del sistema es la arena, la misma que es transportada del Perú, este material es primeramente colocado en forma masiva por la maquinaria pesada, la misma que deberá luego ser nivelado en forma manual, este trabajo se ejecuta en las tres lagunas del sistema.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 967.68 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 967.68 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención en relación a lo programado.

**Partida 2.16 Selección y Nivelación de substrato con rastrillo.**

El material acumulado por los volquetes no esta distribuido uniformemente, a pesar que el cargador frontal intente realizar esta tarea, pero necesita nivelar con mano de obra, para ello se emplea rastrillos con los que se dejó bien nivelado.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 2452.00 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 252.00 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención en relación a lo programado.

**Partida 2.17 Nivelación de terraplenes con material de préstamo.**

En algunos puntos existe necesidad de nivelar con material de préstamo a fin de alcanzar la cota deseada, para ello se emplea carretillas para el acarreo de material y pisones de mano para la respectiva compactación.

De acuerdo al metrado de la obra, el presupuesto es de \$ 252.00 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 252.00 lo que significa un avance del 100% de la partida en mención en relación a lo programado.

**Partida 2.18 Perfilado y Nivelado de base a mano**

El fondo del estanque de tratamiento debe tener un pendiente adecuada y el ajuste de esta pendiente fue realizada a mano y el material restante debe ser eliminado, para luego realizar la instalación del substrato y plantación de totorales.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$ 957.60 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 957.6 lo que representa el 100% del avance físico según lo programado.



**Partida 2.19 Perfilado, Nivelado de taludes a mano.**

La máquina se encarga de establecer los terraplenes y para un acabado con el talud correspondiente de acuerdo al proyecto es necesario perfilar los taludes interiores y exteriores en todo el sistema, entonces para ello se hace uso de una cerca para el control de los taludes.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$ 349.80 y a la fecha se tiene el 100% del avance físico según lo programado.

**Partida 2.20 Eliminación de material excedente d= 20m.**

Producto de la regulación de cotas existe un material que debe ser de los estanques es necesario eliminar, para ello se realizará con carretillas a una distancia promedio de 30 m.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$ 227.25 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$ 227.25 lo que representa el 100% del avance físico según lo programado.

Conformación de Base y Terraplenes c/maquinaria

**Partida 2.21 Eliminación de material orgánico h=0.30 m.**

La capa arable de todo el área del sistema es necesario eliminar ya que este material es perjudicial como material impermeable, se eliminó una altura promedio de 0.50 m., en todo el área de ejecución de obra.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$. 1.425.06 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$. 1.425.06 lo que representa el 100 % de avance físico según lo programado.

**Partida 2.22 Extracción de material de cantera para base y terraplén.**

Para la construcción del sistema,, se necesita acumular material adecuado de acuerdo a las especificaciones del proyecto, dicha cantera se ubica a 10 Km. Para ello se utiliza un tractor a orugas.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$. 5.195.20 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$. 5.195.20 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 2.24 Transporte de material para base y taludes**

Este material se transporta desde la cantera hasta el lugar de la construcción de la obra.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$. 6.786.00 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$. 6.876.00 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 2.25 Conformación y Compactado de base y taludes**

Consiste en la conformación y compactado de la base y terraplenes de todo el sistema, una vez que se haya realizado el trazado.

De acuerdo al metrado de obra, lo presupuestado es de \$. 7.741.87 y a la fecha se tiene un avance que valoriza \$. 7.741.87 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 2.26: Perfilado de substrato-filtro con maquinaria**

Consiste en perfilar con maquinaria todo el substrato filtro expuesto inicialmente luego de que los volquetes dejaron el material, en vista de que el material es arrumado y para ello es necesario perfilar con maquinaria (cargador frontal)

De acuerdo a lo presupuestado se tiene \$. 1.128.96 y a la fecha se tiene un avance del 100 % según lo programado.

**Partida 2.27: Preparación de rampas de acceso para maquinaria y volquetes**

Para el ingreso momentáneo de la maquinaria y los volquetes a los estanques de tratamiento es necesario construir rampas de acceso en 2 puntos y para ello se hace uso de maquinaria y con el material de préstamo.

De acuerdo al metrado se tiene presupuestado \$. 177.12 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 177.12 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 2.28: Tamizado de grava para substrato filtro.**

Consiste en el tamizado de la grava, para ello se utilizara zaranda con diámetro de 1", y este material se utilizara en los sistemas de filtración.

Para esta partida se presupuesto \$. 1.964.25 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 1.964.25 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**BOMBEO**

Eliminación de agua con bombas

**Partida 3.11: Eliminación de agua de estanques con motobomba.**

Consiste en la eliminación de agua acumulada en el sistema, esto por la presencia excesiva de lluvias en esta temporada, para ello se hace uso de tres motobombas y el trabajo es diario en vista que una vez eliminado, inmediatamente las lluvias inundan por lo que el trabajo es continuo.

Para esta partida se presupuestó \$. 985.80 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 985.80 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**OBRAS DE CONCRETO ARMADO**

Obras en Dispositivo de aireación

**Partida 4.11: Concreto  $f_c=175 \text{ Kg/cm}^2$** 

Consiste en el suministro de concreto a esta estructura hidráulica, la misma que es de acuerdo a las especificaciones técnicas de l proyecto.

Para esta partida se presupuestó \$. 298.12 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 298.12 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 4.12: Acero  $f_y=4200 \text{ IKg/cm}^2$** 

Consiste en el suministro de acero a esta estructura hidráulica, la misma que es de acuerdo a las especificaciones técnicas de l proyecto.

Para esta partida se presupuestó \$. 82.13 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 82.13 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 4.13: Encofrado y Desencofrado**

Esta partida consiste en el encofrado y desencofrado que se necesita para la construcción de esta obra de arte, para ello se utiliza tablas, cuartería y otros.

Para esta partida se presupuestó \$. 70.20 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 70.20 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 4.14: Revestimiento  $c=1''$** 

Consiste en el revestimiento de las obras de arte, para ello se suministrará concreto, mano de obra y todo lo necesario para ejecutar esta tarea.

Para esta partida se presupuestó \$. 53.55 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 53.55 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**OBRAS EN MEDIDORES DE CAUDAL****Partida 4.21: Concreto  $f_c=175 \text{ Kg/cm}^2$** 

Consiste en el suministro de concreto a esta estructura hidráulica, la misma que es de acuerdo a las especificaciones técnicas de l proyecto.

Para esta partida se presupuesto \$. 423.46 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 423.46 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 4.22: Acero  $f_y=4200 \text{ Kg/cm}^2$** 

Consiste en el suministro de acero a esta estructura hidráulica, la misma que es de acuerdo a las especificaciones técnicas de l proyecto.

Para esta partida se presupuesto \$. 96.00 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 96.00 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 4.22: Encofrado y Desencofrado**

Esta partida consiste en el encofrado y desencofrado que se necesita para la construcción de esta obra de arte, para ello se utiliza tablas, cuarterería y otros.

Para esta partida se presupuesto \$. 86.40 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 86.40 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 4.14: Revestimiento  $c=1''$** 

Consiste ene el revestimiento de las obras de arte, par ello se suministrará concreto, mano de obra y todo lo necesario para ejecutar esta tarea.

Para esta partida se presupuesto \$. 57.12 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 57.12 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**SISTEMA DE TUBERIA PARA EVACUACIÓN**

Tubería PVC 4''

**Partida 5.11: Preparación de cama de apoyo**

Consiste en la preparación de cama de arena para la instalación de tubería de evacuación a los peines de infiltración.

Para esta partida se presupuesto \$. 10.12 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 10.12 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 5.12 Instalación de tubería de evacuación la misma será de 4”**

Consiste en la instalación y suministro de tubería de evacuación la misma será de 4”

Para esta partida se presupuestó \$. 110.00 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 110.00 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 5.13: Instalación de tubería entre estanques d=4”**

-

El sedimentado resistente es necesario interconectar con el sistema de tratamiento de aguas servidas para ello se adecuó un medidor de caudal y de ahí se comunicara con una tuberías de 4” con el sistema.

Para esta partida se presupuestó \$. 35.20 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 35.20 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**SISTEMA DE FILTRACIÓN****Sistema de filtración en estanques de tratamiento****Partida 6.11: Traslado de material tamizado con maquinaria.**

Consiste en el traslado del material tamizado a los puntos donde se construirá los filtros, es decir en todo el largo de cada estanque de tratamiento, para ello se utiliza el cargador frontal, en vista que realizar en forma manual ocasiona retrasos en la ejecución de las obras complementarias.

Para esta partida se presupuestó \$. 238.50 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 238.50 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 6.12: Cribado de Tubería de 3”**

Consiste en perforar tuberías de 3”, con diámetros y distancias entre orificios de acuerdo a diseño de proyecto, ya que es importante que la tubería este cribada para un mejor funcionamiento del sistema de filtración. Se colocará de acuerdo a los planos del proyecto.

Para esta partida se presupuestó \$. 138.60 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 138.60 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 6.13: Instalación de tubería cribada de 3”.**

Consiste en el suministro de tubería, mano de obra y otros para la instalación de la tubería en los lugares indicados en el plano, las mismas se colocarán en todo el ancho tanto al inicio y final de cada estanque.

Para esta partida se presupuestó \$. 1.108.80 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 1.108.80 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 6.14: Instalación de punto de evacuación.**

Para interconectar un estanque al otro mediante la tubería cribada es necesario instalar antes y después de cada dispositivo de aireación, tal como se muestra en los planos del proyecto, en dichos puntos se utilizan codos, té, uniones y otros.

Para esta partida se presupuestó \$. 114.00 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 114.00 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 6.15: Construcción manual de filtros con grava.**

Una vez colocada la tubería cribada en su posición es necesario enterrar, para ello se utiliza la grava tamizada y ya transportada a estos lugares, la misma se realizará en forma manual, consiste en colocar alrededor de la tubería grava de poco a poco hasta llegar al nivel establecido en los planos.

Para esta partida se presupuestó \$. 277.20 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 277.20 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 6.16: Carguío de sustrato a volquetes en cantera.**

Consiste en el carguío de sustrato a los volquetes, las mismas que trasladarán hasta la obra.

Para esta partida se presupuestó \$. 2.092.80 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 2.92.80 lo que representa el 100 % del avance físico según lo programado.

**Partida 6.17: Transporte de sustrato de cantera a obra d=50 Km.**

Consiste en el transporte de sustrato de cantera a obra, para ello se utiliza volquetes de 15M<sup>3</sup>, la distancia entre cantera y obra es de 50 Km.

Para esta partida se presupuestó \$. 7.900.00 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 7.900.00.

**PLANTACION DE TOTORALES**

Selección, extractiva y plantación de totoras

**Partida 7.11: Identificación y selección de plántulas.**

Consiste en identificar las plántulas de acuerdo a las exigencias del método de plantación, para ello se identifica y señala para luego extraer.

Para esta partida se presupuestó \$. 322.56 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 322.56.

**Partida 7.12: Plantación de plántulas.**

Una vez identificado las plántulas se procede a la extracción de las plántulas, para ello se utiliza mano de obra no calificada en forma masiva.

Para esta partida se presupuesto \$. 403.20 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 403.20.

**Partida 7.13: Traslado de plántulas en movilidad d=24 Km.**

Para el traslado es necesario tener mucho cuidado en vista que las plántulas seleccionadas no deberán ser maltratadas, para esto se utiliza un camión, desde el lugar de extracción hasta pie de obra.

Para esta partida se presupuesto \$. 322.56 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 322.56.

**Partida 7.14: Carguío y descarguío de plántulas.**

Una vez extraído las plántulas, se tiene que acarrear hasta el camión que trasladará a pie de obra, se tiene mucho cuidado en carguío y descarguío respectivo, en vista que las plántulas han sido seleccionadas y el margen de perdidas deberá ser mínimo

Para esta partida se presupuesto \$. 483.84 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 483.84.

**Partida 7.15: Plantación de totoras.**

Consiste en la plantación de plántulas de totora, previamente se adecua al substrato, ya que la técnica a utilizarse requiere de ciertas condiciones, la cantidad de plántula por metro cuadrado es de 4, para ello se utiliza cuadrillas de plantación.

Para esta partida se presupuesto \$. 524.16 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 524.16.

**Partida 7.16: corte de tallo de plántulas**

Para un rápido desarrollo es necesario podar a una altura de 20 cm. encima del nivel del substrato, esto se ejecutara con peones y con cegadora.

Para esta partida se presupuesto \$. 201.60 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 201.60

**Partida 7.17: Riego de plántulas de totora.**

Luego del podado es necesario suministrar de agua, para un rápido crecimiento, para ello se inundara los tres estanques con agua, y se utilizara una motobomba, el agua a utilizarse serpa del Lago Titicaca. También se realiza esta actividad debido a que al sistema de tratamiento no llega aguas servidas ya que cárcamo aún no ha sido reparado por la municipalidad de Copacabana.

Para esta partida se presupuesto \$. 492.90 y a la fecha se tiene un avance que valoriza en \$. 492.90.

## CONVENIO SER-ECO MEDMIN MUNICIPALIDAD DE COPACABANA VALORIZACION DE OBRA FINAL

PROYECTO:

CONSTRUCCIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO  
AGUAS SERVIDAS "COPACABANA

SECCIÓN: PRIMERA  
PROVINCIA: MANKO KAPAC  
DEPART.: LA PAZ

Fecha 04/05/02

| PART. | DESCRIPCION   | AVANCES     |           |        |             |          |            |           |            |           |            | AVANCE PORCENTUAL | SALDO METRADO |
|-------|---|-------------|-----------|--------|-------------|----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-------------------|---------------|
|       |   | PRESUPUESTO |           |        |             | ANTERIOR |            | ACTUAL    |            | ACUMULADO |            |                   |               |
|       |   | UNL         | METRADO   | P.U.   | PRESUPUESTO | METRADO  | VALORIZADO | METRADO   | VALORIZADO | METRADO   | VALORIZADO |                   |               |
|       |   | \$          | \$        |        | \$          |          | \$         |           | \$         | %         |            |                   |               |
| 1,00  | <b>TRABAJOS PRELIMINARES</b>                            |             |           |        |             |          |            |           |            |           |            |                   |               |
| 1,10  | <b>Trazo, Niveles y Replanteo</b>                       |             |           |        |             |          |            |           |            |           |            |                   |               |
| 1,11  | Trazo, Repalnteo y Nivelación                           | m2          | 3,276,00  | 0,141  | 461,92      |          |            | 3,276,00  | 461,916    | 3,276,00  | 461,92     | 100,00%           |               |
| 1,12  | Nivelacion y control de cotas durante el proceso        | m2          | 9,828,00  | 0,162  | 1,592,14    |          |            | 9,828,00  | 1,592,136  | 9,828,00  | 1,592,14   | 100,00%           |               |
| 2,00  | <b>MOVIMIENTO DE TIERRAS Y EXPLANACIONES</b>            |             |           |        |             |          |            |           |            |           |            |                   |               |
| 2,10  | <b>Excavaciones Manuales</b>                            |             |           |        |             |          |            |           |            |           |            |                   |               |
| 2,11  | Excavaciones para Medidores de Caudal                   | m3          | 1,60      | 2,150  | 3,440       |          |            | 1,600     | 3,440      | 1,60      | 3,440      | 100,00%           |               |
| 2,12  | Excavaciones para Dispositivos de aireación             | m3          | 4,20      | 2,150  | 9,03        |          |            | 4,20      | 9,030      | 4,20      | 9,03       | 100,00%           |               |
| 2,13  | Excavaciones par tubería de evacuación                  | m3          | 6,40      | 2,150  | 13,76       |          |            | 6,40      | 13,760     | 6,40      | 13,76      | 100,00%           |               |
| 2,14  | Perfilado y Nivelación de primer substrato a mano       | m2          | 1,008,00  | 0,560  | 564,48      |          |            | 1,008,00  | 564,480    | 1,008,00  | 564,48     | 100,00%           |               |
| 2,15  | Perfilado y Nivelación de segundo substrato a mano      | m2          | 1,008,00  | 0,960  | 967,68      |          |            | 1,008,00  | 967,680    | 1,008,00  | 967,68     | 100,00%           |               |
| 2,16  | Perfilado y Nivelación de substrato con rastrillo       | m2          | 1,008,00  | 0,250  | 252,00      |          |            | 1,008,00  | 252,000    | 1,008,00  | 252,00     | 100,00%           |               |
| 2,17  | Nivelación de terraplenes con material de prestamo      | m2          | 468,00    | 0,120  | 524,16      |          |            | 468,00    | 524,160    | 468,00    | 524,16     | 100,00%           |               |
| 2,18  | Perfilado, Nivelado de Base a mano                      | m2          | 1,008,00  | 0,950  | 957,60      |          |            | 1,008,00  | 957,600    | 1,008,00  | 957,60     | 100,00%           |               |
| 2,19  | Perfilado, Nivelado de Taludes a mano                   | m1          | 220,000   | 1,590  | 349,80      |          |            | 220,000   | 349,800    | 220,00    | 349,80     | 100,00%           |               |
| 2,20  | Eliminación de material exedente d=0,30 m.              | m3          | 50,500    | 4,500  | 227,25      |          |            | 50,500    | 227,250    | 50,50     | 227,25     | 100,00%           |               |
| 2,20  | <b>Conformación de Base y Terraplenes c/Maquinaria</b>  |             |           |        |             |          |            |           |            |           |            |                   |               |
| 2,21  | Eliminación de material orgánico h=0,50 m.              | m3          | 982,800   | 1,450  | 1,425,06    |          |            | 982,800   | 1,425,06   | 982,80    | 1,425,06   | 100,00%           |               |
| 2,22  | Extracción de material de cantera para base y terraplen | m3          | 3,056,00  | 1,700  | 5,195,20    |          |            | 3,056,00  | 5,195,20   | 3,056,00  | 5,195,20   | 100,00%           |               |
| 2,23  | Carguio de material a volquetes                         | m3          | 3,056,00  | 0,850  | 2,597,60    |          |            | 3,056,00  | 2,597,60   | 3,056,00  | 2,597,60   | 100,00%           |               |
| 2,24  | Transporte de Material de cantera a obra d=10 Km.       | m3          | 3,056,00  | 2,250  | 6,876,00    |          |            | 3,056,00  | 6,876,00   | 3,056,00  | 6,876,00   | 100,00%           |               |
| 2,25  | Conformación y Compactado de base y terraplenes         | m2          | 10,186,67 | 0,760  | 7,741,87    |          |            | 10,186,67 | 7,741,87   | 10,186,67 | 7,741,87   | 100,00%           |               |
| 2,26  | Perfilado de substrato con maquinaria                   | m2          | 1,008,00  | 1,120  | 1,128,96    |          |            | 1,008,00  | 1,128,96   | 1,008,00  | 1,128,96   | 100,00%           |               |
| 2,27  | Preparación de rampas de acceso para maquinaria, vol    | m3          | 43,20     | 4,100  | 177,12      |          |            | 43,20     | 177,120    | 43,20     | 177,12     | 100,00%           |               |
| 2,28  | Tamizado de grava para substrato-filtro                 | m3          | 405,00    | 4,850  | 1,964,25    |          |            | 405,00    | 1,964,25   | 405,00    | 1,964,25   | 100,00%           |               |
| 2,29  | eliminación de rampa de acceso                          | m3          | 43,20     | 3,800  | 164,16      |          |            | 43,20     | 164,160    | 43,20     | 164,16     | 100,00%           |               |
| 3,00  | <b>BOMBEO</b>   |             |           |        |             |          |            |           |            |           |            |                   |               |
| 3,10  | <b>Eliminación de agua con Bombas</b>                   |             |           |        |             |          |            |           |            |           |            |                   |               |
| 3,11  | Eliminación de aguas de Estanques con Motobomba         | día         | 60,00     | 16,430 | 985,80      |          |            | 60,00     | 985,80     | 60,00     | 985,80     | 100,00%           |               |

Fecha 04/05/02



| PART.  | DESCRIPCION  | PRESUPUESTO |          |            |                   | AVANCES  |                  |                  |                  |                  |                  | SALDO |                 |
|--|--|-------------|----------|------------|-------------------|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-----------------|
|  |  | PRESUPUESTO |          |            |                   | ANTERIOR |                  | ACTUAL           |                  | ACUMULADO        |                  |       | AVANCE          |
|  |  | UNI.        | METRADO  | P.U.<br>\$ | PRESUPUESTO<br>\$ | METRADO  | VALORIZADO<br>\$ | METRADO          | VALORIZADO<br>\$ | METRADO          | VALORIZADO<br>\$ |       | PORCENTUAL<br>% |
| <b>OBRAS DE CONCRETO ARMADO</b>                          |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
| <b>Obras en Dispositivos de Aireación (2 Unidades)</b>   |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
|  | Concreto fc=175 KG/cm2                                 | m3          | 4,40     | 67,754     | 298,12            |          | 4,40             | 298,12           | 4,40             | 298,12           | 100,00%          |       |                 |
|  | Acero fy=4,200 Kg/cm2                                  | Kg          | 65,70    | 1,250      | 82,13             |          | 65,70            | 82,13            | 65,70            | 82,13            | 100,00%          |       |                 |
|  | Encofrado y Desencofrado                               | m2          | 15,60    | 4,500      | 70,20             |          | 15,60            | 70,20            | 15,60            | 70,20            | 100,00%          |       |                 |
|  | Revestimiento e=1"                                     | m2          | 10,50    | 5,100      | 53,55             |          | 10,50            | 53,55            | 10,50            | 53,55            | 100,00%          |       |                 |
| <b>Obras en Medidores de caudal (2unidades)</b>          |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
|  | Concreto fc=175 KG/cm2                                 | m3          | 6,25     | 67,754     | 423,46            |          | 6,25             | 423,46           | 6,25             | 423,46           | 100,00%          |       |                 |
|  | Acero fy=4,200 Kg/cm2                                  | Kg          | 76,80    | 1,250      | 96,00             |          | 76,80            | 96,00            | 76,80            | 96,00            | 100,00%          |       |                 |
|  | Encofrado y Desencofrado                               | m2          | 19,20    | 4,500      | 86,40             |          | 19,20            | 86,40            | 19,20            | 86,40            | 100,00%          |       |                 |
|  | Revestimiento e=1"                                     | m2          | 11,20    | 5,100      | 57,12             |          | 11,20            | 57,12            | 11,20            | 57,12            | 100,00%          |       |                 |
| <b>SISTEMA DE TUBERIA PARA EVACUACIÓN</b>                |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
| <b>Tubería de 4"</b>                                     |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
|  | Preparación de cama de apoyo                           | m3          | 1,10     | 9,200      | 10,12             |          | 1,10             | 10,12            | 1,10             | 10,12            | 100,00%          |       |                 |
|  | Instalación de tubería de evacuación                   | ml          | 25,00    | 4,400      | 110,00            |          | 25,00            | 110,00           | 25,00            | 110,00           | 100,00%          |       |                 |
|  | Instalación de tubería de conexión entre estanques     | ml          | 8,00     | 4,400      | 35,20             |          | 8,00             | 35,20            | 8,00             | 35,20            | 100,00%          |       |                 |
| <b>SISTEMA DE FILTRACIÓN</b>                             |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
| <b>Sistema de Filtración de Estanques de Tratamiento</b> |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
|  | Traslado de material tamizado con maquinaria           | m3          | 135,00   | 2,100      | 283,50            |          | 135,00           | 283,50           | 135,00           | 283,50           | 100,00%          |       |                 |
|  | Cribado de tubería de 3"                               | ml          | 198,00   | 0,700      | 138,60            |          | 198,00           | 138,60           | 198,00           | 138,60           | 100,00%          |       |                 |
|  | Instalación tubería de 3"                              | ml          | 198,00   | 5,600      | 1,108,80          |          | 198,00           | 1,108,80         | 198,00           | 1,108,80         | 100,00%          |       |                 |
|  | Instalación de puntos de evacuación                    | pto         | 6,00     | 19,000     | 114,00            |          | 6,00             | 114,00           | 6,00             | 114,00           | 100,00%          |       |                 |
|  | Construcción manual de filtro con grava en sistema a=1 | ml          | 198,00   | 1,400      | 277,20            |          | 198,00           | 277,20           | 198,00           | 277,20           | 100,00%          |       |                 |
|  | Carguio de substrato a volquetes                       | m3          | 960,00   | 2,180      | 2,092,80          |          | 960,00           | 2,092,80         | 960,00           | 2,092,80         | 100,00%          |       |                 |
|  | Transporte de substrato de cantera a obra d=50 Km.     | m3          | 960,00   | 8,229      | 7,900,00          |          | 960,00           | 7,900,00         | 960,00           | 7,900,00         | 100,00%          |       |                 |
| <b>PLANTACION DE TOTORALES</b>                           |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
| <b>Selección, Extracción y Plantación de Totoras</b>     |  |             |          |            |                   |          |                  |                  |                  |                  |                  |       |                 |
|  | Identificación y selección de plántulas                | unid        | 4,032,00 | 0,080      | 322,56            |          | 4,032,00         | 322,56           | 4,032,00         | 322,56           | 100,00%          |       |                 |
|  | Extracción de plántulas                                | unid        | 4,032,00 | 0,100      | 403,20            |          | 4,032,00         | 403,20           | 4,032,00         | 403,20           | 100,00%          |       |                 |
|  | Traslado de plántulas en movilidad de=24 Km.           | unid        | 4,032,00 | 0,080      | 322,56            |          | 4,032,00         | 322,56           | 4,032,00         | 322,56           | 100,00%          |       |                 |
|  | Carguio de y descarguio de plántulas en camión         | unid        | 4,032,00 | 0,120      | 483,84            |          | 4,032,00         | 483,84           | 4,032,00         | 483,84           | 100,00%          |       |                 |
|  | Plantación de totoras                                  | unid        | 4,032,00 | 0,130      | 524,16            |          | 4,032,00         | 524,16           | 4,032,00         | 524,16           | 100,00%          |       |                 |
|  | Corte de tallo de plántulas                            | unid        | 4,032,00 | 0,050      | 201,60            |          | 4,032,00         | 201,60           | 4,032,00         | 201,60           | 100,00%          |       |                 |
|  | Riego de plántulas de totora                           | dia         | 30,00    | 16,430     | 492,90            |          | 30,00            | 492,90           | 30,00            | 492,90           | 100,00%          |       |                 |
|  | <b>PRESUPUESTO DIRECTO DE OBRA</b>                     | S/.         |          | U.S. \$    | <b>50,167,29</b>  |          | U.S. \$          | <b>50,167,29</b> | U.S. \$          | <b>50,167,29</b> | <b>100,00%</b>   |       |                 |

|                                     |  |         |          |  |         |          |
|-------------------------------------|--|---------|----------|--|---------|----------|
| G.G. 10 % DE LCOSTO DIRECTO         |  | U.S. \$ | 5,016,73 |  | U.S. \$ | 5,016,73 |
| DIRECCIÓN Y ASISTENCIA TECNICA 10 % |  | U.S. \$ | 5,016,73 |  | U.S. \$ | 5,016,73 |

|                           |  |  |  |  |         |                  |
|---------------------------|--|--|--|--|---------|------------------|
| <b>VALORIZACION TOTAL</b> |  |  |  |  | U.S. \$ | <b>60,200,75</b> |
|---------------------------|--|--|--|--|---------|------------------|

**INVERSION REALIZADA**

|                        |  |  |  |  |         |           |
|------------------------|--|--|--|--|---------|-----------|
| VALORIZACION MUNICIPIO | Partidas: 2,21 al 2,26 y 2,28 (50%)                                |  |  |  | U.S. \$ | 26,123,93 |
| VALORIZACION MEDMIN    | Partidas: 1,11, 1,12, 2,11 al 2,20, 2,28 (50 %) 2,29, 3,11 al 7,17 |  |  |  | U.S. \$ | 34,076,81 |

**PRESUPUESTO DE OBRA****PROGRAMA : USO DE TOTORALES EN LA DESCONTAMINACIÓN EN EL AMBITO BOLIVIANO****PROYECTO: SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS "COPACABANA"**

| N°   | DESCRIPCION   | UNIDAD | METRADO   | PRECIO UNITARIO | PARCIAL  | TOTAL     |
|------|---|--------|-----------|-----------------|----------|-----------|
| 1,00 | <b>TRABAJOS PRELIMINARES</b>                            |        |           |                 |          |           |
| 1,10 | <b>Trazo, Niveles y Replanteo</b>                       |        |           |                 |          |           |
| 1,11 | Trazo, Repalnteo y Nivelación                           | m2     | 3,276,00  | 0,141           | 461,92   |           |
| 1,12 | Nivelacion y control durante el proceso                 | m2     | 9,828,00  | 0,162           | 1,592,14 | 2,054,05  |
| 2,00 | <b>MOVIMIENTO DE TIERRAS Y EXPLANACIONES</b>            |        |           |                 |          |           |
| 2,10 | <b>Excavaciones Manuales</b>                            |        |           |                 |          |           |
| 2,11 | Excavaciones para Medidores de Caudal                   | m3     | 1,60      | 2,150           | 3,44     |           |
| 2,12 | Excavaciones para Dispositivos de aireación             | m3     | 4,20      | 2,150           | 9,03     |           |
| 2,13 | Excavaciones par tubería de evacuación                  | m3     | 6,40      | 2,150           | 13,76    |           |
| 2,14 | Perfilado y Nivelación de primer substrato a mano       | m2     | 1,008,00  | 0,560           | 564,48   |           |
| 2,15 | Perfilado y Nivelación de segundo substrato a mano      | m2     | 1,008,00  | 0,960           | 967,68   |           |
| 2,16 | Perfialdo y Nivelación de substrato con rastrillo       | m2     | 1,008,00  | 0,250           | 252,00   |           |
| 2,17 | Nivelación de terraplenes con material de prestamo      | m2     | 468,00    | 1,120           | 524,16   |           |
| 2,18 | Perfilado, Nivelado de Base a mano                      | m2     | 1,008,00  | 0,950           | 957,60   |           |
| 2,19 | Perfilado, Nivelado de Taludes a mano                   | ml.    | 220,00    | 1,590           | 349,80   |           |
| 2,20 | Eliminación de material exedente d=20 m.                | m3     | 50,50     | 4,500           | 227,25   | 3,869,20  |
| 2,20 | <b>Conformación de Base y Terraplenes c/Maquinaria</b>  |        |           |                 |          |           |
| 2,10 | Eliminación de material orgánico h=0,30 m.              | m3     | 982,20    | 1,450           | 1,425,06 |           |
| 2,22 | Extracción de material de cantera para base y terraplen | m3     | 3,056,00  | 1,700           | 5,195,20 |           |
| 2,23 | Carguío de material a volquetes                         | m3     | 3,056,00  | 0,850           | 2,597,60 |           |
| 2,24 | Transporte de Material de cantera a obra d=10 Km.       | m3     | 3,056,00  | 2,250           | 6,876,00 |           |
| 2,25 | Conformación y Compactado de base y terraplenes         | m2     | 10,186,67 | 0,760           | 7,741,87 |           |
| 2,26 | Perfilado de substrato con maquinaria                   | m2     | 1,008,00  | 1,120           | 1,128,96 |           |
| 2,27 | Preparación de rampas de acceso para maquinaria, vol    | m3     | 43,20     | 4,100           | 177,12   |           |
| 2,28 | Tamizado de grava para substrato-filtro                 | m3     | 405,00    | 4,850           | 1,964,25 |           |
| 2,29 | eliminación de rampa de acceso                          | m3     | 43,20     | 3,800           | 164,16   | 27,270,22 |
| 3,00 | <b>BOMBEO</b>   |        |           |                 |          |           |

|      |  |      |          |        |          |           |
|------|--|------|----------|--------|----------|-----------|
| 3,10 | <b>Eliminación de agua con Bombas</b>                    |      |          |        |          |           |
| 3,11 | Eliminación de aguas de Estanques con Motobomba          | dia  | 60,00    | 16,430 | 985,80   | 985,8     |
| 3,00 | <b>OBRAS DE CONCRETO ARMADO</b>                          |      |          |        |          |           |
| 3,10 | <b>Obras en Dispositivos de Aireación (2 Unidades)</b>   |      |          |        |          |           |
| 3,11 | Concreto fc=175 KG/cm2                                   | mm3  | 4,40     | 67,754 | 298,12   |           |
| 3,12 | Acero fy=4,200 Kg/cm2                                    | Kg   | 65,70    | 1,250  | 82,13    |           |
| 3,13 | Encofrado y Desencofrado                                 | m2   | 15,60    | 4,500  | 70,20    |           |
| 3,14 | Revestimiento e=1"                                       | m2   | 10,50    | 5,100  | 53,55    | 503,99    |
| 3,20 | <b>Obras en Medidores de caudal (2 unidades)</b>         |      |          |        |          |           |
| 3,21 | Concreto fc=175 KG/cm2                                   | m3   | 6,25     | 67,754 | 423,46   |           |
| 3,22 | Acero fy=4,200 Kg/cm2                                    | Kg   | 76,80    | 1,250  | 96,00    |           |
| 3,23 | Encofrado y Desencofrado                                 | m2   | 19,20    | 4,500  | 86,40    |           |
| 3,24 | Revestimiento e=1"                                       | m2   | 11,20    | 5,100  | 57,12    | 662,98    |
| 4,00 | <b>SISTEMA DE TUBERIA PARA EVACUACIÓN</b>                |      |          |        |          |           |
| 4,10 | <b>Tubería de 4"</b>                                     |      |          |        |          |           |
| 4,11 | Preparación de cama de apoyo                             | m3   | 1,10     | 9,200  | 10,12    |           |
| 4,12 | Instalación de tubería de evacuación                     | ml   | 25,00    | 4,400  | 110,00   |           |
| 4,13 | Instalación de tubería de conexión entre estanques       | ml   | 8,00     | 4,400  | 35,20    | 155,32    |
| 5,00 | <b>SISTEMA DE FILTRACIÓN</b>                             |      |          |        |          |           |
| 5,10 | <b>Sistema de Filtración de Estanques de Tratamiento</b> |      |          |        |          |           |
| 5,11 | Traslado de material tamizado con maquinaria             | m3   | 135,00   | 2,100  | 283,50   |           |
| 5,12 | Cribado de tubería de 3"                                 | ml   | 198,00   | 0,700  | 138,60   |           |
| 5,13 | Instalación tubería de 3"                                | ml   | 198,00   | 5,600  | 1,108,80 |           |
| 5,14 | Instalación de puntos de evacuación                      | pto  | 6,00     | 19,000 | 114,00   |           |
| 5,15 | Construcción manual de filtro con grava en sistema a=1   | ml   | 198,00   | 1,400  | 277,20   |           |
| 5,16 | Carguo de substrato a volquetes                          | m3   | 960,00   | 2,180  | 2,092,80 |           |
| 5,17 | Transporte de substrato de cantera a obra d=50 Km.       | m3   | 960,00   | 8,229  | 7,900,00 | 11,914,90 |
| 6,00 | <b>PLANTACION DE TOTORALES</b>                           |      |          |        |          |           |
| 6,10 | <b>Selección, Extracción y Plantación de Totoras</b>     |      |          |        |          |           |
| 6,11 | Identificación y selección de plántulas                  | unid | 4,032,00 | 0,080  | 322,56   |           |
| 6,12 | Extracción de plántulas                                  | unid | 4,032,00 | 0,100  | 403,20   |           |
| 6,13 | Traslado de plántulas en movilidad de=24 Km.             | unid | 4,032,00 | 0,080  | 322,56   |           |
| 6,14 | Carguo de y descarguo de plántulas en camión             | unid | 4,032,00 | 0,120  | 483,84   |           |

Proyecto 21.06: Uso de la totora para descontaminación

Informe N°3

|      |                              |      |          |        |                    |                  |
|------|------------------------------|------|----------|--------|--------------------|------------------|
| 6,15 | Plantación de totoras        | unid | 4,032,00 | 0,130  | 524,16             |                  |
| 6,16 | Corte de tallo de plántulas  | unid | 4,032,00 | 0,050  | 201,60             |                  |
| 6,17 | Riego de plántulas de totora | dia  | 30,00    | 16,430 | 492,90             | 2,750,82         |
|      |                              |      |          |        | <b>TOTAL \$US.</b> | <b>50,167,29</b> |

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| GASTOS GENERALES DE OBRA 10 % | <b>5,016,73</b>  |
| DIRECCIÓN TÉCNICA 10 %        | <b>5,016,73</b>  |
| <b>COSTO TOTAL DE OBRA</b>    | <b>60,200,74</b> |

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN  
REALIZADO EN LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE COPACABANA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO COPACABANA

*Institución: Fundación MEDMIN*

*Encargados: Lic. Danilo Bocángel; coordinador del proyecto*

*Ing. Florian Erzinger; asistente científico*

*Ing. Patricia Delgadillo; asistente técnico*

## **TABLA DE CONTENIDO**

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.   | Planta de tratamiento y programa de investigación Copacabana .....     | 4  |
| 1.1. | Antecedentes .....   | 4  |
| 1.2. | Introducción .....   | 5  |
| 1.3. | Los objetivos .....  | 6  |
|      | Dentro del Proyecto: .....   | 6  |
|      | Específicos de la Investigación: .....                                 | 6  |
| 2.   | La planta de tratamiento .....   | 7  |
| 2.1. | Procesos biológicos .....  | 7  |
| 2.2. | Funcionamiento técnico .....   | 7  |
| 3.   | Campaña de investigación .....   | 8  |
| 3.1. | Metodología .....  | 8  |
|      | Muestreo .....   | 8  |
|      | Métodos de muestreo .....  | 8  |
|      | Determinación de oxígeno disuelto .....                                | 8  |
|      | Determinación del pH y potencial mV .....                              | 9  |
|      | Determinación de los otros parámetros químicos y microbiológicos ..... | 9  |
| 3.2. | Reporte del seguimiento .....  | 10 |
| 4.   | Interpretación de Resultados Obtenidos .....                           | 11 |
| 4.1. | Parámetros de referencia .....   | 11 |
|      | Acidez / alcalinidad .....   | 11 |
|      | Temperatura .....  | 12 |
|      | Sólidos suspendidos .....  | 13 |
| 4.2. | Oxígeno y carbono orgánico y inorgánico .....                          | 15 |
|      | Oxígeno disuelto .....   | 15 |
|      | Demanda biológica de oxígeno .....                                     | 16 |
|      | Demanda química de oxígeno .....                                       | 17 |
| 4.3. | Nutrientes .....   | 19 |
|      | Nitrógeno .....  | 19 |
|      | Fósforo .....  | 20 |
| 4.4. | Metales pesados .....  | 22 |
|      | Plomo .....  | 22 |

|   |                    |
|---|--------------------|
| Cadmio.....                                   | 25                 |
| 4.5. Coliformes fecales.....                  | 27                 |
| 5. Conclusiones .....                         | 29                 |
| 6. Apéndice.....                              | 31                 |
| 6.1. Expresiones científicas y técnicas ..... | 31                 |
| 6.2. Información adicional .....              | 32                 |
| 6.3. Documentación fotográfica .....          | 33                 |
| 6.4. Datos crudos .....                       | <a href="#">33</a> |
| 6.5. Bibliografía.....                        | 33                 |
| Literatura científica .....                   | 52                 |
| Páginas de Web.....                           | 52                 |



# PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO COPACABANA

Institución: Fundación MEDMIN  
Encargados: Lic. Danilo Bocángel; coordinador del proyecto  
Ing. Florian Erzinger; asistente científico  
Ing. Patricia Delgadillo; asistente técnico

## 1. PLANTA DE TRATAMIENTO Y PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN COPACABANA

### 1.1. Antecedentes

En 1998, los gobiernos de Perú y Bolivia han suscrito con el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el convenio de asistencia técnica y financiera para la ejecución del proyecto “Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial GEF, a ser ejecutado por la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT).

En el marco de ejecución del proyecto "BOL / 98 / G-31, Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)", se viene ejecutando el subproyecto “Pruebas del Uso de Totorales para la Descontaminación en el Ámbito Boliviano” (21.06), a cargo de la Fundación MEDMIN.

El contrato fue firmado en octubre de 2000 y tras una serie de adendas, se logró extender el mismo hasta febrero de 2003. El retraso en la culminación de este proyecto tiene su origen en diversas causas entre las que podemos citar:

- Ausencia de poblaciones rurales ubicadas a orillas del lago que cuenten con un sistema de alcantarillado.
- Las únicas poblaciones identificadas bajo este sistema fueron: Copacabana, Desaguadero y San Pedro de Tiquina, de las cuales fueron elegidas como poblaciones beneficiarias Copacabana y Desaguadero.
- En Copacabana se tropezó con la falta de terreno para la construcción de la planta. Finalmente el terreno elegido pertenecía a la Prefectura del Departamento y los trámites de transferencia de los mismos al Municipio de Copacabana demoraron bastante tiempo.
- El cambio de concepción del proyecto original, requirió la contraparte financiera de la Alcaldía de Copacabana para la construcción de la planta de tratamiento, motivo por el cual se realizaron sucesivos viajes y reuniones en <sup>20</sup>Copacabana juntamente con representantes del ALT PNUD hasta lograr la firma de Convenios.
- La contraparte del Municipio de Copacabana tardó en hacerse realidad por los problemas políticos que vivía entonces.
- Una vez finalizada la construcción de la planta de tratamiento en Copacabana, el cárcamo de bombeo a cargo del municipio no se encontraba funcionando. Con ayuda de las motobombas de MEDMIN, se logró mantener vivos los plantines de totoras por espacio de dos meses hasta que el cárcamo funcionó.

- Se tuvo que esperar un tiempo aproximado de dos meses hasta que las totoras reaccionen y se termine de activar el sistema.
- En el Desaguadero, por la magnitud de las obras civiles a construir, también se gestionó la contraparte de la ALT, para la construcción de terraplenes y sedimentadores, como parte de su proyecto de saneamiento ambiental y alcantarillado.

Pese a las numerosas dificultades que acabaron de ser descritas, finalmente se logró culminar obras satisfactoriamente en las regiones elegidas. El proyecto inicial estuvo dirigido a evaluar el comportamiento de los totorales en la descontaminación de aguas servidas, sin embargo, gracias al esfuerzo de las instituciones involucradas a lo largo de estos dos años y medio (Alcaldía de Copacabana, ALT/PNUD y MEDMIN), fue posible extender los alcances del mismo, al construir obras de verdadera magnitud en Copacabana y Desaguadero, las cuales formarán parte de los proyectos de mayor impacto para su bienestar social, ecológico y de salud pública durante los próximos años.

## 1.2. Introducción

El proyecto en si puede ser dividido en tres etapas: **Preinversión**, que incluye las gestiones realizadas y la elaboración de los Expedientes Técnicos y otros informes de acuerdo a contrato; **Inversión**, que constituye la construcción misma de las obras, dirección y supervisión; y el **Monitoreo** ejecutado a través de un Programa de Investigación. Todos los criterios técnicos estuvieron orientados al tratamiento de desagües de poblaciones humanas sin impacto adicional de origen industrial.

De manera general, la planta de tratamiento consta de un **proceso primario** de eliminación y sedimentación de sólidos gruesos y suspendidos, seguido de un **proceso secundario** de purificación mediante tres celdas de tratamiento con flujo subsuperficial en el cual están insertadas las totoras, sistema en el que alternan procesos químicos y biológicos que favorecen la descontaminación.

Una vez concluidas las obras, se realizaron pruebas hidráulicas y reajustes en la planta para dar lugar al Programa de Investigación, que evalúe la eficiencia de purificación de la planta de tratamiento. Los resultados de este monitoreo de un mes y medio de duración se presentan y valorizan en el presente informe. Para la operación y mantenimiento óptimo de la planta de tratamiento se elaboró y entregó a los municipios de Copacabana y Desaguadero un Manual de Operación y Funcionamiento, con el fin de asegurar una purificación máxima de las descargas.

El Programa de Investigación contempló la medición de parámetros in situ: caudal, pH, temperatura y el potencial mV y el oxígeno disuelto del agua en los puntos de descarga de los tubos de evacuación. Los mismos parámetros se midieron in situ en el agua que se tomo del suelo de las celdas de tratamiento a una profundidad de 20 cm mediante tubos cribados. Adicionalmente se tomó muestras de suelos de las celdas de tratamiento y de plantas (para analizar el contenido de contaminantes en raíces y tallos) para hacer analizar las concentraciones de nitrógeno total, fósforo total, del plomo y del cadmio además de sólidos suspendidos y definir la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) en las muestras de agua y las concentraciones de plomo y de cadmio en las muestras de suelo y raíces de las totoras.

A continuación, como parte del proyecto, se explican los objetivos bajo los cuales fue construida la planta de tratamiento de aguas servidas y los objetivos de la campaña de investigación. Para facilitar al lector del presente informe científico el entendimiento del funcionamiento de la planta de tratamiento. También en el capítulo 2 se da una breve introducción en el funcionamiento biológico y técnico de una planta de purificación de aguas servidas mediante *tratamiento pasivo como es el caso de Copacabana o Desaguadero*. En el capítulo 3 se describe la campaña de investigación, iniciando con la explicación de la *metodología utilizada*, seguido por un breve reporte del seguimiento de la campaña. Luego, en la parte principal de presente informe, el *capítulo 4, se presenta parámetro por parámetro los resultados de las mediciones de manera gráfica y se realiza una interpretación de los datos*. Al final, en el capítulo 5 de este documento, los resultados son discutidos y evaluados para deducir algunas

conclusiones fundamentales sobre el funcionamiento y la eficiencia de la planta de tratamiento de Copacabana. La documentación de la campaña por fotos y los datos crudos de laboratorio, seguido por una breve explicación de las expresiones científicas utilizadas en este informe tiene lugar en el apéndice, capítulo 6.

### **1.3. Los objetivos**

Como objetivos prácticos del proyecto y del Programa de Investigación, se tienen:

#### **Dentro del Proyecto:**

- Cumplir una parte medular del contrato 21.06 del proyecto "Conservación de la Biodiversidad de la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)": Validación de humedales artificiales y el uso de la totora para la descontaminación, como una nueva tecnología de purificación de aguas residuales humanas en el perímetro altiplánico.

#### **Específicos de la Investigación:**

- Cuantificar la eficiencia de la planta de tratamiento, por un lado, respecto a la eliminación de los nutrientes claves para evitar la eutrofización de sistemas acuáticos y por otro, respecto a la reducción de los contaminantes como materia orgánica, sólidos suspendidos, coliformes y metales pesados
- Conocer la influencia del sistema descontaminador sobre el pH y a la temperatura del agua tratada.
- Cuantificar el aumento progresivo en los niveles de oxígeno después del tratamiento en cada una de las celdas con totora.
- Realizar un análisis comparativo de las concentraciones de metales pesados más importantes de aguas residuales humanas, en los suelos de las celdas y las plantas de totoras mismas que crecen en estos suelos.
- Investigar si la composición bioquímica de las totoras cultivadas en las celdas de tratamiento cumplen normas de alimentación de animales domésticos.

## 2. LA PLANTA DE TRATAMIENTO

### 2.1. Procesos biológicos

Desde los años sesenta, humedales construidos con helófitas se utilizan como “sistemas naturales” en la purificación de aguas servidas y sus usos se intensificaron en las últimas décadas, por ser un método alternativo de bajo costo que mantiene la integridad del paisaje y tiene un alto valor ecológico. En los humedales construidos como sistemas de purificación se encuentran implantados helófitas, plantas macrófitas enraizadas y emergentes del agua, que habitan en pantanos y aguas someras. De estos sistemas se tiene más y más ejemplos en los países en vías de desarrollo. *MEDMIN a través de este tipo de proyectos, es la primera institución en el país que esta experimentando introducir tecnologías de esta naturaleza en zonas rurales afectadas por la contaminación doméstica, industrial y minera.*

Entre las helófitas más usados, comúnmente se encuentran gramíneas como *Phragmites australis* entre otros. En el altiplano Andino se tiene dos helófitas que son aptas para el uso de la purificación de aguas contaminadas: La totora (*Schoenoplectus tatora*) y la matara (*Juncus andicola*), las cuales ya han sido probados como buenos purificadores dentro del sistema de humedales de tratamiento de aguas servidas (Franken 1988, 1990 y Taucer 1991,1993).

De acuerdo a diversos estudios realizados en el mundo, se ha demostrado que el lugar donde se realiza la mayor actividad de purificación de aguas servidas es en la zona de la rizósfera de los helófitas. Para el caso de la totora, el proceso se realiza en la raíz, rizoma y el substrato que la alberga. En cambio en el tallo y en la columna de agua que la rodea el proceso de purificación de las aguas servidas es menor. Asimismo, en la rizósfera de la totora se encuentra un conjunto de sustancias que inhiben y anulan el desarrollo de microorganismos fecales y patógenos y al mismo tiempo crea condiciones de oxigenación que son ideales para la producción de bacterias aeróbicas que contribuyen a la eliminación de nutrientes (fósforo, nitrógeno) y tóxicos (pesticidas, metales pesados etc.) disueltos en el agua (Bahlo & Wach 1993).

Eso implica que para un proceso de purificación de aguas servidas por medio de la totora, todo el caudal de agua contaminada, debe pasar por la zona de la rizósfera pues es en esta zona donde se efectuará el mayor tratamiento de las aguas servidas. El principio del sistema de tratamiento se basa entonces en utilizar la zona más activa de purificación de la totora para el tratamiento, la cual se ubica en la zona de la rizósfera y del substrato que la alberga. En consecuencia se tiene que tomar todas las precauciones de hacer transcurrir el agua mediante un sistema subsuperficial. Tomando en cuenta esta condición, agregando un filtro de substrato de arena especialmente preparado y adecuado para este fin, se establecen sistemas de tratamiento muy eficientes. El nivel de eficiencia de este tipo de plantas de purificación, es superior a cualquier otro sistema de tratamiento con plantas helófitas.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el proceso constructivo de un sistema de flujo subsuperficial es mucho más complejo que otros tipos de sistema de tratamiento pasivo con el uso de helófitas. Esto implica que el costo de inversión (construcción de la obra) puede llegar a ser muy elevado. No obstante, la ventaja de estos sistemas pasivos de flujo subsuperficial radica en dos aspectos fundamentales: por un lado *su eficiencia*, y por otro *sus bajos costos de operación y mantenimiento*. Esto último es el factor que más se debe tomar en cuenta a la hora de realizar estudios de factibilidad técnica en materia de medio ambiente en regiones rurales, en las que sus municipios no están en condiciones de afrontar elevados costos de operación y funcionamiento de una obra determinada. Menos aun, considerando que los presupuestos asignados al saneamiento ambiental en estos lugares son muy bajos en relación a otras prioridades como educación y salud.

### 2.2. Funcionamiento técnico

En la Figura 1 se describe de manera gráfica el sistema de tratamiento de aguas servidas de Copacabana. El diseño del sistema de humedales artificiales construido para el tratamiento de aguas servidas, en breve consta de una rejilla que permite retener los materiales gruesos, una cámara de

distribución a un tanque de sedimentación, un dispositivo de distribución y regulación de caudal, por lo menos tres estanques de totora ubicados en serie para evacuar a una poza de control para luego introducir las aguas tratadas a la zona de evacuación a través de los peines de infiltración.

La rejilla consiste en una estructura metálica que permite retener los materiales más gruesos provenientes del cárcamo de bombeo ubicado a 2,5km, impidiendo su ingreso hacia el tanque sedimentador. Dicho sedimentador consiste en una estructura de concreto que tiene como función el tratamiento primario de las aguas a través de procesos físicos de sedimentación del material en suspensión que llega desde el cárcamo de bombeo. La compuerta de regulación, que sigue al tanque de sedimentación tiene la función de controlar el caudal de entrada al sistema de tratamiento con totoras, dependiendo del caudal necesario según los parámetros proyectados. El caudal ingresado al sistema de purificación biológica se controla por un medidor de caudal, un dispositivo un vertedero triangular de 90° sin contracción, con el cual uno puede definir la masa de agua pasando por unidad de tiempo por una relación matemática entre la altura del agua y el caudal.

$$\begin{aligned} \text{Vertedero rectangular: } Q &= 0.533 \cdot \sqrt{2g} \cdot C \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{5/2} \\ &\cong 1.393 \cdot \sqrt{\frac{m}{\text{sec}^2}} \cdot h^{5/2} \quad [\text{m}^3\text{sec}^{-1}] \end{aligned}$$

Con:

Q := Caudal [m<sup>3</sup>sec<sup>-1</sup>]

h := Diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero [m]

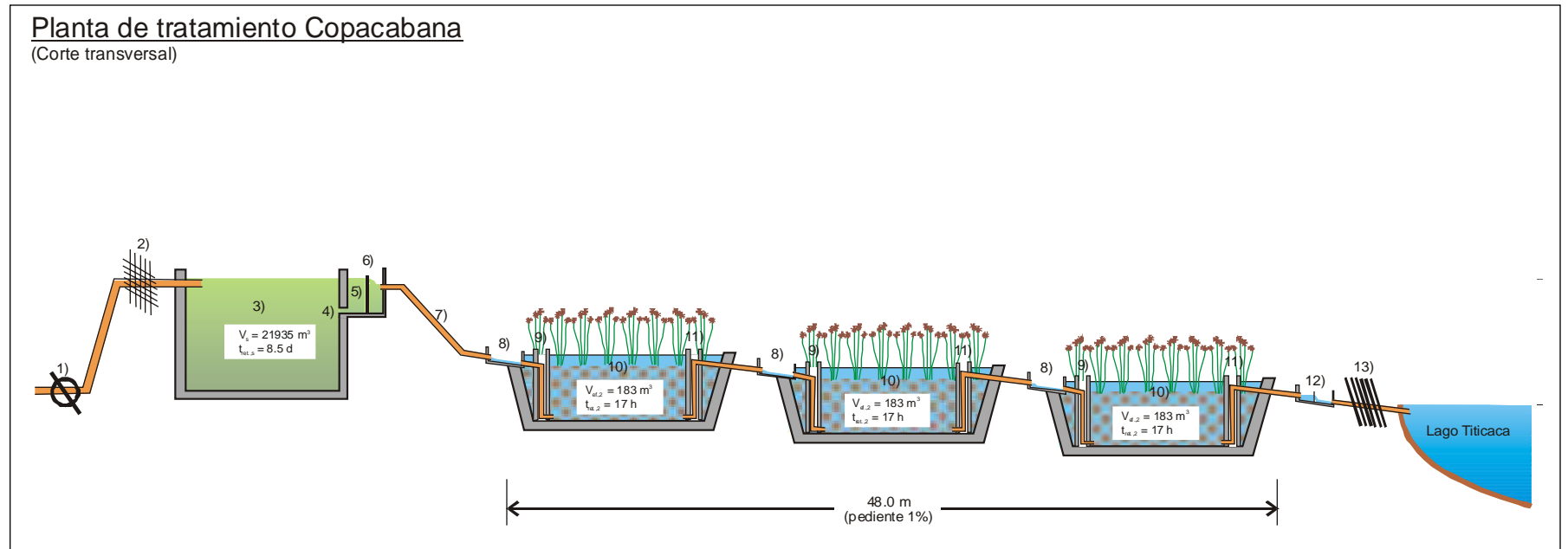
C := Coeficiente del vertedero dependiendo parámetros adicionales; en el caso de mediciones en el campo se pone un valor constante de 0,59 [ ]

g := Constante gravitacional [msec<sup>-2</sup>]

θ := Ángulo del vertedero [°]

Una vez que el agua pasa por el medidor de caudal, inmediatamente llega a un dispositivo de aireación, que eficiente la purificación biológica en las celdas de tratamiento incrementando mayor oxigenación. Desde la caja de aireación, el agua pasa por tubos cribados a la primera celda de tratamiento y pasa en su mayor parte por flujo subterráneo por un relleno de 80cm, en la cual están insertadas las plantas de totora, el agente biológico fundamental en la descontaminación de aguas servidas. Una vez que el agua pasa por el sistema de filtros de arena, es recolectada al punto más bajo de la celda de tratamiento para luego ser evacuada a la siguiente celda de purificación pasando previamente por otra caja de aireación.

El sistema de tratamiento consta de 3 celdas de purificación. Las celdas de tratamiento están constituidas de arena con la granulometría especificada en el expediente técnico, la misma que sirve para el tratamiento y fijación de los agentes contaminantes. Una vez que las aguas han terminado de transcurrir por las tres celdas, el agua pasa finalmente por los peines de infiltración, sistema que extrae los últimos restos de sólidos suspendidos antes de su evacuación al Lago Titicaca.



**Figura 1:** Esquema de funcionamiento de la planta de tratamiento de Copacabana: Las aguas servidas entren por bombeo en el tanque de sedimentación, de lo cual pasan las tres celdas de tratamiento planteadas con totoras (*Schoenoplectus tatora*) para finalmente ser tratadas por peines de infiltración 1) cárcamo de bombeo, 2) rejilla, 3) tanque de sedimentación con 4) compuerta de regulación de caudal, 5) poza de disipación de energía y 6) medidor de caudal, 7) la tubería de conexión al sistema principal, 8) dispositivo de aireación, 9) caja de distribución e inspección, 10) celdas de tratamiento, 11) caja de control de niveles, 12) medidor de caudal de salida y 13) peines de infiltración.

### 3. CAMPAÑA DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Metodología

##### Muestreo

En principio, se realizaron distintos relevamientos de análisis de aguas in situ y mediante los laboratorios de Calidad Ambiental (LCA, Instituto de Ecología) y SGS, para verificar que la planta purificadora estaba ya activada y de esta manera dar lugar a la fase de monitoreo intensivo de 35 días.

En el plan de muestreo existen siete puntos de muestreo y cuatro clases de muestras: agua, suelo y tanto raíces como tallos de plantas. Cuatro de los siete puntos corresponden a las cajas de aireación de cada celda de tratamiento y tienen como referencia (ver gráfica 1):

- Tubo 1 (Entrada de agua a la primera celda de tratamiento que procede del tanque de sedimentación)
- Tubo 2 (Salida de agua de la primera celda de tratamiento)
- Tubo 3 (Salida de agua de la segunda celda de tratamiento)
- Tubo 4 (Salida de agua de la tercera celda de tratamiento)

Se recogió una muestra de agua en cada tubo para análisis de todos los parámetros (pH, potencial mV, temperatura, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, demanda biológica y química de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, plomo, cadmio y colifecales) en un intervalo de tiempo de 7 días durante 35 días. Para determinar los caudales se registró el tirante en cada tubo. La frecuencia de muestreo se determinó con respecto del tiempo de retención del agua en el tanque de sedimentación, que se estimó en un promedio de 8½ días.

Los otros tres puntos corresponden a las celdas de tratamiento cuya referencia es:

- Celda 1 (Primera celda de tratamiento directamente después el tanque sedimentador)
- Celda 2 (Segunda celda de tratamiento)
- Celda 3 (Tercera celda de tratamiento antes de la salida del agua a los peines de infiltración)

Se obtuvo una muestra de suelo y plantas (raíces y tallos separadamente) en cada celda para determinar los contenidos de Pb y Cd en las totoras, al principio y al final de la campaña de monitoreo.

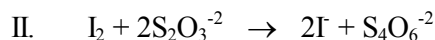
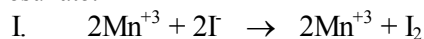
También se registraron datos de pH, temperatura del agua y altura de saturación del agua ( $h_s$ ) en cada celda y datos climáticos locales como la precipitación, la evaporación, la temperatura mínima, máxima, y la temperatura de mediodía del ambiente en el intervalo de tiempo de 1 día durante 7 días.

##### Métodos de muestreo

La lista de métodos y procedimientos a ser usados en el campo y en el laboratorio y los límites de detección de los diferentes métodos individuales son:

##### Determinación de oxígeno disuelto

Para determinación de oxígeno disuelto se emplea el método de Winkler: La prueba está basada en la adición a la muestra de una solución de manganeso divalente, seguido por un álcali fuerte dentro de un frasco con tapa de vidrio. El oxígeno disuelto presente oxida rápidamente a una cantidad equivalente del hidróxido manganoso precipitado y lleva a los hidróxidos a estados de valencia más altos. En la presencia de iones yoduro y acidificación, el manganeso oxidado revierte a su estado divalente con la liberación de yodo equivalente al oxígeno disuelto originalmente contenido en la muestra. El yodo es luego titulado con una solución estándar de tiosulfato:



Equipo de medición:

Kit para oxígeno disuelto 0.2-4 y 1-20mg/L O<sub>2</sub>, MOD. OX-2P, # 1469-00

Reactivos y materiales:

- Matraz DBO, 60mL, marcado en los 30mL, con tapón de vidrio esmerilado

- Matraz cuadrado de vidrio (para mezclar)
- Pinzas cortantes para cápsulas intermedias
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 1
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 3
- Tarjeta de Instrucciones, juego de Prueba OX-2P
- Probeta, plástico. 5.83mL
- Solución patrón estabilizada de tiosulfato de sodio, 0.0109 N, 100mL

**Procedimiento:**

Se llena el matraz para oxígeno (matraz con tapón de vidrio esmerilado) con la muestra de agua, dejando resbalar la muestra por el matraz suavemente durante 2 o 3 minutos, evitando la formación de turbulencias y burbujas en la muestra al llenar. Se inclina ligeramente el matraz y coloque el tapón de un golpe para evitar atrapar burbujas de aire.

Se quita el tapón y se añade el contenido de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 1 y de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2 al matraz. Tapar el matraz suavemente para evitar atrapar burbujas de aire. Se sacude vigorosamente el matraz para mezclar. Se formaran flóculos de precipitado. Se espera a que el precipitado se deposite aproximadamente hasta la mitad del volumen del matraz.

Se quita el tapón y se añade el contenido de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 3, se debe evitar atrapar burbujas de aire. Se sacude vigorosamente el matraz. Los flóculos se disuelven y la muestra se torna amarilla si contiene oxígeno disuelto.

Se llena hasta el máximo la probeta de plástico con la muestra hasta aquí preparada. Se vierte el contenido de la probeta en el matraz para mezclar. Se añade gota a gota la solución patrón de tiosulfato sódico al matraz. Contar cada gota añadida y agitar hasta mezclar tras añadir cada gota. Continuar añadiendo gotas lentamente hasta que la muestra se vuelva totalmente incolora. *El número total de gotas de solución valorada equivale al total de oxígeno disuelto expresado en mg/L.*

**Determinación del pH y potencial mV**

La acidez / alcalinidad se determina generalmente por método potenciométrico midiendo la concentración de iones hidrógenos de forma instrumental empleando un pH-metro. Igualmente de forma potenciométrica se define el potencial mV la totalidad de los iones negativos suspendidos en el agua.

Equipo de medición:

- Equipo pH/mV Handylab SCHOTT, rango del pH-metro: -2 a 16, precisión: +/-1 dígito, resolución: 0.01.
- Accesorios: Electrodo combinado de medición de pH, solución KCl 3mol/L (300L) para conservar el electrodo.

**Procedimiento:**

Se limpia el electrodo de medición pH / potencial mV con agua destilada. Se mide el pH y el potencial mV esperando que la lectura se estabilice. Después de utilizarlo, se enjuaga otra vez con agua destilada.

**Determinación de los otros parámetros químicos y microbiológicos**

Todos los otros parámetros químicos y microbiológicos, vale decir, concentraciones de nitrógeno total ( $N_{tot}$ ), fósforo total ( $P_{tot}$ ), plomo (Pb), cadmio (Cd), sólidos suspendidos (SST) y tanto la demanda biológica de oxígeno (DBO), como la demanda química de oxígeno (DQO) en las muestras de agua y las concentraciones de plomo y de cadmio en muestras de suelo y raíces de las totoras, fueron analizados por el laboratorio SGS ENVILAB (Société Générale de Surveillance).

Las muestras de agua fueron fijadas a temperaturas entre 1 a 4°C hasta que fueron entregadas al laboratorio 48 horas después de la toma de muestras.



## 3.2. Reporte del seguimiento

4. 12. 2002:

Llegando a la planta de tratamiento, MEDMIN recibió un informe del ingeniero de obra, quien informó que dos días antes, los tubos de la planta fueron destruidos violentamente, se presume por un acto de sabotaje. Por esta razón, los responsables del programa de investigación, decidieron trasladar el inicio de la campaña hasta el día 20 de diciembre 2002 hasta que pueda ser reparada la construcción y se establezca un equilibrio de flujos de masa.

20. 12. 2002:

Este primer día de monitoreo, los técnicos de MEDMIN encontraron la planta de tratamiento sin flujo de agua. Asimismo, el caudal en los tubos era muy bajo. El encargado del mantenimiento de la alcaldía de Copacabana, Ing. Felipe Maydana, informó que por razón de corte de energía eléctrica no era posible bombear desde el cárcamo de la ciudad a la planta de tratamiento durante varios días. Después de media hora, se logró re-establecer la nutrición de la planta con el agua residual. Después haber esperado el establecimiento de un cierto equilibrio de flujos entre las celdas de tratamiento, se procedió a la toma de muestras.

27. 12. 2002:

En este día se observó que el funcionamiento del sistema era estable en las condiciones de alimentación y en las celdas de tratamiento. Se realizó la medición del tirante, la medición in situ y la toma de muestras para definición de los parámetros fisicoquímicos y biológicos.

3. 1. 2003:

En este día, se encontró la planta de tratamiento casi totalmente seca, con caudales muy disminuidos en los tubos 1, 2 y 3. Sólo el efluente de la celda 3 mostró un flujo continuo. Por el hecho de que el tiempo de retención en las tres celdas es aproximadamente de un día, se puede estimar que al menos en este periodo, la planta de tratamiento estuvo sin alimentación. Como el tubo 2 (entre la celda 1 y 2) no tuvo ningún flujo y no se pudo ubicar una persona responsable del mantenimiento a la planta de tratamiento de la alcaldía, no fue posible tomar una muestra de dicho tubo tomándose las muestras solamente en los tubos 1, 3 y 4.

Al mismo tiempo, se constató que una de las instalaciones de medición fue destruida nuevamente por violencia. Esta penosa situación fue comunicada al encargado del mantenimiento de la alcaldía de Copacabana Ing. Felipe Maydana, cuatro días más tarde.

10. 1. 2003:

En esta fecha la variación del caudal de agua tratada fue mayor. Se registraron datos de tirante en cada tubería. Considerando los procedimientos de muestreo se realizó la toma de muestras de las siguientes clases: agua, plantas y suelo, así como la caracterización de parámetros in situ.

10. 1. Al 16. 1. 2003:

Durante todos los días de esta semana se registraron datos físicos y ambientales como los caudales que entraron a las distintas celdas de tratamiento, la temperatura, el pH y el potencial mV del agua en las celdas. Asimismo se midió la temperatura ambiental, la precipitación y la evaporación para conocer mejor la relación entre estos parámetros exteriores y el funcionamiento de la planta de tratamiento.

17. 1. 2003:

En este día el volumen de agua tratada fue mayor, las celdas tuvieron en su interior un alto nivel de agua, sin embargo con volumen constante. Además de la toma de muestras respectiva de agua y de suelos, se procedió a tomar muestras de totora para determinar sus contenidos de sustancias en sus raíces y tallos

Asimismo, se efectuaron tomas fotográficas y se filmaron los detalles constructivos de la planta junto a los procedimientos de medición, con fines de producción de un vídeo.

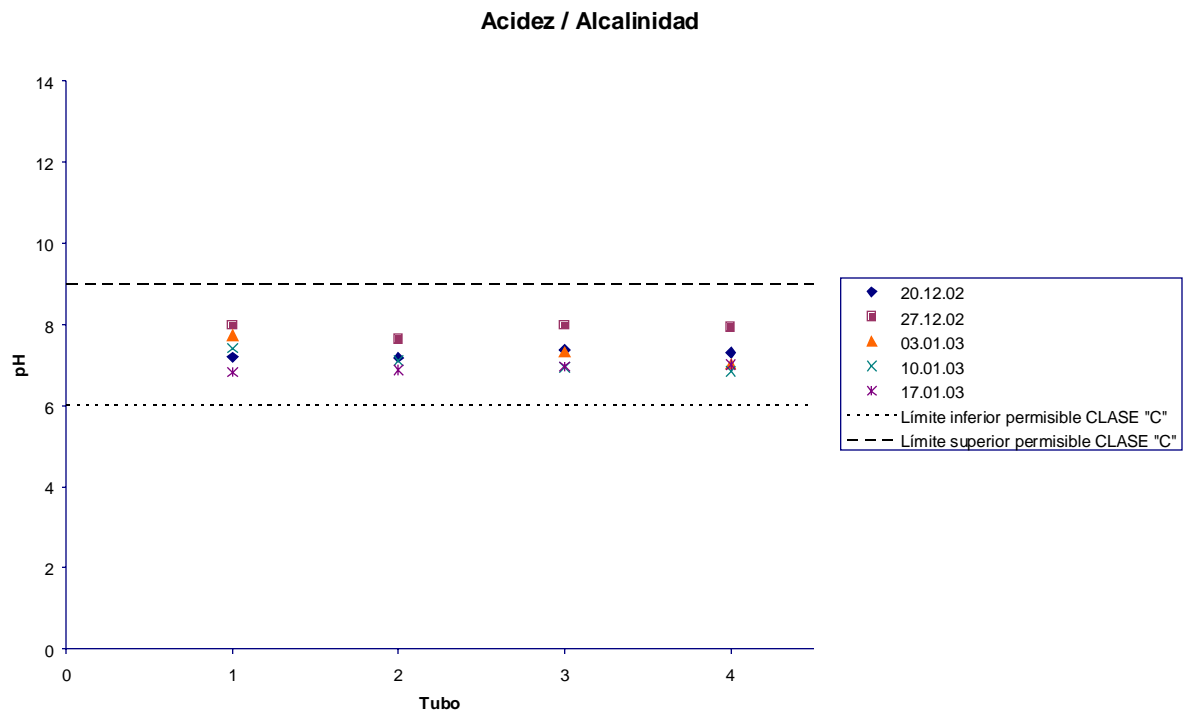
## 4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.1. Parámetros de referencia

Para ganar una primer vista del agua contaminada que sea purificada física (por el tanque sedimentador) y biológicamente en la planta de tratamiento de Copacabana se presenta primeramente algunos parámetros de referencia como el pH, la temperatura y los sólidos suspendidos. Con estas informaciones ya se puede conocer la calidad del agua vagamente y estimar los requisitos generales a una tal planta de tratamiento.

#### Acidez/ alcalinidad

El pH, es decir la concentración de los iones hidrógenos ( $H^+$ ), indica la acidez (pH 1 a 7) o la alcalinidad (pH 7 a 14) de un cuerpo agua. Dependiendo del tipo de roca predominante en una cierta región, el agua natural puede mostrar un pH de 6 (en áreas de piedra silicato) hasta pH 8 (en áreas de piedra caliza). La alteración del pH tanto por debajo, por influencia de desagües industriales ácidos, como por encima de este rango natural, por razones de contaminación provenientes de residuos humanos y detergentes, impactan la integridad de los sistemas ecológicos y también a la salud del ser humano. La acidez o alcalinidad del agua que llega a la planta de tratamiento nos da entonces una idea de su procedencia y del tipo de contaminación que se va a encontrar en los otros parámetros químicos y microbiológicos presentados en los siguientes capítulos. La estabilización del pH alrededor de 7 por el otro lado nos muestra la eficiencia de la capacidad de buffer de un cierto ecosistema.



**Figura 2:** Los valores de pH en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la Figura 2, se encuentra una fluctuación de pH insignificante entre los dos valores extremos de pH 6,8 y pH 8,0 con un promedio alrededor de 7,3. Comparando los valores del inicio del proceso de purificación con los de la salida del agua hacia el Lago Titicaca, se observa en promedio una ligera reducción del pH de 7,4 a 7,2. Por el otro lado, el agua en el tubo 1 muestra una fluctuación en el

tiempo un poco mayor que el agua que sale de la última celda de tratamiento. Estos hechos conjuntos se puede interpretar como una suave estabilización del pH por la reducción de los contaminantes anteriormente mencionados.

La normativa ambiental boliviana, pide para aguas potables (clase "A") un pH entre 6,0 y 8,5. Como el agua que sale de la planta de tratamiento no es destinada al consumo humano, sino más bien entra directamente al Lago Titicaca con la posibilidad de ser usada para riego de las chacras alrededor de la planta de tratamiento, para fines de este informe se utiliza la clase "C" del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), la cuál permite una fluctuación del pH entre 6,0 y 9,0. Como se observa en la Fig. 2.

En consecuencia, el agua que sale de la planta de tratamiento cumple absolutamente y en todos los casos, los límites permisibles tanto de la clase "C", como los de la clase "A".

### **Temperatura**

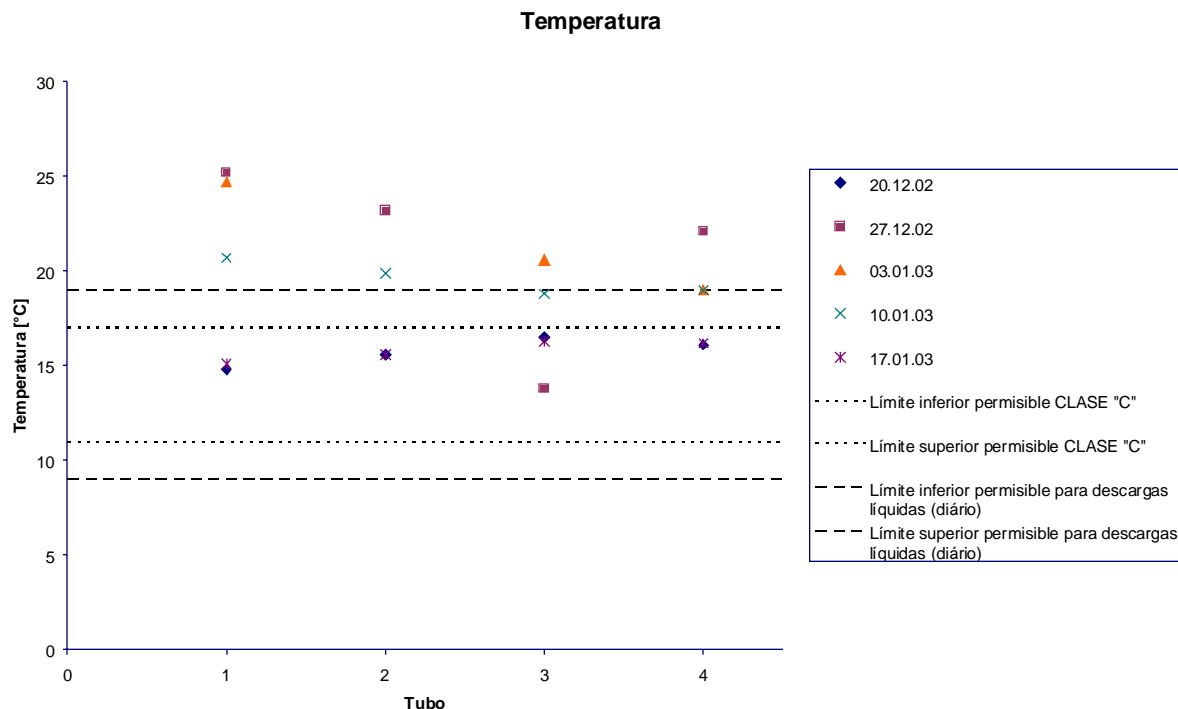
La temperatura de un cuerpo de agua natural es el parámetro físico más importante de un ecosistema acuático, porque la temperatura influye directamente en todos los procesos microbiológicos y químicos, por ejemplo, en aguas estancadas (mar, lagos y humedales), el crecimiento de la masa biológica y de los microorganismos que viven en el agua, y en aguas corrientes, la saturación de oxígeno. Con temperaturas elevadas, el crecimiento biológico aumenta proporcionalmente y el punto de saturación de gas baja. En el caso de una planta de tratamiento, que purifica el agua por la asimilación de los distintos nutrientes y la reducción de las sustancias tóxicas disueltas en el agua, el objetivo principal es adquirir un ecosistema con productividad máxima. En consecuencia, el aumento de la temperatura en la planta misma es un efecto positivo.

En la Fig. 3, se observa que el agua que entra por el tubo 1 a la primera celda de tratamiento está significativamente alterada en su temperatura, mostrando un promedio de 20,1°C. con una fluctuación de  $\pm 5,0^\circ\text{C}$ ; igualmente se caracteriza por una gran inestabilidad en su temperatura, esto debido a la larga permanencia del agua en el tanque de sedimentación y los grandes volúmenes de agua que almacena este tanque. Por otro lado, la fluctuación en los tubos 2, 3, y 4 se estabiliza progresivamente a 18,5°C en promedio, con una fluctuación que disminuye de  $\pm 3,7^\circ\text{C}$  hasta  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ . Eso significa que la sucesión de humedales provoca en la primera celda de tratamiento un enfriamiento del agua calentada en el tanque de sedimentación y al mismo tiempo asegura en las siguientes dos celdas de tratamiento la estabilización de la temperatura del agua alrededor de los 18°C.

La Ley de Medio Ambiente Boliviana exige para desagües de la clase "C" que la alteración máxima es de  $\pm 3^\circ\text{C}$  con respecto a la temperatura del cuerpo de agua receptor y para descargas líquidas una variación de  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Partiendo de un promedio anual del agua superficial del Lago Titicaca de  $14^\circ\text{C}$ <sup>21</sup>, se puede anticipar que el agua que sale de la planta de tratamiento cumple la ley en la mayor parte del tiempo, ya que la temperatura promedio del agua del lago Titicaca en esta época del año es de 17.5 °C.

---

<sup>21</sup> Hay que tener en cuenta, que también el agua superficial muestra fluctuaciones de temperatura dependiente de la radiación solar de cada época.



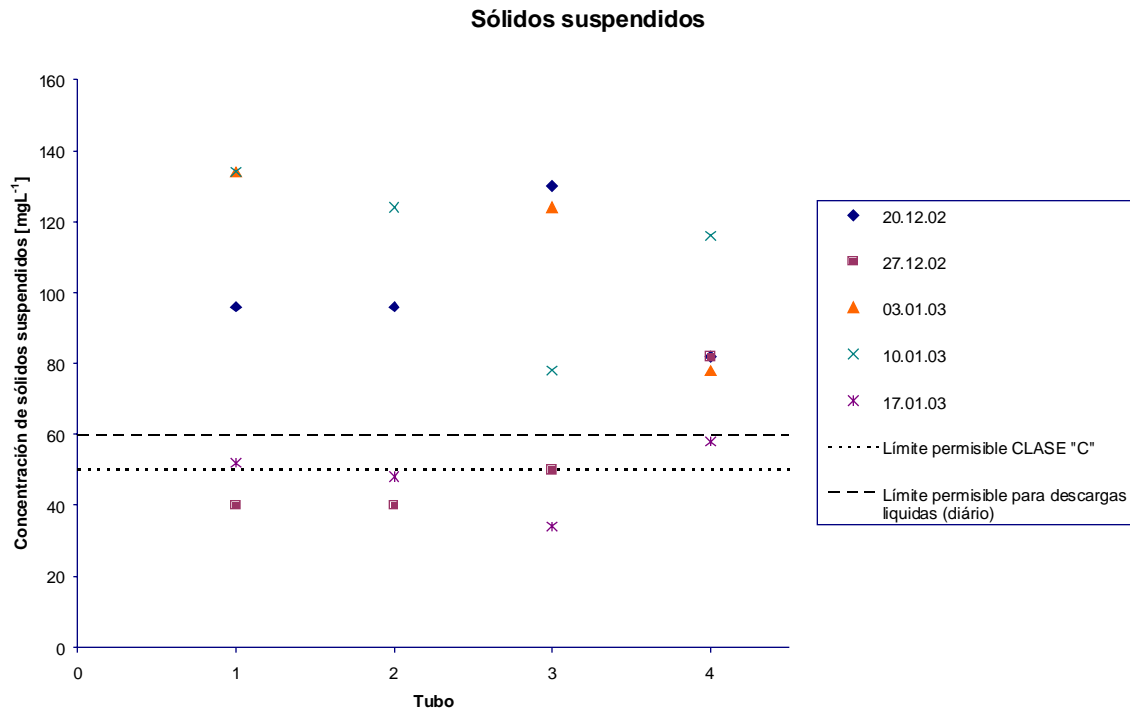
**Figura 3:** Los valores de temperatura en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

### Sólidos suspendidos

La cantidad de sólidos suspendidos (SST) de materia tanto orgánica como inorgánica, representa el grado de turbidez del agua. En aguas estancadas, este parámetro influye en el funcionamiento de un ecosistema acuático de dos maneras principales: por un lado, en épocas de productividad biológica, la turbidez del agua superficial disminuye la actividad fotosintética, lo que significa una reducción de la producción de oxígeno en esta capa de agua. Por otro lado, la presencia de materia orgánica aumenta el consumo bacteriano de oxígeno disuelto en los niveles más profundos del cuerpo de agua, lo que puede llevar a estas capas de agua hasta un estado anóxico. En respecto al consumo humano, una concentración de sólidos suspendidos aumentada significa una reducción en la calidad del agua potable.

Del análisis de los sólidos suspendidos en la Fig. 4, se observan dos hechos fundamentales: la concentración de sólidos suspendidos fluctúa tanto entre los distintos tubos como entre las distintas fechas de muestreo de manera muy fuerte. Además, en la sucesión de los humedales no se puede reconocer una reducción sistemática de los sólidos suspendidos. Sólo las muestras de agua del último muestreo, es decir del 17 de enero 2003, muestran un curso más o menos satisfactorio, cumpliendo al menos el límite permisible para descargas líquidas, la que pide una concentración máxima de sólidos suspendidos de 60mg/L.

La eficiencia de la planta en la reducción de los SST irá incrementándose a medida que los espacios porosos de la cama de arena sean ocupados por las raíces adventicias de la totora.



**Figura 4:** Las concentraciones de sólidos suspendidos en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Las razones para este comportamiento inesperado en la concentración de los sólidos suspendidos se puede ver por un lado en el hecho que la construcción de la planta de tratamiento ha concluido recién antes que el programa de investigación ha comenzado, por lo cual, la rizósfera de las totora todavía no se pudo consolidar. Por otro lado, las mediciones se hicieron en la época de lluvia, lo que puede impactar la calidad de los resultados por el agua de lluvia que pasa adyacente a las celdas de tratamiento y entran en el sistema de purificación, bien cargada con sólidos suspendidos del suelo del entorno. Por último, hay que mencionar también que la nutrición inconstante de la planta de tratamiento con aguas servidos de la ciudad de Copacabana, como se ha observado varias veces durante el monitoreo, muy probablemente contribuye a fluctuaciones alteradas sobre todo en la cantidad de los sólidos suspendidos en estos desagües. Finalmente, se ha podido evidenciar que el cárcamo de bombeo no está funcionando de manera adecuada, dejando ingresar apreciables cantidades de sólidos gruesos que se van disgregando pequeñas cantidades de SST a lo largo de su recorrido por el sedimentador.

El límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, pide una concentración de sólidos suspendidos máxima de 50mg/L y el límite permisible para descargas líquidas una de 60mg/L. Como se ve en la Fig. 4, la carga de los sólidos suspendidos en el agua que sale de la planta de tratamiento, está en la mayoría de las muestras muy por encima de los dos límites. En el futuro se tendría que averiguar, si con caudales más constantes se alcanzaría cumplir la ley.

## 4.2. Oxígeno y carbono orgánico e inorgánico

Los tres parámetros presentados en los siguientes subcapítulos, el oxígeno disuelto, la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) están en contexto con el metabolismo respiratorio de los organismos que viven en un cierto ecosistema, es decir, con el oxígeno consumido por organismos aeróbicos y el carbono orgánico e inorgánico que está acumulado en el agua y que potencialmente puede ser asimilado por procesos oxidativos. Con esta información, se pueden precisar conclusiones respecto al potencial Redox de un ecosistema acuático impactado por desagües y en consecuencia sobre los distintos procesos oxidativos que pueden tener lugar en éste.

### Oxígeno disuelto

El parámetro químico más importante para la vitalidad de un ecosistema acuático es el contenido de oxígeno disuelto (OD) en el agua. La falta de oxígeno impide la existencia de vida aeróbica, es decir de los peces, larvas de insectos y seres inferiores que requieren oxígeno para respirar. Además, aguas con concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 1,9 mg/L inician los procesos oxidativos anaeróbicos con la transformación de nitrato en nitrógeno molecular ( $N_2$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ), con el producto secundario de nitrito ( $NO_2^-$ ). Los últimos dos compuestos mencionados son altamente tóxicos. En el caso extremo de la ausencia casi absoluta de oxígeno, es decir en entornos anóxicos con concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 0,15 mg/L, el potencial reductor disminuye hasta que las bacterias anóxicas utilicen sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) para oxidar la materia orgánica, lo que resulta en la producción de sulfuro de hidrógeno ( $HS^-$ ), sustancia que hace que el agua sea no potable.

Como se aprecia en la Fig. 5, el agua que entra a la planta de tratamiento por el tubo 1 muestra un rango en el contenido de oxígeno disuelto entre 0,0mg/L y 2,0mg/L con un promedio de 0,6mg/L. Se puede decir que este agua, por razón de fuertes procesos oxidativos en el tanque de sedimentación, es anaeróbica hasta anóxica. Sin embargo, con la sucesión de las celdas de tratamiento, la concentración del oxígeno disuelto sube significativamente hasta un promedio de 2,7mg/L, un nivel entonces que está dentro de los parámetros aeróbicos. Este fenómeno puede ser atribuido al aporte de oxígeno atmosférico por procesos simbióticos en la rizósfera de las totoras.

El límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, exige un contenido mínimo de oxígeno disuelto de 60% de la concentración de saturación. Para descargas líquidas la ley no reconoce ningún límite para el contenido de oxígeno disuelto. Saliendo de una presión atmosférica de 0,61atm. en la altura de Copacabana (3'868 msnm.) según la fórmula de altura barométrica<sup>22</sup> y una presión parcial del oxígeno en el aire de 23%, se puede calcular la concentración de saturación en el cuerpo de agua superficial del Lago Titicaca por la Ley de Henry:

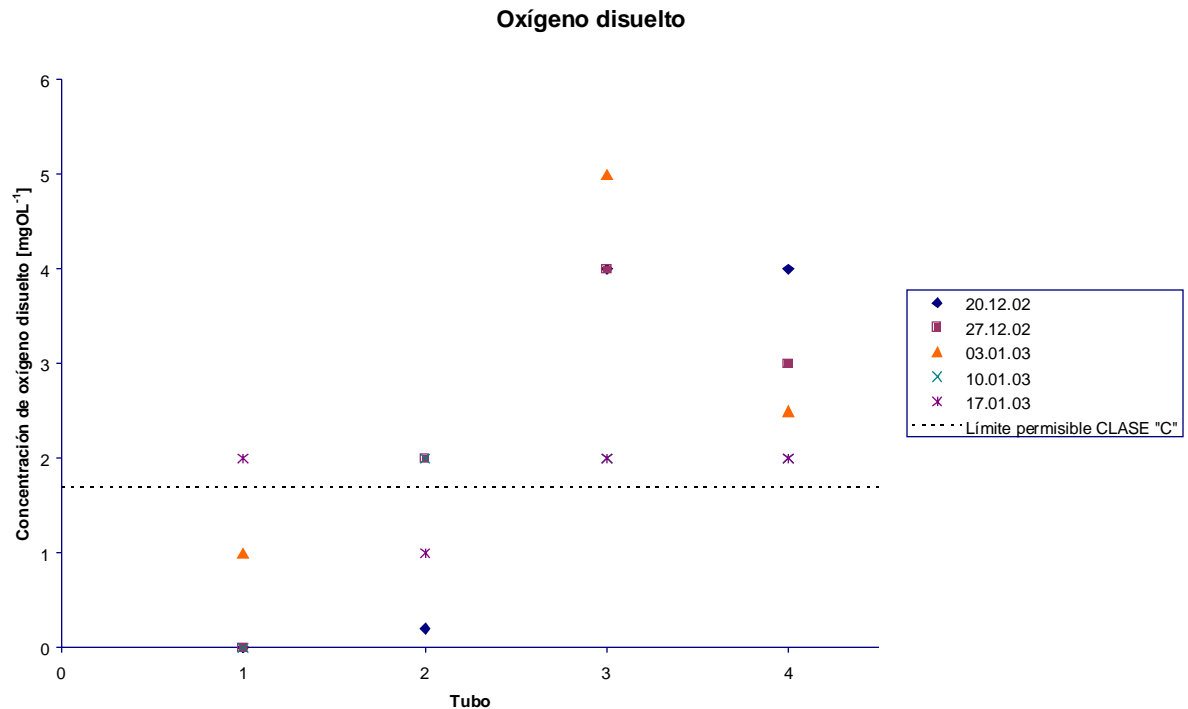
$$K_H(O_2) = \frac{[O_2]_{sat.}}{p_{O_2}(h=3'868m.)} = 1,26 \cdot 10^{-3} M / atm.$$

$$\text{En consecuencia: } [O_2]_{sat.}(h=3'868m.) = 0,177mM = 2,84mgO / L$$

Según estos cálculos, la concentración mínima de oxígeno disuelto que se debe establecer para aguas de la clase "C" que ingresen al cuerpo receptor del Lago Titicaca es 1,7 mg de oxígeno / L. Como se puede ver en la Fig. 5, las muestras de agua que se tomaron del tubo 4 tienen enteramente un contenido de oxígeno disuelto por encima de este límite.

---

<sup>22</sup> La fórmula de altura barométrica:  $p(h) = p_0 \cdot e^{\frac{-\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}}$   
 con:  $p_0 = p(h=0) = 101325Pa$   
 $\rho_0 = \rho(h=0) = 1,293kg/m^3$

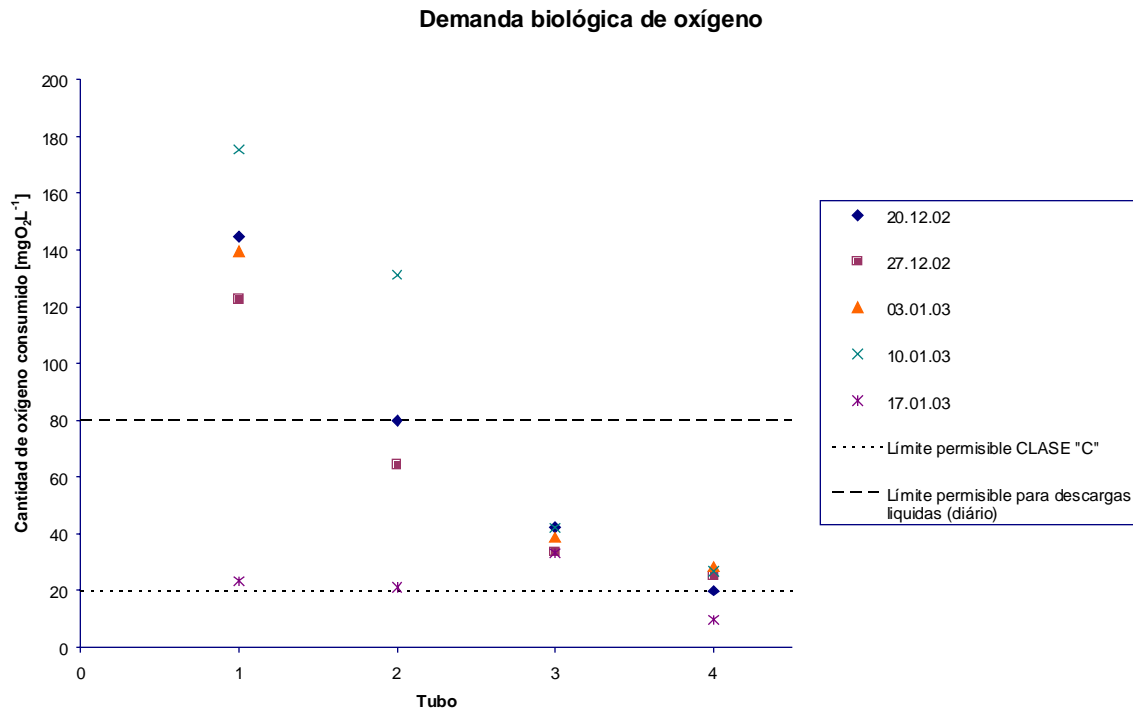


**Figura 5:** Las concentraciones de oxígeno disuelto en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el RMCH.

### Demanda biológica de oxígeno

La demanda biológica de oxígeno (DBO) representa la cantidad de carbono de origen biológico, es decir orgánico, disuelto en un cuerpo de agua. En otras palabras, la DBO nos brinda información acerca de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica presente en el agua. En la naturaleza, el carbono orgánico se asimila por organismos quimioheterotrofos aeróbicos o anaeróbicos por la oxidación del carbono con las sustancias oxidativas presentes en un cierto entorno en la siguiente secuencia: Oxígeno ( $O_2$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ), óxido de manganeso ( $MnO_2$ ), hidroxígeno de hierro ( $FeOOH$ ) y sulfato ( $SO_4^{2-}$ ). El interés ecológico en este parámetro un poco abstracto, es conocer el potencial de un agua cargada con materia orgánica de reducir al potencial Redox en el cuerpo de agua recipiente por la oxidación de este material orgánico.

Evaluando los resultados presentados en la Fig. 6, se reconoce que a excepción de la muestra del 17 de enero 2003, los aguas tomadas del tubo 1 se caracterizan por una demanda biológica de oxígeno muy elevada,  $123mgO_2/L$  hasta  $175mgO_2/L$ . De igual manera, se observa que el contenido de materia orgánica disminuye exponencialmente en las siguientes celdas de tratamiento hasta que las muestras de agua del tubo 4 muestran un promedio de  $22mgO_2/L$ . Una razón de la presencia de valores relativamente bajos en los cuatro tubos el día 17 de enero de 2003, puede ser la dilución de los desagües de la ciudad de Copacabana por las lluvias fuertes que empezaron esos días, lo que se puede verificar en los caudales significativamente elevados medidos en estos días (ver ¿??). Tomando en cuenta sólo los datos de los primeros cuatro muestreos, se puede calcular una reducción promedio del DBO de  $146mgO_2/L$  a  $25mgO_2/L$ , es decir una eficiencia de purificación de la planta de tratamiento de  $-83\%$ .



**Figura 6:** Las cantidades de oxígeno consumido por demanda biológica en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según del RMCH.

La normativa ambiental para este parámetro presenta un límite permisible para desagües de la clase "C" máxima de 20mgO<sub>2</sub>/L, mientras que el límite permisible para descargas líquidas es 80mgO<sub>2</sub>/L. Como se ve en la Fig. 6, el agua que sale de la planta de tratamiento para desembocar en el Lago Titicaca, cumple el límite para descargas líquidas en todas las muestras y con el límite de la clase "C" al menos en un parte de las muestras.

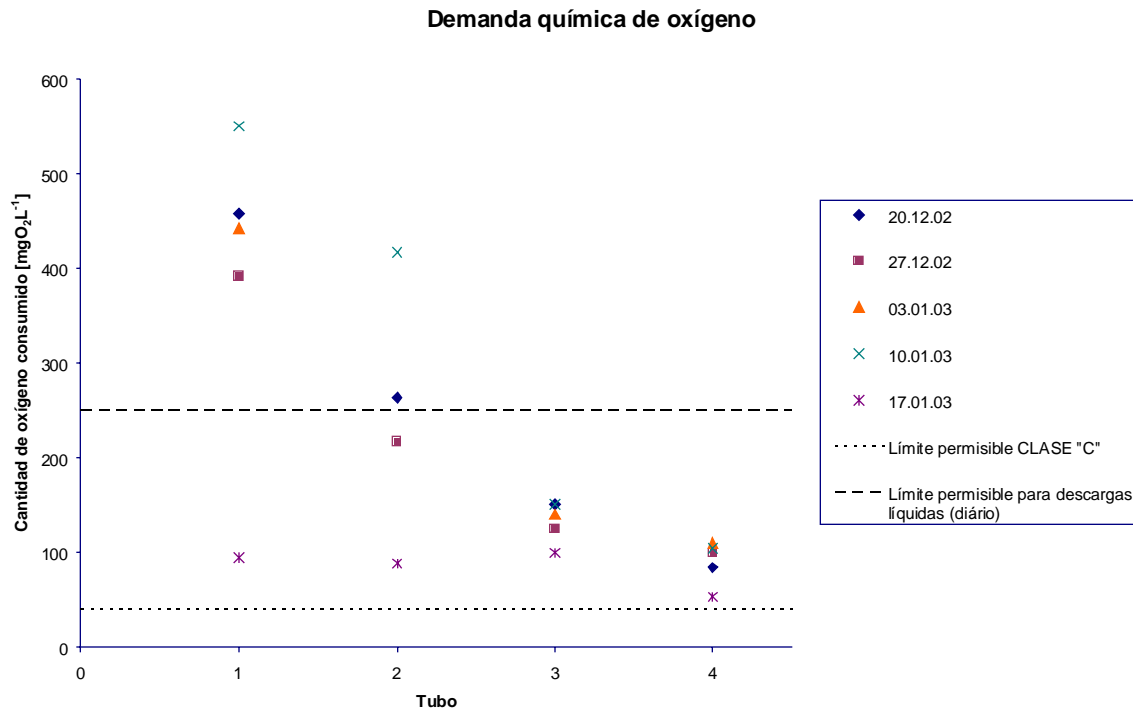
Después de un tiempo mayor de estabilización ecológica de la planta de tratamiento, se piensa casi con total certeza que los niveles de DBO reducirán hasta encontrarse en todos los casos dentro de la Clase "C". En unos meses más, cuando los procesos de degradación de materia orgánica en las tres celdas de purificación sean más eficientes, la carga de carbono de origen biológico en el agua que sale de la planta de tratamiento será más baja. Una condición importante para que eso suceda sin embargo, es que los caudales en los tres tubos de nutrición al sistema sean lo más constante posibles.

### **Demanda química de oxígeno**

La demanda química de oxígeno (DQO) representa, en contraste a la DBO, la cantidad de carbono inorgánico disuelto en un cuerpo de agua. En la naturaleza, el carbono inorgánico se asimila por organismos quimiolitotrofos, los cuales en su mayoría son aeróbicos, es decir utilizan el oxígeno disuelto en el agua como medio de oxidación. De igual manera, el interés ecológico en este parámetro, es conocer el potencial de un agua cargada con carbono inorgánico para reducir al potencial Redox en el cuerpo de agua receptora por la asimilación de este carbono inorgánico. En otras palabras, la DQO nos brinda información acerca de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar el carbono inorgánico presente en el agua.



El análisis de la demanda química de oxígeno nos da una imagen muy similar al de la demanda biológica de oxígeno, presentada en el subcapítulo anterior. La carga de carbono inorgánico en el tubo 1 está muy elevada en las muestras del 20 de diciembre de 2002, 27 de diciembre de 2002, 3 de enero de 2003 y 10 de enero de 2003, mostrando valores entre  $392\text{mgO}_2/\text{L}$  y  $550\text{mgO}_2/\text{L}$ . Igualmente como la DBO, la DQO se reduce en las muestras de estos días exponencialmente, al transcurrir el agua por las tres celdas de purificación, mostrando finalmente un promedio de  $89\text{mgO}_2/\text{L}$  en el tubo 4. Considerando otra vez solamente los resultados de los primeros cuatro muestreos, se calcula una eficiencia de purificación del agua con respecto a la carga de carbono inorgánico de  $-78\%$ .



**Figura 7:** Las cantidades de oxígeno consumido por demanda química en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

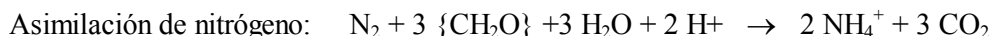
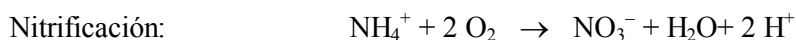
El límite permisible para la clase "C" del RMCH, exige una demanda química de oxígeno máxima de  $40\text{mgO}_2/\text{L}$  y el límite permisible para descargas líquidas exige  $250\text{mgO}_2/\text{L}$ . Como vemos en la Fig. 7, la carga de carbono inorgánico en el agua que sale de la planta de tratamiento está muy por debajo del límite para descargas líquidas y suavemente por encima del límite para desagües de la clase "C". Igualmente como en el caso del parámetro DBO, se puede anticipar que en los próximos meses, con un mantenimiento de la planta de tratamiento óptimo y constante, también los valores de carbono inorgánico disuelto en el agua que desemboca al Lago Titicaca estarán por debajo del límite de los desagües de la clase "C".

### 4.3. Nutrientes

En los próximos dos subcapítulos se presentan y evalúan los datos de las dos sustancias consideradas como nutrientes en ecosistemas acuáticos, el nitrógeno y el fósforo. En aguas estancadas, el perjuicio por estos dos elementos se relaciona directamente con el grado de eutrofización, es decir, con la productividad biológica de un ecosistema por la asimilación fotosintética de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) e indirectamente el consumo de oxígeno disuelto por la degradación de esta materia orgánica ({CH<sub>2</sub>O}) acumulada por la producción biológica incrementada.

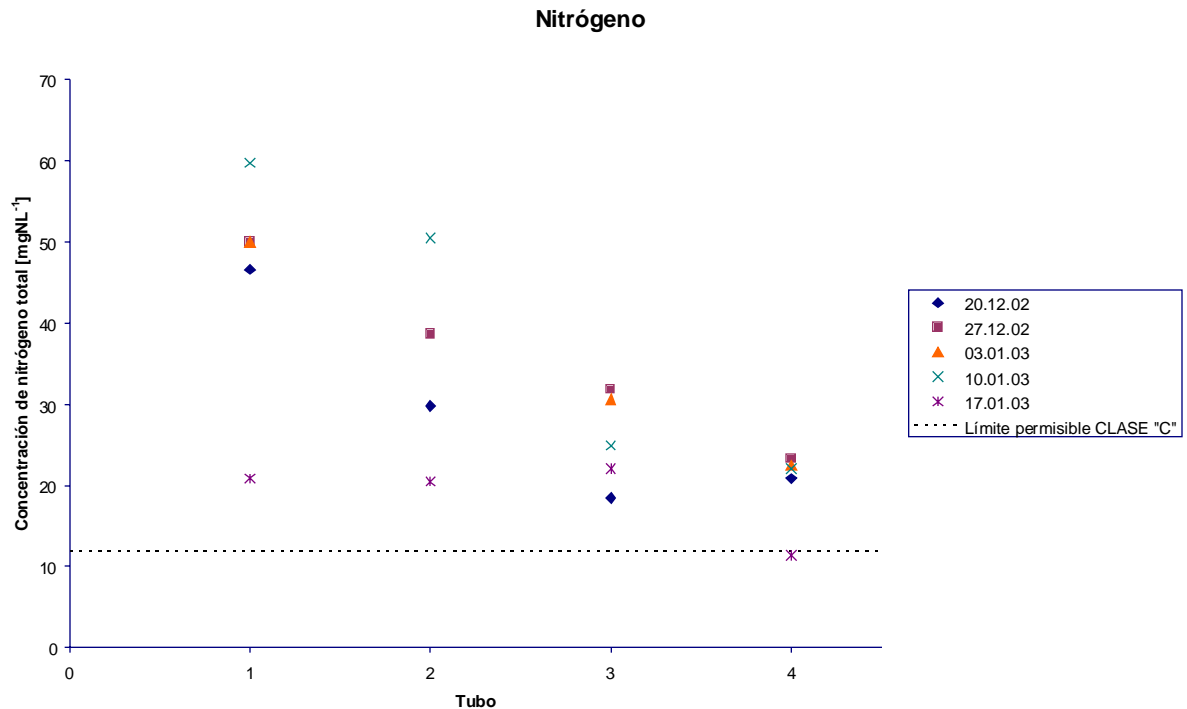
#### Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento que en sistemas acuáticos puede aparecer en especies químicas muy diversas, de las cuales unas con otras están conectadas por varias reacciones Redox. Este sistema reactivo muy complejo y todavía no enteramente entendido por los científicos, se llama ciclo de nitrógeno, en el cual las reacciones y los compuestos transformados más importantes son:



La primera de las cuatro reacciones es aeróbica, las otras tres son facultativamente anaeróbicas. Tanto el nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), como el amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y el nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), que son productos secundarios de la nitrificación, de la desnitrificación y de la amonificación de nitrato), son tóxicos. Por eso, la sobrecarga de un ecosistema acuático por nitrógeno significa por un lado la intoxicación de este sistema natural, y por otro lado la reducción progresiva del potencial Redox con las consecuencias explicadas en el capítulo ????. El nitrógeno en las aguas residuales tienen su origen en general, en la contaminación por orina humana o animal.

Interpretando los resultados de la Fig. 8, se observa otra vez una fluctuación muy grande en las análisis de nitrógeno total en el tubo 1 y por lo menos concentraciones muy elevadas en los primeros cuatro muestreos entre 46,6mgN/L y 59,8mgN/L. También en los datos de estas fechas se reconoce una reducción progresiva en los contenidos de nitrógeno total del agua de una celda a la próxima, hasta que llegan a una concentración promedio de 20,0mgN/L en el tubo 4. Tomando en cuenta también en este caso sólo los datos de los primeros cuatro muestreos, se puede calcular una reducción promedio en la concentración del nitrógeno de 51,6mgN/L a 22,2mgN/L, es decir una eficiencia de purificación de la planta de tratamiento de - 57%.



**Figura 8:** Las concentraciones de nitrógeno total en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

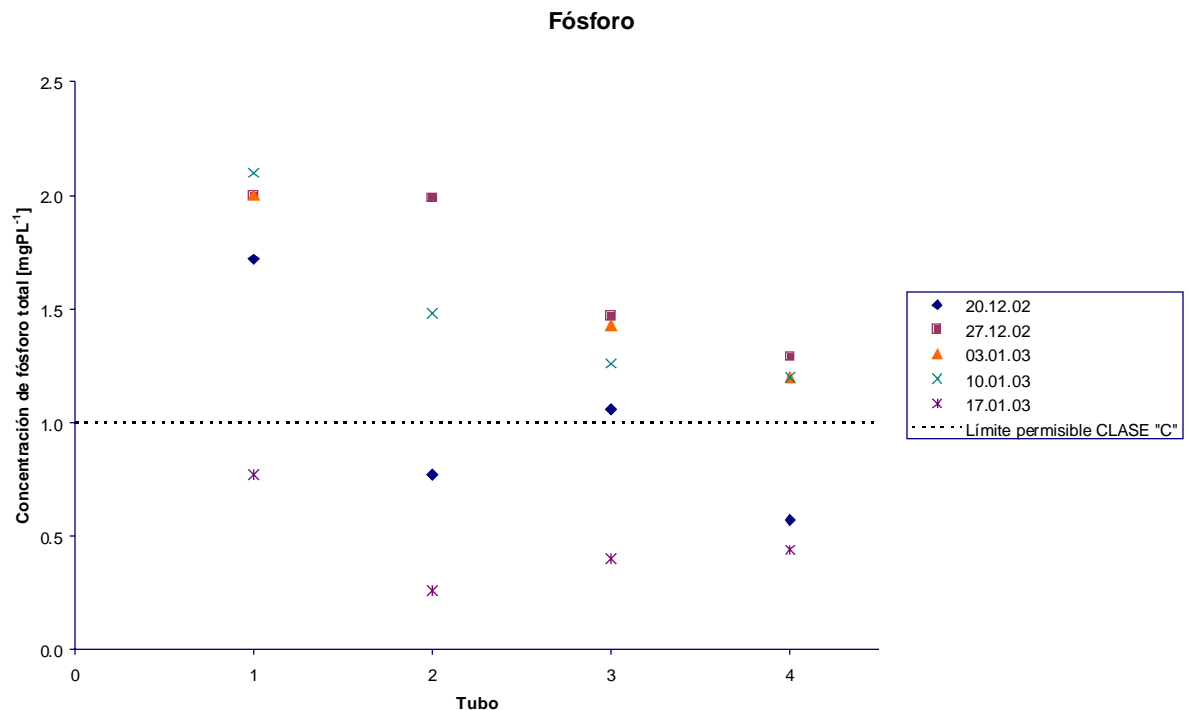
La Ley de Medio Ambiente Boliviana exige para el nitrógeno total un límite permisible para desagües de la clase "C", un máximo de 12,0mgN/L en su concentración total. Para descargas líquidas la ley no reconoce ningún límite para su contenido de nitrógeno disuelto. Como se ve en la Fig.8, el agua que sale de la planta de tratamiento muestra concentraciones de nitrógeno levemente por encima de este límite permisible. Tomando en cuenta que la planta de tratamiento todavía no está en un total equilibrio ecológico y que se conoce eficiencias de purificación con respecto al nitrógeno total en plantas de tratamiento similares a la de Copacabana que son mucho mayores, se puede esperar un aumento en la reducción del nitrógeno también en esta planta de tratamiento de manera significativa en el futuro, hasta cumplir los límites permisibles para desagües de la clase "C". Para alcanzar esto, sin embargo, se necesita mantener la planta con una alimentación constante de aguas residuales.

## Fósforo

El fósforo es el nutriente limitante al crecimiento de la biomasa en ecosistemas acuáticos, por un lado porque su presencia en la materia orgánica - la composición química de la cual simplificada puede ser anotada como  $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4)$  - en comparación con los otros elementos, es la más escasa y por otro lado, porque la especie química de fósforo - la más frecuente en la naturaleza - tiene una fuerte tendencia de adsorber a la materia orgánica. Por estas razones, el contenido de fósforo en aguas estancadas es el parámetro que predominantemente influye en la eutrofización de estos ecosistemas con todas sus consecuencias explicadas en la introducción de este capítulo. El fósforo en las aguas residuales tiene origen por lo general en la contaminación por excrementos fecales humanos o animales.

Analizando los resultados de los distintos muestreos en la Fig. 9, se reconoce una fluctuación en la concentración del fósforo total muy grande en todos los cuatro puntos de toma de muestras. El agua que entra a la planta de tratamiento muestra concentraciones de fósforo entre 0,8mgP/L y 2,1mgP/L,

con un promedio de 1,7mgP/L. Sin embargo, lo que se ve también muy claramente es que la reducción del contenido de fósforo en el agua, evidentemente sucede en todos los cinco casos linealmente aproximadamente con la misma eficiencia de  $-45\%$  en promedio, independiente de la concentración de inicio. Este hecho nos muestra, que la eliminación del fósforo en el estado de equilibración ecológica al sistema todavía está dominado por procesos físicos, es decir por la adsorción del fosfato a la matriz de suelo, y no por su asimilación biológica. Es decir, se puede esperar que una vez que la productividad biológica de esta planta de tratamiento sea la óptima, la eficiencia en la eliminación del fósforo será mucho mayor.



**Figura 9:** Las concentraciones de fósforo total en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

El límite permisible para desagües de la clase "C" según la normativa boliviana, exige un contenido máximo del fósforo total disuelto en el agua de 1 mgP/L. Para descargas líquidas la normativa no conoce ningún límite para su contenido de fósforo. Como se puede observar en la Fig. 9, el agua que sale de la planta de tratamiento muestra concentraciones de fósforo cercano a este límite permisible. Tomando en cuenta que también en el caso del fósforo total se sabe de eficiencias de purificación en plantas de tratamiento similares a la construida en Copacabana, son mucho mayores, se puede esperar un aumento progresivo en la reducción del fósforo. Pero también en este caso hay que decir que esto se logrará sólo con un mantenimiento óptimo y alimentación lo más constante posible.

## 4.4. Metales pesados

En los siguientes dos subcapítulos se presentan y evalúan los contenidos de los dos metales pesados más frecuentes en aguas servidas, el plomo (Pb) y el cadmio (Cd). Se debe recordar que se cuentan con datos tomados en el agua tratada, en los suelos de las celdas de tratamiento y en las raíces de las plantas de totora.

El interés en los metales pesados en ecosistemas acuáticos se explica por dos razones: por un lado, los metales pesados se caracterizan por una fuerte tendencia de acumularse en organismos biológicos (bioacumulación) y por otro lado las dos sustancias son tóxicas para mamíferos como el ser humano y otros seres vivos como p. e. los insectos, peces y anfibios. Por estas características, el plomo y el cadmio tienen un peligro alto de intoxicación por el consumo crónico incluso de concentraciones muy por debajo de la dosis letal aguda.

En el contexto de la acumulación de metales pesados<sup>23</sup> hay que mencionar que en los helófitos, la bioacumulación más alta tiene lugar en las raíces. Por esta razón y porque se anticipaba en general concentraciones de metales pesados muy por debajo incluso del límite de detección (lo que resultó cierto), para tener datos representativos y seguros, en este programa de investigación se ha tomado solamente muestras de las raíces de las totoras, que nos sirven para inferir conclusiones sobre el contenido de metales pesados en toda la planta.

### Plomo

En mamíferos, el plomo por su consumo causa daños en el sistema de sangre, en el tracto digestivo, en el sistema central nervioso y también puede tener como consecuencia de su consumo el disturbio en el desarrollo fetal. La característica especialmente peligrosa de este elemento es que tiene una permanencia química en sistemas ecológicos muy alta y que por eso, una vez absorbido en la grasa de un organismo biológico, la posibilidad de degradación y eliminación del cuerpo es casi nula, es decir que tiene un alto factor de bioacumulación en la cadena ecológica de nutrición y en consecuencia de intoxicación crónica.

Las fuentes de este elemento se relacionan con el combustible, compuestos de plomo se utilizan como antiacústico en los motores de gasolina. Otra fuente de plomo en aguas residuales son los tubos de cañerías que son revestidos con plomo, lo que con el tiempo se oxida y se disuelve en el agua.

Analizando los contenidos de plomo en el agua en la Fig. 10, se reconoce una concentración casi absolutamente constante durante todo el período de monitoreo y en todos los tubos de alrededor de 0,01mgPb/L, que representa el límite de detección. Eso significa que obviamente el plomo disuelto en las aguas residuales que llegan a la planta de tratamiento están muy por debajo de los límites permisibles y no se reduce de manera significativa por la biomasa en las celdas de tratamiento. La eficiencia de eliminación del plomo, sin embargo, puede cambiar cuando se de un equilibrio ecológico instalado que facilitaría un crecimiento microbiológico mayor.

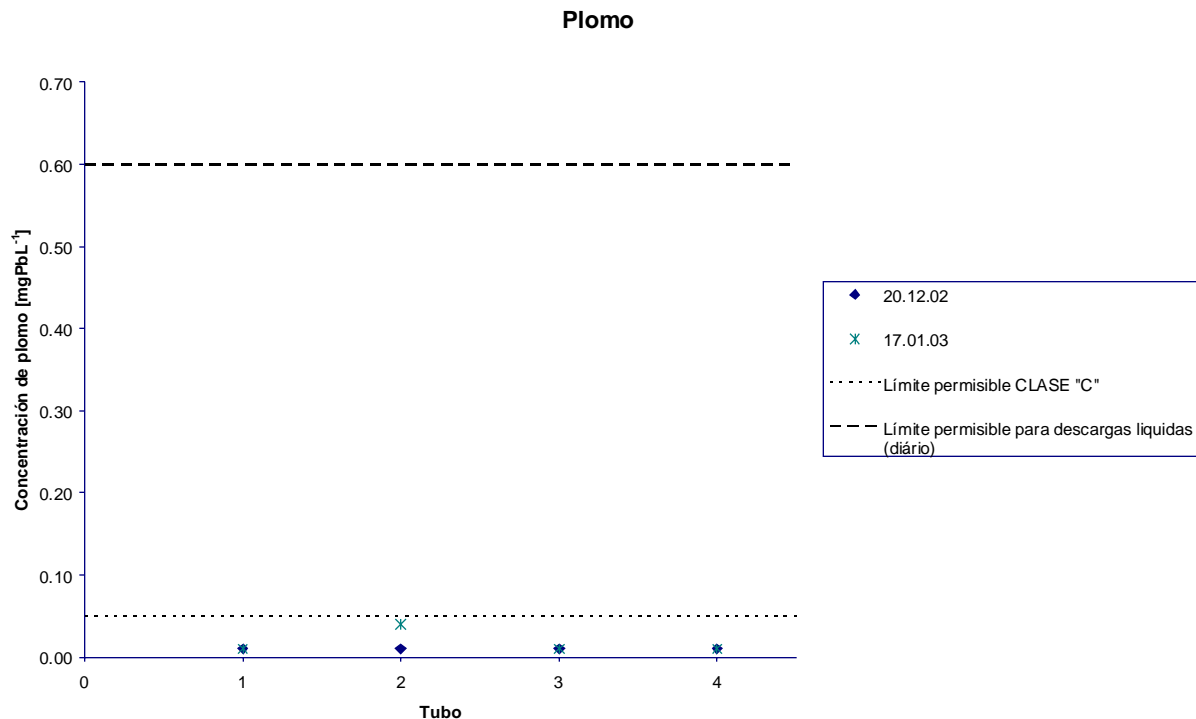
Por otro lado, cuando se evalúa la Fig. 11, se observa que las concentraciones de plomo en las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora en dependencia con el tiempo, se comprueba que tampoco existe una acumulación significativa de plomo en la biomasa de la planta de tratamiento. Además, se reconoce que las muestras del 20 de diciembre 2002, con concentraciones entre 124mgPb/kg y 32mgPb/kg en los suelos y entre 2,4mgPb/kg y 1,0mgPb/kg en las raíces, muestran valores mucho mayores a los del 17 de enero 2003, los que están entre 8mgPb/kg y 4mgPb/kg en los suelos y en 6,0mgPb/kg en todas las muestras de raíces. Eso provoca una fluctuación en todos los resultados que está muy alto alrededor del promedio de los mismos datos. Este fenómeno se puede

---

<sup>23</sup> La bioacumulación tiene lugar principalmente en los lípidos, es decir la grasa y los aceites de un organismo. Como los tallos de una planta están compuestos en su mayoría de celulosa, es lógico que los metales pesados se acumulen en los rizomas, dónde por razón de simbiosis con distintos microorganismos y hongos, la planta muestra un contenido de lípidos aumentado.

atribuir a la heterogeneidad natural de muestras de suelos y plantas. Sin embargo, comparando las concentraciones en la sucesión de las tres celdas de tratamiento, se ve que en cada muestreo el contenido de este metal pesado disminuye tanto en el suelo (de 66mgPb/kg a 18mgPb/kg en promedio), como en las plantas de totora (de 4,2mgPb/kg a 3,5mgPb/kg en promedio) de una celda a la siguiente. Este fenómeno indica que sí existe una acumulación en la biomasa de las celdas de tratamiento, la cual depende de la concentración del plomo en el medio de nutrición, aún cuando no se percibe la eliminación del plomo disuelto en el agua misma, debido a que estos cambios en las concentraciones de plomo en el agua están por debajo del límite de detección. Por esta razón sería necesario seguir observando los contenidos de plomo en la biomasa durante un horizonte de tiempo mínimo de aproximadamente unos dos años, para poder arribar a conclusiones confiables acerca la bioacumulación del plomo en el sistema de purificación.

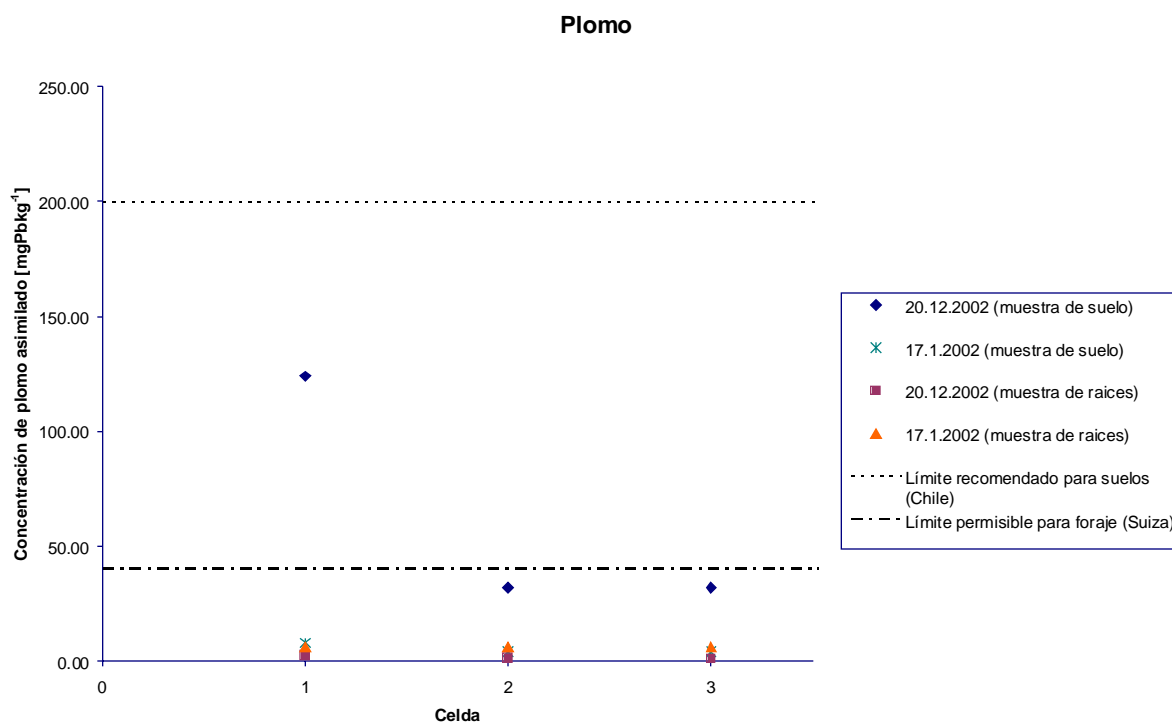
En el caso del plomo, la normativa ambiental boliviana reconoce límites permisibles para el plomo disuelto, únicamente en el agua. Para cuerpos de agua de la clase "C", el límite permisible exige una concentración máxima de 0,05mgPb/L y para descargas líquidas exige un máximo 0,6mgPb/L. En la planta de tratamiento de Copacabana, todas las muestras tomadas, se encuentran por debajo de ambos límites.



**Figura 10:** Las concentraciones de plomo disuelto en el agua en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el RMCH.

Para valorar los resultados obtenidos de las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora se recurrió a límites correspondientes a las leyes de medio ambiente de otros países (ver tablas 1 a 3 en el capítulo 6.2.). Tomando en cuenta que los distintos países trabajan con diferentes recursos naturales, de los cuales unos implican más urgencia de acción que otros y en consecuencia piden límites para ciertos parámetros más altos que los otros<sup>24</sup>, para esta evaluación se utilizaron los límites jurídicamente vinculatorios, los más exigentes encontrados en las distintas leyes, lo que son para suelos el límite recomendado de la Ley Chilena (200mgPb/kg) y para plantas el límite permisible para forraje de la Ley Suiza (40mgPb/kg). A excepción del valor para la concentración de plomo en el suelo de la celda 1 del 20 de diciembre de 2003, que muy probablemente se trata de una muestra foránea, todas las concentraciones medidas tanto en los suelos, como en las raíces de las plantas de totora están muy por debajo del límite correspondiente indicado.

Estos resultados nos permiten afirmar que más adelante se podrán utilizar las totoras podadas, como medio de forraje. Sin embargo, como ya se explicó, con una bioacumulación aumentada, eso podría cambiar en los próximos meses y años, por lo cual se sugiere medir el contenido de plomo en las plantas de totora cada vez antes de su poda.



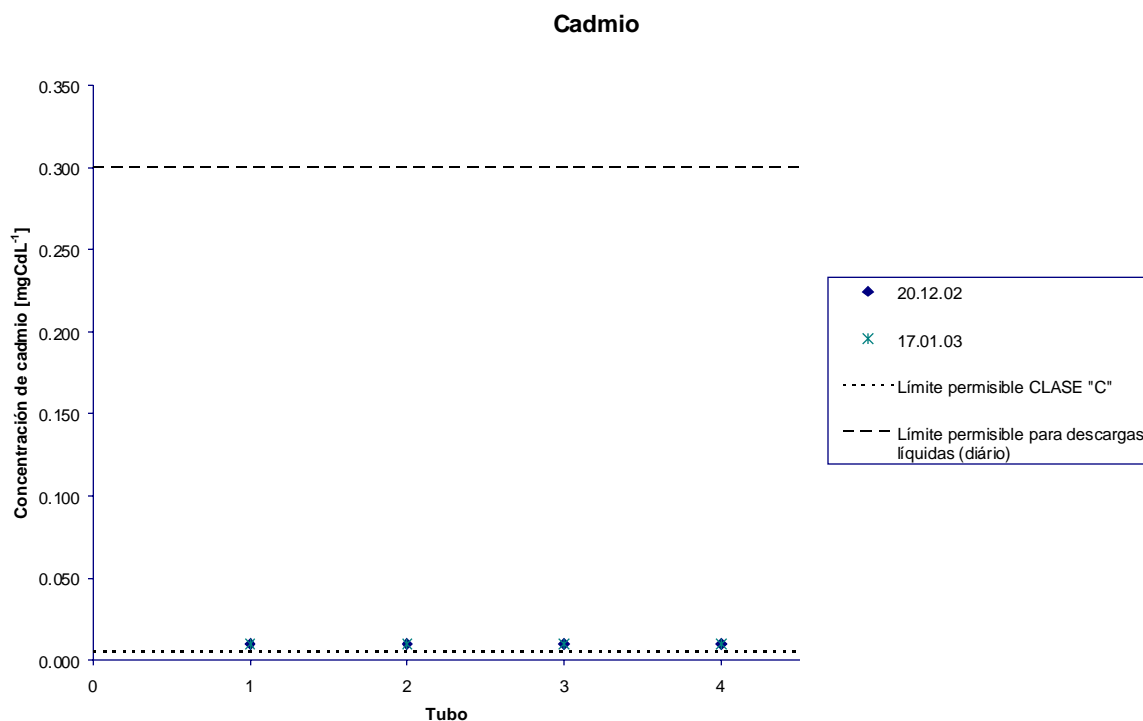
**Figura 11:** Las concentraciones de plomo acumulado en el suelo y las plantas en las tres celdas de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite recomendado para suelos según la Ley de Medio Ambiente Chilena y el límite permisible para forraje según la Ley de Medio Ambiente Suiza.

<sup>24</sup> Lógicamente, los límites jurídicamente vinculantes, deben ser más altos que los límites indicativos, de otra manera sería muy difícil cumplirlos.

## Cadmio

El modo de acción del cadmio (Cd) todavía no es totalmente conocido. En el caso del ser humano y otros mamíferos, su consumo crónico puede causar anemia, daños en los huesos y los riñones. Los compuestos de cadmio, igualmente como los de plomo, se caracterizan por una permanencia química en ecosistemas muy elevada y tienen una tendencia fuerte de bioacumularse en la cadena de nutrición. De todas maneras, queda muy claro que especialmente el consumo de ciertas cantidades de cadmio de modo crónico, por ejemplo por el consumo de agua contaminada, daña irreversiblemente a la salud humana. El cadmio en los aguas residuales humanas generalmente tiene origen en las pilas y baterías a base de cadmio eliminados de manera inapropiada.

Evaluando las concentraciones de cadmio en el agua en la Fig. 12, se reconoce que están homogéneamente y absolutamente constantes durante todo el período de monitoreo y en todos los tubos de por debajo de 0,01mgPb/L, es decir por debajo del límite de detección de la metodología utilizada para analizar los contenidos de cadmio. Por esta razón, no se puede afirmar exactamente si se da lugar a una reducción en las concentraciones del cadmio por bioacumulación en las celdas de tratamiento.



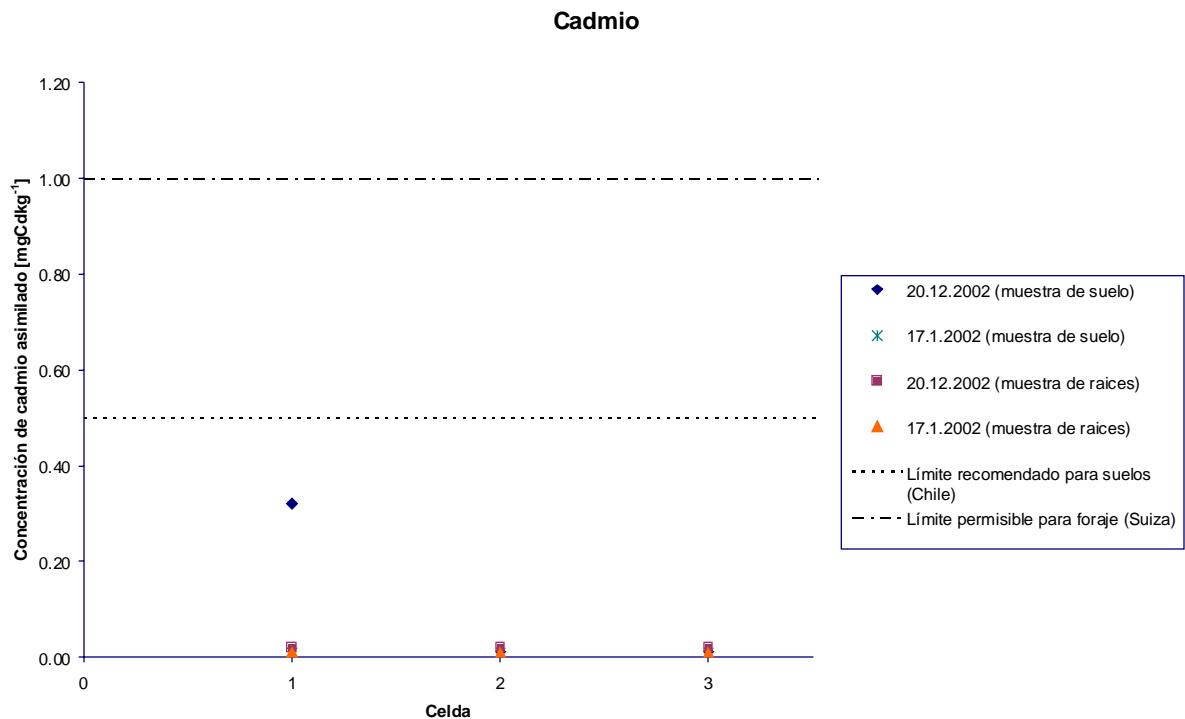
**Gráfica 12:** Las concentraciones de cadmio disuelto en el agua en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

También en el caso de los contenidos de cadmio en las muestras de suelo y en las raíces de las plantas de totora, las concentraciones se ubican muy constantemente alrededor los valores promedios entre 0,01mgCd/L (suelos) y 0,015mgCd/L (raíces) con una excepción en la muestra de la celda 1 del 20 de diciembre 2002, la que muy probablemente representa un valor fugitivo. Con menos de 0,01mgCd/L en promedio, la fluctuación de estos valores está muy baja alrededor del límite de detección. Obviamente, por esta limitación técnica en los análisis del cadmio, no es posible decir si el cadmio se está bioacumulando en los microorganismos de suelo o en las plantas de totora o no. Sin embargo, por



causa del tiempo de monitoreo muy corto para procesos ecológicos tan sensibles, sería indicado continuar la observación, midiendo los contenidos de cadmio en la biomasa durante un horizonte de tiempo mínimo de aproximadamente unos dos años, utilizando en el futuro metodologías de análisis, enviando las muestras a un laboratorio especializado del exterior.

La normativa ambiental para el cadmio sólo reconoce límites permisibles para el cadmio disuelto en el agua. Para cuerpos de agua de la clase "C", el límite permisible exige una concentración máxima de 0,005mgCd/L y para descargas líquidas un máximo de 0,3mgPb/L. Como hemos visto en el párrafo anterior, los valores de concentración en el agua tratada en la planta de tratamiento están por debajo del límite de detección de 0,01mgCd/L, lo que quiere decir que cumplen en todos los casos seguramente el límite para descargas líquidas. En el caso del límite para la clase "C", no se puede decir si cumplen o no, pues el límite por sí mismo está muy por debajo del límite de detección de la metodología aplicada para el análisis del cadmio disuelto. También en este contexto hay que decir, que sería muy indicado utilizar para futuros análisis una metodología con límite de detección más bajo.



**Figura 13:** Las concentraciones de cadmio acumulado en el suelo y las plantas en las tres celdas de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite recomendado para suelos según la Ley de Medio Ambiente Chilena y el límite permisible para forraje según la Ley de Medio Ambiente Suiza.

Por las mismas razones que fueron explicadas en el capítulo anterior, para valorar los resultados obtenidos de las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora, también en el caso del cadmio nos servimos del límite recomendado por la Ley Chilena para las muestras de suelos (0,5mgCd/kg) y del límite permisible para forraje de la Ley Suiza para las muestras de plantas (1,0mgPb/kg) (ver tablas 1 a 3 en el capítulo 6.2.). A parte del valor para la concentración de cadmio en el suelo de la celda 1 del 20 de diciembre 2003, lo que muy probablemente es un valor fugitivo, todas las concentraciones medidas tanto en los suelos, como en las raíces de las plantas de totora, están muy por debajo del límite correspondiente indicado.

Como ya se explicó, de la misma manera que en el caso del plomo, debido a las concentraciones de cadmio encontradas, se podría utilizar el corte semestral de las totoras totora para el forraje de

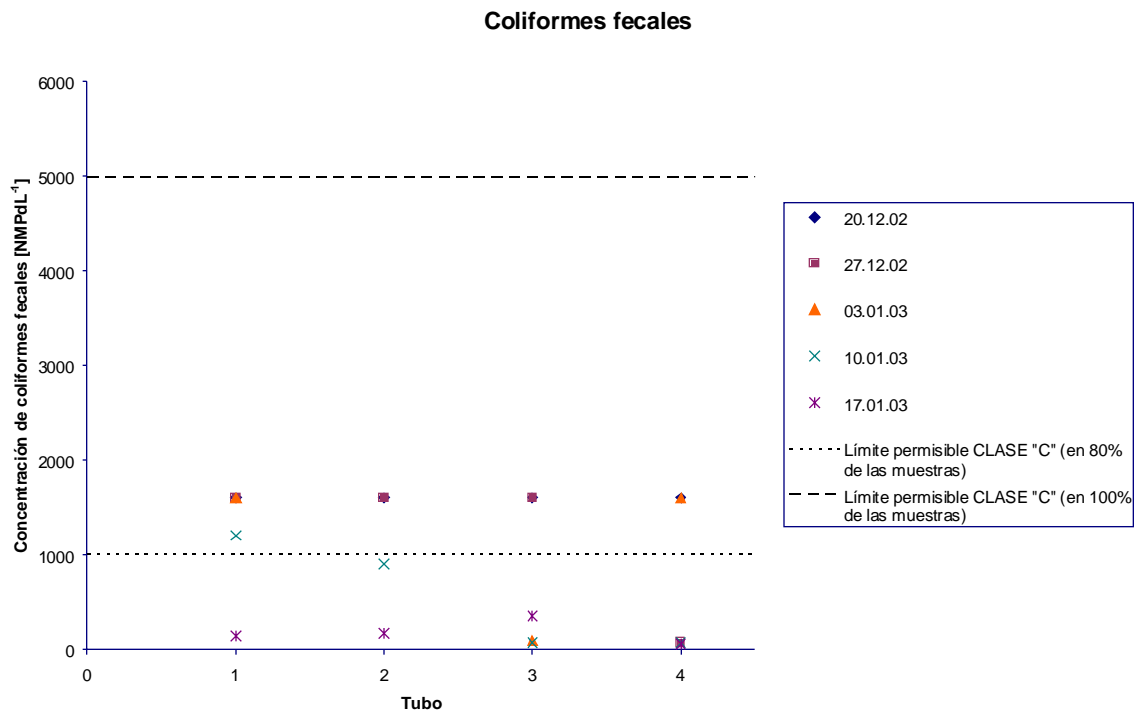
animales. Sin embargo, sería apropiado medir también el contenido de cadmio en las plantas de totora en cada poda antes de utilizarlo para forraje.

#### **4.5. Coliformes fecales**

Los coliformes fecales son bacterias del aparato digestivo humano, que por su consumo oral por el agua contaminada pueden causar graves enfermedades de digestión y afectar al sistema inmunológico. La concentración de microorganismos entonces nos da una idea de la contaminación del agua por residuos fecales.

Como se ve en la Fig. 14, en los días 20 de diciembre 2002, 27 de diciembre 2002, 3 de enero 2003 y 10 de enero 2003 el agua que llega a la planta de tratamiento muestra concentraciones bastante homogéneas de 1'200NMP/dL hasta por encima de 1'600NMP/dL. Además, se observa que en las primeras dos fechas de muestreo no existe ninguna reducción en el contenido de bacterias colifecales en el agua tratada. También el día 3 de enero 2003 se puede suponer que en realidad no había una eliminación de los coliformes fecales durante el tratamiento del agua, pues el valor medido en el tubo 3 en este día muy probablemente es un valor fugitivo. Sin embargo, ya el día 10 de enero 2003 se observa una reducción significativa en la concentración de los coliformes fecales de 1'200NMP/dL hasta 70NMP/dL, y también el día 17 de enero 2003 una reducción de 140NMP/dL hasta 50NMP/dL tiene lugar. Estos últimos valores en promedio dan una eficiencia de purificación con respecto a la carga de bacterias colifecales en el agua de - 91%. Analizando el curso de estos valores registrados, se puede suponer que durante el período de monitoreo, tuvo lugar la estabilización del sistema microbiológico en las tres celdas de tratamiento, que permite atacar eficientemente a las bacterias colifecales. Del mismo modo, se puede reafirmar lo que anteriores estudios demostraron acerca de las propiedades de los rizomas de la totora para excretar sustancias que actúan como antibióticos específicos de coliformes.

La normativa ambiental boliviana exige para desagües de la clase "C" una concentración máxima de coliformes fecales de 1'000NMP/dL y para descargas líquidas una de 5'000NMP/dL. Como se ve en la Fig. 14, las cargas de bacterias colifecales en el agua que desemboca en el Lago Titicaca están muy por debajo del segundo límite mencionado y al menos también en los últimos dos muestreos, claramente por debajo del límite de la clase "C".



**Gráfica 14:** Las concentraciones de coliformes fecales en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límites permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el RMCH.

## 5. CONCLUSIONES

Después esta evaluación amplia y profunda de los datos adquiridos en el campo, es necesario llegar a deducir algunas conclusiones fundamentales sobre el funcionamiento de la planta de tratamiento pasivo de la ciudad de Copacabana, teniendo en cuenta los objetivos planteados en el Programa de Investigación ejecutado por MEDMIN (ver capítulo ???).

Como parte de los objetivos específicos, se discutió el impacto de la planta de tratamiento en los dos parámetros más fundamentales, la acidez / alcalinidad y la temperatura del agua tratada. Se observó que el curso del pH es constante entre pH 6,0 y 9,0, es decir entre los dos límites permisibles para desagües de la clase "C". Se puede afirmar que la planta de tratamiento con respecto al pH del agua que desemboca al Lago Titicaca cumple absolutamente con la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

Por el otro lado, la temperatura que muestra el agua que sale de la planta de tratamiento está ligeramente por encima de la temperatura promedio del cuerpo superficial del Lago Titicaca, sin embargo, en la mayoría del tiempo se encuentra dentro de los márgenes de los límites permisibles tanto para descargas líquidas, como para desagües de la clase "C".

Se analizó y valorizó también la eficiencia de purificación para distintos parámetros químicos alcanzados actualmente en la planta de tratamiento de Copacabana y se anticipó los procesos futuros. Respecto a la eliminación de los nutrientes acuáticos se puede hablar de una eficiencia mediana de - 45% para el fósforo total y - 57% para el nitrógeno total disuelto en el agua tratada. Las concentraciones alcanzadas por el tratamiento del agua, en consecuencia cumplen sólo parcialmente los límites permisibles para desagües de la clase "C". Sin embargo, con el establecimiento de un equilibrio ecológico óptimo por un mantenimiento de la planta de tratamiento constante en su alimentación con aguas residuales, en los próximos meses se puede esperar, que estos dos parámetros también cumplirán con los límites permisibles más estrictos para desagües de la clase "C".

En el caso de los sólidos suspendidos, por razón de un periodo de estabilización al sistema ecológico demasiado corto desde la conclusión de la construcción de la planta de tratamiento, los datos adquiridos no muestran una calidad bastante alta para ofrecer alguna conclusión sobre su eficiencia. Como consecuencia, sería indicado seguir observando este parámetro en el futuro para averiguar si con el tiempo se establece una eficiencia de purificación satisfactoria respecto a los sólidos suspendidos.

Con respecto al carbono orgánico (DBO), al carbono inorgánico (DQO) y a la presencia de bacterias colifecales, se puede afirmar que la planta de tratamiento de Copacabana luego de un tiempo muy corto desde la conclusión de la construcción, muestra una eficiencia elevada de -78% para el DQO, de -83% para el DBO y de - 91% para los coliformes fecales. Aún cuando la planta de tratamiento todavía no cumple las exigencias más estrictas para los desagües de la clase "C", cumple los límites para descargas líquidas en todos los casos. También la eficiencia de estos parámetros fundamentales de contaminación de agua servidas, se irá incrementando en los próximos meses. Una vez que se logre una estabilización ecológica completa.

Otro parámetro muy importante para la salud de un ecosistema acuático, es el contenido de oxígeno disuelto en el agua tratado, para el cual se obtuvieron resultados muy satisfactorios. Con un incremento progresivo en cada celda de tratamiento en total de + 350% hasta una concentración de 2,7mgO/L en promedio, el agua que pasa por la planta de tratamiento cambia su carácter de un nivel absolutamente anóxico hasta uno claramente aeróbico. En consecuencia, gracias a los procesos de oxigenación esperados durante el diseño de la planta, el agua que desemboca al Lago Titicaca saliendo de la planta de tratamiento cumple enteramente el límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, respecto a su contenido de oxígeno disuelto

Finalmente, respecto a los metales pesados disueltos en el agua tratada, no es posible concluir de manera absoluta sobre la eficiencia de sus eliminación, porque las concentraciones analizadas están casi enteramente por debajo de los límites de detección del laboratorio. Sin embargo, hay que poner en claro que en el caso del cadmio, el agua que sale de la planta de tratamiento, al menos cumple el límite

permisible para descargas líquidas y en el caso del plomo cumple los límites permisibles tanto para descargas líquidas, como para desagües de la clase "C".

Respecto a las concentraciones de estos dos metales pesados en los suelos de las celdas de tratamiento y en las raíces de las plantas de totora, se puede concluir que en todas las muestras las concentraciones tanto del cadmio, como de plomo están claramente por debajo de los límites permisibles internacionalmente utilizados. Los contenidos de plomo en las raíces de las plantas de totora están muy por debajo de las concentraciones correspondientes en las muestras de suelos, mostrando una proporcionalidad entre 1 parte en las raíces a 16 partes en los suelos hasta 1 en las raíces a 5 en los suelos.

A la pregunta, si estos dos elementos se acumulan en la biomasa de las celdas de la planta de tratamiento, no se puede responder directamente, pues los cambios probablemente efectuados en las muestras de suelos y de plantas están muy por debajo del límite de detección de la metodología de análisis aplicada en este programa de investigación. Sin embargo, teniendo en cuenta las cantidades de cadmio y plomo acumuladas en la biomasa en la sucesión de las tres celdas, se puede suponer, que existe una cierta bioacumulación, lo que exige una observación atenta de estos parámetros durante un periodo más prolongado, analizando muestras de plantas y de suelos una vez antes de utilizar las plantas como forraje. De cualquier manera, bajo la situación actual, se puede manifestar que la nutrición de animales domésticos con plantas de totoras de las celdas de tratamiento es absolutamente inocua.

En base al objetivo general del proyecto, es decir, la validación de los sistemas de flujo subsuperficial como una nueva tecnología de purificación de aguas residuales humanas en el ámbito altiplánico, como consecuencia de todos los argumentos anteriormente presentados, se concluye que los humedales artificiales construidos, cuyo componente principal es la totora, representan un sistema natural de purificación muy eficiente, con una técnica muy interesante para la protección de ecosistemas acuáticos que demandan bajos costos de operación y mantenimiento. Sus principales características son: a) Eficiencia de purificación muy satisfactoria, b) costos de construcción y de mantenimiento relativamente bajos y c) un manejo bastante simple y poco susceptible a errores.

Sin embargo, de todas maneras se debe tener en claro que la eficiencia de la planta de tratamiento depende fuertemente de su mantenimiento óptimo y una alimentación con aguas servidas a la planta purificadora lo más constante posible. Sólo de esta manera se puede asegurar que la planta de tratamiento continúe purificando las aguas servidas, cumpliendo la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

## 6. APÉNDICE

### 6.1. Expresiones científicas y técnicas

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

OD: Oxígeno disuelto

RMCH: Reglamento Ambiental Boliviano en Materia de Contaminación Hídrica

Biodiversidad: Riqueza y diversidad de especies de flora y fauna encontrado en un cierto ecosistema.

Totora: Planta local de la cual se conoce que asimila muchos nutrientes y metales pesados. Nombre científico: *Schoenoplectus tatora*.

Humedal Artificial: Ecosistema saturado por aguas superficiales y subterráneas con profundidad inferior de un metro (para evitar áreas extensas anóxicas).

Sistema de flujo subsuperficial (SFS): Planta de tratamiento en la cual las aguas servidas son purificados por procesos biológicos en la matriz del suelo mediante flujo subterráneo horizontal.

Eutrofización: Sobrecarga de un ecosistema acuático con nutrientes suspendidos, sobre todo el fosfato y el nitrógeno en forma de amonio y nitrato.

Coliformes: Bacterias anaerobios del aparato digestivo que sirven como indicador de contaminación séptica.

Capacidad de buffer: La posibilidad de un sistema químico de estabilizar el pH alrededor un cierto valor de pH por el equilibrio carbonato (el más frecuente en la naturaleza) o otras sustancias buffer.

Organismos aeróbicos: Utilizan el oxígeno disuelto en el agua como medio de oxidación del carbono asimilado.

Organismos anaeróbicos: Utilizan para la oxidación del carbono asimilando otras sustancias oxidativas como el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), el óxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ), el hidroxígeno de hierro ( $\text{FeOOH}$ ) o el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Organismos químiotrofos: Ganan la energía respiratoria por reacciones químicas (en contraste al los organismos fototrofos, que ganan su energía por la radiación solar), asimilando el carbono de compuestos orgánicos (hetero-).

Organismos químiolitotrofos: Ganan la energía respiratoria también por reacciones químicas, utilizando los iones hidrógenos ( $\text{H}^+$ ) necesarios para los procesos Redox de compuestos inorgánicos (lito-) y asimilando el carbono de compuestos inorgánicos (auto-).

Bioacumulación: La acumulación de sustancias químicas en organismos biológicos independiente de si la sustancia sea consumida por la nutrición contaminada o absorbido directamente del medio ambiente. Este fenómeno causa un aumento de las sustancias acumuladas en la cadena trófica.

## 6.2. Información adicional

**Tabla 1:** Concentraciones de trasfondo naturales de metales pesados en suelos

| Concentración de trasfondo natural | As [mg/kg] | Pb [mg/kg] | Zn [mg/kg] | Hg [mg/kg]   | Cu [mg/kg] | Sb [mg/kg] | Cd [mg/kg]  | Cr [mg/kg]   | Fe [mg/kg] | Sn [mg/kg] |
|------------------------------------|------------|------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|
| Cuenca Pilcomayo <sup>1</sup>      |            | 6 - 34     | 17 - 132   | 0,01 - 0,087 | 3 - 24     |            | <0,05 - 0,3 | <0,01 - 0,22 |            |            |

<sup>1</sup> Datos obtenidos de Kabata-Pendias (1995).

**Tabla 2:** Límites permitibles para concentraciones de metales pesados en suelos

| Pautas de salud                               | As [mg/kg] | Pb [mg/kg] | Zn [mg/kg] | Hg [mg/kg] | Cu [mg/kg] | Sb [mg/kg] | Cd [mg/kg] | Cr [mg/kg] | Fe [mg/kg] | Sn [mg/kg] |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Holanda (niveles de acción)                   | 55         | 530        | 720        | 10         | 190        |            | 12         |            |            |            |
| Estados Unidos (límites máximos) <sup>2</sup> |            |            | 4          |            | 2          | 8          | 0,08       | 10         | 1000 (?)   |            |
| Canadá (límites máximos)                      |            | 200        | 400        |            | 100        |            | 8          |            |            |            |
| Alemania (límites máximos)                    |            | 500        | 300        |            | 500        |            | 2          |            |            |            |
| Suiza (límites máximos)                       |            | 200        |            |            | 150        |            | 2          |            |            |            |
| Chile (límites recomendados) <sup>3</sup>     | 40         | 200        |            | 0,4        |            |            | 0,5        |            |            |            |
| Suiza (valor indicativo <sup>4</sup> )        |            | 50         | 150        | 0,5        | 40         |            | 0,8        | 50         |            |            |

<sup>2</sup> Valores permisibles en suelos definidos como objetivos medioambientales multimedia (Fitchko 1989). Tamada de Canter L (1997).

<sup>3</sup> Límites recomendados por INTA Chile (1996).

<sup>4</sup> Valores indicativos jurídicamente no son vinculatorio.

**Tabla 3:** Límites permitibles para concentraciones de metales pesados en plantas de forraje

| Pautas de salud         | As [mg/kg] | Pb [mg/kg] | Zn [mg/kg] | Hg [mg/kg] | Cu [mg/kg] | Sb [mg/kg] | Cd [mg/kg] | Cr [mg/kg] | Fe [mg/kg] | Sn [mg/kg] |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Suiza (límites máximos) | 2          | 40         |            | 0,1        |            |            | 1          |            |            |            |

### 6.3. Documentación fotográfica



Figura 9: La planta de tratamiento en Copacabana sector Chapampa durante su construcción en agosto de 2002.



Figura 10: Visita de la planta de tratamiento justamente después la conclusión del acondicionamiento y terminación de detalles constructivos de la obra en diciembre de 2002. Algunas personas habían destruido las tuberías de conexión al sistema principal y de distribución entre las distintas celdas de purificación.





Figura 11: Pruebas hidráulicas, en la fotografía se observa el tubo de conexión al sistema principal ya reparado antes de colocar las cajas de distribución e inspección con cierre candados.



Figura 12: La planta de tratamiento después la conclusión definitiva de la obra a principios de diciembre de 2002.



Figura 13: Medición de la altura de agua en la tubería de conexión al sistema principal y de distribución entre las distintas celdas de purificación para la computación de los correspondientes caudales durante el programa de investigación.



Figura 14: Medición in situ del pH, del potencial mV y de la temperatura en las cajas de de aireación. En el segundo plano se reconoce las distintas botellas de muestreo y una caja con el kit para la determinación de oxígeno disuelto durante el programa de investigación.



Figura 15: Extracción de una planta de totora que sirvió de realizar los análisis del contenido de nitrógeno, fósforo, plomo y cadmio en sus raíces y tallos.



Figura 16: Una planta de totora extraída en su entera magnitud, con sus flores, tallos y las raíces al lado de la planta de tratamiento de Copacabana.

## 6.4. Datos crudos

### Análisis de la Fundación MEDMIN

#### pH

| Fecha    | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Suelo 1 | Suelo 2 | Suelo 3 |
|----------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 20.12.02 | 7.2    | 7.2    | 7.4    | 7.3    |         |         |         |
| 27.12.02 | 8.0    | 7.6    | 8.0    | 7.9    | 8.2     | 9.0     | 9.6     |
| 03.01.03 | 7.7    |        | 7.3    | 7.0    |         |         |         |
| 10.01.03 | 7.4    | 7.1    | 6.9    | 6.9    | 7.3     | 7.4     | 7.3     |
| 11.01.03 | 7.2    | 7.2    | 7.1    | 7.1    | 7.5     | 7.6     | 7.4     |
| 12.01.03 | 7.8    | 7.1    | 7.2    | 7.3    | 7.1     | 7.2     | 7.7     |
| 13.01.03 | 7.6    | 7.3    | 7.2    | 7.2    | 7.5     | 7.4     | 7.5     |
| 14.01.03 | 7.6    | 7.3    | 7.1    | 7.1    | 7.3     | 7.8     | 7.5     |
| 15.01.03 | 7.9    | 7.2    | 7.2    | 7.0    | 7.6     | 7.5     | 7.6     |
| 16.01.03 | 7.7    | 7.1    | 7.1    | 7.1    | 7.4     | 7.4     | 7.7     |
| 17.01.03 | 6.8    | 6.9    | 7.0    | 7.0    | 7.0     | 7.2     | 7.1     |

#### Potencial

| Fecha    | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Suelo 1 | Suelo 2 | Suelo 3 |
|----------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 20.12.02 | -8.0   | -5.0   | -19.0  | -15.0  |         |         |         |
| 27.12.02 | -54.0  | -43.0  | -54.0  | -50.0  | -71.0   | -108.0  | -145.0  |
| 03.01.03 | -48.0  |        | -32.0  | -18.0  |         |         |         |
| 10.01.03 | -39.0  | -27.0  | -13.0  | -8.0   | -38.0   | -19.0   | -35.0   |
| 11.01.03 | -42.0  | -33.0  | -17.0  | -19.0  | -45.0   | -66.0   | -44.0   |
| 12.01.03 | -49.0  | -19.0  | -24.0  | -34.0  | -25.0   | -26.0   | -51.0   |
| 13.01.03 | -40.0  | -27.0  | -27.0  | -24.0  | -43.0   | -34.0   | -36.0   |
| 14.01.03 | -45.0  | -24.0  | -20.0  | -19.0  | -39.0   | -64.0   | -33.0   |
| 15.01.03 | -51.0  | -21.0  | -27.0  | -15.0  | -55.0   | -43.0   | -40.0   |
| 16.01.03 | -41.0  | -20.0  | -19.0  | -22.0  | -31.0   | -29.0   | -45.0   |
| 17.01.03 | -9.0   | -9.0   | -14.0  | -16.0  | -14.0   | -27.0   | -23.0   |

Las indicaciones están en mV.

#### Temperatura

| Fecha    | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Suelo 1 | Suelo 2 | Suelo 3 |
|----------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 20.12.02 | 14.8   | 15.6   | 16.5   | 16.1   |         |         |         |
| 27.12.02 | 25.2   | 23.2   | 13.8   | 22.1   | 22.5    | 21.6    | 20.4    |
| 03.01.03 | 24.7   |        | 20.6   | 19.0   |         |         |         |
| 10.01.03 | 20.7   | 19.9   | 18.8   | 19.0   | 19.4    | 18.7    | 19.8    |
| 11.01.03 | 19.8   | 17.6   | 17.4   | 18.2   | 20.5    | 21.4    | 20.3    |
| 12.01.03 | 17.3   | 20.9   | 20.3   | 19.4   | 24.7    | 25.3    | 23.9    |
| 13.01.03 | 18.4   | 18.5   | 18.3   | 17.5   | 20.4    | 20.4    | 21.6    |
| 14.01.03 | 21.9   | 20.4   | 19.5   | 17.8   | 22.4    | 23.4    | 20.0    |
| 15.01.03 | 22.1   | 21.8   | 21.2   | 19.2   | 21.8    | 20.7    | 19.7    |
| 16.01.03 | 19.4   | 18.8   | 19.7   | 18.9   | 25.3    | 22.2    | 23.1    |
| 17.01.03 | 15.1   | 15.6   | 16.3   | 16.2   | 18.8    | 18.1    | 17.9    |

Las indicaciones están en °C.

**Oxígeno disuelto**

| Fecha    | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| 20.12.02 | 0.0    | 0.2    | 4.0    | 4.0    |
| 27.12.02 | 0.0    | 2.0    | 4.0    | 3.0    |
| 03.01.03 | 1.0    |        | 5.0    | 2.5    |
| 10.01.03 | 0.0    | 2.0    | 2.0    | 2.0    |
| 11.01.03 | 0.0    | 2.0    | 4.0    | 4.0    |
| 12.01.03 | 0.0    | 3.0    | 3.0    | 3.0    |
| 13.01.03 | 0.0    | 3.0    | 2.0    | 4.0    |
| 14.01.03 | 0.0    | 2.0    | 4.0    | 4.0    |
| 15.01.03 | 0.0    | 2.0    | 3.0    | 3.0    |
| 16.01.03 | 0.0    | 2.0    | 4.0    | 4.0    |
| 17.01.03 | 2.0    | 1.0    | 2.0    | 2.0    |

Las indicaciones están en mg/L.

**Caudales**

La medición de los caudales en el vertedor rectangular y en los 4 tubos del sistema de tratamiento se intentó hacer según las siguientes formulas, midiendo la altura del agua en el vertedor y en los tubos, para comparar los distintos caudales y finalmente calcular un balance hídrico:

**Vertedero rectangular:** 
$$Q = 0.533 \cdot \sqrt{2g} \cdot C \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{5/2}$$

$$\cong 1.393 \sqrt{\frac{m}{\text{sec}^2}} \cdot h^{5/2} \quad [\text{m}^3\text{sec}^{-1}]$$

Con:

Q := Caudal [m<sup>3</sup>sec<sup>-1</sup>]

h := Diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero [m]

C := Coeficiente del vertedero dependiendo parámetros adicionales; en el caso de mediciones en el campo se pone un valor constante de 0.59 [ ]

g := Constante gravitacional [msec<sup>-2</sup>]

θ := Ángulo del vertedero [°]

**Vertedero redondo (tubo):** 
$$Q = k \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad [\text{m}^3\text{sec}^{-1}]$$

Con:

Q := Caudal [m<sup>3</sup>sec<sup>-1</sup>]

k := Coeficiente de Manning-Strickler; en el caso de materiales muy lisas como PVC se elige un un valor de 60 [m<sup>1/3</sup>sec<sup>-1</sup>]

S := Área de la sección "mojada" [m<sup>2</sup>]

R := Rayón hidraulico [m]

J := Pendiente de la tubería ≈ 1% [..]

Con:  $R = \frac{S}{P}$

$$S = \frac{h \cdot (32 \cdot r \cdot h - 13 \cdot h^2)}{6\sqrt{8 \cdot r \cdot h - 4 \cdot h^2}} \quad ; h \leq r$$

$$P = 2 \cdot r \cdot a \cos\left(\frac{r-h}{r}\right)$$

P := Perímetro de la sección "mojada" [m]

h := Altura del agua en la tubería [m]

r := Radio de la tubería = 5,25cm [m]

Sin embargo, como el monitoreo tuvo lugar al menos en sus últimos días durante plena época de lluvia, la condición elemental para poder trabajar con esta última fórmula no era dada, pues la altura del agua era mayor del radio de los tubos (entonces  $h > r$ ). Para el primer parte del monitoreo sin embargo se pudo calcular los siguientes resultados:

|          | Tubo 1 |                         | Tubo 2 |                         | Tubo 3 |                         | Tubo 4 |                         |
|----------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|
| Fecha    | h [cm] | Q [Lsec <sup>-1</sup> ] | h [cm] | Q [Lsec <sup>-1</sup> ] | h [cm] | Q [Lsec <sup>-1</sup> ] | h [cm] | Q [Lsec <sup>-1</sup> ] |
| 20.12.02 | 4.0    | 1.42                    | 2.0    | 0.36                    | 2.0    | 0.36                    | 2.0    | 0.36                    |
| 27.12.02 | 1.0    | 0.09                    | 1.5    | 0.20                    | 2.0    | 0.36                    | 4.3    | 1.62                    |
| 03.01.03 | 0.5    | 0.02                    | 0.0    | #DIV/0!                 | 0.2    | 0.00                    | 2.0    | 0.36                    |
| 10.01.03 | 1.3    | 0.15                    | 0.8    | 0.05                    | 1.7    | 0.26                    | 2.1    | 0.40                    |
| 11.01.03 | 6.7    | 3.54                    | 3.1    | 0.87                    | 2.3    | 0.48                    | 3.8    | 1.29                    |

Por razón de las fluctuaciones muy fuertes en la nutrición del sistema con aguas servidas de la ciudad de Copacabana, sin embargo no era posible calcular un balance hídrico, pues esta teoría sale de un sistema en equilibrio de flujos de materia. En investigaciones futuras, con humedales constantemente mantenidos, con los datos de los distintos caudales y de los de la cantidad de agua evaporada y de lluvia se podría averiguar el balance hídrico de este ecosistema integralmente.

**Datos climáticos**

| Fecha    | Ev. [Lm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ] | Ev. + Ll [Lm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ] | T <sub>atm.</sub> [°C] | T <sub>atm., max.</sub> [°C] | T <sub>atm., min.</sub> [°C] |
|----------|---|--|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 20.12.02 |   |  | 13                     | 22                           | 3                            |
| 27.12.02 |   |  | 17                     | 28                           | 4                            |
| 03.01.03 |   |  | 31                     |                              |                              |
| 10.01.03 | 1                                       | 0  | 13                     | 21                           | 2                            |
| 11.01.03 | 0.5                                     | 6  | 11                     | 22                           | 3                            |
| 12.01.03 | 2                                       | 0  | 18                     | 30                           | 7                            |
| 13.01.03 | 2                                       | 8  | 19                     | 33                           | 4                            |
| 14.01.03 | 2                                       | 4  | 18                     | 29                           | 3                            |
| 15.01.03 | 2.5                                     | 5  | 20                     | 31                           | 4                            |
| 16.01.03 | 3                                       | 4  | 22                     | 35                           | 11                           |
| 17.01.03 | 0                                       | 13   | 28                     | 30                           | 4                            |

Ev. := Evaporación, Ll. := Lluvia, T<sub>atm.</sub> := Temperatura atmosférica.

**Análisis de la SGS****20. 12. 2002:****LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 2

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 179 – 02**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-15**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **AGUA**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, Fe, Cd, DBO<sub>5</sub>,DQO, Coliformes fecales.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

| Su referencia:                            | Cd<br>mg/l  | Pb<br>mg/l | DQO<br>mgO <sub>2</sub> /l | DBO <sub>5</sub><br>mgO <sub>2</sub> /l | P<br>mg/l | SST<br>mg/l | NTK<br>mg/l | Coliformes<br>fecales<br>NMP/100ml |
|---|---|------------|----------------------------|---|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|
| M-1 Entrada                               | <0.01   | 0.01       | 458.1                      | 144.7                                   | 1.72      | 96.0        | 46.63       | >1600                              |
| M-2 Salida 1                              | <0.01   | 0.01       | 263.2                      | 79.73                                   | 0.77      | 96.0        | 29.80       | >1600                              |
| M-3 Salida 2                              | <0.01   | 0.01       | 150.4                      | 42.13                                   | 1.06      | 130.0       | 18.45       | >1600                              |
| M-4 Salida 3                              | <0.01   | 0.01       | 83.8                       | 19.93                                   | 0.57      | 82.0        | 20.88       | >1600                              |
| Límites de<br>detección de<br>laboratorio | 0.01  |            | 0.05                       | 2                                       | 0.05      | 0.5         | 0.5         | 2                                  |
| Metodos<br>utilizados                     | Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 <sup>th</sup> Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF. |            |                            |   |           |             |             |                                    |
| Observaciones                             |   |            |                            |   |           |             |             |                                    |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.



SGS Bolivia S.A.

Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 179 – 02**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-14**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **SUELOS**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **NTK, P.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

| Su referencia:                  | <b>P<br/>mg/Kg</b> | <b>NTK<br/>mg/Kg</b> |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|
| M-1 SUELO 1                     | 7.48               | 0.20                 |
| M-2 SUELO 2                     | 2.60               | 0.12                 |
| M-3 SUELO 3                     | 10.97              | 0.61                 |
| Limite de detección laboratorio | 0.05               | 0.05                 |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002





SGS Bolivia S.A.

Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 179 – 02**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **SUELOS**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **Cd, Pb.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

| Su referencia:       | Cd<br>mg/Kg | Pb<br>mg/Kg |
|----------------------|-------------|-------------|
| M-1 SUELO 1          | 0.32        | 124.0       |
| M-2 SUELO 2          | <0.01       | 32.0        |
| M-3 SUELO 3          | <0.01       | 32.0        |
| Límites de detección | 0.01        | 0.02        |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002



SGS Bolivia S.A.

Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 179 – 02**FECHA EMISIÓN : **2003- enero - 14**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **RAICES**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **NTK, P, Pb, Cd, Peso de la planta, Número de plantas.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

| Su referencia:                        | Cd<br>mg/Kg | Pb<br>mg/Kg | NTK<br>mg/Kg | P<br>mg/Kg | Peso de la Planta<br>g | Número de<br>Plantas |
|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------------------|----------------------|
| M-1 Raíz 1                            | 0.02        | 2.4         | 0.06         | 0.43       | 771.75                 | 105.0                |
| M-2 Raíz 2                            | 0.02        | 1.2         | 0.06         | 0.18       | 549.45                 | 135.0                |
| M-3 Raíz 3                            | 0.02        | 1.0         | < 0.05       | 1.02       | 478.10                 | 105.0                |
| Límite de<br>detección<br>laboratorio | 0.01        | 0.01        | 0.05         | 0.05       |                        |                      |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002



SGS Bolivia S.A.

Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 179 – 02**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-14**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **TALLOS**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **NTK, P.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

| Su referencia:                   | <b>P<br/>mg/Kg</b> | <b>NTK<br/>mg/Kg</b> |
|----------------------------------|--------------------|----------------------|
| M-1 PLANTA 1                     | 0.47               | 0.41                 |
| M-2 PLANTA 2                     | 0.64               | <0.05                |
| M-3 PLANTA 3                     | 0.65               | <0.05-               |
| Límites de detección laboratorio | 0.05               | 0.05                 |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002

27. 12. 2002

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 179 – 02**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-15**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **AGUA**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO<sub>5</sub>, DQO, Coliformes fecales.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 30**

| Su referencia:     | DQO<br>mgO <sub>2</sub> /l  | DBO <sub>5</sub><br>mgO <sub>2</sub> /l | P<br>mg/l | SST<br>mg/l | NTK<br>mg/l | Coliformes<br>fecales<br>NMP/100ml |
|--------------------|---|---|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|
| M-1 Entrada        | 391.6   | 122.5                                   | 2.0       | 40.0        | 50.07       | >1600                              |
| M-2 Salida 1       | 217.1   | 64.3                                    | 1.99      | 40.0        | 38.72       | >1600                              |
| M-3 Salida 2       | 124.8   | 33.6                                    | 1.47      | 50.0        | 31.83       | >1600                              |
| M-4 Salida 3       | 99.20   | 25.0                                    | 1.29      | 82.0        | 23.31       | 70.0                               |
| Límites            | 0.05  | 2                                       | 0.05      | 0.5         | 0.5         | 2                                  |
| Metodos utilizados | Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 <sup>th</sup> Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF. |   |           |             |             |                                    |
| Observaciones      |   |   |           |             |             |                                    |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

## 3. 1. 2003



Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 001 – 03**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-20**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **AGUA**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO<sub>5</sub>, DQO, Coliformes fecales.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 06**

| Su referencia:     | DQO<br>mgO <sub>2</sub> /l   | DBO <sub>5</sub><br>mgO <sub>2</sub> /l | P<br>mg/l | SST<br>mg/l | NTK<br>mg/l | Coliformes<br>fecales<br>NMP/100ml |
|--------------------|--|---|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|
| M-1 Entrada        | 442.7  | 139.6                                   | 2.0       | 134.0       | 50.07       | >1600                              |
| M-2 Salida 1       | 140.2  | 38.6                                    | 1.43      | 124.0       | 30.61       | 90.0                               |
| M-3 Salida 2       | 109.4  | 28.5                                    | 1.20      | 78.0        | 22.50       | >1600                              |
| Límites            | 0.05   | 2                                       | 0.05      | 0.5         | 0.5         | 2                                  |
| Metodos utilizados | Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 <sup>th</sup> Edition, 2000, APHA,AWWA, WEF. |   |           |             |             |                                    |
| Observaciones      |  |   |           |             |             |                                    |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención.  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002

10. 1. 2002

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 005 – 03**FECHA EMISIÓN : **2003- enero - 21**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **AGUA**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO<sub>5</sub>, DQO, Coliformes fecales.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 13**

| Su referencia:     | DQO<br>mgO <sub>2</sub> /l   | DBO <sub>5</sub><br>mgO <sub>2</sub> /l | P<br>mg/l | SST<br>mg/l | NTK<br>mg/l | Coliformes<br>fecales<br>NMP/100ml |
|--------------------|--|---|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|
| M-1 Entrada        | 550.4  | 175.4                                   | 2.10      | 134.0       | 59.80       | 1200                               |
| M-2 Salida 1       | 417.0  | 131.2                                   | 1.48      | 124.0       | 50.48       | 900                                |
| M-3 Salida 2       | 150.4  | 42.1                                    | 1.26      | 78.0        | 24.93       | 70.0                               |
| M-4 Salida 3       | 104.3  | 26.7                                    | 1.20      | 116.0       | 22.09       | 70.0                               |
| Límites            | 0.05   | 2                                       | 0.05      | 0.5         | 0.5         | 2                                  |
| Metodos utilizados | Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 <sup>th</sup> Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF. |   |           |             |             |                                    |
| Observaciones      |  |   |           |             |             |                                    |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención.  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002

17. 1. 2002

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 008 – 03**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-27**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **AGUA**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO<sub>5</sub>,DQO, Coliformes fecales.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

| Su referencia:     | Pb<br>mg/l  | Cd<br>mg/l | DQO<br>mgO <sub>2</sub> /l | DBO <sub>5</sub><br>mgO <sub>2</sub> /l | P<br>mg/l | SST<br>mg/l | NTK<br>mg/l | Coliformes<br>fecales<br>NMP/100ml |
|--------------------|---|------------|----------------------------|---|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|
| M-1 Entrada        | <0.01   | <0.01      | 94.0                       | 23.33                                   | 0.77      | 52.0        | 20.88       | 140.0                              |
| M-2 Salida 1       | 0.04  | <0.01      | 88.0                       | 21.03                                   | 0.26      | 48.0        | 20.48       | 170.0                              |
| M-3 Salida 2       | <0.01   | <0.01      | 99.2                       | 33.06                                   | 0.40      | 34.0        | 22.10       | 350.0                              |
| M-4 Salida 3       | <0.01   | <0.01      | 53.0                       | 9.66                                    | 0.44      | 58.0        | 11.43       | 50.0                               |
| Límites            | 0.01  | 0.01       | 0.05                       | 2                                       | 0.05      | 0.5         | 0.5         | 2                                  |
| Metodos utilizados | Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 <sup>th</sup> Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF. |            |                            |   |           |             |             |                                    |
| Observaciones      |   |            |                            |   |           |             |             |                                    |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 008 – 03**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **SUELOS**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **Cd, Pb, NTK, P.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

| Su referencia:       | <b>Cd<br/>mg/Kg</b> | <b>Pb<br/>mg/Kg</b> | <b>P<br/>mg/Kg</b> | <b>NTK<br/>mg/Kg</b> |
|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| M-1 SUELO 1          | <0.01               | 8.0                 | 3.53               | 0.55                 |
| M-2 SUELO 2          | <0.01               | 4.0                 | 1.26               | 1.07                 |
| M-3 SUELO 3          | <0.01               | 4.0                 | 4.52               | <0.05                |
| Límites de detección | 0.01                | 0.01                | 0.01               | 0.05                 |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002





SGS BOLIVIA S.A.  
Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 2

**INFORME DE ENSAYO**

ORDEN N° **MA – 008 – 03**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
MATERIAL : **RAICES**  
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
ENSAYOS SOLICITADOS : **Peso de raices, Cd, Pb, NTK, P.**  
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

| Su referencia:       | Pesos de raices g*     | Cd mg/Kg* | Pb mg/Kg* | P mg/Kg* | NTK mg/Kg* |
|----------------------|------------------------|-----------|-----------|----------|------------|
| M-1 RAÍZ 1           | 30.44                  | <0.01     | 6.0       | 0.18     | <0.05      |
| M-2 RAÍZ 2           | 16.24                  | <0.01     | 6.0       | 0.16     | <0.05      |
| M-3 RAÍZ 3           | 23.85                  | <0.01     | 6.0       | 0.23     | <0.05      |
| Límites de detección | -                      | 0.01      | 0.01      | 0.01     | 0.05       |
| Observación          | * Peso de materia seca |           |           |          |            |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. **NO reproducir parcialmente** sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2002

**LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES**

SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080  
 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro  
 Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126

Página 1 de 1

**INFORME DE ENSAYO**ORDEN N° **MA – 008 – 03**FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**  
 MATERIAL : **TALLOS**  
 NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**  
 ENSAYOS SOLICITADOS : **Peso de tallos, Número de plantas, NTK, P.**  
 FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

| Su referencia:       | Peso de tallos<br>g*   | Número de<br>plantas | P<br>mg/kg* | NTK<br>mg/kg* |
|----------------------|------------------------|----------------------|-------------|---------------|
| M-1 PLANTA 1         | 804.6                  | 202.0                | 0.35        | <0.05         |
| M-2 PLANTA 2         | 320.51                 | 84.0                 | 0.37        | <0.05         |
| M-3 PLANTA 3         | 266.14                 | 136.0                | 0.42        | <0.05         |
| Límites de detección | -                      | -                    | 0.01        | 0.05          |
| Observaciones        | * Peso de materia seca |                      |             |               |

**Vilma Hurtado**  
**DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE**

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención  
 Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

## **6.5. Bibliografía**

### **Literatura científica**

Coronel T. (1995): Hidraulica. CECSA, México.

Ferrero C. M. (1999): Manual de Obras Rurales. Colombia.

Métodos Normalizados. Edición 20 APHA (American Public Health Association) - AWWA (American Water Works Association) - WPCF (Water Pollution Control Federation) y ASTM (American Society for Testing and Materials).

Fent K. (1998): Ökotoxikologie: Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart / New York.

Sigg L. und Stumm W. (1994): Aquatische Chemie: Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer. Vdf Verlag der Fachvereine an den Schweizerischen Hochschulen und Techniken AG und B. G. Teubner, Zürich / Stuttgart.

### **Páginas de Web**

<http://www.pnud.bo/biodiversidadtdps/proyecto/antecedentes.html>

<http://www.agualtiplano.net/cuencas/titicaca.htm>

[http://129.13.103.40/shop/evaluation/10/demo\\_de/Mechanik/FlueGas/Barome/Barome.htm](http://129.13.103.40/shop/evaluation/10/demo_de/Mechanik/FlueGas/Barome/Barome.htm)

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**ACCIONES DE DIFUSIÓN Y  
CAPACITACIÓN A OPERADORES EN  
COPACABANA Y DESAGUADERO**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**ACCIONES DE DIFUSIÓN Y  
CAPACITACION A OPERADORES EN  
COPACABANA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# DIFUSION DEL PROYECTO Y CAPACITACION A OPERADORES

## “PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DE COPACABANA Y DESAGUADERO”

Institución: Fundación MEDMIN  
Encargados: Danilo Bocángel: coordinador del proyecto  
Florian Erzinger: asistente científico  
Guillermo Noriega: asistente técnico

### **1. ANTECEDENTES**

En 1998, los gobiernos de Perú y Bolivia han suscrito con el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el convenio de asistencia técnica y financiera para la ejecución del proyecto “Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial GEF, a ser ejecutado por la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT).

En el marco de ejecución del proyecto "BOL / 98 / G-31, Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)", se viene ejecutando el subproyecto “Pruebas del Uso de Totorales para la Descontaminación en el Ámbito Boliviano” (21.06), a cargo de la Fundación MEDMIN. El contrato fue firmado en octubre de 2000 y tras una serie de adendas, se logró extender el mismo hasta febrero de 2003.

Pese a las numerosas dificultades enfrentadas durante la ejecución de este proyecto, finalmente se logró culminar el mismo con obras que funcionan de manera muy satisfactoria. La fase de difusión del proyecto y la capacitación a operadores es el corolario de todo el trabajo realizado. Pese a que el seminario de capacitación tuvo una duración de un día entero, en el cual se realizó una visita a la planta junto a los participantes, el proceso mismo de capacitación a los técnicos de la alcaldía fue permanente, durante la construcción y monitoreo del funcionamiento de la planta.

## **2. EL TALLER DE CAPACITACIÓN**

### **Los objetivos**

El taller de capacitación tuvo dos objetivos específicos:

- Difundir el proyecto mediante la capacitación en temas de saneamiento básico y medio ambiente a los representantes de instituciones locales.
- Capacitación final a los operadores de las plantas de tratamiento de Desaguadero y de Copacabana en el mantenimiento, operación y monitoreo de las mismas.

### **Cronograma**

El taller de capacitación fue estructurado en dos sesiones, una en la mañana y otra en la tarde. En cada sesión, MEDMIN ofreció refrigerios y al medio día invitó un almuerzo a todos los participantes en el Hotel Playa Azul. En la concepción del cronograma se tomó en consideración que la sucesión de temáticas teóricas y prácticas sean bien entrelazadas, para evitar el cansancio de los asistentes.

A continuación se presenta el Programa inextenso:

SEMINARIO DE DIFUSION DEL PROYECTO Y CAPACITACION A OPERADORES  
 “PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS COPACABANA Y DESAGUADERO”

**PROGRAMA**

|   |  |
|---|--|
| 9:00 Registro de Participantes  |  |
| 9:30 Conceptos de saneamiento ambiental y medio ambiente  | Lic. Danilo Bocángel Jerez<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN  |
| 10:15 El Proyecto 21.06: Construcción de Plantas de Tratamiento con el Uso de la Totora                             | Lic. Danilo Bocángel Jerez<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN  |
| 10:45 Ronda de preguntas  | Participantes  |
| 11:00 Refrigerio  |  |
| 11:15 Concepción de la Planta de Tratamiento de Copacabana  | Ing. Guillermo Noriega E.<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN   |
| 12:00 Principios de diseño de una planta de tratamiento compuestos de humedales artificiales plantadas de totorales | Ing. Guillermo Noriega E.<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN   |
| 12:45 Ronda de preguntas  | Participantes  |
| 13:00 Almuerzo en el Hotel Playa Azul   |  |
| 14:30 Visita a la Planta de Tratamiento de Copacabana y explicaciones in situ                                       | Ing. Guillermo Noriega E.<br>Lic. Danilo Bocángel Jerez<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN                               |
| 15:00 Presentación de los resultados del Programa de Investigación  | Ing. Florian Erzinger<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN   |
| 15:45 Ronda de preguntas  | Participantes  |
| 16:00 Refrigerio  |  |
| 16:15 Capacitación en el manejo y operación de la planta  | Ing. Guillermo Noriega E.<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN   |
| 17:00 Ronda de preguntas  | Participantes  |
| 17:15 Capacitación práctica para el monitoreo y toma de muestras  | Ing. Florian Erzinger<br>Servicios y Proyectos F. MEDMIN   |
| 18:00 Ronda final de preguntas  | Participantes  |
| 18:15 Entrega de manuales de operación y mantenimiento para las Plantas de Copacabana y Desaguadero                 | Lic. Danilo Bocángel Jerez<br>Representante de MEDMIN  |
| 18:30 Clausura  | A cargo del Honorable Alcalde de Copacabana Sr. Gumerindo Paye y el oficial técnico de Desaguadero Sr. Richard Escalante |
| 18:45 Entrega de certificados de participación  |  |



## **Metodología**

Se lanzaron invitaciones a los alcaldes, oficiales técnicos y técnicos de las alcaldías de Copacabana, Desaguadero y July-Perú. Asimismo, se invitaron a los representantes de las instituciones locales de Copacabana.

En la jornada de la mañana se tocaron aspectos básicos de saneamiento ambiental, medio ambiente y ecosistemas para dar lugar a la exposición central que fue la explicación de la concepción de los diseños de las plantas de tratamiento construidas.

La jornada de la tarde fue la más importante, a primera hora se inició con un recorrido y explicación in situ del funcionamiento de la planta. Posteriormente, en un movilidad contratada, todos los participantes se trasladaron hasta el salón principal de la alcaldía de Copacabana para continuar con el programa. La parte fundamental de la jornada estuvo dirigida a la capacitación en el manejo y operación de la planta, así como los procedimientos que se deben seguir para su monitoreo.

Precisamente en este último punto se procedió a realizar la toma de muestras y mediciones in situ del agua potable de la alcaldía de Copacabana. Se procedió a medir el pH, la temperatura del agua y el potencial eléctrico. Posteriormente se dio una explicación práctica de cómo proceder para el recojo de muestras de las descargas de los sistemas de tratamiento y como medir caudales de ingreso y salida. Finalmente, mediante un equipo portátil, el Ing. Erzinger procedió a medir la cantidad de oxígeno disuelto del agua potable de Copacabana, en presencia de todo el auditorio, con el uso de reactivos químicos.

Es decir que el evento se desarrolló mediante metodologías de capacitación interactivas, en el cual, debido a la poca cantidad de participantes, se abrió un diálogo directo entre expositores y participantes. Durante la jornada se hizo uso de instrumentos fundamentales para llevar a cabo una capacitación efectiva, como ser: Data display, proyector de transparencias y papelógrafos.

Al final de la jornada se procedió a la entrega de los Manuales de Operación y Mantenimiento al Alcalde de Copacabana y al Oficial Mayor técnico de la Alcaldía de Desaguadero y se procedió a la clausura del evento para concluir con la entrega de certificados de participación.

### **3. RESULTADOS**

Como se muestran en el registro fotográfico, se logró generar gran expectativa durante el desarrollo del seminario que permitió contar con la participación continua de las 28 personas inscritas oficialmente. Participaron los oficiales técnicos y técnicos de las alcaldías de Copacabana y Desaguadero, quienes serán los encargados de operar la planta.

Destacó la presencia de los representantes de instituciones locales de Copacabana como la Cámara Hotelera y de los concejales y técnicos del Municipio de July perteneciente a la hermana república del Perú, quienes al final de la jornada mostraron real interés en ejecutar un proyecto similar en su jurisdicción.

Se determinó in situ la calidad del agua potable de Copacabana en presencia de todo el auditorio, utilizando materiales y reactivos llevados desde la ciudad de La Paz, para mostrar de manera práctica como se debe efectuar el monitoreo de la planta. Los parámetros medidos fueron: pH, temperatura del agua, conductividad eléctrica y contenido de oxígeno disuelto.

Asimismo, se capacitó en metodologías de poda de las totoras, medición del caudal de entrada y salida, toma de muestras a ser enviadas al laboratorio y procedimientos de mantenimiento de la infraestructura de las celdas de tratamiento y el tanque de sedimentación.

Se hizo entrega de dos ejemplares del Manual de operación de la planta de Copacabana y dos ejemplares de la planta de Desaguadero a las autoridades correspondientes.

Se cuenta con tomas fotográficas y filmación de los momentos más importantes del seminario, en el cual se evidencia la interesada participación de la audiencia.

#### **4. CONCLUSIÓN**

Absolutamente todos los participantes, coincidieron en felicitar la iniciativa de la ALT/PNUD, MEDMIN y las Alcaldías de Copacabana y Desaguadero por encarar proyectos de este tipo, en lugares estratégicos en los que se hace urgente el tratamiento y purificación de las aguas domiciliarias.

Lo más convincente e importante para los participantes, de propia declaración registrada, fueron los resultados positivos que arrojó el programa de investigación realizado en Copacabana, en base al cual se evidenció las cualidades de diseño de la planta y de la importancia de la totora como agente biológico de descontaminación.

## 5. APÉNDICE

### Documentación fotográfica



Figura 17: Introducción en la temática de la protección de los ecosistemas acuáticos por el representante de MEDMIN Lic. D. Bocángel con proyecciones de data display y transparencias



Figura 18: Explicación de la concepción y diseño de las plantas de tratamiento a cargo del Ing. Guillermo Noriega.



Figura 19: Visita a la planta de tratamiento de Copacbana en la que se brindó una explicación de su funcionamiento.



Figura 20: Sesión de la tarde en la que se capacitó de manera práctica en la operación y monitoreo del funcionamiento de la planta.



Figura 21: Entrega oficial del manual de operación y mantenimiento al Honorable Alcalde Copacabana.



Figura 22: Entrega de certificados de participación.

**Lista de participantes al taller**

| No. | Nombre y Apellido                     | Institución                             | Municipio   |
|-----|---------------------------------------|---|-------------|
| 1   | Rhino Tejada Portillo                 | Cámara Hotelera Copacabana              | Copacabana  |
| 2   | Tte. Cgon. Ramiro Arispe Pérez        | Capitanía de Puerto                     | Copacabana  |
| 3   | Marinero: Roberto Cabrerías Villca    | Capitanía de Puerto                     | Copacabana  |
| 4   | Marinero: Franklin Quispe Sarmiento   | Capitanía de Puerto                     | Copacabana  |
| 5   | Marinero: Luis A. Calvimontes Aguilar | Capitanía de Puerto                     | Copacabana  |
| 6   | Reynaldo Montealegre Suxo             | Comité Cívico Pro Desarrollo            | Copacabana  |
| 7   | Victor Suxo Cahuaza                   | Confederación de Gremiales              | Copacabana  |
| 8   | Goyo A. Selanes Q.                    | Consejo Municipal Copacabana            | Copacabana  |
| 9   | Ines Isabel Mollisaca G.              | Gobierno Municipal de Desaguadero       | Desaguadero |
| 10  | Guadalupe Videla                      | H. A. M. de Copacabana                  | Copacabana  |
| 11  | Richard Escalante C.                  | H. A. M. de Desaguaderos                | Desaguadero |
| 12  | Susana Elena Rivera Centellas         | Hospital Copacabana                     | Copacabana  |
| 13  | Maya Carmen Zeballos                  | Hospital Copacabana                     | Copacabana  |
| 14  | Jeri Antonio Vega D.                  | Hospital Copacabana                     | Copacabana  |
| 15  | Ruben Adolfo Quispe Riveros           | Municipalidad de Juli (Chucuito – Puno) | Juli-Perú   |
| 16  | Pablo Rodolfo Olaguivel Rodriguez     | Municipalidad de Juli (Chucuito – Puno) | Juli-Perú   |
| 17  | Ruth Condorena Gonzales               | Municipalidad de Juli (Chucuito – Puno) | Juli-Perú   |
| 18  | Fermin Quispe                         | Municipio de Copacabana                 | Copacabana  |
| 19  | Guido Román Condory                   | OTB's Munaypata                         | Copacabana  |
| 20  | Reynerio Manuel Gemio Alarico         | OTB's Zona Garita                       | Copacabana  |
| 21  | Javier Encinas Suxo                   | Radio Copacabana                        | Copacabana  |
| 22  | Oscar Vargas Mamani                   | Radio FIDES Copacabana                  | Copacabana  |
| 23  | José Mamani Mayta                     | Resp. Escuela Exp. de Fútbol            | Copacabana  |
| 24  | Genaro Germán Tito Pamí               | Subprefectura                           | Copacabana  |
| 25  | Felipe Acero Tarqui                   | Zona Colquepata                         | Copacabana  |
| 26  | Mario Monasterios                     | Zona Cundiza                            | Copacabana  |
| 27  | Dionisio Poma                         | Zona Huajrapilla                        | Copacabana  |
| 28  | Maria Gutierrez                       |   | Copacabana  |

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**GUÍAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO  
DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE  
COPACABANA Y DESAGUADERO**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003



*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO  
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
SERVIDAS COPACABANA**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# **MANUAL DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS**

(SISTEMA DE FLUJO SUBSUPERFICIAL)

**Fundación MEDMIN**

## TABLA DE CONTENIDO

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.   | MARCO CONCEPTUAL Y DE REFERENCIA.....                            | 4  |
| II.  | DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....                                    | 3  |
| III. | OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO.....                                  | 7  |
|      | 3.1. BASE NORMATIVA PARA EL CONTROL DE AGUAS CONTAMINADAS .....  | 7  |
|      | 3.2. SEGURIDAD.....  | 7  |
|      | 3.3. PERSONAL .....  | 8  |
|      | 3.4. OPERACION Y MANTENIMIENTO .....                             | 9  |
|      | 3.4.1. INICIO DE OPERACIÓN .....                                 | 9  |
|      | 3.4.2. CUIDADO DE LA OBRA CIVIL .....                            | 10 |
|      | 3.4.2.1. TRATAMIENTO PRELIMINAR .....                            | 10 |
|      | 3.4.2.2. LIMPIEZA DE LOS MEDIDORES DE CAUDAL .....               | 10 |
|      | 3.4.2.3. LIMPIEZA DE TUBERIAS .....                              | 11 |
|      | 3.4.2.4. MANTENIMIENTO DE TALUDES .....                          | 11 |
|      | 3.4.2.5. MANTENIMIENTO DE CAMINOS, CERCAS Y OTROS ELEMENTOS..... | 11 |
|      | 3.4.2.6. DE MALOS OLORES.....                                    | 12 |
|      | 3.4.2.7. DESARROLLO DE MOSQUITOS Y OTROS INSECTOS.....           | 12 |
|      | 3.4.2.8. CRECIMIENTO DE MALEZAS.....                             | 13 |
|      | 3.4.2.9. ACUMULACION DE MATERIAS FLOTANTES.....                  | 13 |
| IV.  | MANTENIMIENTO DEL ECOSISTEMA.....                                | 14 |
|      | 4.1 ESTABLECIMIENTO DE LA PLANTACIÓN DE TOTORA .....             | 14 |
|      | 4.2. REGULACION DE LA BIOMASA.....                               | 14 |
|      | 4.3 RENOVACION DEL ECOSISTEMA .....                              | 14 |

# MANUAL DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

(SISTEMA DE FLUJO SUBSUPERFICIAL)

**Fundación MEDMIN**

## I. MARCO CONCEPTUAL Y DE REFERENCIA

El deterioro del Medio Ambiente y la progresiva contaminación de las aguas, son los males que vienen afectando al mundo y por tanto requieren la mayor atención posible.

En los países desarrollados existen sistemas convencionales eficientes de depuración de aguas residuales que les permite tratar grandes caudales con pocas necesidades de terreno, pero con una gran inversión y con elevados costos de mantenimiento. Sin embargo estos sistemas exigen gran regularidad en el caudal y carga constante de aguas servidas.

Para el caso de países subdesarrollados, es recomendable realizar la depuración de aguas servidas mediante “sistemas naturales” que aprovechan y potencian los procesos naturales de tratamiento físicos, químicos y biológicos que ocurren de forma espontánea en la naturaleza. Estos sistemas se caracterizan por sus costos tanto de construcción como de mantenimiento y operación significativamente más bajos que los anteriormente mencionados y un manejo más simple y menos susceptible a errores. Por estas razones, un nivel de purificación satisfactorio, se puede alcanzar también de manera segura bajo condiciones económicas menos exigentes que en el caso de los sistemas técnicamente más sofisticados.

Dichos “sistemas naturales”, se utilizan desde hace cincuenta años con plantas acuáticas para la purificación de aguas servidas. Las modalidades más usadas son:

- Sistemas con algas o macrófitas sumergidos en estanques con aguas detenidas o flujo continuo.
- Sistemas con plantas flotantes en la superficie del agua en estanques de poca profundidad.
- Sistemas con plantas helófitas, que están enraizadas en grava o en suelo limoso.

Cada uno de estos sistemas tiene una eficiencia particular y su uso depende de muchas variables que se relacionan con la topografía del entorno, la flora, la fauna y el clima de un ecosistema dado, la topografía del entorno, de las necesidades de purificación y otras variables más.

Desde los años sesenta, humedales construidos con helófitas se utilizan como “sistemas naturales” en la purificación de aguas servidas y sus usos se intensificaron en las últimas décadas, por ser un método alternativo de bajo costo que mantiene la integridad del paisaje y tiene un alto valor ecológico. En los humedales construidos como sistemas de purificación se encuentran implantados helófitas, plantas macrófitas enraizadas y emergentes del agua, que habitan en pantanos y aguas someras. De estos sistemas se tiene más y más ejemplos en los países en vías de desarrollo. MEDMIN a través de este y tipo de proyectos, es la primera institución en el país que esta experimentando introducir este tipo de sistemas en zonas rurales afectadas por la contaminación doméstica, industrial y minera.

Entre los helófitas más usados comúnmente se encuentran gramíneas como *Phragmites australis* entre otros. En el altiplano Andino se tiene dos helófitas que son aptas para el uso de la purificación de aguas contaminadas: La totora (*Schoenoplectus tatora*) y la matara (*Juncus andicola*), las cuales ya han sido probados como buenos purificadores dentro del sistema de humedales de tratamiento de aguas servidas.

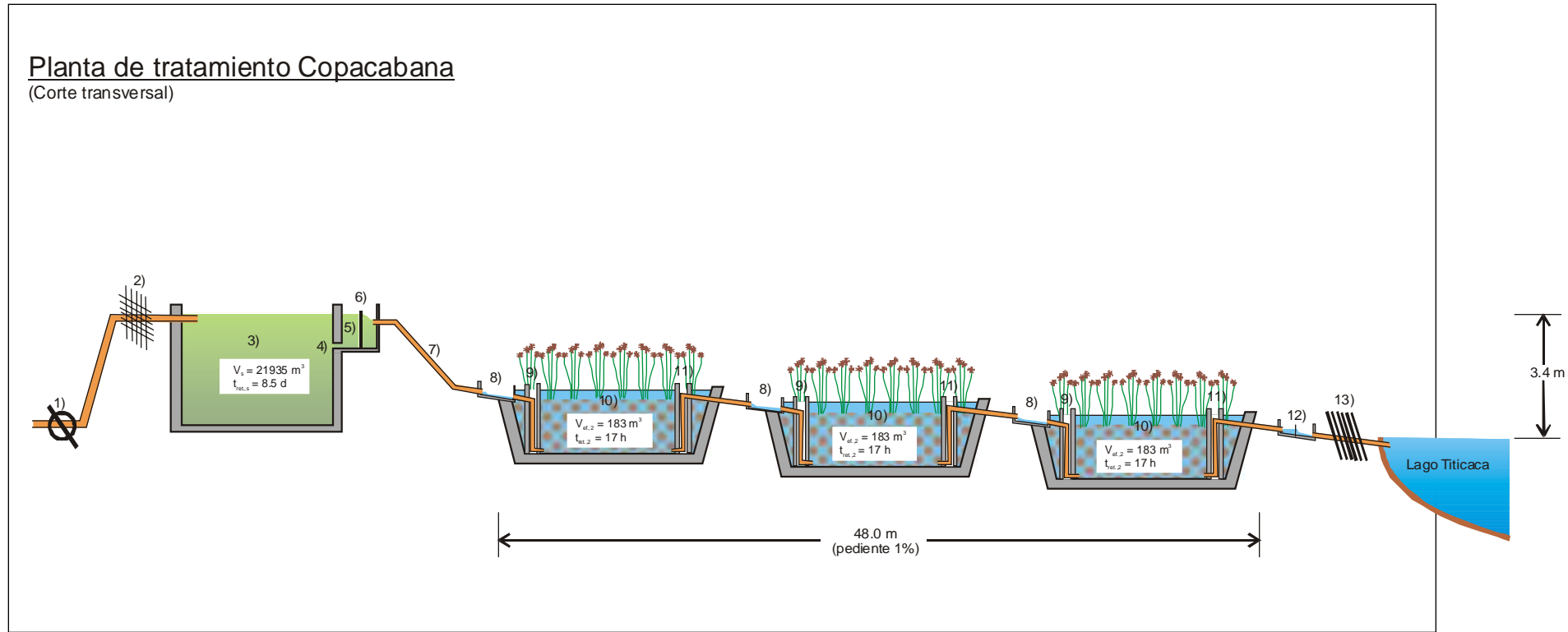
De acuerdo a diversos estudios realizados en el mundo, se ha demostrado que el lugar donde se realiza la mayor actividad de purificación de aguas servidas es en la zona de la rizósfera de los helófitas. Para el caso de la totora, el proceso se realiza en la raíz, rizoma y el substrato que la alberga. En cambio en el tallo y en la columna de agua que la rodea el proceso de purificación de las aguas servidas es menor. Asimismo, en la rizósfera de la totora se encuentra un conjunto de sustancias que inhiben y anulan el desarrollo de microorganismos fecales y patógenos y al mismo tiempo crea condiciones de oxigenación que son ideales para la producción de bacterias aeróbicas que contribuyen a la eliminación de nutrientes (fósforo, nitrógeno) y tóxicos (pesticidas, metales pesados etc.) disueltos en el agua.

Eso implica que para un proceso de purificación de aguas servidas por medio de la totora, todo el caudal de agua contaminada, debe pasar por la zona de la rizósfera pues es en esta zona donde se efectuará el mayor tratamiento de las aguas servidas. El principio del sistema de tratamiento se basa entonces en utilizar la zona más activa de purificación de la totora para el tratamiento, la cual se ubica en la zona de la rizósfera y del substrato que la alberga. En consecuencia se tiene que tomar todas las precauciones de hacer transcurrir el agua mediante un sistema subsuperficial. Tomando en cuenta esta condición, agregando un filtro de substrato de arena especialmente preparado y adecuado para este fin, se establecen sistemas de tratamiento muy eficientes. El nivel de eficiencia de este tipo de plantas de purificación, es superior a cualquier otro sistema de tratamiento con plantas helófitas.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el proceso constructivo de un sistema de flujo subsuperficial es mucho más complejo que otros tipos de sistema de tratamiento pasivo con el uso de helófitas. Esto implica que el costo de inversión (construcción de la obra) puede llegar a ser muy elevado. No obstante, la ventaja de estos sistemas pasivos de flujo subsuperficial radica en dos aspectos fundamentales: por un lado su eficiencia, y por otro sus bajos costos de operación y mantenimiento. Esto último es el factor que más se debe tomar en cuenta a la hora de realizar estudios de factibilidad técnica en materia de medio ambiente en regiones rurales, en las que sus municipios no están en condiciones de afrontar elevados costos de operación y funcionamiento de una obra determinada. Menos aun, considerando que los presupuestos asignados al saneamiento ambiental en estos lugares son muy bajos en relación a otras prioridades como educación y salud.

## **II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

En la Figura 1 se describe de manera gráfica el sistema de tratamiento de aguas servidas de Copacabana. El diseño del sistema de humedales artificiales construido para el tratamiento de aguas servidas, en breve consta de una rejilla que permite retener los materiales gruesos, una cámara de distribución a un tanque de sedimentación, un dispositivo de distribución y regulación de caudal, por lo menos tres estanques de totora ubicados en serie para evacuar a una poza de control para luego introducir las aguas tratadas a la zona de evacuación a través de los peines de infiltración.



Gráfica 15: Esquema de funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Copacabana: 1) cárcamo de bombeo, 2) rejilla, 3) tanque de sedimentación, 4) compuerta de regulación de caudal, 5) posa de disipación de energía, 6) medidor de caudal, 7) tubería de conexión al sistema principal, 8) dispositivo de aireación, 9) caja de distribución e inspección, 10) celdas de tratamiento, 11) caja de control de niveles, 12) medidor de caudal de salida y 13) peines de infiltración.

A continuación, se describe a mayor detalle los distintos componentes de la planta:

- REJILLA

Consiste en una estructura metálica que permite retener los materiales más gruesos provenientes del cárcamo de bombeo ubicado 2.5 Km, impidiendo su ingreso hacia el tanque sedimentador.

- SEDIMENTADOR

Consiste en una estructura de concreto que tiene como función el tratamiento primario de las aguas a través de procesos físicos de sedimentación del material en suspensión que llega desde el cárcamo de bombeo. Se divide a su vez en tres tanques de sedimentación, el primero que sedimenta el material más grueso y pesado, el segundo que sedimenta el material más fino y el tercero que actúa prácticamente como clarificador.

- COMPUERTA DE REGULACION DE CAUDAL

Este dispositivo tiene la función de controlar el caudal de entrada al sistema de tratamiento con totoras, dependiendo del caudal necesario según los parámetros proyectados. El material del cual está confeccionado es de metal y plancha de acero, y el tipo de compuerta es tipo gusano con tarjeta de control.

- POSA DE DISIPACION DE ENERGIA

Una vez ingresada el agua contaminada a la estructura es necesario que el caudal disipe su energía antes de llegar al medidor de caudal instalado en el comportamiento continuo.

- MEDIDOR DE CAUDAL

Este dispositivo es importante para conocer y controlar el caudal de ingreso al sistema principal. La medición se hará de acuerdo a la relación matemática de un vertedero triangular de 90° sin contracción, de acuerdo a procedimientos internacionales:

Computación del caudal por vertedero rectangular:

$$Q = 1427 \cdot h^{5/2} [\text{Lsec.-1}]$$

Donde: h := altura del agua que fluye por el vertedero rectangular [m].

El material del dispositivo medidor del caudal de ingreso a la primera celda de tratamiento es de plancha de acero y el encargado de medir el caudal será capacitado para tal fin.

- TUBERIA DE CONEXIÓN AL SISTEMA PRINCIPAL

Una vez que el agua pasa por el medidor de caudal, inmediatamente pasa al sistema mediante una tubería de 4" con una pendiente del 1%, la cual permite evacuar el agua libremente.

- DISPOSITIVO DE AIREACIÓN

Para una buena purificación es necesario que haya oxigenación previa, y es así que en este dispositivo lo que se trata es de oxigenar el agua que llega del dispositivo de medición de caudal, lo que beneficiaría a la depuración de agentes contaminantes mediante oxigenación.

- CAJA DE DISTRIBUCIÓN E INSPECCIÓN

Una vez ingresado a este dispositivo pasa inmediatamente a una caja de distribución de caudal, la cual permitirá en el futuro realizar inspecciones y limpiezas de la tubería que a continuación está instalada. Dicha caja es de concreto armado con su respectiva tapa de concreto.

- TUBERIA CRIBADA DE DISTRIBUCIÓN

Inmediatamente después el agua pasa a la primera poza de purificación a través de una tubería cribada, la misma que esta distribuida en todo el ancho de la poza.

Esta tubería es de PVC de 3" cribada con pendiente hacia ambos lados a partir de la caja de distribución.

- CELDAS DE TRATAMIENTO

Las celdas de tratamiento están constituidas de arena con la granulometría especificada en el expediente técnico, la misma que sirve para el tratamiento y fijación de los agentes contaminantes. La altura de relleno es de 80 cm, en la cual están insertadas las plantas de la totora, un agente biológico fundamental en la descontaminación de las aguas servidas. En el sistema entero de la planta de tratamiento están establecidas 3 celdas de purificación.

La cama de arena de cada una de las celdas de tratamiento contiene el espacio poroso ideal para el crecimiento vegetativo de las raíces y rizomas de las plantas.

- TUBERIA CRIBADA DE RECOLECCIÓN

Una vez que el agua pasa por el sistema de filtros de arena, es recolectada para luego ser evacuada a la siguiente celda de purificación.

Para esto se utiliza tubería cribada de 3" de PVC, para luego ser evacuada por intermedio de una caja de control de niveles.

- CAJA DE CONTROL DE NIVELES

Esta caja tiene dos funciones: una de regular el nivel del agua sobre el filtro de arena y otra de limpieza de la tubería de recolección. Inmediatamente el agua transcurre al siguiente dispositivo de aireación, el mismo que está construido de concreto armado.

Finalmente, luego de la última celda de tratamiento se cuenta con otra estructura hidráulica detallada a continuación.

- MEDIDOR DE CAUDAL DE SALIDA

Esta estructura hidráulica es importante ya que permitirá conocer el caudal de salida, después de haber recorrido todo el sistema de purificación. Esta estructura fue construida igualmente de concreto armado y el medidor de caudal es de plancha de acero.

La medición estará a cargo del personal designado por la Alcaldía, previa capacitación.



### **III. OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO**

#### **3.1. BASE NORMATIVA PARA EL CONTROL DE AGUAS CONTAMINADAS**

El marco institucional para el control de aguas contaminadas esta basado en la Ley 1333 Ley de Medio Ambiente y en el Reglamento General de Gestión Ambiental (RGGA).

Los municipios, al constituirse en la célula del Estado Boliviano, están obligados a realizar el control ambiental dentro de su jurisdicción, de acuerdo a sus competencias establecidas en el RGGA y la Ley de Municipalidades (Ley 2028).

Los artículos 32 al 39 de la Ley de Medio Ambiente, se dedican exclusivamente al control de la contaminación hacia cuerpos receptores y el vertido de aguas contaminadas. Estos artículos están desarrollados en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), instrumento fundamental para la gestión ambiental del recurso agua. En el RMCH se establecen los parámetros de límites permisibles para descargas líquidas (Anexo A-2) y los parámetros de límites permisibles para cuerpos de agua (Anexo A-1) que son los elementos más importantes en los que se basan el control y el monitoreo ambiental.

#### **3.2. SEGURIDAD**

La planta de tratamiento de aguas servidas debe ser cercada por una malla de protección para evitar la presencia de intrusos o animales extraviados. Que pueden dañar el sistema.

Los desperdicios sólidos provenientes del tanque de sedimentación deben enterrarse inmediatamente para evitar problemas de moscas y malos olores. Todo material flotante deberá ser removido o sumergido tan pronto como sea posible. Si es removido, debe enterrarse de inmediato. La masa sedimentada en el estanque de sedimentación, igualmente debe ser removida y enterrada, una vez por año.

Deben removerse también las piedras de pequeño diámetro, gravilla, pedazos de madera, estopas, etc. que caigan en las cajas de inspección, para que no se corte la alimentación de las celdas de tratamiento. Además, una vez en veinte años la matriz de suelo de las celdas de tratamiento y las plantas de totoras crecidas en ellas, tienen que ser eliminadas enteramente y enterradas en una dependencia apta para basuras, teniendo en cuenta que se trata de un tipo de contaminante químico y microbiológico y remplazada por suelos frescos y plantas nuevas.

De acuerdo a las características señaladas más adelante, cada cierto periodo se debe reponer una nueva cama de arena y reimplantar nuevas totoras (de acuerdo al caso, cada 15 a 20 años).

Las normas de seguridad que se describen a continuación son las más básicas que el operador debe seguir:

- El operador de la planta de tratamiento debe lavarse las manos y la cara con bastante agua y jabón después de haber trabajado en la planta y especialmente antes de comer o deber. El operador debe prestar estricta atención a su higiene personal, por ejemplo, debe mantener sus uñas limpias y cortas, porque las uñas sucias son un medio de incubación y transmisión de enfermedades.

- Es obligatorio ponerse uniformes de trabajo (capas, guantes y filtros) durante todo tipo de trabajo en la planta de tratamiento. Además, el operador tiene que saber nadar. El operador debe estar debidamente instruido en prestación de primeros auxilios.
- Las herramientas, como palas, rastrillos y dispositivos para la remoción de espumas deben lavarse con agua potable antes de guardarse.
- Cortadas, rasguños y quemaduras deben evitarse. De darse algún hecho de estos, lavarse y desinfectarse inmediatamente y ser protegidos contra cualquier contacto con aguas servidas o los suelos de la planta de tratamiento.
- Personas no autorizadas no deben ser invitadas a la planta de tratamiento por razones de seguridad, pues si alguien se cae dentro del sedimentador podrá hacerse daño o aun más morir ahogado. Además existe gran riesgo de contaminación con los microorganismos existentes en las masas líquidas del sistema.
- El operador debe estar vacunado contra tétanos y fiebre tifoidea y si fuera necesario contra fiebre amarilla y cólera, como ha sido sugerido por las autoridades sanitarias. En caso de síntomas de enfermedades como fiebres, escalofríos etc., debe someterse a exámenes médicos inmediatamente.
- Un maletín de primeros auxilios debe estar disponible en sitio fácilmente accesible.

### 3.3. PERSONAL

La cantidad de personas necesarias para el control adecuado del sistema de tratamiento de aguas servidas se establece en función del número de celdas que componen el sistema y su área total. En esta oportunidad se necesitará 1 persona para el control y mantenimiento de la planta de tratamiento.

La persona responsable por el funcionamiento del sistema de tratamiento debe poseer conocimientos básicos sobre la operación y mantenimiento de estos sistemas. Deberá ser capacitado periódicamente por los órganos responsables directa o indirectamente del sistema. Las principales funciones del operador son:

- Lo más importante es garantizar la alimentación constante del sistema de tratamiento con aguas servidas mediante el sistema de bombeo del cárcamo de manera diaria.
- Informar personalmente al responsable del sistema sobre el funcionamiento y el estado general del sistema de tratamiento.
- Realizar los controles necesarios en la operación normal como:
  - Meteorológicos: incluidos la lectura de instrumentos y de los registros y su mantenimiento. Un monitoreo en época de lluvias y uno en época seca.
  - Físico – químicos: incluidos la lectura de parámetros in situ y los análisis de muestras semestralmente.

- Mantener los taludes cada semana exentos de basuras. Las rejillas deben ser limpiadas diariamente. Asimismo, se debe realizar el mantenimiento de desarenadores, vertederos y los dispositivos de entrada y salida y también mantener el área de tratamiento y su entorno limpio de cualquier tipo de basura.
- Recorrer el perímetro del sistema de tratamiento de las aguas residuales y el de cada celda, verificando que las cercas de alambre no estén rotas, buscando con esa precaución impedir la entrada de animales o de personas extrañas al lugar.
- Controlar el estado de conservación de los céspedes de protección de los diques internos y externos y el estado de conservación y de limpieza de las cajas existentes de distribución y recojo de caudal, antes y después de las tuberías cribadas.
- Averiguar si existe algún rebose de líquidos por los taludes y si los niveles de operación son los adecuados.

### **3.4. OPERACION Y MANTENIMIENTO**

#### **3.4.1. INICIO DE OPERACIÓN**

Tan pronto se concluya con la construcción del sistema de tratamiento de aguas servidas, debe iniciarse su funcionamiento. Se debe intentar evitar el crecimiento de las malezas y procurar el desarrollo de las plantas de titora en las celdas de tratamiento. Se debe realizar la extracción mensual desde raíz de las malezas que crezcan en cada celda.

La puesta en marcha del sistema de tratamiento debe realizarse preferentemente en la época en que las condiciones favorezcan el desarrollo del ecosistema, es decir al inicio de la época de lluvia.

- Llenar las celdas hasta el nivel adecuado, es decir hasta la zona enraizada Subsuperficial, con agua limpia si se pudiera.
- Luego iniciar el ingreso de aguas residuales a las celdas de purificación previo paso por los controles respectivos de caudal.
- Verificar diariamente los dispositivos de medición de caudal, para que las aguas servidas entren constantemente al menos con 1L/seg a las celdas de tratamiento.
- No permitir el emposamiento de aguas servidas en más de 20cm. de lámina de agua en ninguna de las celdas de tratamiento y chequear las cajas de inspección y regulación de nivel constantemente.
- Igualar las profundidades de agua en todas las celdas, no descargando antes que todas las celdas estén llenas. Esto se realizará a través de controles de niveles en las cajas establecidas en las mismas pozas de tratamiento.

### **3.4.2. CUIDADO DE LA OBRA CIVIL**

A continuación presentamos un resumen de los cuidados que se deben tener en cuenta para preservar la obra.

#### **3.4.2.1. TRATAMIENTO PRELIMINAR**

El material en las rejillas deberá removerse con frecuencia para evitar que el aumento de la pérdida de carga localizada en las barras cause obstáculos al agua para atravesarlas. Por tanto es necesario eliminar estos sólidos depositados por lo menos una vez al día. Esta eliminación debe efectuarla el operador, utilizando para ello un rastrillo que encaja entre las barras.

Especialmente en las rejillas de limpieza se acumula una serie de sólidos de naturaleza diversa que da lugar a serios problemas para la salud, si no se entierran lo antes posible.

Los proyectistas de los sistemas depuradores deben identificar un área para el enterramiento de estos desechos sólidos. Puede darse la necesidad de transportar los sólidos diariamente de la planta de tratamiento e incorporarlos al sistema municipal de recojo de basuras.

El desarenador instalado en el sistema de tratamiento es de flujo horizontal. Las arenas y otros materiales pueden acumularse en el fondo del desarenador, desde donde se van eliminando en forma manual.

La limpieza manual se lleva a cabo mediante rastrillo y tiene un sistema de eliminación de lodos mediante tuberías que acceden a una poza de secado de lodos, la misma que deberá ser accionada cada 5 años o cuando los sedimentos lleguen al nivel indicado en el expediente técnico.

Aunque el diseño del desarenador se ajusta la velocidad del agua residual de forma que sedimenta sólo la materia inorgánica, las fluctuaciones de caudal pueden dar lugar a variaciones de velocidad que ocasionan también la sedimentación de materia orgánica. Por consiguiente, los sólidos acumulados en el desarenador tendrán un carácter predominantemente inorgánico, pero con cierto contenido de materia orgánica.

La cantidad de materia orgánica en este sistema será mayor si no se controla adecuadamente la velocidad del agua residual a su paso por esta unidad de pre-tratamiento, y si el caudal tiende a variar mucho durante el día. Esto hecho puede provocar que el sistema se haga menos efectivo.

#### **3.4.2.2. LIMPIEZA DE LOS MEDIDORES DE CAUDAL**

El sistema de tratamiento tiene dos medidores de caudal, de los cuales uno está instalado entre el sedimentador y la 1era celda de tratamiento y el otro se encuentra aguas debajo del desarenador.

Es esencial mantenerlos limpios de acumulaciones de residuos, ya que de lo contrario, las lecturas de caudal serán erróneas. Esta limpieza debe efectuarse una vez a la semana y los sólidos recogidos deben eliminarse en la misma forma descrita para las distintas etapas de pre-tratamiento.

Por lo general en la salida del sistema se tiene un vertedero triangular como medidor de caudal de sus efluentes. La limpieza de estos medidores se realiza esporádicamente, pues los efluentes de estas pozas son bastante limpias y ya no deben tener sólidos.

### **3.4.2.3. LIMPIEZA DE TUBERIAS**

Todas las tuberías del agua residual entre distintos elementos del sistema de tratamiento deben mantenerse limpias, eliminando los depósitos de materia sólida que se haya acumulado. Estos sólidos deben enterrarse prontamente después de ser retirados de las tuberías.

Si la planta de tratamiento cuenta con aliviaderos para aguas de lluvias, hay que inspeccionarlos con regularidad, al menos una vez en tiempo seco y al final de cada episodio para asegurarse de que estén libres de obstrucciones y en condiciones de cumplir su misión correctamente.

Cada seis meses, se deberá realizar la limpieza de tubería mediante una motobomba. Eso significa introducir desde las cajas de inspección una manguera y mediante presión realizar dicha limpieza. Esta operación deberá ejecutarse en todo el sistema de tubería con que cuenta el sistema de tratamiento.

#### **3.4.2.4. MANTENIMIENTO DE TALUDES**

Los taludes son los elementos del sistema de tratamiento más sensibles al deterioro y donde éste resulta más visible. Los cuidados que requieran dependen del material del que están conformados. En el caso de la planta de tratamiento de Copacabana las celdas están impermeabilizadas.

Los taludes de tierra pueden resultar dañados por animales que construyen sus madrigueras en ellos, y por la escorrentía. El operador debe inspeccionar los taludes para detectar señales de erosión, desarrollo de grietas y agujeros causados por animales.

Las medidas a tomar son las siguientes:

- Rellenar las grietas con tierra y si es posible con arcilla, y seguidamente igualar el terreno y compactarlo.
- Eliminar las malezas que crecen en los taludes. Realizar un deshierbe cada tres semanas.
- Si por razones estéticas se ha dotado a la planta de tratamiento de jardinería, hay que mantener una distancia mínima de 30 cm. entre el nivel máximo de agua en las lagunas y las plantas cultivadas en los taludes interiores. Las gramíneas deben mantenerse cortadas.
- Si existen zonas arborizadas en las proximidades de la planta, hay que impedir el desarrollo de árboles a por lo menos 100m. de la misma y nunca deben cultivarse setos alrededor de estas.

#### **3.4.2.5. MANTENIMIENTO DE CAMINOS, CERCAS Y OTROS ELEMENTOS**

El sistema de tratamiento de aguas servidas debe estar rodeado en todos los casos de una malla de protección. El operador debe inspeccionar la malla periódicamente, una vez a la semana, recorriendo todo el perímetro para detectar daños en las estacas o el alambre. Los posibles deterioros deben arreglarse inmediatamente. Es muy importante que el recinto este bien aislado para impedir la entrada de personas no autorizadas o ganado, evitando de esta manera posibles accidentes o daños al sistema.

Los caminos de acceso a la planta deben mantenerse en buen estado. Si no están asfaltados o al menos dotados de una cubierta de grava, deben vigilarse para evitar el crecimiento de malezas y la formación de charcos en periodos de lluvia.

En terrenos arcillosos es conveniente que los caminos tengan un buen acabado, ya que de lo contrario puede quedar cortado el acceso a la planta durante periodos lluviosos. Los caminos interiores deben mantenerse siempre libres de malezas.

Si el acabado es de gravilla, hay que mantenerlo por las lluvias, y en el caso de los taludes hay que repararlos inmediatamente.

Cuando la planta de tratamiento se encuentra en la ladera de un cerro, como en el caso de la planta de Copacabana, puede originarse arrastres de tierra en épocas de lluvia, que se acumulen en los caminos y pueden alcanzar las celdas de tratamiento. Hay que vigilar estos arrastres y eliminarlos tan pronto como se producen. Si es necesario, el operador debe informar a las autoridades competentes sobre la conveniencia de asegurar el terreno de la ladera para evitar estos arrastres.

### **3.4.2.6. DE MALOS OLORES**

La aparición de malos olores puede deberse a las siguientes razones:

- Desajuste en la carga orgánica aplicada a la laguna, tanto por encima como por debajo del intervalo utilizado para el diseño. La poza estará funcionando como laguna anóxica (sin oxígeno). El operador debe verificar el contenido de materia orgánica del agua residual y confirmar si se trata de una sobrecarga o si el agua residual está demasiado diluida.
- Presencia de tóxicos o efluentes industriales en las aguas residuales. La presencia de tóxicos en la alimentación, debida a vertimientos industriales clandestinos, provocan un desequilibrio ecológico súbito y en los procesos físicos, químicos y biológicos.
- Gran oscilación en el caudal de entrada. Cuando aumenta o disminuye con respecto al intervalo de diseño, el agua residual permanece menos o más tiempo del previsto en las lagunas de tratamiento. Esto provoca el rompimiento del equilibrio necesario entre las distintas fases de la depuración, con la consiguiente interrupción del proceso.
- Caída repentina de la temperatura ambiental que da lugar a la disminución de la velocidad de los mecanismos de depuración.

El control de los malos olores puede lograrse de la siguiente manera:

Aumentando el pH hasta 8, de modo que se forme la mayor parte de sulfuro en la forma de ion inodoro bisulfuro mediante procesos de reducción bacteriana de sulfatos. La corrección del pH puede hacerse mediante la aplicación de polvo calcáreo, cal o de nitrato de sodio (popularmente llamado de salitre), durante el tiempo suficiente para que surja la fermentación metanogénica.

### **3.4.2.7. DESARROLLO DE MOSQUITOS Y OTROS INSECTOS**

También es importante evitar que caigan ramas o plantas a las celdas de tratamiento, pues ellos sirven de soporte para el desarrollo de insectos. A veces la capa de costra superficial puede servir de criadero de mosquitos.

En este caso, una posible solución es remover esta costra con un rastrillo, para que las larvas de insectos se desprendan y se sedimenten en las celdas de tratamiento. Es preferible evitar siempre el uso de insecticidas.

### **3.4.2.8. CRECIMIENTO DE MALEZAS**

Si las malezas no se retiran periódicamente, suelen incluso comprometer la seguridad de las celdas de tratamiento, ya que los roedores excavan túneles que producen filtraciones.

Las malezas que crecen sobre la parte seca de los taludes tienen menor relevancia en el funcionamiento del sistema, pero ofrecen una impresión de desidia y abandono que debe evitarse en toda instalación y en especial en una planta de tratamiento de aguas residuales.

### **3.4.2.9. ACUMULACION DE MATERIAS FLOTANTES**

Los problemas más frecuentes son causados por la formación de costras y la presencia de papeles, plásticos, grasas y aceites que no han sido eliminados.

Todos estos elementos deben retirarse inmediatamente. A veces se produce la acumulación de agregados de algas en la superficie, en especial después del desarrollo de algas verde azules en épocas calurosas.



## **IV. MANTENIMIENTO DEL ECOSISTEMA.**

### **4.1. ESTABLECIMIENTO DE LA PLANTACIÓN DE TOTORA**

Una vez realizada la siembra de las plantas de totora, se debe dar la cantidad necesaria de agua hasta que las plántulas arraiguen al sustrato filtro. Una época ideal para realizar la siembra son los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Se deben realizar las acciones necesarias para que las plantas de totora cubran toda la superficie de las celdas de tratamiento así como el crecimiento de las raíces se desarrolle en todo el sustrato.

Las celdas de tratamiento tendrán un funcionamiento adecuado cuando las plantas de totora estén completamente arraigadas y en pleno desarrollo de su biomasa.

### **4.2. REGULACION DE LA BIOMASA**

Aproximadamente al segundo año, la biomasa de las plantas de totora cubrirá la superficie de las celdas de tratamiento y en forma proporcional ocurrirá con la biomasa radicular.

Existe una relación directa entre la extracción de elementos contaminantes y el desarrollo de la biomasa. Por tal razón, a fin de extraer elementos contaminantes del ecosistema se debe retirar la cantidad de biomasa excedente en el sedimentador, de tal modo que no atente contra el normal crecimiento y desarrollo del ecosistema. Es recomendable realizar la poda cada cuatro meses, sin embargo es posible realizar dos cortes de biomasa aérea al año.

### **4.3. RENOVACION DEL ECOSISTEMA**

Aproximadamente al cabo de los 15 a 20 años de funcionamiento, cuando la tasa de extracción de elementos contaminantes sea mínima. Esta tasa de extracción se constituye en un indicador de que el sustrato debe ser renovado de las celdas de tratamiento para ser cambiado por uno nuevo.

El establecimiento de un nuevo sustrato debe ser de las mismas características que figura en el expediente técnico.

Luego de confirmar que se han tomado en cuenta todas las características de diseño en la instalación del nuevo sustrato, se procede con la plantación de totora.

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO  
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
SERVIDAS DESAGUADERO**

(Sistema de Flujo Superficial)

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

La Paz, enero de 2003

# MANUAL DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

(SISTEMA DE FLUJO SUPERFICIAL)

**Fundación MEDMIN**

## TABLA DE CONTENIDO

|      |   |    |
|------|---|----|
| I.   | MARCO CONCEPTUAL Y DE REFERENCIA.....                             | 4  |
| II.  | DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....                                      | 3  |
| III. | OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO.....                                   | 7  |
|      | 3.1. BASE NORMATIVA PARA EL CONTROL DE AGUAS CONTAMINADAS .....   | 7  |
|      | 3.2. SEGURIDAD.....   | 7  |
|      | 3.3. PERSONAL .....   | 8  |
|      | 3.4. OPERACION Y MANTENIMIENTO .....                              | 9  |
|      | 3.4.1. INICIO DE OPERACIÓN.....                                   | 9  |
|      | 3.4.2. CUIDADO DE LA OBRA CIVIL .....                             | 10 |
|      | 3.4.2.1. TRATAMIENTO PRELIMINAR    10                             |    |
|      | 3.4.2.2. LIMPIEZA DE LOS MEDIDORES DE CAUDAL    10                |    |
|      | 3.4.2.3. LIMPIEZA DE TUBERIAS           11                        |    |
|      | 3.4.2.4. MANTENIMIENTO DE TALUDES           11                    |    |
|      | 3.4.2.5. MANTENIMIENTO DE CAMINOS, CERCAS Y OTROS ELEMENTOS    11 |    |
|      | 3.4.2.6. DE MALOS OLORES           12                             |    |
|      | 3.4.2.7. DESARROLLO DE MOSQUITOS Y OTROS INSECTOS    12           |    |
|      | 3.4.2.8. CRECIMIENTO DE MALEZAS.    13                            |    |
|      | 3.4.2.9. ACUMULACION DE MATERIAS FLOTANTES    13                  |    |
| IV.  | MANTENIMIENTO DEL ECOSISTEMA.....                                 | 14 |
|      | 4.1 ESTABLECIMIENTO DE LA PLANTACIÓN DE TOTORA.....               | 14 |
|      | 4.2. REGULACION DE LA BIOMASA.....                                | 14 |
|      | 4.3 RENOVACION DEL ECOSISTEMA.....                                | 14 |

# **MANUAL DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS**

(SISTEMA DE FLUJO SUPERFICIAL)

**Fundación MEDMIN**

## **I. MARCO CONCEPTUAL Y DE REFERENCIA**

El deterioro del Medio Ambiente y la progresiva contaminación de las aguas, son los males que vienen afectando al mundo y por tanto requieren la mayor atención posible.

En los países desarrollados existen sistemas convencionales eficientes de depuración de aguas residuales que les permite tratar grandes caudales con pocas necesidades de terreno, pero con una gran inversión y con elevados costos de mantenimiento. Sin embargo estos sistemas exigen gran regularidad en el caudal y carga constante de aguas servidas.

Para el caso de países subdesarrollados, es recomendable realizar la depuración de aguas servidas mediante “sistemas naturales” que aprovechan y potencian los procesos naturales de tratamiento físicos, químicos y biológicos que ocurren de forma espontánea en la naturaleza. Estos sistemas se caracterizan por sus costos tanto de construcción como de mantenimiento y operación significativamente más bajos que los anteriormente mencionados y un manejo más simple y menos susceptible a errores. Por estas razones, un nivel de purificación satisfactorio, se puede alcanzar también de manera segura bajo condiciones económicas menos exigentes que en el caso de los sistemas técnicamente más sofisticados.

Dichos “sistemas naturales”, se utilizan desde hace cincuenta años con plantas acuáticas para la purificación de aguas servidas. Las modalidades más usadas son:

- Sistemas con algas o macrófitas sumergidos en estanques con aguas detenidas o flujo continuo.
- Sistemas con plantas flotantes en la superficie del agua en estanques de poca profundidad.
- Sistemas con plantas helófitas, que están enraizadas en grava o en suelo limoso.

Cada uno de estos sistemas tiene una eficiencia particular y su uso depende de muchas variables que se relacionan con la topografía del entorno, la flora, la fauna y el clima de un ecosistema dado, la topografía del entorno, de las necesidades de purificación y otras variables más.

Desde los años sesenta, humedales construidos con helófitas se utilizan como “sistemas naturales” en la purificación de aguas servidas y sus usos se intensificaron en las últimas décadas, por ser un método alternativo de bajo costo que mantiene la integridad del paisaje y tiene un alto valor ecológico. En los humedales construidos como sistemas de purificación se encuentran implantados helófitas, plantas macrófitas enraizadas y emergentes del agua, que habitan en pantanos y aguas someras. De estos sistemas se tiene más y más ejemplos en los países en vías de desarrollo. MEDMIN a través de este y tipo de proyectos, es la primera institución en el país que esta experimentando introducir este tipo de sistemas en zonas rurales afectadas por la contaminación doméstica, industrial y minera.

Entre los helófitas más usados comúnmente se encuentran gramíneas como *Phragmites australis* entre otros. En el altiplano Andino se tiene dos helófitas que son aptas para el uso de la purificación de aguas contaminadas:

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

La totora (*Schoenoplectus tatora*) y la matara (*Juncus andicola*), las cuales ya han sido probados como buenos purificadores dentro del sistema de humedales de tratamiento de aguas servidas.

De acuerdo a diversos estudios realizados en el mundo, se ha demostrado que el lugar donde se realiza la mayor actividad de purificación de aguas servidas es en la zona de la rizósfera de los helófitas (raíz y rizoma). En cambio en el tallo y en la columna de agua que la rodea el proceso de purificación de las aguas servidas es más lento. En el caso de la planta de tratamiento de Desaguadero, el diseño de la planta es de flujo superficial, es decir, la zona de los tallos de las totoras es la que más actúa en el proceso de descontaminación, mientras la zona de la rizósfera va creando lentamente condiciones de oxigenación que son ideales para la producción de bacterias aeróbicas que contribuyen a la eliminación de nutrientes (fósforo, nitrógeno) y tóxicos (pesticidas, metales pesados etc.) disueltos en el agua.

Eso implica que cuando no se cuenta con la suficiente superficie de área descontaminante (como es el caso de la Planta de Tratamiento de Copacabana), para un proceso eficiente de purificación de aguas servidas por medio de la totora, la mayor parte del caudal de agua contaminada debe pasar por la zona de la rizósfera, para lo cual se toman precauciones de flujo de agua mediante un sistema subsuperficial. En Desaguadero, al contar con una gran superficie descontaminante se ha decidido implementar un sistema de flujo superficial, tomando en cuenta en este caso que la eficiencia de la planta esta más en función de la superficie de las lagunas de tratamiento que de la acción misma de las totoras.

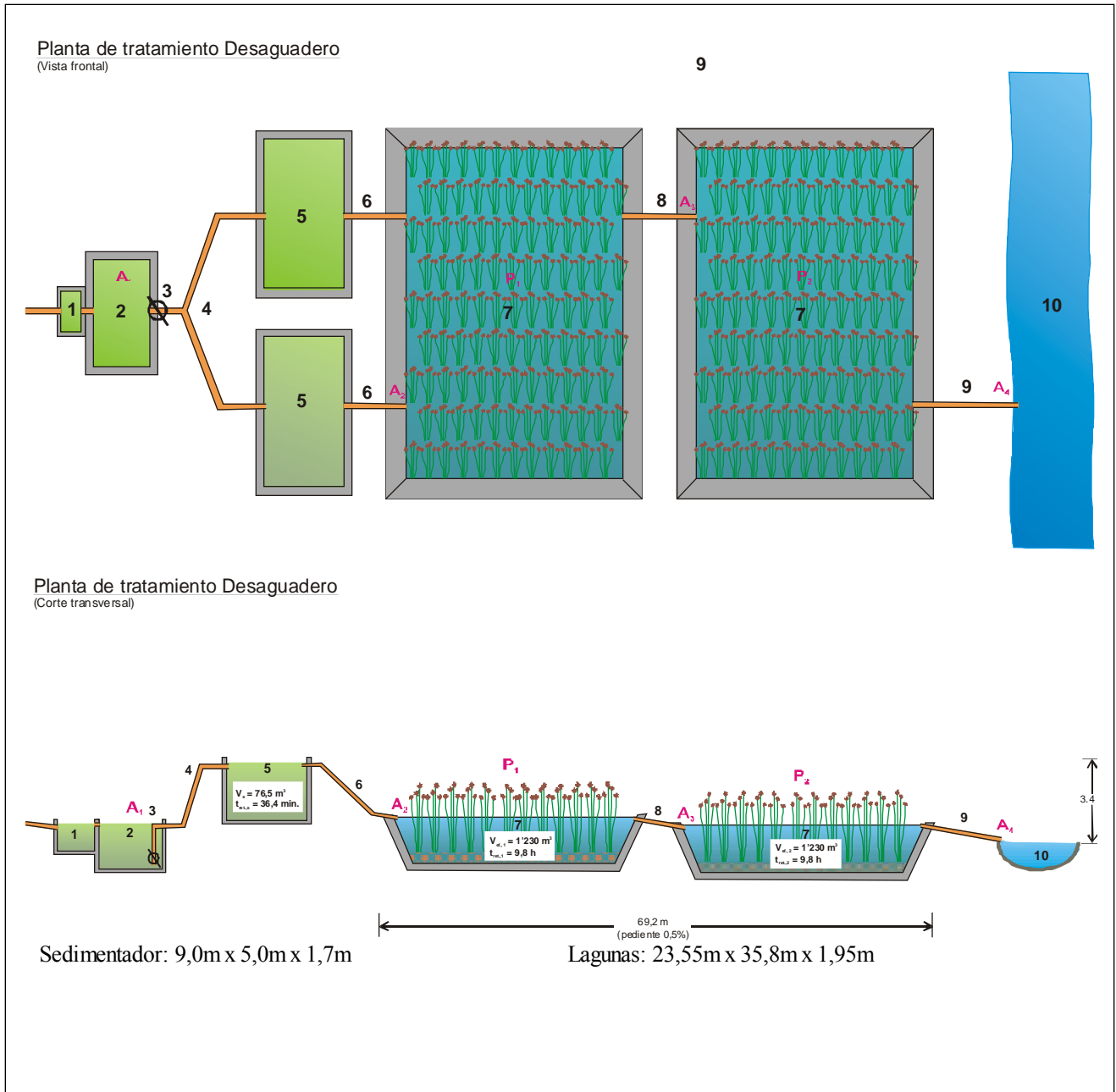
Se debe tomar en cuenta que el proceso constructivo de un sistema de flujo subsuperficial es mucho más complejo que otros tipos de sistema de tratamiento pasivo con el uso de helófitas. Esto implica su costo de inversión (construcción de la obra) puede llegar a ser muy elevado.

No obstante, en cualquiera de los casos (sistemas de flujo superficial y subsuperficial), la ventaja de estos tratamientos pasivos radica en dos aspectos fundamentales: por un lado su eficiencia, y por otro sus bajos costos de operación y mantenimiento. Esto último es el factor que más se debe tomar en cuenta a la hora de realizar estudios de factibilidad técnica en materia de medio ambiente en regiones rurales, en las que sus municipios no están en condiciones de afrontar elevados costos de operación y funcionamiento de una obra determinada. Menos aun, considerando que los presupuestos asignados al saneamiento ambiental en estos lugares son muy bajos en relación a otras prioridades como educación y salud.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la Figura 1 se describe de manera gráfica el sistema de tratamiento de aguas servidas de Desaguadero. El diseño del sistema de humedales artificiales construido para el tratamiento de aguas servidas, en breve consta de una cámara de ingreso que da paso al agua contaminada hacia la cámara de bombeo, en la cual el agua es succionada hasta la tubería de distribución que la conduce hacia los tanques de sedimentación. De aquí el agua clarificada para por un sistema de conexión hacia las dos lagunas de tratamiento en la cual están insertadas las totoras para luego despedir las aguas tratadas a la zona de evacuación por flujo superficial y de aquí hacia el río Desaguadero.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero



instrucción (1); tanques de sedimentación (2); tubería de conexión al sistema principal (3); lagunas de tratamiento (7); tubería de conexión entre las lagunas de tratamiento (8); tubería de evacuación (9); el Río Desaguadero (10). Las muestras de agua se tendrán tomar en los puntos A<sub>1</sub> a A<sub>4</sub>, y las muestras de las raíces las de las raíces de totoras en los puntos P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

A continuación, se describe a mayor detalle los distintos componentes de la planta:

- CAMARA DE DISTRIBUCIÓN

Es una cámara séptica que rompe el flujo de agua proveniente de la tubería final de recolección de aguas negras y conduce el agua hacia la cámara de bombeo

- SISTEMA DE BOMBEO

Consiste en una estructura de concreto que almacena el agua que posteriormente es será succionada por la motobomba de lodos. Tiene la función principal de precipitar los sólidos más gruesos y pesados que pueden afectar el funcionamiento de la bomba .

- TANQUES DE SEDIMENTACIÓN

La planta de Desaguadero cuenta con dos grandes tanques sedimentadores, lugar en el que verdaderamente comienza la purificación de las aguas. Tienen la función de tratamiento primario de las aguas a través de procesos físicos de sedimentación del material en suspensión que llega desde la cámara de bombeo.

Además, esta estructura tiene la función de controlar el caudal de entrada al sistema de tratamiento con totoras, dependiendo del caudal necesario según los parámetros proyectados. El material del cual está confeccionado es de concreto.

- TUBERIA DE DISTRIBUCIÓN

Del sistema de bombeo, el agua es distribuida hacia los dos sedimentadores a través de una tubería, la misma que esta distribuida en todo el ancho de la poza.

Esta tubería es de PVC de 4" cribada con pendiente hacia ambos lados a partir del lugar de distribución.

- LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Del sistema sedimentador, el agua clarificada transcurre hacia la primera laguna artificial de tratamiento y de ésta, por flujo superficial y rebose, a la segunda laguna de tratamiento. Ambas lagunas han sido diseñadas bajo parámetros que permitan una superficie adecuada para lograr un tiempo de retención máximo y dar lugar a los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos para la descontaminación de las aguas.

Lo novedoso de este sistema es la incorporación de un agente biológico adicional de descontaminación, la Totora, helófito que ayuda a la eficaz descontaminación y una vez cumplido su ciclo descontaminante, puede ser utilizado como alimento para animales, siempre y cuando a si lo establezca un programa de investigación preliminar.

Cada una de estas lagunas de tratamiento tendrá una película de agua con una profundidad de 1.5 m inicialmente. Una vez que las totoras lleguen a establecerse en el sistema y alcancen sus tamaños máximos, esta altura llegará hasta 2 m.

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

- MEDIDOR DE CAUDAL

Este dispositivo es importante para conocer y controlar el caudal de ingreso al sistema principal. La medición se hará de acuerdo a la relación matemática de un vertedero triangular de 90° sin contracción, de acuerdo a procedimientos internacionales:

Computación del caudal por vertedero rectangular:

$$Q = 1427 \cdot h^{3/2} \quad \text{[Lsec.-1]}$$

Donde: h := altura del agua que fluye por el vertedero rectangular [m].

El encargado de medir el caudal será capacitado para tal fin.

- TUBERIA DE CONEXIÓN

Son tuberías de 4" que conectan a los sistemas descritos, con una pendiente del 1%, la cual permite evacuar el agua libremente.



## III. OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

### 3.1 BASE NORMATIVA PARA EL CONTROL DE AGUAS CONTAMINADAS

El marco institucional para el control de aguas contaminadas esta basado en la Ley 1333 Ley de Medio Ambiente y en el Reglamento General de Gestión Ambiental (RGGA).

Los municipios, al constituirse en la célula del Estado Boliviano, están obligados a realizar el control ambiental dentro de su jurisdicción, de acuerdo a sus competencias establecidas en el RGGA y la Ley de Municipalidades (Ley 2028).

Los artículos 32 al 39 de la Ley de Medio Ambiente, se dedican exclusivamente al control de la contaminación hacia cuerpos receptores y el vertido de aguas contaminadas. Estos artículos están desarrollados en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), instrumento fundamental para la gestión ambiental del recurso agua. En el RMCH se establecen los parámetros de límites permisibles para descargas líquidas (Anexo A-2) y los parámetros de límites permisibles para cuerpos de agua (Anexo A-1) que son los elementos más importantes en los que se basan el control y el monitoreo ambiental.

### 3.2 SEGURIDAD

La planta de tratamiento de aguas servidas debe ser cercada por una malla de protección para evitar la presencia de intrusos o animales extraviados. Que pueden dañar el sistema.

Los desperdicios sólidos provenientes del tanque de sedimentación deben enterrarse inmediatamente para evitar problemas de moscas y malos olores. Todo material flotante deberá ser removido o sumergido tan pronto como sea posible. Si es removido, debe enterrarse de inmediato. La masa sedimentada en el estanque de sedimentación, igualmente debe ser removida y enterrada, una vez por año.

Deben removerse también las piedras de pequeño diámetro, gravilla, pedazos de madera, estopas, etc. que caigan en las cajas de inspección, para que no se corte la alimentación de las celdas de tratamiento. Además, una vez en veinte años la matriz de suelo de las celdas de tratamiento y las plantas de totoras crecidas en ellas, tienen que ser eliminadas enteramente y enterradas en una dependencia apta para basuras, teniendo en cuenta que se trata de un tipo de contaminante químico y microbiológico y remplazada por suelos frescos y plantas nuevas.

De acuerdo a las características señaladas más adelante, cada cierto periodo se debe reimplantar nuevas totoras (de acuerdo al caso, cada 15 a 20 años).

Las normas de seguridad que se describen a continuación son las más básicas que el operador debe seguir:

- El operador de la planta de tratamiento debe lavarse las manos y la cara con bastante agua y jabón después de haber trabajado en la planta y especialmente antes de comer o beber. El operador debe prestar estricta atención a su higiene personal, por ejemplo, debe mantener sus uñas limpias y cortas, porque las uñas sucias son un medio de incubación y transmisión de enfermedades.
- Es obligatorio ponerse uniformes de trabajo (capas, guantes y filtros) durante todo tipo de trabajo en la planta de tratamiento. Además, el operador tiene que saber nadar. El operador debe estar debidamente instruido en prestación de primeros auxilios.

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

- Las herramientas, como palas, rastrillos y dispositivos para la remoción de espumas deben lavarse con agua potable antes de guardarse.
- Cortadas, rasguños y quemaduras deben evitarse. De darse algún hecho de estos, lavarse y desinfectarse inmediatamente y ser protegidos contra cualquier contacto con aguas servidas o los suelos de la planta de tratamiento.
- Personas no autorizadas no deben ser invitadas a la planta de tratamiento por razones de seguridad, pues si alguien se cae dentro del sedimentador podrá hacerse daño o aun más morir ahogado. Además existe gran riesgo de contaminación con los microorganismos existentes en las masas líquidas del sistema.
- El operador debe estar vacunado contra tétanos y fiebre tifoidea y si fuera necesario contra fiebre amarilla y cólera, como ha sido sugerido por las autoridades sanitarias. En caso de síntomas de enfermedades como fiebres, escalofríos etc., debe someterse a exámenes médicos inmediatamente.
- Un maletín de primeros auxilios debe estar disponible en sitio fácilmente accesible.

### 3.3 PERSONAL

La cantidad de personas necesarias para el control adecuado del sistema de tratamiento de aguas servidas se establece en función del número de celdas que componen el sistema y su área total. En esta oportunidad se necesitará 1 persona para el control y mantenimiento de la planta de tratamiento.

La persona responsable por el funcionamiento del sistema de tratamiento debe poseer conocimientos básicos sobre la operación y mantenimiento de estos sistemas. Deberá ser capacitado periódicamente por los órganos responsables directa o indirectamente del sistema. Las principales funciones del operador son:

- Lo más importante es garantizar la alimentación constante del sistema de tratamiento con aguas servidas mediante el sistema de bombeo de manera diaria.  
Informar personalmente al responsable del sistema sobre el funcionamiento y el estado general del sistema de tratamiento.
- Realizar los controles necesarios en la operación normal como:
  - Meteorológicos: incluidos la lectura de instrumentos y de los registros y su mantenimiento. Un monitoreo en época de lluvias y uno en época seca.
  - Físico – químicos: incluidos la lectura de parámetros in situ y los análisis de muestras semestralmente.
- Mantener los taludes cada semana exentos de basuras. Las rejillas deben ser limpiadas diariamente. Asimismo, se debe realizar el mantenimiento de desarenadores, vertederos y los dispositivos de entrada y salida y también mantener el área de tratamiento y su entorno limpio de cualquier tipo de basura.
- Recorrer el perímetro del sistema de tratamiento de las aguas residuales y el de cada celda, verificando que las cercas de alambre no estén rotas, buscando con esa precaución impedir la entrada de animales o de personas extrañas al lugar.

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

- Controlar el estado de conservación de los céspedes de protección de los diques internos y externos y el estado de conservación y de limpieza de las cajas existentes de distribución y recojo de caudal, antes y después de las tuberías cribadas.
- Averiguar si existe algún rebose de líquidos por los taludes y si los niveles de operación son los adecuados.

### 3.4 OPERACION Y MANTENIMIENTO

#### 3.4.1 INICIO DE OPERACIÓN

Tan pronto se concluya con la construcción del sistema de tratamiento de aguas servidas, debe iniciarse su funcionamiento. Se debe intentar evitar el crecimiento de las malezas y procurar el desarrollo de las plantas de totora en las celdas de tratamiento. Se debe realizar la extracción mensual desde raíz de las malezas que crezcan en cada celda.

La puesta en marcha del sistema de tratamiento debe realizarse preferentemente en la época en que las condiciones favorezcan el desarrollo del ecosistema, es decir al inicio de la época de lluvia.

- Llenar las celdas hasta el nivel adecuado, es decir hasta la zona enraizada Subsuperficial, con agua limpia si se pudiera.
- Luego iniciar el ingreso de aguas residuales a las celdas de purificación previo paso por los controles respectivos de caudal.
- Verificar diariamente los dispositivos de medición de caudal, para que las aguas servidas entren constantemente al menos con 1L/seg a las celdas de tratamiento.
- No permitir el emposamiento de aguas servidas en más de 2 m. de espejo de agua en ninguna de las celdas de tratamiento y chequear las cajas de inspección y regulación de nivel constantemente.
- Igualar las profundidades de agua en todas las celdas, no descargando antes que todas las celdas estén llenas.

## **3.4.2 CUIDADO DE LA OBRA CIVIL**

A continuación presentamos un resumen de los cuidados que se deben tener en cuenta para preservar la obra.

### **3.4.2.1. TRATAMIENTO PRELIMINAR**

El material en las rejillas deberá removerse con frecuencia para evitar que el aumento de la pérdida de carga localizada en las barras cause obstáculos al agua para atravesarlas. Por tanto es necesario eliminar estos sólidos depositados por lo menos una vez al día. Esta eliminación debe efectuarla el operador, utilizando para ello un rastrillo que encaja entre las barras.

Especialmente en las rejillas de limpieza se acumula una serie de sólidos de naturaleza diversa que da lugar a serios problemas para la salud, si no se entierran lo antes posible.

Los proyectistas de los sistemas depuradores deben identificar un área para el enterramiento de estos desechos sólidos. Puede darse la necesidad de transportar los sólidos diariamente de la planta de tratamiento e incorporarlos al sistema municipal de recojo de basuras.

El desarenador instalado en el sistema de tratamiento es de flujo horizontal. Las arenas y otros materiales pueden acumularse en el fondo del desarenador, desde donde se van eliminando en forma manual.

La limpieza manual se lleva a cabo mediante rastrillo y tiene un sistema de eliminación de lodos mediante tuberías que acceden a una poza de secado de lodos, la misma que deberá ser accionada cada 5 años o cuando los sedimentos lleguen al nivel indicado en el expediente técnico.

Aunque el diseño del desarenador se ajusta la velocidad del agua residual de forma que sedimenta sólo la materia inorgánica, las fluctuaciones de caudal pueden dar lugar a variaciones de velocidad que ocasionan también la sedimentación de materia orgánica. Por consiguiente, los sólidos acumulados en el desarenador tendrán un carácter predominantemente inorgánico, pero con cierto contenido de materia orgánica.

La cantidad de materia orgánica en este sistema será mayor si no se controla adecuadamente la velocidad del agua residual a su paso por esta unidad de pre-tratamiento, y si el caudal tiende a variar mucho durante el día. Esto hecho puede provocar que el sistema se haga menos efectivo.

### **3.4.2.2. LIMPIEZA DE LOS MEDIDORES DE CAUDAL**

Es esencial mantenerlos limpios de acumulaciones de residuos, ya que de lo contrario, las lecturas de caudal serán erróneas. Esta limpieza debe efectuarse una vez a la semana y los sólidos recogidos deben eliminarse en la misma forma descrita para las distintas etapas de pre-tratamiento.

Por lo general en la salida del sistema se tiene un vertedero triangular como medidor de caudal de sus efluentes. La limpieza de estos medidores se realiza esporádicamente, pues los efluentes de estas pozas son bastante limpias y ya no deben tener sólidos.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## **3.4.2.3. LIMPIEZA DE TUBERIAS**

Todas las tuberías del agua residual entre distintos elementos del sistema de tratamiento deben mantenerse limpias, eliminando los depósitos de materia sólida que se haya acumulado. Estos sólidos deben enterrarse prontamente después de ser retirados de las tuberías.

Si la planta de tratamiento cuenta con aliviaderos para aguas de lluvias, hay que inspeccionarlos con regularidad, al menos una vez en tiempo seco y al final de cada episodio para asegurarse de que estén libres de obstrucciones y en condiciones de cumplir su misión correctamente.

Cada seis meses, se deberá realizar la limpieza de tubería mediante una motobomba. Eso significa introducir desde las cajas de inspección una manguera y mediante presión realizar dicha limpieza. Esta operación deberá ejecutarse en todo el sistema de tubería con que cuenta el sistema de tratamiento.

## **3.4.2.4. MANTENIMIENTO DE TALUDES**

Los taludes son los elementos del sistema de tratamiento más sensibles al deterioro y donde éste resulta más visible. Los cuidados que requieran dependen del material del que están conformados. En el caso de la planta de tratamiento de Copacabana las celdas están impermeabilizadas.

Los taludes de tierra pueden resultar dañados por animales que construyen sus madrigueras en ellos, y por la escorrentía. El operador debe inspeccionar los taludes para detectar señales de erosión, desarrollo de grietas y agujeros causados por animales.

Las medidas a tomar son las siguientes:

- Rellenar las grietas con tierra y si es posible con arcilla, y seguidamente igualar el terreno y compactarlo.
- Eliminar las malezas que crecen en los taludes. Realizar un deshierbe cada tres semanas.
- Si por razones estéticas se ha dotado a la planta de tratamiento de jardinería, hay que mantener una distancia mínima de 30 cm. entre el nivel máximo de agua en las lagunas y las plantas cultivadas en los taludes interiores. Las gramíneas deben mantenerse cortadas.
- Si existen zonas arborizadas en las proximidades de la planta, hay que impedir el desarrollo de árboles a por lo menos 100m. de la misma y nunca deben cultivarse setos alrededor de estas.

## **3.4.2.5. MANTENIMIENTO DE CAMINOS, CERCAS Y OTROS ELEMENTOS**

El sistema de tratamiento de aguas servidas debe estar rodeado en todos los casos de una malla de protección. El operador debe inspeccionar la malla periódicamente, una vez a la semana, recorriendo todo el perímetro para detectar daños en las estacas o el alambre. Los posibles deterioros deben arreglarse inmediatamente. Es muy importante que el recinto este bien aislado para impedir la entrada de personas no autorizadas o ganado, evitando de esta manera posibles accidentes o daños al sistema.

Los caminos de acceso a la planta deben mantenerse en buen estado. Si no están asfaltados o al menos dotados de una cubierta de grava, deben vigilarse para evitar el crecimiento de malezas y la formación de charcos en periodos de lluvia.

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

En terrenos arcillosos es conveniente que los caminos tengan un buen acabado, ya que de lo contrario puede quedar cortado el acceso a la planta durante periodos lluviosos. Los caminos interiores deben mantenerse siempre libres de malezas.

Si el acabado es de gravilla, hay que mantenerlo por las lluvias, y en el caso de los taludes hay que repararlos inmediatamente.

Cuando la planta de tratamiento se encuentra en la ladera de un cerro, como en el caso de la planta de Copacabana, puede originarse arrastres de tierra en épocas de lluvia, que se acumulen en los caminos y pueden alcanzar las celdas de tratamiento. Hay que vigilar estos arrastres y eliminarlos tan pronto como se producen. Si es necesario, el operador debe informar a las autoridades competentes sobre la conveniencia de asegurar el terreno de la ladera para evitar estos arrastres.

### **3.4.2.6. PRESENCIA DE MALOS OLORES**

La aparición de malos olores puede deberse a las siguientes razones:

- Desajuste en la carga orgánica aplicada a la laguna, tanto por encima como por debajo del intervalo utilizado para el diseño. La poza estará funcionando como laguna anóxica (sin oxígeno). El operador debe verificar el contenido de materia orgánica del agua residual y confirmar si se trata de una sobrecarga o si el agua residual está demasiado diluida.
- Presencia de tóxicos o efluentes industriales en las aguas residuales. La presencia de tóxicos en la alimentación, debida a vertimientos industriales clandestinos, provocan un desequilibrio ecológico súbito y en los procesos físicos, químicos y biológicos.
- Gran oscilación en el caudal de entrada. Cuando aumenta o disminuye con respecto al intervalo de diseño, el agua residual permanece menos o más tiempo del previsto en las lagunas de tratamiento. Esto provoca el rompimiento del equilibrio necesario entre las distintas fases de la depuración, con la consiguiente interrupción del proceso.
- Caída repentina de la temperatura ambiental que da lugar a la disminución de la velocidad de los mecanismos de depuración.

El control de los malos olores puede lograrse de la siguiente manera:

Aumentando el pH hasta 8, de modo que se forme la mayor parte de sulfuro en la forma de ion inodoro bisulfuro mediante procesos de reducción bacteriana de sulfatos. La corrección del pH puede hacerse mediante la aplicación de polvo calcáreo, cal o de nitrato de sodio (popularmente llamado de salitre), durante el tiempo suficiente para que surja la fermentación metanogénico.

### **3.4.2.7. DESARROLLO DE MOSQUITOS Y OTROS INSECTOS**

También es importante evitar que caigan ramas o plantas a las celdas de tratamiento, pues ellos sirven de soporte para el desarrollo de insectos. A veces la capa de costra superficial puede servir de criadero de mosquitos.

En este caso, una posible solución es remover esta costra con un rastrillo, para que las larvas de insectos se desprendan y se sedimenten en las celdas de tratamiento. Es preferible evitar siempre el uso de insecticidas.

### **3.4.2.8 CRECIMIENTO DE MALEZAS**

Si las malezas no se retiran periódicamente, suelen incluso comprometer la seguridad de las celdas de tratamiento, ya que los roedores excavan túneles que producen filtraciones.

Las malezas que crecen sobre la parte seca de los taludes tienen menor relevancia en el funcionamiento del sistema, pero ofrecen una impresión de desidia y abandono que debe evitarse en toda instalación y en especial en una planta de tratamiento de aguas residuales.

### **3.4.2.9 ACUMULACION DE MATERIAS FLOTANTES**

Los problemas más frecuentes son causados por la formación de costras y la presencia de papeles, plásticos, grasas y aceites que no han sido eliminados.

Todos estos elementos deben retirarse inmediatamente. A veces se produce la acumulación de agregados de algas en la superficie, en especial después del desarrollo de algas verde azules en épocas calurosas.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## **IV. MANTENIMIENTO DEL ECOSISTEMA.**

### **4.1 ESTABLECIMIENTO DE LA PLANTACIÓN DE TOTORA**

Una vez realizada la siembra de las plantas de totora, se debe dar la cantidad necesaria de agua hasta que las plántulas arraiguen al sustrato. Una época ideal para realizar la siembra son los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Se deben realizar las acciones necesarias para que las plantas de totora cubran toda la superficie de las celdas de tratamiento así como el crecimiento de las raíces se desarrolle en todo el sustrato.

Las celdas de tratamiento tendrán un funcionamiento adecuado cuando las plantas de totora estén completamente arraigadas y en pleno desarrollo de su biomasa.

### **4.2. REGULACION DE LA BIOMASA**

Aproximadamente al segundo año, la biomasa de las plantas de totora cubrirá la superficie de las celdas de tratamiento y en forma proporcional ocurrirá con la biomasa radicular.

Existe una relación directa entre la extracción de elementos contaminantes y el desarrollo de la biomasa. Por tal razón, a fin de extraer elementos contaminantes del ecosistema se debe retirar la cantidad de biomasa excedente en el sedimentador, de tal modo que no atente contra el normal crecimiento y desarrollo del ecosistema. Es recomendable realizar la poda cada cuatro meses, sin embargo es posible realizar dos cortes de biomasa aérea al año.

### **4.3. RENOVACION DEL ECOSISTEMA**

Aproximadamente al cabo de los 15 a 20 años de funcionamiento, cuando la tasa de extracción de elementos contaminantes sea mínima. Esta tasa de extracción se constituye en un indicador de que el sustrato debe ser renovado de las celdas de tratamiento para ser cambiado por uno nuevo.

El establecimiento de un nuevo sustrato debe ser de las mismas características que figura en el expediente técnico.

Luego de confirmar que se han tomado en cuenta todas las características de diseño en la instalación del nuevo sustrato, se procede con la plantación de totora.



*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**GUÍA DE MONITOREO E INVESTIGACIÓN  
PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
DESAGUADERO**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## **TABLA DE CONTENIDO**

### Guía de Investigación: Planta de Tratamiento Desaguadero

|   |    |
|---|----|
| 1. Planta de tratamiento y programa de investigación Desaguadero..... | 3  |
| 1.1. Antecedentes .....   | 3  |
| 1.2. Introducción .....   | 3  |
| 1.3. Los objetivos .....  | 5  |
| 1.3.1. Dentro del Proyecto: .....                                     | 5  |
| 1.3.2. Específicos de la Investigación: .....                         | 5  |
| 2. La planta de tratamiento .....                                     | 6  |
| 2.1. Procesos físicos .....   | 6  |
| 2.2. Procesos biológicos.....   | 8  |
| 2.3. Funcionamiento técnico.....                                      | 9  |
| 3. Campaña de investigación.....                                      | 11 |
| 3.1. Metodología .....  | 11 |
| 3.1.1. Muestreo .....   | 11 |
| 3.1.2. Métodos de muestreo .....                                      | 11 |
| 3.2. Cronograma del seguimiento .....                                 | 13 |
| 3.3. Presupuesto del programa de investigación.....                   | 14 |
| 4. Evaluación e interpretación de resultados obtenidos.....           | 17 |
| 4.1. Parámetros de referencia .....                                   | 17 |
| 4.1.1. Acididez / alcalinidad.....                                    | 17 |
| 4.1.2. Temperatura .....  | 18 |
| 4.1.3. Sólidos suspendidos .....                                      | 18 |
| 4.2. Oxígeno y carbono orgánico e inorgánico .....                    | 18 |
| 4.2.1. Oxígeno disuelto.....  | 18 |
| 4.2.2. Demanda biológica de oxígeno .....                             | 19 |
| 4.2.3. Demanda química de oxígeno .....                               | 19 |
| 4.3. Nutrientes.....  | 20 |
| 4.3.1. Nitrógeno .....  | 20 |
| 4.3.2. Fósforo.....   | 20 |
| 4.4. Metales pesados.....   | 21 |
| 4.4.1. Plomo .....  | 21 |
| 4.4.2. Cadmio .....   | 22 |
| 4.5. Coliformes fecales .....   | 22 |
| 5. Apéndice.....  | 23 |
| 5.1. Expresiones científicas .....                                    | 23 |
| 5.2. Información adicional .....                                      | 24 |
| 5.2.1. Velocidad y tiempo de sedimentación de forma laminar .....     | 24 |
| 5.2.2. Medición de caudales.....                                      | 24 |
| 5.2.3. Ejemplo de visualización de los datos obtenidos .....          | 26 |
| 5.2.4. Límites permisibles y concentraciones naturales .....          | 26 |

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

|        |                                |    |
|--------|--------------------------------|----|
| 5.2.5. | Presión atmosférica .....      | 27 |
| 5.2.6. | Distribución aire / agua ..... | 27 |
| 5.3.   | Bibliografía .....             | 28 |
| 5.3.1. | Literatura científica .....    | 28 |
| 5.3.2. | Páginas de Web .....           | 28 |

# **GUÍA DE INVESTIGACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO DESAGUADERO**

Institución: Fundación MEDMIN  
Encargados: Danilo Bocángel; coordinador del proyecto  
Florian Erzinger; asistente científico

## **1. PLANTA DE TRATAMIENTO Y PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN DESAGUADERO**

### **1.1. Antecedentes**

En 1998, los gobiernos de Perú y Bolivia han suscrito con el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el convenio de asistencia técnica y financiera para la ejecución del proyecto “Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial GEF, a ser ejecutado por la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT).

En el marco de ejecución del proyecto "BOL / 98 / G-31, Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)", se viene ejecutando el subproyecto “Pruebas del Uso de Totorales para la Descontaminación en el Ámbito Boliviano” (21.06), a cargo de la Fundación MEDMIN.

El contrato fue firmado en octubre de 2000 y tras una serie de adendas, se logró extender el mismo hasta febrero de 2003.

Pese a las numerosas dificultades presentadas que acabaron de ser descritas, finalmente se logró culminar obras satisfactoriamente en las regiones elegidas. El proyecto inicialmente estuvo dirigido a evaluar el comportamiento de los totorales en la descontaminación de aguas servidas, sin embargo, gracias al esfuerzo de las instituciones involucradas a lo largo de estos dos años y medio, se hizo posible extender los alcances del mismo al construir obras de verdadera magnitud en Copacabana y Desaguadero, las cuales formarán parte de los proyectos de mayor impacto para el bienestar social, ecológico y de salud pública durante los próximos años.

### **1.2. Introducción**

El proyecto en si puede ser dividido en tres etapas: Preinversión, que incluye las gestiones realizadas y la elaboración de los Expedientes Técnicos y otros informes de acuerdo a contrato; Inversión, que constituye la construcción misma de las obras, dirección y supervisión; y el Monitoreo ejecutado a través de un Programa de Investigación. Todos los criterios técnicos estuvieron orientados al tratamiento de desagües de poblaciones humanas sin impacto adicional de origen industrial.

De manera general, la planta de tratamiento consta de un proceso primario de eliminación y sedimentación de sólidos gruesos y suspendidos, seguido de un proceso secundario de purificación mediante tres celdas de tratamiento con flujo superficial, sistema en el que alternan procesos químicos y biológicos que favorecen la descontaminación.

Una vez concluidas las obras, se propone realizar pruebas hidráulicas y reajustes en la planta para dar lugar al Programa de Investigación, que evalúe la eficiencia de purificación de la planta de tratamiento. La manera de conducir un tal monitoreo se presentan en el presente informe. Para la operación y mantenimiento óptimo de la

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

planta de tratamiento se elaboró y entregó a los municipios de Copacabana y Desaguadero un Manual de Operación y Funcionamiento, con el fin de asegurar una purificación máxima de las descargas.

El Programa de Investigación contempla la medición de parámetros in situ: caudal, pH, temperatura y el potencial mV y el oxígeno disuelto del agua en los puntos de descarga de los tubos de evacuación. Los mismos parámetros se propone medir in situ en el suelo de las celdas de tratamiento a una profundidad de 20cm. Adicionalmente se tendrá tomar muestras de agua de los tubos que llevan el agua a las celdas y afuera al Río Desaguadero para identificar las concentraciones del nitrógeno total, del fósforo total, del plomo y del cadmio y de los sólidos suspendidos y definir la demanda biológica de oxígeno, la demanda química de oxígeno en estas aguas. Igualmente se sugiere tomar muestras de plantas para hacer analizar las concentraciones de plomo y de cadmio en las muestras de raíces de las totoras.

A continuación, como parte del proyecto, se explican los objetivos bajo los cuales fue construida la planta de tratamiento de aguas servidas y los objetivos de la campaña de investigación (cap. 1.3.). Para facilitar al lector del presente informe científico el entendimiento del funcionamiento de la planta de tratamiento, en el capítulo 2. se da una breve introducción en el funcionamiento físico (cap. 2.1.), biológico (cap. 2.2.) y técnico (cap. 2.3.) de una planta de purificación de aguas servidas mediante tratamiento pasivo como es el caso de Desaguadero. En el capítulo 3., se describe la campaña de investigación como los expertos científicos de la fundación MEDMIN la proponen, iniciando con la explicación de la metodología que tendrá ser utilizado en (cap. 3.1.), seguido por un cronograma de seguimiento de la campaña (cap. 3.2.) y por un cálculo de presupuesto para la conducción de presente programa de monitoreo (cap. 3.3.). Luego, en la parte principal de presente informe, parámetro por parámetro se da unas indicaciones sobre la manera científicamente correcta de evaluar y interpretar los datos obtenidos por un tal programa de investigación. Finalmente, en el apéndice en el capítulo 5. se presenta unas definiciones de expresiones científicas que se utilicen en este informe (cap. 5.1.), informaciones adicionales que el lector necesita para su mejor entendimiento (cap. 5.2.) y las fuentes de literatura, en la cual se base el contenido de este documento (cap. 5.3.).

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## 1.3. Los objetivos

Como objetivos prácticos del proyecto y del Programa de Investigación, se tienen:

### 1.3.1. Dentro del Proyecto:

- Cumplir una de las partes fundamentales del contrato 21.06 del Convenio de asistencia técnica y financiera para la ejecución del proyecto "Conservación de la biodiversidad de la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)", suscrito con el Programa de las Naciones Unidas (PNUD): Validar las plantas de totoras y los humedales, es decir los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) y los de flujo superficial (FWS) como una nueva tecnología de purificación a aguas residuales humanas en el perímetro Altiplánico.

### 1.3.2. Específicos de la Investigación:

- Cuantificar la eficiencia de la planta de tratamiento, por un lado respecto de la eliminación de los nutrientes claves para evitar la eutrofización de sistemas acuáticos y por otro lado de la reducción de los contaminantes como la materia orgánica, los sólidos suspendidos, los coliformes y metales pesados. Asimismo, conocer la influencia del sistema descontaminador sobre el pH y la temperatura del agua tratada.
- Cuantificar el aumento progresivo en los niveles de oxígeno después del tratamiento en cada una de las celdas con totora.
- Realizar un análisis comparativo de las concentraciones de los metales pesados más importantes en aguas residuales humanas en el sedimento de las celdas de tratamiento y las plantas de totoras que crecen en estos sedimentos.
- Investigar si la composición bioquímica de las totoras criadas en las celdas de tratamiento cumplen las normas de alimentación para animales domésticos.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## 2. LA PLANTA DE TRATAMIENTO

El funcionamiento de una planta de tratamiento como en caso de Desaguadero base en dos distintos procesos pasivos de purificación de los desagües humanos: el primero, lo que se llama tratamiento primario, consiste en la eliminación de partículas suspendidas por la sedimentación por gravedad, es decir únicamente en un proceso físico. El tratamiento secundario sin embargo es provocado por varios procesos biológicos como la degradación, absorción, adsorción, la asimilación o la acumulación de las sustancias contaminantes por microorganismos o plantas acuáticas.

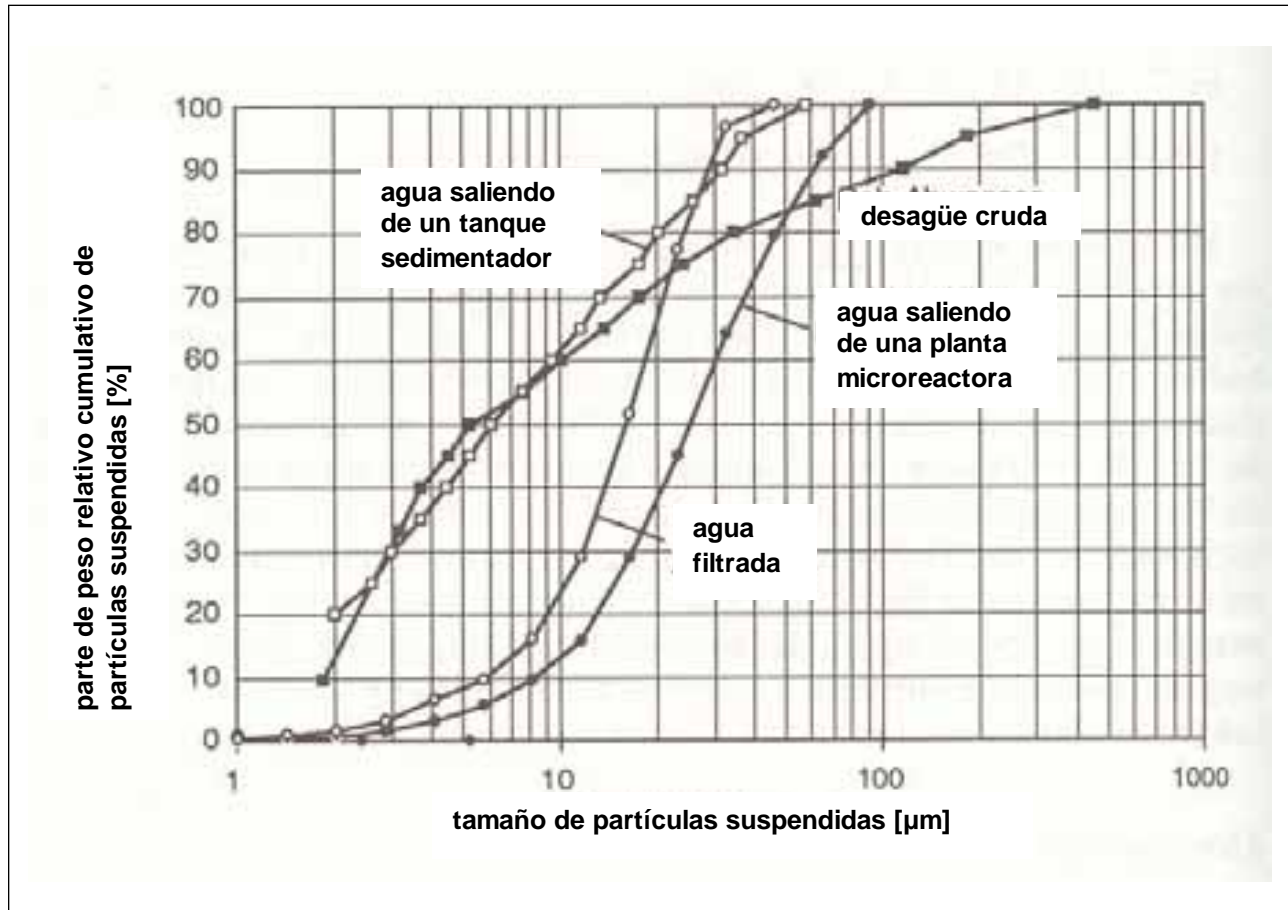
### 2.1. Procesos físicos

Para conocer la eficiencia del tratamiento primario de las partículas suspendidas en las aguas negras, es necesario conocer el tiempo que necesitan estos sólidos suspendidos en promedio para sedimentar, es decir el tiempo de sedimentación  $t_{sed}$ . Obviamente, este parámetro depende de la velocidad de sedimentación  $v_{sed}$  y de la profundidad de la capa de agua recorrido por las partículas suspendidas en proceso de sedimentación  $h$  (ver capítulo 5.2.1.), la que en el caso de los dos sedimentadores de la planta de tratamiento en Desaguadero acaba 1,7m de profundidad.

La sedimentación de partículas suspendidas en aguas estancadas como es el caso en un sedimentador tiene lugar de forma laminar, es decir no turbulento. Bajo estas condiciones, para calcular la velocidad de sedimentación por gravedad  $v_{sed}$  se sirve de la ley de Stokes (ver capítulo 5.2.1.), la cual relaciona velocidad de sedimentación  $v_{sed}$  al tamaño de las partículas suspendidas, es decir sus radios  $r$ . Esta fórmula aplicada a distintos radios de partículas nos da los tiempos de sedimentación anotados en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Velocidades y tiempos de sedimentación laminar

| r [mm] | Descripción        | $v_{sed}$ [cmseg <sup>-1</sup> ] | $t_{sed,170cm}$ [h] |
|--------|--------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1      | Arena              | 360                              | 0.0001              |
| 0.5    |                    | 90                               | 0.0005              |
| 0.4    |                    | 58                               | 0.0008              |
| 0.3    |                    | 32                               | 0.001               |
| 0.2    |                    | 14                               | 0.003               |
| 0.1    | Arena fina         | 4                                | 0.01                |
| 0.05   |                    | 0.9                              | 0.05                |
| 0.01   | Arcilla            | 0.036                            | 1.3                 |
| 0.005  |                    | 0.009                            | 5                   |
| 0.001  | Bacteria           | 0.00036                          | 131                 |
| 0.0005 |                    | 0.00009                          | 524                 |
| 0.0001 | Partícula coloidal | 0.0000036                        | 13107               |



**Figura 23:** Distribución de frecuencia de tamaños de partículas suspendidas en aguas contaminadas.

La evacuación del agua del tanque de sedimentación por la tubería de conexión al sistema principal tiene lugar por decantación, una metodología que se sirve del fenómeno físico que partículas suspendidas en un cuerpo de agua estancado siguen sedimentando por la atracción gravitacional de la tierra. Este hecho conduce a la situación que la densidad de las partículas suspendidas disminuye con la altura de la capa de agua del cuerpo de agua. De esta manera, el grado de pureza del agua estancada aumenta en las capas superficiales.

En la Figura 23 reconocemos que las partículas de interés en nuestro caso son los de un radio entre 5 y 100µm, pues respecto al peso acumulativo abarcan casi la totalidad de las partículas suspendidas en aguas contaminadas. Para este rango de volúmenes podemos notar que las partículas suspendidas en el agua almacenada en los sedimentadores de la planta de tratamiento de Desaguadero tienen tiempos de sedimentación entre algunos minutos y unas 5 horas. Ya que estos valores están en el rango del tiempo de retención del agua en el tanque de sedimentación  $t_{ret.,sed.}$  (ver capítulo 2.3.), se puede partir de que la gran mayoría de los metales pesados y minerales contaminantes ya serán eliminados simplemente por sedimentación por gravedad, además de que la evacuación del agua purificada por la tubería de conexión al sistema principal de la planta de tratamiento tiene lugar en la capa superficial de algunos centímetros de ancho.



# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## 2.2. Procesos biológicos

Desde los años sesenta, humedales construidos con helófitas se utilizan como “sistemas naturales” en la purificación de aguas servidas y sus usos se intensificaron en las últimas décadas, por ser un método alternativo de bajo costo que mantiene la integridad del paisaje y tiene un alto valor ecológico. En los humedales construidos como sistemas de purificación se encuentran implantados helófitas, plantas macrófitas enraizadas y emergentes del agua, que habitan en pantanos y aguas someras.

De estos sistemas se tiene más y más ejemplos en los países en vías de desarrollo. MEDMIN a través de este tipo de proyectos, es la primera institución en el país que está experimentando introducir este tipo de sistemas en zonas rurales afectadas por la contaminación doméstica, industrial y minera.

Entre las helófitas más usadas comúnmente se encuentran gramíneas como *Phragmites australis* entre otros. En el altiplano Andino se tiene dos helófitas que son aptas para el uso de la purificación de aguas contaminadas: La totora (*Schoenoplectus tatora*) y la matara (*Juncus andicola*), las cuales ya han sido probados como buenos purificadores dentro del sistema de humedales de tratamiento de aguas servidas (Franken 1988, 1990 y Taucer 1991,1993).

De acuerdo a diversos estudios realizados en el mundo, se ha demostrado que el lugar donde se realiza la mayor actividad de purificación de aguas servidas es en la zona de la rizósfera de los helófitas. Para el caso de la totora, el proceso se realiza en la raíz, rizoma y el substrato que la alberga. En cambio en el tallo y en la columna de agua que la rodea el proceso de purificación de las aguas servidas es menor. Asimismo, en la rizósfera de la totora se encuentra un conjunto de sustancias que inhiben y anulan el desarrollo de microorganismos fecales y patógenos y al mismo tiempo crea condiciones de oxigenación que son ideales para la producción de bacterias aeróbicas que contribuyen a la eliminación de nutrientes (fósforo, nitrógeno) y tóxicos (pesticidas, metales pesados etc.) disueltos en el agua (Bahlo & Wach 1993).

El principio del sistema de tratamiento se basa entonces en utilizar las zona activas de purificación de la totora para el tratamiento, la cual se ubica en la zona de la rizósfera y del substrato que la alberga y, con menos eficiencia de eliminación de sustancias contaminantes, en el cuerpo de agua alrededor de los tallos de la planta.

En consecuencia, el método que ofrece mejores resultados en la actualidad es el de hacer transcurrir el agua mediante un sistema subsuperficial. Tomando en cuenta esta condición, agregando un filtro de substrato de arena especialmente preparado y adecuado para este fin, se establecen sistemas de tratamiento muy eficientes. El nivel de eficiencia de este tipo de plantas de purificación, sería superior a cualquier otro sistema de tratamiento con plantas helófitas. El otro sistema, consiste en hacer transcurrir el agua contaminada a través de un flujo superficial (caso Desaguadero), en el cual el contacto del agua contaminada con la rizósfera de las totoras es mucho menor, igual garantiza la reducción de las sustancias contaminantes por procesos asimilatorios y degradación microbiológica, sin embargo con menor eficiencia que en el primer caso.

Por otro lado, se debe también tomar en cuenta que el proceso constructivo de un sistema de flujo subsuperficial es mucho más complejo que otros tipos de sistema de tratamiento pasivo con el uso de helófitas. Esto implica que el costo de inversión (construcción de la obra) puede llegar a ser muy elevado en comparación con sistemas de flujo superficial. Otro argumento en este contexto es el tamaño de la planta de tratamiento que necesitan los dos sistemas para garantizar el mismo efecto de purificación al agua contaminada, pues los sistemas con flujo superficial por razón de su eficiencia microbiológica menor necesitan un terreno mucho más amplio que los sistemas de flujo subsuperficiales.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## 2.3. Funcionamiento técnico

En la Figura 24 se describe de manera gráfica el sistema de tratamiento de aguas servidas de Desaguadero. El diseño del sistema de humedales artificiales construido para el tratamiento de aguas servidas, en breve consta de una cámara de distribución de aguas servidas seguida de un sistema de bombeo con una bomba sumergible de lodos. De allí, el agua está conducida por un sistema de distribución a dos tanques de sedimentación. Los sedimentadores consisten en una estructura de concreto que tiene como función el tratamiento primario de las aguas a través de procesos físicos de sedimentación por gravedad del material en suspensión que llega desde el cárcamo de bombeo.

Después este tratamiento primario, el agua está llevada hacia las dos lagunas de tratamiento secundario, donde el agua se purifica mayormente por procesos biológicos, es decir por la degradación, absorción, adsorción, asimilación o acumulación de las sustancias contaminantes por microorganismos en la matriz de la capa vegetal y en las rizomas de las plantas. El sistema de tratamiento biológico consta de dos lagunas de purificación. En dichas lagunas, el agua pasa en su mayor parte por flujo superficial sobre una capa vegetal de 70cm, en la cual están insertadas las plantas de totora. Los procesos de purificación entonces tienen lugar por su mayor parte en la columna de agua libre de una profundidad promedio de 1,5 m y sólo por partes menores en la capa vegetal, el agente biológico fundamental en la descontaminación de aguas servidas. Una vez que el agua pasa por el cuerpo de agua de una laguna, es recolectada para luego ser evacuada a la siguiente celda de purificación. Al final, el agua tratada es evacuada y conducida al Río Desaguadero.

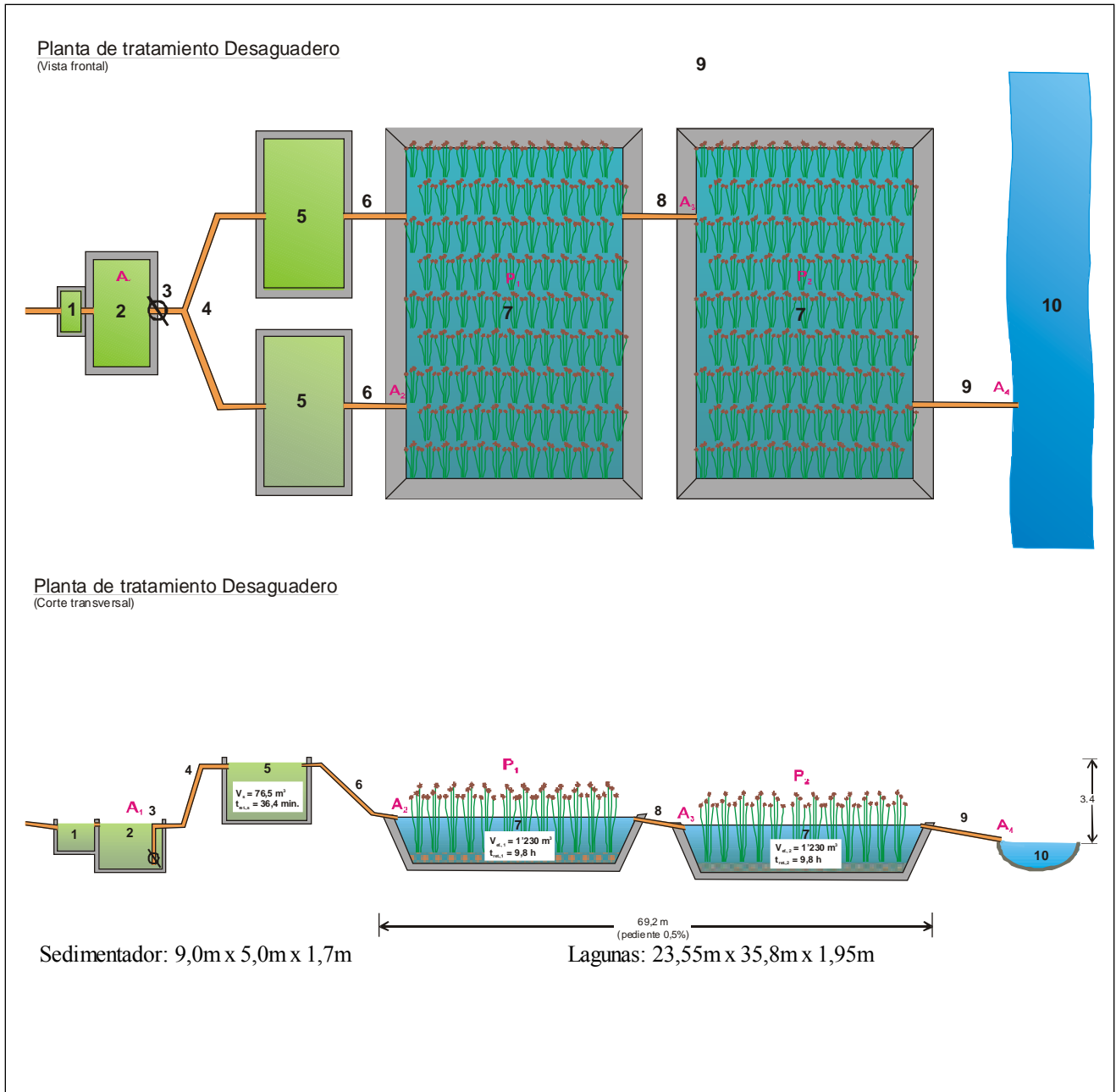
Para el entendimiento sistémico de una planta de tratamiento como en el caso de Desaguadero el parámetro técnico central es el tiempo de retención del agua en las distintas estructuras de almacenamiento de agua. Eso se explica por la importancia del tiempo promedio durante el cual las sustancias en el agua están expuestas a los distintos procesos de eliminación físicos o biológicos explicados en los capítulos anteriores.

El tiempo de retención de agua en una superficie dada se deduce del volumen de almacenamiento  $V_{eff.}$  de dicho agua y del caudal  $Q$ :

$$t_{ret.} = \frac{V_{eff.}}{Q} \quad [\text{seg.}] \quad (2.3.1.)$$

Con un caudal promedio  $Q_{prom.}$  de 35L/seg., una porosidad de la capa vegetal  $\Phi$  de 0,3 y los volúmenes indicados en la Figura 24 se determina un tiempo de retención  $t_{ret.,sed.}$  promedio del agua en el sedimentador de 36,4min. y en cada laguna de tratamiento con totora un tiempo de retención  $t_{ret.,lag.}$  promedio de 9,8h (ver Figura 24).

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero



de distribución (4); tanques de sedimentación (5); tubería de conexión al sistema principal (6), lagunas de tratamiento (7); tubería de conexión entre las lagunas de tratamiento (8); tubería de evacuación (9); el Río Desaguadero (10). Las muestras de agua se tendrán que tomar en los puntos A<sub>1</sub> a A<sub>4</sub>, y las muestras de las raíces las de las raíces de totoras en los puntos P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## 3. CAMPAÑA DE INVESTIGACIÓN

### 3.1. Metodología

#### 3.1.1. Muestreo

En el plan de muestreo existen seis puntos de muestreo y tres clases de muestras: agua, tallos y raíces de plantas de totora. Cuatro de los seis puntos corresponden al cárcamo de bombeo o a los tubos de conexión respectivamente, es decir se refieren a muestras de agua, y tienen como descripción (ver Figura 24):

- A<sub>1</sub>: Cárcamo de bombeo
- A<sub>2</sub>: Evacuación del sedimentador a la primera laguna de tratamiento
- A<sub>3</sub>: Entrada de agua a la segunda laguna de tratamiento
- A<sub>4</sub>: Tubo de evacuación de agua al Río Desaguadero

Se tiene que recoger una muestra de agua en cada uno de estos puntos de muestreo para análisis de todos los parámetros: pH, potencial mV, temperatura, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, demanda biológica y química de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, plomo, cadmio y colifecales. Para determinar los caudales se registra el tirante en cada tubo. Como frecuencia de medición de estos parámetros se sugiere un intervalo de tiempo de 3 días durante 6 días (ver capítulo 3.2.).

Los otros dos puntos de muestreo corresponden a las lagunas de tratamiento y se refieren a los puntos donde deben colectarse las plantas, cuya definición es:

- P<sub>1</sub>: Primera laguna de tratamiento
- P<sub>2</sub>: Segunda laguna de tratamiento

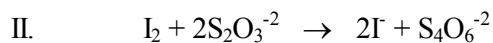
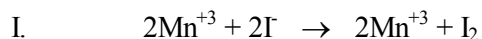
Se tiene que tomar una muestra de los tallos y de los raíces de plantas en cada laguna para análisis de plomo y cadmio al principio y al final de la campaña de monitoreo ver capítulo 3.2.)

#### 3.1.2. Métodos de muestreo

La lista de métodos y procedimientos a ser usados en el campo y en el laboratorio y los límites de detección de los diferentes métodos individuales son:

#### Determinación de oxígeno disuelto

Para la determinación de oxígeno disuelto se emplea el método de Winkler: La prueba está basada en la adición a la muestra de una solución de manganeso divalente, seguido por un álcali fuerte dentro de un frasco con tapa de vidrio. El oxígeno disuelto presente oxida rápidamente a una cantidad equivalente del hidróxido manganeso precipitado y lleva a los hidróxidos a estados de valencia más altos. En la presencia de iones yoduro y acidificación, el manganeso oxidado revierte a su estado divalente con la liberación de yodo equivalente al oxígeno disuelto originalmente contenido en la muestra. El yodo es luego titulado con una solución estándar de tiosulfato:



# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## *Equipo de medición:*

Kit para la determinación de oxígeno disuelto, 0.2-4 y 1-20mg/L O<sub>2</sub>, MOD. OX-2P, # 1469-00

## *Reactivos y materiales:*

- Matraz DBO, 60mL, marcado en los 30mL, con tapón de vidrio esmerilado
- Matraz cuadrado de vidrio (para mezclar)
- Pinzas cortantes para cápsulas intermedias
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 1
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2
- Tarjeta de Instrucciones, juego de Prueba OX-2P
- Probeta, plástico 5.83mL
- Solución patrón estabilizada de tiosulfato de sodio, 0.0109 N, 100mL

## *Procedimiento:*

Se llena el matraz para oxígeno (matraz con tapón de vidrio esmerilado) con la muestra de agua, dejando resbalar la muestra por el matraz suavemente durante 2 o 3 minutos, evitando la formación de turbulencias y burbujas en la muestra al llenar. Se inclina ligeramente el matraz y coloque el tapón de un golpe para evitar atrapar burbujas de aire.

Se quita el tapón y añadir el contenido de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 1 y de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2 al matraz. Tapar el matraz suavemente para evitar atrapar burbujas de aire. Se sacude vigorosamente el matraz para mezclar. Se forman flóculos de precipitado. Se espera a que el precipitado se deposite aproximadamente hasta la mitad del volumen del matraz.

Se quita el tapón y añade el contenido de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 3, tape el matraz suavemente para evitar atrapar burbujas de aire. Se sacude vigorosamente el matraz. Los flóculos se disolverán y la muestra se volverá amarilla si contiene oxígeno disuelto.

Se llena hasta el máximo la probeta de plástico con la muestra hasta aquí preparada. Se vierte el contenido de la probeta en el matraz para mezclar. Se añade gota a gota la solución patrón de tiosulfato sódico al matraz. Contar cada gota añadida y agitar hasta mezclar tras añadir cada gota. Continuar añadiendo gotas hasta que la muestra se vuelva totalmente incolora. El número total de gotas de solución valorada equivale al total de oxígeno disuelto expresado en mg/L.

## **Determinación del pH, del potencial mV y de la temperatura**

La acidez / alcalinidad se determina generalmente por método potenciométrico midiendo la concentración de iones hidrógenos de forma instrumental empleando un pH-metro. Igualmente de forma potenciométrica se define el potencial mV la totalidad de los iones negativos suspendidos en el agua.

## *Equipo de medición:*

- Equipo pH/mV Handylab SCHOTT, rango del pH-metro: -2 a 16, precisión: +/-1 dígito, resolución: 0.01.
- Accesorios: Electrodo combinado de medición de pH, solución KCl 3mol/L (300L) para conservar el electrodo.

# Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

## *Procedimiento:*

Se limpia el electrodo de medición combinada de pH / potencial mV con agua destilado. Se mide el pH, el potencial mV y la temperatura del agua, esperando que la se estabilice la lectura. Después de utilizarlo se enjuaga otra vez con agua destilada.

## **Determinación de los otros parámetros químicos y microbiológicos**

Todo los otros parámetros químicos y microbiológicos, es decir las concertaciones del nitrógeno total ( $N_{tot}$ ), del fósforo total ( $P_{tot}$ ), del plomo (Pb), del cadmio (Cd) y de los sólidos suspendidos (SST) y tanto la demanda biológica de oxígeno (DBO), tanto la demanda química de oxígeno (DQO) en las muestras de agua y las concentraciones de plomo y de cadmio en las muestras de raíces de la plantas totaras se proponen hacer analizar por el laboratorio SGS ENVILAB (Société Générale de Surveillance), zona 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro, El Alto, Bolivia. Las muestras de agua tienen que ser guardados a temperaturas entre 1 y 4°C en el caso que no se puede entregarlas inmediatamente al laboratorio.

## **3.2. Cronograma del seguimiento**

Para obtener datos representativos del funcionamiento de la planta de tratamiento de Desaguadero se tiene que escoger un intervalo de muestreo adecuado al dimensionamiento de los distintos cuerpos de almacenamiento del agua tratada como explicado en el capítulo 2.3. Eso significa que el tiempo de periodo en el cual se repite las mediciones tiene que ser de la misma magnitud al tiempo de retención promedio más largo del sistema, es decir como el tiempo promedio del sedimentador o el de una laguna de tratamiento, dependiendo cual de los dos subsistemas tiene un tiempo de retención más largo:

$$t_{med.} \geq t_{ret.,max.} \quad [\text{seg.}] \quad (3.2.1.)$$

En el caso de la planta de tratamiento de Desaguadero, los subsistemas con el tiempo de retención mayor son las lagunas con totora, que muestran un tiempo de retención promedio  $t_{ret.,lag.}$  de más de 9 horas. En consecuencia de este hecho se recomienda escoger un intervalo de tiempo de cada vez 3 días para medir los parámetros químicos de las aguas negras durante un periodo de monitoreo de 6 días (ver ejemplo en Tabla 5 - Tabla 8).

En el caso de las muestras de plantas, en las cuales se tendrá que analizar los contenidos de los dos metales pesados más frecuentes en desagües humanos, Plomo (Pb) y Cadmio (Cd), bastaría un cronograma de investigación menos frecuente, pues los procesos de bioacumulación son lentos. En consecuencia de estas reflexiones se recomienda medir estos dos parámetros sólo dos veces durante cada campaña de de investigación: al inicio de la campaña y a su finalización tanto en las raíces, como en los tallos de las totoras (ver ejemplo en Tabla 9 y Tabla 10).

Las campañas de monitoreos tendrían que tener lugar dos veces por año, óptimamente una vez en época de lluvia y una vez en época seca. Para conocer los contenidos de sustancias contaminantes en las plantas de totora que pueden servir para el forraje, es indicado entonces conducir los programas de investigación siempre poco antes de la poda.

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

### 3.3. Presupuesto del programa de investigación

Siguiendo el cronograma de seguimiento anteriormente explicado, se puede calcular el presupuesto para el programa de monitoreo de la siguiente manera (ver Tabla 11):

Para cada parámetro monitoreado (línea A), la cantidad de muestras que se recomienda tomar está anotada en la línea B. En la línea C están alistados los precios por entidad, es decir por cada análisis de una muestra de agua en respecto al parámetro correspondiente con el límite de detección adquirido (línea D). Para conocer el precio total de cada parámetro por punto de muestreo, se calcula el producto del precio por entidad por la cantidad de muestras por punto de muestreo por cada parámetro (línea E). La suma de estos precios por punto de muestreo se encuentra en la línea F y la cantidad de puntos de muestreo están anotados en la línea G de la Tabla 11. El total del programa de monitoreo por tipo de muestra analizada (línea H) se conoce multiplicando la suma por punto de muestreo por la cantidad de dichos puntos de muestreo y finalmente, el total del programa de monitoreo se conoce la suma de los totales por cada tipo de muestra, anotada en la línea I de la Tabla 11.

De esta manera se puede entonces estimar que el programa de investigación, planificado por los expertos de la Fundación MEDMIN, comprende un total de US\$ 1'828.

## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

**Tabla 5:** Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento Desaguadero; punto de medición A<sub>1</sub>

| Día | Fecha    | Q <sub>1</sub> [Lseg. <sup>-1</sup> ] | DBO <sub>1</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | DQO <sub>1</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | OD <sub>1</sub> [mgOL <sup>-1</sup> ] | N <sub>tot,1</sub> [mgNL <sup>-1</sup> ] | P <sub>tot,1</sub> [mgPL <sup>-1</sup> ] | SST <sub>1</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | Colif. <sub>1</sub> [UFCdL <sup>-1</sup> ] | [Pb] <sub>1</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>1</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | pH <sub>1</sub> |
|-----|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|--|---|---|-----------------|
| 0   | 09.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 3   | 12.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 6   | 15.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |

**Tabla 6:** Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento Desaguadero; punto de medición A<sub>2</sub>

| Día | Fecha    | Q <sub>2</sub> [Lseg. <sup>-1</sup> ] | DBO <sub>2</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | DQO <sub>2</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | OD <sub>2</sub> [mgOL <sup>-1</sup> ] | N <sub>tot,2</sub> [mgNL <sup>-1</sup> ] | P <sub>tot,2</sub> [mgPL <sup>-1</sup> ] | SST <sub>2</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | Colif. <sub>2</sub> [UFCdL <sup>-1</sup> ] | [Pb] <sub>2</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>2</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | pH <sub>2</sub> |
|-----|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|--|---|---|-----------------|
| 0   | 09.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 3   | 12.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 6   | 15.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |

**Tabla 7:** Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento Desaguadero; punto de medición A<sub>3</sub>

| Día | Fecha    | Q <sub>3</sub> [Lseg. <sup>-1</sup> ] | DBO <sub>3</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | DQO <sub>3</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | OD <sub>3</sub> [mgOL <sup>-1</sup> ] | N <sub>tot,3</sub> [mgNL <sup>-1</sup> ] | P <sub>tot,3</sub> [mgPL <sup>-1</sup> ] | SST <sub>3</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | Colif. <sub>3</sub> [UFCdL <sup>-1</sup> ] | [Pb] <sub>3</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>3</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | pH <sub>3</sub> |
|-----|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|--|---|---|-----------------|
| 0   | 09.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 3   | 12.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 6   | 15.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |

**Tabla 8:** Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento Desaguadero; punto de medición A<sub>4</sub>

| Día | Fecha    | Q <sub>4</sub> [Lseg. <sup>-1</sup> ] | DBO <sub>4</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | DQO <sub>4</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | OD <sub>4</sub> [mgOL <sup>-1</sup> ] | N <sub>tot,4</sub> [mgNL <sup>-1</sup> ] | P <sub>tot,4</sub> [mgPL <sup>-1</sup> ] | SST <sub>4</sub> [mgL <sup>-1</sup> ] | Colif. <sub>4</sub> [UFCdL <sup>-1</sup> ] | [Pb] <sub>4</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>4</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | pH <sub>4</sub> |
|-----|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|--|---|---|-----------------|
| 0   | 09.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 3   | 12.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |
| 6   | 15.06.02 | *                                     | *                                     | *                                     | *                                     | *  | *  | *                                     | *  | *                                       | *                                       | *               |



## Guía de monitoreo e investigación: Planta de tratamiento Desaguadero

**Tabla 9:** Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento Desaguadero; punto de medición P<sub>1</sub>

| Día | Fecha    | [Pb] <sub>tallos,1</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>tallos,1</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Pb] <sub>raíces,1</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>raíces,1</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] |
|-----|----------|--|--|--|--|
| 0   | 09.06.02 | *  | *  | *  | *  |
| 3   | 12.06.02 |  |  |  |  |
| 6   | 15.06.02 | *  | *  | *  | *  |

**Tabla 10:** Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento Desaguadero; punto de medición P<sub>2</sub>

| Día | Fecha    | [Pb] <sub>tallos,2</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>tallos,2</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Pb] <sub>raíces,2</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] | [Cd] <sub>raíces,2</sub> [mgkg <sup>-1</sup> ] |
|-----|----------|--|--|--|--|
| 0   | 09.06.02 | *  | *  | *  | *  |
| 3   | 12.06.02 |  |  |  |  |
| 6   | 15.06.02 | *  | *  | *  | *  |

**Tabla 11:** Cálculo de presupuesto para la campaña de medición en la planta de tratamiento Desaguadero

| A: Análisis de agua                  | DBO     | DQO     | N <sub>tot</sub> | P <sub>tot</sub> | SST   | Colif. | [Pb]    | [Cd]    | Prep. <sub>muestra</sub> | OD | pH | Pot. | T  | Q   |
|--------------------------------------|---------|---------|------------------|------------------|-------|--------|---------|---------|--------------------------|----|----|------|----|-----|
| B: # muestras por punto de muestreo  | 3       | 3       | 3                | 3                | 3     | 3      | 3       | 3       | 3                        | 3  | 3  | 3    | 3  | 3   |
| C: Precio por entidad [\$]           | 30      | 20      | 17               | 17               | 8     | 20     | 7       | 2       | 7                        | 5  | 0  | 0    | 0  | 0   |
| D: Límite de detección adquirido     | 0.01ppm | 0.01ppm | 0.01ppm          | 0.01ppm          | 10ppm | 0.5ppm | 0.02ppm | 0.01ppm |                          | 5% | 5% | 5%   | 5% | 10% |
| E: Precio por punto de muestreo [\$] | 90      | 60      | 51               | 51               | 24    | 60     | 21      | 6       | 21                       | 15 | 0  | 0    | 0  | 0   |
| F: Suma por punto de muestreo        | 399     |         |                  |                  |       |        |         |         |                          |    |    |      |    |     |
| G: # puntos de muestreo              | 4       |         |                  |                  |       |        |         |         |                          |    |    |      |    |     |
| H: Análisis de agua total [\$]       | 1'596   |         |                  |                  |       |        |         |         |                          |    |    |      |    |     |

| A: Análisis de plantas               | Pb <sub>tallos</sub> | Cd <sub>tallos</sub> | Prep. <sub>tallos</sub> | Pb <sub>raíces</sub> | Cd <sub>raíces</sub> | Prep. <sub>raíces</sub> |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| B: # muestras por punto de muestreo  | 2                    | 2                    | 2                       | 2                    | 2                    | 2                       |
| C: Precio por entidad [\$]           | 7                    | 2                    | 20                      | 7                    | 2                    | 20                      |
| D: Límite de detección adquirido     | 0.01ppm              | 0.01ppm              |                         | 0.01ppm              | 0.01ppm              |                         |
| E: Precio por punto de muestreo [\$] | 14                   | 4                    | 40                      | 14                   | 4                    | 40                      |
| F: Suma por punto de muestreo        | 116                  |                      |                         |                      |                      |                         |
| G: # puntos de muestreo              | 2                    |                      |                         |                      |                      |                         |
| H: Análisis de tallos total [\$]     | 232                  |                      |                         |                      |                      |                         |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| I: Monitoreo Total [\$] | 1'828 |
|-------------------------|-------|

#### **4. EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS**

Para ser capaz de evaluar e interpretar los resultados obtenidos es necesario tener un mínimo conocimiento del significado ecológico de los distintos parámetros medidos y contar con los límites permisibles establecidos por la Ley de Medio Ambiente Boliviana (Reglamentos a la Ley de Medio Ambiente; Decreto Supremo N° 24176, páginas 244 – 246) o alternativamente conocer los límites permisibles o recomendados de otros países o instituciones. Esta información será transmitido en los siguientes capítulos parámetro por parámetro.

La mejor forma de poder entender y interpretar la información obtenida es por visualización en diagramas en las cuales se pone los distintos puntos de muestreo ( $A_1$  a  $A_4$ , o  $P_1$  y  $P_2$ ) en la abscisas, y los resultados obtenidos en las ordenadas, pintando las curvas según las fechas de los muestreos (ver ejemplo en capítulo 5.2.3.). De esta manera, evaluado el transcurso de las concentraciones en el agua nos proporciona información del tipo de eliminación de la sustancia respectiva: la eliminación por procesos biológicos y microbiológicos (biodegradación, bioasimilación, bioacumulación) en general sigue una ley exponencial (con exponentes positivos o negativos), y los procesos físicos (adsorción, evaporación etc.) siempre siguen una regularidad lineal.

##### **4.1. Parámetros de referencia**

Los parámetros de referencia como el caudal, pH, la temperatura y los sólidos suspendidos nos da una primer vistazo del agua contaminada a ser purificada físicamente (en el tanque sedimentador) y biológicamente en la planta de tratamiento de Desaguadero. Con estas informaciones ya se puede conocer la calidad del agua vagamente y estimar los requisitos generales para el diseño de una planta de tratamiento.

##### **4.1.1. Acidez / alcalinidad**

El pH, es decir la concentración de los iones hidrógenos ( $H^+$ ), indica la acidez (pH 1 a 7) o la alcalinidad (pH 7 a 14) de un cuerpo agua. Dependiendo del tipo de roca predominante en una cierta región, el agua natural puede mostrar un pH de 6 (en áreas de piedra silicato) hasta pH 8 (en áreas de piedra caliza). La alteración del pH tanto por debajo, por influencia de desagües industriales ácidos, como por encima de este rango natural, por razones de contaminación provenientes de residuos humanos y detergentes, impactan la integridad de los sistemas ecológicos y también a la salud del ser humano. La acidez o alcalinidad del agua que llega a la planta de tratamiento nos da entonces una idea de su procedencia y del tipo de contaminación que se va a encontrar en los otros parámetros químicos y microbiológicos presentados en los siguientes capítulos. La estabilización del pH alrededor de 7 por el otro lado nos muestra la eficiencia de la capacidad de buffer de un cierto ecosistema.

La normativa ambiental boliviana, pide para aguas potables (clase "A") un pH entre 6,0 y 8,5. Como el agua que sale de la planta de tratamiento no es destinada al consumo humano, sino más bien entra directamente al Río Desaguadero con la posibilidad de ser usada para riego de las chacras alrededor de la planta de tratamiento, para fines de este informe se utiliza la clase "C" del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), la cuál permite una fluctuación del pH entre 6,0 y 9,0.

#### 4.1.2. Temperatura

La temperatura de un cuerpo de agua natural es el parámetro físico más importante de un ecosistema acuático, porque la temperatura influye directamente en todos los procesos microbiológicos y químicos, por ejemplo, en aguas estancadas (mar, lagos y humedales), el crecimiento de la masa biológica y de los microorganismos que viven en el agua, y en aguas corrientes, la saturación de oxígeno. Con temperaturas elevadas, el crecimiento biológico aumenta proporcionalmente y el punto de saturación de gas baja. En el caso de una planta de tratamiento, que purifica el agua por la asimilación de los distintos nutrientes y la reducción de las sustancias tóxicas disueltas en el agua, el objetivo principal es adquirir un ecosistema con productividad máxima. En consecuencia, el aumento de la temperatura en la planta misma es un efecto positivo.

La Ley de Medio Ambiente Boliviana exige para desagües de la clase "C" que la alteración máxima es de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura del cuerpo de agua receptor y para descargas líquidas una variación de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Para interpretar la conformidad del agua que sale de la planta de tratamiento con la Ley Boliviana entonces hay que conocer la temperatura (promedia) del cuerpo de agua en el cual desemboca, es decir en este caso del Río Desaguadero.

#### 4.1.3. Sólidos suspendidos

La cantidad de sólidos suspendidos (SST) de materia tanto orgánica como inorgánica, representa el grado de turbidez del agua. En aguas estancadas, este parámetro influye en el funcionamiento de un ecosistema acuático de dos maneras principales: por un lado, en épocas de productividad biológica, la turbidez del agua superficial disminuye la actividad fotosintética, lo que significa una reducción de la producción de oxígeno en esta capa de agua. Por otro lado, la presencia de materia orgánica aumenta el consumo bacteriano de oxígeno disuelto en los niveles más profundos del cuerpo de agua, lo que puede llevar a estas capas de agua hasta un estado anóxico. En respecto al consumo humano, una concentración de sólidos suspendidos aumentada significa una reducción en la calidad del agua potable.

El límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, pide una concentración de sólidos suspendidos máxima de 50mg/L y el límite permisible para descargas líquidas una de 60mg/L.

### 4.2. Oxígeno y carbono orgánico e inorgánico

Los tres parámetros presentados en los siguientes subcapítulos, el oxígeno disuelto (OD), la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) están en contexto con el metabolismo respiratorio de los organismos que viven en un cierto ecosistema, es decir, con el oxígeno consumido por organismos aeróbicos y el carbono orgánico e inorgánico que está acumulado en el agua y que potencialmente puede ser asimilado por procesos oxidativos. Con esta información, se pueden precisar conclusiones respecto al potencial Redox de un ecosistema acuático impactado por desagües y en consecuencia sobre los distintos procesos oxidativos que pueden tener lugar en éste.

#### 4.2.1. Oxígeno disuelto

El parámetro químico más importante para la vitalidad de un ecosistema acuático es el contenido de oxígeno disuelto (OD) en el agua. La falta de oxígeno impide la existencia de vida aeróbica, es decir de los peces, larvas de insectos y seres inferiores que requieren oxígeno para respirar. Además, aguas con concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 1,9 mg/L inician los procesos oxidativos anaeróbicos con la transformación de nitrato en nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) y amonio

( $\text{NH}_4^+$ ), con el producto secundario de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ). Los últimos dos compuestos mencionados son altamente tóxicos. En el caso extremo de la ausencia casi absoluta de oxígeno, es decir en entornos anóxicos con concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 0,15 mg/L, el potencial reductor disminuye hasta que las bacterias anóxicas utilicen sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) para oxidar la materia orgánica, lo que resulta en la producción de sulfuro de hidrógeno ( $\text{HS}^-$ ), sustancia que hace que el agua sea no potable.

El límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, exige un contenido mínimo de oxígeno disuelto de 60% de la concentración de saturación. Para descargas líquidas la ley no reconoce ningún límite para el contenido de oxígeno disuelto. Saliendo de una presión atmosférica de 0,61atm. en la altura de Desaguadero (3'810 msnm.) según la fórmula de altura barométrica (ver capítulo 5.2.5.) y una presión parcial del oxígeno en el aire de 23%, se puede calcular la concentración de saturación en el cuerpo de del Río Desaguadero por la Ley de Henry (ver capítulo 5.2.6.). Según estos cálculos, la concentración mínima de oxígeno disuelto que se debe establecer para aguas de la clase "C" que ingresen al cuerpo receptor del Río Desaguadero es 12,5mgO<sub>2</sub>/L.

#### 4.2.2. Demanda biológica de oxígeno

La demanda biológica de oxígeno (DBO) representa la cantidad de carbono de origen biológico, es decir orgánico, disuelto en un cuerpo de agua. En otras palabras, la DBO nos brinda información acerca de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica presente en el agua. En la naturaleza, el carbono orgánico se asimila por organismos quimioheterotrofos aeróbicos o anaeróbicos por la oxidación del carbono con las sustancias oxidativas presentes en un cierto entorno en la siguiente secuencia: Oxígeno ( $\text{O}_2$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), óxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ), hidróxido de hierro ( $\text{FeOOH}$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). El interés ecológico en este parámetro un poco abstracto, es conocer el potencial de un agua cargada con materia orgánica de reducir al potencial Redox en el cuerpo de agua recipiente por la oxidación de este material orgánico.

La normativa ambiental para este parámetro presenta un límite permisible para desagües de la clase "C" máxima de 20mgO<sub>2</sub>/L, mientras que el límite permisible para descargas líquidas es 80mgO<sub>2</sub>/L.

#### 4.2.3. Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) representa, en contraste a la DBO, la cantidad de carbono inorgánico disuelto en un cuerpo de agua. En la naturaleza, el carbono inorgánico se asimila por organismos quimioautótrofos, los cuales en su mayoría son aeróbicos, es decir utilizan el oxígeno disuelto en el agua como medio de oxidación. De igual manera, el interés ecológico en este parámetro, es conocer el potencial de un agua cargada con carbono inorgánico para reducir al potencial Redox en el cuerpo de agua receptora por la asimilación de este carbono inorgánico. En otras palabras, la DQO nos brinda información acerca de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar el carbono inorgánico presente en el agua.

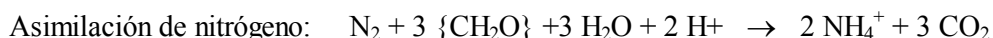
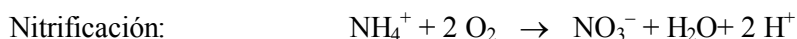
El límite permisible para la clase "C" del RMCH, exige una demanda química de oxígeno máxima de 40 mgO<sub>2</sub>/L y el límite permisible para descargas líquidas exige 250mgO<sub>2</sub>/L.

### 4.3. Nutrientes

En los próximos dos subcapítulos se presentan y evalúan los datos de las dos sustancias consideradas como nutrientes en ecosistemas acuáticos, el nitrógeno y el fósforo. En aguas estancadas, el perjuicio por estos dos elementos se relaciona directamente con el grado de eutrofización, es decir, con la productividad biológica de un ecosistema por la asimilación fotosintética de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) e indirectamente el consumo de oxígeno disuelto por la degradación de esta materia orgánica ({CH<sub>2</sub>O}) acumulada por la producción biológica incrementada.

#### 4.3.1. Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento que en sistemas acuáticos puede aparecer en especies químicas muy diversas, de las cuales unas con otras están conectadas por varias reacciones Redox. Este sistema reactivo muy complejo y todavía no enteramente entendido por los científicos, se llama ciclo de nitrógeno, en el cual las reacciones y los compuestos transformados más importantes son:



La primera de las cuatro reacciones es aeróbica, las otras tres son facultativamente anaeróbicas. Tanto el nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), como el amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y el nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), que son productos secundarios de la nitrificación, de la desnitrificación y de la amonificación de nitrato, son tóxicos. Por eso, la sobrecarga de un ecosistema acuático por nitrógeno significa por un lado la intoxicación de este sistema natural, y por otro lado la reducción progresiva del potencial Redox con las consecuencias explicadas en el capítulo 4.2.. El nitrógeno en las aguas residuales tienen su origen en general, en la contaminación por orina humana o animal.

La Ley de Medio Ambiente Boliviana exige para el nitrógeno total un límite permisible para desagües de la clase "C", un máximo de 12,0mgN/L en su concentración total. Para descargas líquidas la ley no reconoce ningún límite para su contenido de nitrógeno disuelto.

#### 4.3.2. Fósforo

El fósforo es el nutriente limitante al crecimiento de la biomasa en ecosistemas acuáticos, por un lado porque su presencia en la materia orgánica - la composición química de la cual simplificada puede ser anotada como (CH<sub>2</sub>O)<sub>106</sub>(NH<sub>3</sub>)<sub>16</sub>(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) - en comparación con los otros elementos, es la más escasa y por otro lado, porque la especie química de fósforo - la más frecuente en la naturaleza - tiene una fuerte tendencia de adsorber a la materia orgánica. Por estas razones, el contenido de fósforo en aguas estancadas es el parámetro que predominantemente influye en la eutrofización de estos ecosistemas con todas sus consecuencias explicadas en la introducción de este capítulo. El fósforo en las aguas residuales tiene origen por lo general en la contaminación por excrementos fecales humanos o animales.

El límite permisible para desagües de la clase "C" según la normativa boliviana, exige un contenido máximo del fósforo total disuelto en el agua de 1mgP/L. Para descargas líquidas la normativa no conoce ningún límite para su contenido de fósforo.

#### 4.4. Metales pesados

En los siguientes dos subcapítulos se presentan y evalúan los contenidos de los dos metales pesados más frecuentes en aguas servidas, el plomo (Pb) y el cadmio (Cd). Se debe recordar que se cuentan con datos tomados en el agua tratada, en los suelos de las celdas de tratamiento y en las raíces de las plantas de totora.

El interés en los metales pesados en ecosistemas acuáticos se explica por dos razones: por un lado, los metales pesados se caracterizan por una fuerte tendencia de acumularse en organismos biológicos (bioacumulación) y por otro lado las dos sustancias son tóxicas para mamíferos como el ser humano y otros seres vivos como p. e. los insectos, peces y anfibios. Por estas características, el plomo y el cadmio tienen un peligro alto de intoxicación por el consumo crónico incluso de concentraciones muy por debajo de la dosis letal aguda.

En el contexto de la acumulación de metales pesados<sup>25</sup> hay que mencionar que en los helófitos, la bioacumulación más alta tiene lugar en las raíces. Por esta razón y porque se anticipaba en general concentraciones de metales pesados muy por debajo incluso del límite de detección (lo que resultó cierto), para tener datos representativos y seguros, en este programa de investigación se ha tomado solamente muestras de las raíces de las totoras, que nos sirven para inferir conclusiones sobre el contenido de metales pesados en toda la planta.

##### 4.4.1. Plomo

En mamíferos, el plomo por su consumo causa daños en el sistema de sangre, en el tracto digestivo, en el sistema central nervioso y también puede tener como consecuencia de su consumo el disturbio en el desarrollo fetal. La característica especialmente peligrosa de este elemento es que tiene una permanencia química en sistemas ecológicos muy alta y que por eso, una vez absorbido en la grasa de un organismo biológico, la posibilidad de degradación y eliminación del cuerpo es casi nula, es decir que tiene un alto factor de bioacumulación en la cadena ecológica de nutrición y en consecuencia de intoxicación crónica.

Las fuentes de este elemento se relacionan con el combustible, compuestos de plomo se utilizan como antiacústico en los motores de gasolina. Otra fuente de plomo en aguas residuales son los tubos de cañerías que son revestidos con plomo, lo que con el tiempo se oxida y se disuelve en el agua.

En el caso del plomo, la normativa ambiental boliviana reconoce límites permisibles para el plomo disuelto, únicamente en el agua. Para cuerpos de agua de la clase "C", el límite permisible exige una concentración máxima de 0,05mgPb/L y para descargas líquidas exige un máximo 0,6mgPb/L. En la planta de tratamiento de Copacabana, todas las muestras tomadas, se encuentran por debajo de ambos límites.

Para valorar los resultados adquiridos de las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora se recurrió a límites correspondientes a las leyes de medio ambiente de otros países (ver cap. 5.2.). Tomando en cuenta que los distintos países trabajan con diferentes recursos naturales, de los cuales unos implican más urgencia de acción que otros y en consecuencia piden límites para ciertos parámetros más altos que los otros<sup>26</sup>, para esta evaluación se utilizaron los límites jurídicamente

---

<sup>25</sup> La bioacumulación tiene lugar principalmente en los lípidos, es decir la grasa y los aceites de un organismo. Como los tallos de una planta están compuestos en su mayoría de celulosa, es lógico que los metales pesados se acumulan en los rizomas, donde por razón de simbiosis con distintos microorganismos y hongos, la planta muestra un contenido de lípidos aumentado.

<sup>26</sup> Lógicamente, los límites jurídicamente vinculantes, deben ser más altos que los límites indicativos, de otra manera sería muy difícil cumplirlos.

vinculatorios, los más exigentes encontrados en las distintas leyes, lo que son para suelos el límite recomendado de la Ley Chilena (200mgPb/kg) y para plantas el límite permisible para forraje de la Ley Suiza (40mgPb/kg).

#### **4.4.2. Cadmio**

El modo de acción del cadmio (Cd) todavía no es totalmente conocido. En el caso del ser humano y otros mamíferos, su consumo crónico puede causar anemia, daños en los huesos y los riñones. Los compuestos de cadmio, igualmente como los de plomo, se caracterizan por una permanencia química en ecosistemas muy elevada y tienen una tendencia fuerte de bioacumularse en la cadena de nutrición. De todas maneras, queda muy claro que especialmente el consumo de ciertas cantidades de cadmio de modo crónico, por ejemplo por el consumo de agua contaminada, daña irreversiblemente a la salud humana. El cadmio en las aguas residuales humanas generalmente tiene origen en las pilas y baterías a base de cadmio eliminados de manera inapropiada.

La normativa ambiental para el cadmio sólo reconoce límites permisible para el cadmio disuelto en el agua. Para cuerpos de agua de la clase "C", el límite permisible exige una concentración máxima de 0,005mgCd/L y para descargas líquidas un máximo de 0,3mgPb/L.

Por las mismas razones que fueron explicadas en el capítulo anterior, para valorar los resultados adquiridos de las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora, también en el caso del cadmio nos servimos del límite recomendado por la Ley Chilena para las muestras de suelos (0,5mgCd/kg) y del límite permisible para forraje de la Ley Suiza para las muestras de plantas (1,0mgPb/kg) (ver cap. 5.2.).

#### **4.5. Coliformes fecales**

Los coliformes fecales son bacterias del aparato digestivo humano, que por su consumo oral por el agua contaminada pueden causar graves enfermedades de digestión y afectar al sistema inmunológico. La concentración de microorganismos entonces nos da una idea de la contaminación del agua por residuos fecales.

La normativa ambiental boliviana exige para desagües de la clase "C" una concentración máxima de coliformes fecales de 1'000NMP/dL y para descargas líquidas una de 5'000NMP/dL.

## 5. APÉNDICE

### 5.1. Expresiones científicas

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

OD: Oxígeno disuelto

RMCH: Reglamento Ambiental Boliviano en Materia de Contaminación Hídrica

Biodiversidad: Riqueza y diversidad de especies de flora y fauna encontrado en un cierto ecosistema.

Totora: Planta local de la cual se conoce que asimila muchos nutrientes y metales pesados. Nombre científico: *Schoenoplectus tatora*.

Humedal Artificial: Ecosistema saturado por aguas superficiales y subterráneas con profundidad inferior de un metro (para evitar áreas extensas anóxicas).

Sistema de flujo subsuperficial (SFS): Planta de tratamiento en la cual las aguas servidas son purificados por procesos biológicos en la matriz del suelo mediante flujo subterráneo horizontal.

Eutrofización: Sobrecarga de un ecosistema acuático con nutrientes suspendidos, sobre todo el fosfato y el nitrógeno en forma de amonio y nitrato.

Coliformes: Bacterias anaerobios del aparato digestivo que sirven como indicador de contaminación séptica.

Capacidad de buffer: La posibilidad de un sistema químico de estabilizar el ph alrededor un cierto valor de pH por el equilibrio carbonato (el más frecuente en la naturaleza) o otras sustancias buffer.

Organismos aeróbicos: Utilizan el oxígeno disuelto en el agua como medio de oxidación del carbono asimilado.

Organismos anaeróbicos: Utilizan para la oxidación del carbono asimilando otras sustancias oxidativas como el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), el óxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ), el hidróxido de hierro ( $\text{FeOOH}$ ) o el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Organismos químiotrofos: Ganan la energía respiratoria por reacciones químicas (en contraste al los organismos fototrofos, que ganan su energía por la radiación solar), asimilando el carbono de compuestos orgánicos (hetero-).

Organismos químiolitotrofos: Ganan la energía respiratoria también por reacciones químicas, utilizando los iones hidrógenos ( $\text{H}^+$ ) necesarios para los procesos Redox de compuestos inorgánicos (lito-) y asimilando el carbono de compuestos inorgánicos (auto-).

Bioacumulación: La acumulación de sustancias químicas en organismos biológicos independiente de si la sustancia sea consumida por la nutrición contaminada o absorbido directamente del medio ambiente. Este fenómeno causa un aumento de las sustancias acumuladas en la cadena trófica.

Balance hídrico: Calculo del equilibrio de los procesos de transporte del agua en un sistema casi-cerrado, es decir partiendo de la teoría de que la suma de los flujos que entran y de los que salen de un ecosistema sean nula.

Flujo de materia: Proceso de transformación respecto de un cierto elemento o compuesto, partiendo de la teoría de que el total de la masa en un cierto ecosistema sea mantenido.



## 5.2. Información adicional

### 5.2.1. Velocidad y tiempo de sedimentación de forma laminar

**Ley de Stokes:**  $v_{sed.} = \alpha \cdot B \cdot r^2$  (5.2.1.1.)

$$= \alpha \cdot \frac{2g(\rho_s - \rho_w)}{9\mu} \cdot r^2 \quad [\text{mseg}^{-1}]$$

Con:

$\alpha$  := Factor de forma (para esferas  $\alpha = 1$ ) [ ]

$g$  := Constante gravitacional = 9.814 [mseg<sup>-2</sup>]

$\rho_s$  := Densidad de la partícula (para cuarzo  $\rho_s = 2650$ ) [kgm<sup>-3</sup>]

$\rho_w$  := Densidad del agua = 998 [kgm<sup>-3</sup>]

$\mu$  := Viscosidad dinámica del fluido (para agua  $\mu = 10^{-3}$ ) [kgm<sup>-1</sup>seg<sup>-1</sup>]

**Tiempo de sedimentación:**  $t_{sed.} = \frac{h}{v_{sed.}}$  [seg.] (5.2.1.2.)

### 5.2.2. Medición de caudales

La medición de los caudales en el vertedor rectangular y en los 3 tubos del sistema de tratamiento se puede hacer según las siguientes formulas, midiendo la altura del agua en el vertedor y en los tubos, para comparar los distintos caudales y finalmente calcular un balance hídrico:

**Vertedero rectangular:**  $Q = 0.533 \cdot \sqrt{2g} \cdot C \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{5/2}$  (5.2.2.1.)

$$\cong 1.393 \sqrt{\frac{m}{\text{seg}^2}} \cdot h^{5/2} \quad [\text{m}^3\text{seg}^{-1}]$$

Con:

$Q$  := Caudal [m<sup>3</sup>seg<sup>-1</sup>]

$h$  := Diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero [m]

$C$  := Coeficiente del vertedero dependiendo parámetros adicionales; en el caso de mediciones en el campo se pone un valor constante de 0.59 [ ]

$g$  := Constante gravitacional [mseg<sup>-2</sup>]

$\theta$  := Ángulo del vertedero [°]

**Vertedero redondo:**  $Q = k \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$  [m<sup>3</sup>seg.<sup>-1</sup>] (5.2.2.2.)

en lo cual:  $R = \frac{S}{P}$

$$S = \frac{h \cdot (32 \cdot r \cdot h - 13 \cdot h^2)}{6\sqrt{8 \cdot r \cdot h - 4 \cdot h^2}} ; h \leq r$$

$$P = 2 \cdot r \cdot a \cos\left(\frac{r-h}{r}\right)$$

Con:

Q := Caudal [m<sup>3</sup>seg.<sup>-1</sup>]

k := Coeficiente de Manning-Strickler; en el caso de materiales muy lisas como PVC se elige un un valor de 60 [m<sup>1/3</sup>seg.<sup>-1</sup>]

S := Área de la sección "mojada" [m<sup>2</sup>]

R := Rayón hidraulico [m]

J := Pendiente de la tubería ≈ 1% [. . ]

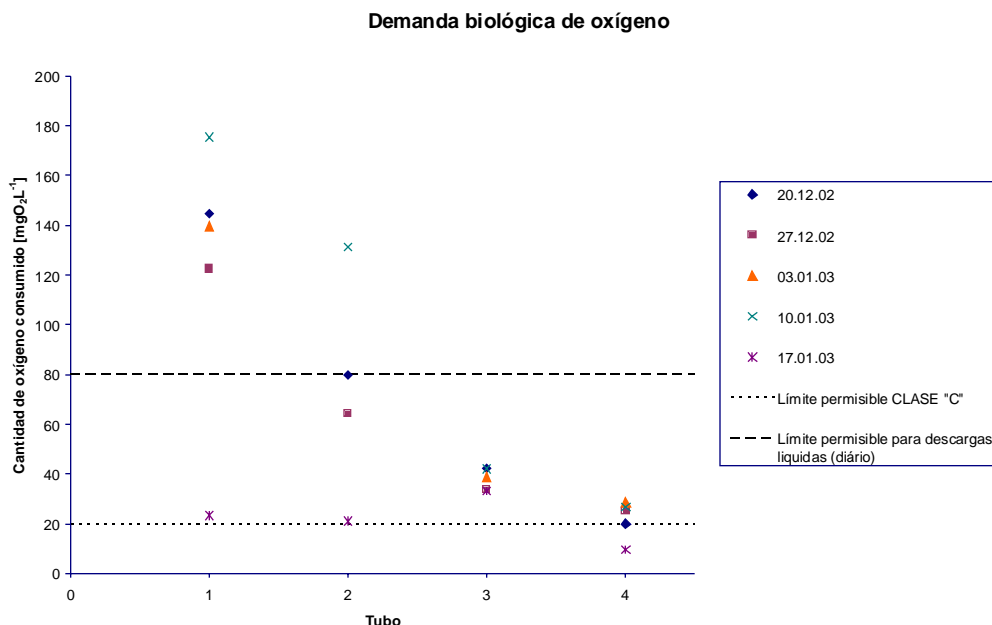
P := Perímetro de la sección "mojada" [m]

h := Altura del agua en la tubería [m]

r := Radio de la tubería = 5,25cm [m]

Sin embargo, la condición elementar para poder trabajar con esta última formula es que la altura del agua es menor del radio de los tubos (entonces  $h < r$ ).

### 5.2.3. Ejemplo de visualización de los datos obtenidos



**Figura 25:** Las cantidades de oxígeno consumido por demanda biológica en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según del RMCH.

### 5.2.4. Límites permisibles y concentraciones naturales

**Tabla 12:** Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en suelos

| Pautas de salud                                  | As<br>[mg/kg] | Pb<br>[mg/kg] | Zn<br>[mg/kg] | Hg<br>[mg/kg] | Cu<br>[mg/kg] | Sb<br>[mg/kg] | Cd<br>[mg/kg] | Cr<br>[mg/kg] | Fe<br>[mg/kg] | Sn<br>[mg/kg] |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Holanda<br>(niveles de acción)                   | 55            | 530           | 720           | 10            | 190           |               | 12            |               |               |               |
| Estados Unidos <sup>2</sup><br>(límites máximos) |               |               | 4             |               | 2             | 8             | 0,08          | 10            | 1000<br>(?)   |               |
| Canadá<br>(límites máximos)                      |               | 200           | 400           |               | 100           |               | 8             |               |               |               |
| Alemania<br>(límites máximos)                    |               | 500           | 300           |               | 500           |               | 2             |               |               |               |
| Suiza<br>(límites máximos)                       |               | 200           |               |               | 150           |               | 2             |               |               |               |
| Chile <sup>3</sup><br>(límites recomendados)     | 40            | 200           |               | 0,4           |               |               | 0,5           |               |               |               |
| Suiza<br>(valor indicativo <sup>4</sup> )        |               | 50            | 150           | 0,5           | 40            |               | 0,8           | 50            |               |               |

<sup>2</sup> Valores permisibles eb suelos definidos como objetivos medioambientales multimedia (Fitchko 1989). Tamada de Canter L (1997).

<sup>3</sup> Límites recomendados por INTA Chile (1996).

<sup>4</sup> Valores indicativos jurídicamente no son vinculatorio.

**Tabla 13:** Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en plantas de forraje

| Pautas de salud            | As<br>[mg/kg] | Pb<br>[mg/kg] | Zn<br>[mg/kg] | Hg<br>[mg/kg] | Cu<br>[mg/kg] | Sb<br>[mg/kg] | Cd<br>[mg/kg] | Cr<br>[mg/kg] | Fe<br>[mg/kg] | Sn<br>[mg/kg] |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Suiza<br>(límites máximos) | 2             | 40            |               | 0,1           |               |               | 1             |               |               |               |

**Tabla 14:** Concentraciones en la naturaleza de metales pesados en suelos

| Concentración de trasfondo natural | As<br>[mg/kg] | Pb<br>[mg/kg] | Zn<br>[mg/kg] | Hg<br>[mg/kg] | Cu<br>[mg/kg] | Sb<br>[mg/kg] | Cd<br>[mg/kg] | Cr<br>[mg/kg] | Fe<br>[mg/kg] | Sn<br>[mg/kg] |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Cuenca Pilcomayo <sup>1</sup>      |               | 6 - 34        | 17 - 132      | 0,01 - 0,087  | 3 - 24        |               | <0,05 - 0,3   | <0,01 - 0,22  |               |               |

<sup>1</sup> Datos obtenidos de Kabata-Pendias (1995).

### 5.2.5. Presión atmosférica

La fórmula de altura barométrica: 
$$p(h) = p_0 \cdot e^{\frac{-\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}} \quad [\text{Pa}] \quad (5.2.4.1.)$$

con:  $p_0 = p(h=0) = 101325 \text{ Pa}$

$\rho_0 = \rho(h=0) = 1,293 \text{ kg/m}^3$

$g = 9,814 \text{ m/seg.}^{-2}$

$h = 3'810 \text{ m}$

En consecuencia:  $p(h = 3'810 \text{ m}) = 0,62 \text{ atm.}$

### 5.2.6. Distribución aire / agua

Ley de Henry: 
$$K_H(O_2) = \frac{[O_2]_{sat.}}{p_{O_2}(h = 3'868 \text{ m})} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ M / atm.} \quad [\text{Matm.}^{-1}] \quad (5.2.4.1.)$$

En consecuencia:  $[O_2]_{sat.}(h = 3'868 \text{ m}) = 0,781 \text{ mM} = 12,51 \text{ mg O / L}$

## 5.3. Bibliografía

### 5.3.1. Literatura científica

Coronel T. (1995): Hidráulica. CECSA, México.

Deutscheschweizerische Mathematikkommission (DMK), Deutscheschweizerische Physikkommission (DPK) (1977 4. ed): Formeln und Tafeln; Mathematik - Physik. Orell Füssli Verlag, Zürich.

Ley de Medio Ambiente (27 – Abril – 1992): Ley N° 1333.

Ferrero C. M. (1999): Manual de Obras Rurales. Colombia.

Métodos Normalizados. Edición 20 APHA (American Public Health Association) - AWWA (American Water Works Association) - WPCF (Water Pollution Control Federation) y ASTM (American Society for Testing and Materials).

Fent K. (1998): Ökotoxikologie: Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart / New York.

Reglamentos a la Ley de Medio Ambiente (1995): Decreto Supremo N° 24176.

Schwarzenbach R. P., Gschwend P. M. und Imboden D. M. (1993): Environmental Organic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc. New York etc.

Sigg L. und Stumm W. (1994): Aquatische Chemie: Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer. Vdf Verlag der Fachvereine an den Schweizerischen Hochschulen und Techniken AG und B. G. Teubner, Zürich / Stuttgart.

### 5.3.2. Páginas de Web

<http://www.pnud.bo/biodiversidadtdps/proyecto/antecedentes.html>

<http://www.eng.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/SEDIMENT/sedsettle.html>

[http://129.13.103.40/shop/evaluation/10/demo\\_de/Mechanik/FlueGas/Barome/Barome.htm](http://129.13.103.40/shop/evaluation/10/demo_de/Mechanik/FlueGas/Barome/Barome.htm)

*Autoridad Binacional del  
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las  
Naciones Unidas  
para el Desarrollo PNUD*

**PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD  
DEL SISTEMA TDPS**

**Uso de Totorales para la  
Descontaminación en Bolivia**

Contrato 21.06

**CONCLUSIONES FINALES Y  
RECOMENDACIONES**

Elaborado por:

**Fundación MEDMIN**  
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

Coordinador del Proyecto: MSc. Danilo Bocángel J.

La Paz, abril de 2003

## CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

PRIMERA. Los humedales son uno de los ecosistemas autorreguladores más importantes del mundo. En Bolivia, contamos con importantes humedales naturales, sin embargo, los construidos a través de este Proyecto, constituyen los primeros a nivel rural que tienen como característica fundamental, la réplica de un ecosistema natural a través de procesos de construcción de obras civiles.

SEGUNDA. Dentro de la concepción de diseño, se ha partido de la problemática actual que tienen muchos países con respecto a sus lagunas de oxidación, el "problema" de índole sanitario, en razón de las diferentes enfermedades atribuidas a la existencia de sus innumerables hospederos. Afortunadamente, la comunidad científica ha empezado a tener éxito en lograr un cambio de actitud para borrar esa visión errónea dada a los pantanos y estos últimos avances y recomendaciones tecnológicas fueron la base del diseño de las plantas tanto de Copacabana como de Desaguadero.

TERCERA. Los humedales construidos pueden ser clasificados de acuerdo con la estructura dominante de la cobertura vegetal. Así tenemos:

- i. sistemas de macrofitas de libre flotación,
- ii. sistemas de macrofitas emergentes y
- iii. sistemas sumergidos de macrofitas

Según la disposición de efluentes, existen tres métodos para disponer la descarga en humedales construidos:

- a) libre escorrentía superficial (LES),
- b) escorrentía subsuperficial (ESS) y
- c) infiltración y percolación en estratos no saturados, mejor descrito como flujo vertical (FV).

En el caso de Copacabana, dada la poca superficie de área que se disponía, se optó por construir un sistema de flujo Subsuperficial, considerando que bajo este sistema se presenta una mayor eficiencia de descontaminación que otros sistemas. En el caso de Desaguadero, al contar con lagunas más grandes se optó por implementar un sistema de flujo Superficial, considerando los elevados costos de inversión directa para la construcción de un sistema subsuperficial. Sin embargo, en ambos casos, las plantas de tratamiento están diseñadas para poder ser incrementadas en su capacidad de tratamiento, teniendo en cuenta la proyección de crecimiento poblacional de las dos ciudades.

Asimismo, los sistemas diseñados para tratar efluentes con bajos niveles de nitrógeno (N) y fósforo (P) generalmente son de reducida área superficial, pero los mismos son capaces de soportar elevadas cargas de demanda biológica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos.

CUARTA. Los humedales (artificiales y naturales) se consideran como ecosistemas altamente transformadores y acumuladores de materia orgánica. En particular, los naturales son unos de los más importantes, debido a su especial condición hidrológica y su función como ecotono entre sistemas terrestres y acuáticos. En nuestro caso, La totora (*Schenoeplectus tatora*) planta nativa del Lago Titicaca reúne las condiciones adecuadas y eficientes como un depurador de aguas domésticas

en ecosistemas contruidos de tratamiento controlado, llegando a obtener una alta eficiencia en la depuración de los efluentes de aguas servidas bajo el enfoque de Ecosistemas artificiales contruidos.

Los contaminantes que son tratados en un humedal son removidos a través de procesos físicos, químicos y biológicos, tales como: sedimentación, precipitación, adsorción a las partículas del suelo, asimilación en los tejidos de las plantas y transformación microbiana.

QUINTA. Por lo general, en cuanto a la reducción del fósforo, encontramos que los LES son más eficientes que los ESS. Los ecosistemas de flujos libres disminuyen la concentración de P a menos de 1 mg/l, en tanto que en los subsuperficiales, los valores de P son mucho más variables. La remoción de P en los humedales contruidos se debe a procesos complejos de adsorción y precipitación con aluminio, hierro, arcillas y materia orgánica. Se adicionan también las condiciones matriciales de aerobiosis anaerobiosis y decantación, floculación, evapotranspiración y fotoxidación.

Sin embargo para fines prácticos y de comportamiento bajo las condiciones ambientales en las que se encuentran las dos plantas de tratamiento, se hace interesante realizar el Programa de Investigación en Desaguadero, semanas después de que comience su funcionamiento. De esta manera se podrá determinar el comportamiento de los diferentes contaminantes en ambos tipos de sistemas de tratamiento.

SEXTA. Basados en la experiencia y la validación de la tecnología a través del Programa de Investigación realizado en Copacabana, concluimos que en materia ambiental, los humedales son los ecosistemas más productivos del mundo, constituyéndose en sitios con alta capacidad de filtración y PURIFICACIÓN. Podríamos asignarles, analógicamente, la misma función que desempeñan los riñones en el cuerpo humano.

En este sentido, estamos en la capacidad de afirmar que estos sistemas de purificación biológica son los más efectivos y, lo que es más importante, los más adecuados para el tratamiento de aguas residuales domésticas rurales. Sin embargo, cabe destacar que los parámetros que se darán a continuación, son de tipo preliminar y siempre consideran la existencia de un proceso previo de tratamiento primario para la sedimentación de sólidos suspendidos. Partiendo de esta concepción y basados en los diagnósticos poblacionales realizados en Copacabana y Desaguadero y la investigación de los parámetros físico-químicos medidos, se podría afirmar que las dos plantas de tratamiento contruidas estarían funcionando óptimamente bajo los siguientes criterios técnicos:

- a) Para la planta de tratamiento de Copacabana (ver caracterización del centro poblado de Copacabana): bajo una extensión de 1738.8 m<sup>2</sup> de superficie biológica descontaminante por filtros subsuperficiales, se ha logrado atender satisfactoriamente (bajo estándares de calidad dentro de límites permisibles) a 1250 habitantes personas contempladas en el subsistema 1 de alcantarillado de Copacabana, tomando en cuenta un promedio de consumo de agua de 90 l / habitante / día.
- b) Para la planta de tratamiento de Desaguadero (ver expediente técnico de Desaguadero): bajo una extensión de 1686.18 m<sup>2</sup> de superficie biológica descontaminante, se ha logrado atender satisfactoriamente a 1950 habitantes a través de sistemas de flujo superficial, habitantes contemplados en el nuevo catastro de alcantarillado elaborado por la ALT, tomando en cuenta un promedio de consumo de agua de 90 l / habitante / día.

En el caso de Desaguadero, se deberá ejecutar el Programa de Investigación de acuerdo a la Guía de Investigación presentada a la ALT. En base a estos parámetros se podrá comprobar el grado de



eficiencia de esta planta de tratamiento y confirmar los parámetros técnicos de dimensionamiento presentados.

Sin embargo, los humedales naturales no deberían ser utilizados deliberadamente para el tratamiento a gran escala de aguas residuales, ya que se generarían muchos cambios estructurales y consecuencias ecológicas impredecibles. Lo cierto es que en otros países los humedales construidos han demostrado ser eficientes y seguros, por lo que se les ha considerado una mejor opción que los naturales.

SÉPTIMA. A fin de lograr que un humedal natural o artificial pueda cumplir con su propósito sanitario, es necesario que se cumpla con un conjunto de aspectos, de manera tal de garantizar su eficiencia de uso durante un tiempo significativamente largo. Los humedales establecidos artificialmente poseen mayor flexibilidad de uso, en razón de que en su diseño se toman en cuenta los factores mayormente predecibles.

### **Factores hidrológicos:**

La hidrología es la variable más determinante en el diseño de un humedal. Las condiciones hidrológicas dependen del clima (precipitación, evaporación, viento, etc.), escorrentía superficial, la influencia de la mesa freática.

Es importante conocer el patrón de distribución de drenaje, la dirección y cantidad del flujo de agua subterránea, la profundidad de la mesa freática, los meses de mayor precipitación, los datos extremos de evaporación del sector, la textura y características de los estratos edáficos, topografía, capacidad de carga y tiempo hidráulico de residencia. La flexibilidad para manejar la variante hidrológica se realiza a través de la aplicación de los sistemas en serie.

### **Composición química del efluente:**

Las concentraciones de ciertos compuestos químicos en un efluente pueden ser beneficiosas o perjudiciales a las funciones de un humedal. Aguas procedentes de agrosistemas incluyen ingentes cantidades de nitrógeno y fósforo, así como sedimentos y trazas de pesticidas. En tanto que las aguas de áreas urbanas contienen mayor presencia de aceites y sales disueltas. Las descargas industriales son mucho más particulares, aunque se puede indicar que las mismas conducen, en general, una significativa carga de metales pesados y/o compuestos cíclicos.

### **Sustrato:**

Es el medio de soporte para la vegetación, constituye el manto de sedimentos donde se retienen los compuestos recalcitrantes; es el sustrato donde se ubican los microorganismos encargados de metabolizar y transformar ciertas sustancias químicas. Incluye también la materia orgánica que promueve el intercambio iónico y constituye el medio responsable de los cambios de condiciones de óxido-reducción en los humedales.

El establecimiento de un sustrato de suelo en los humedales artificiales representa uno de los factores más difíciles de configurar, ya que éstos poseen bajos niveles de materia orgánica y nutrientes, tienen pHs tendentes a la acidez y no ofrecen el soporte físico y químico requerido por

las plantas. Es por esto que los humedales artificiales deben ser proveídos por sustratos enriquecidos con detritos, compost, turbas y microorganismos.

### **Vegetación:**

En cuanto a la selección de especies de plantas, observamos que numerosas plantas emergentes y flotantes son excelentes filtradoras y metabolizadoras de compuestos contaminantes. Dentro de éstas se destacan *Typha domingensis* (eneas), *Pontederia cordata*, *Juncus effusus* (juncos), *Scirpus validus*, *Panicum repens*, *Pontederia lanceolata*, *Eichhornia crassipes* (bora, lirio de agua), *Spirodela polyrhiza*, *Lemna minor* (lenteja de agua), *Phragmites communis* y obviamente LA TOTORA. *Schenoeplectus tatora*. También, se consideran importantes aspectos botánicos relacionados con la densidad de plantación, reproducción asexual, presencia de bulbos, rizomas, raíces trenzadas, etc.

### **Consideraciones económicas:**

Dentro de esta consideración, se destaca lo relativo a los costos de construcción y los gastos operacionales. Los primeros incluyen las erogaciones de ingeniería básica, de detalle y final, pre-construcción (accesos, drenajes, movimientos de suelo, etc.) y la construcción propiamente dicha (obras civiles, equipos, materiales, labor, supervisión, gastos administrativos, etc.).

En lo que se refiere a los gastos operacionales tenemos: los costos de mantenimiento (bombas, filtros, fertilizantes, control de plagas, análisis de laboratorio, etc.), laborales y de capacitación, así como los gastos potenciales de renovación de equipos y adaptabilidad hacia nuevos requerimientos. Como consideración económica tenemos el valor y la disponibilidad de área superficial. Es obvio que un sistema natural, el cual ha sustituido el servicio de bombas, agitadores, mezcladores, tanques de separación, reactores, filtros confinados, compuestos químicos y equipos de mantenimiento por el uso del sol y cobertura vegetal, requiere grandes espacios para un óptimo funcionamiento. El caudal es el parámetro de mayor peso en la consideración costo/beneficio, ya que la factibilidad de uso de un humedal artificial depende básicamente de la disponibilidad de terreno. Finalmente, la utilización de este tipo de sistema requiere que se planifique un régimen de uso de tierras.

En un diseño de un humedal se debe efectuar una zonificación y delimitación de áreas con el objeto de que no ocurran conflictos de uso (interferencias con actividades agrícolas, aprovechamiento indebido de aguas, desarrollo de viviendas aledañas, paso de vías concurridas, etc.).

### **Limitaciones de uso:**

La salinidad es uno de los factores de mayor preocupación en el diseño de la construcción de humedales. A pesar de que las plantas pueden adaptarse a un intervalo amplio de salinidad (de 0 a 40 partes por mil), son muy pocas las especies empleables en los humedales artificiales que puedan considerarse halófitas. Aquellas que soportan una alta salinidad, como por ejemplo los manglares, no son las especies de mayor y más rápido desarrollo de cobertura para establecer un humedal artificial. Sin embargo, las hierbas pertenecientes a los géneros *Juncus* y *Typha*, han sido empleados como "punta de lanza" en humedales construidos para tratar efluentes con alto contenido de sales.