



FERMENTACIÓN ANAERÓBICA DE DESECHOS ORGÁNICOS EN EL ALTIPLANO

Fernando Fontana

ISBN 92-9089-065-7



FERMENTACIÓN ANAERÓBICA DE DESECHOS ORGÁNICOS EN EL ALTIPLANO

Descontaminación de lodos de fosas sépticas en el Altiplano Andino

Prólogo

Un niño de 3 años, poseedor de un buen lenguaje, un día comenzó a hablar de Janauria. Nadie sabía lo que quería decir. Sus mayores lo indagaron varias veces, cada vez que lo decía. Un día lo aclaró: Es una ciudad que se encuentra entre «José Ignacio» y la «Laguna Garzón», localidades de las que sólo conocía la primera y la segunda sólo de nombre. Al ser interrogado, sobre el origen de determinados hechos de su accionar diario, respondía que eran de Janauria.

Si Janauria hubiera sido un lugar conocido, también hubiera sido fácil verificar si tenía o no razón y las explicaciones de los adultos hubieran sido las normales, así como las correcciones que hubiera que hacer.

Entonces, lo básico y fundamental era saber si Janauria existía o no para poder determinar el origen real o imaginario de los hechos.

Exactamente eso es lo que pasó con esta investigación.

Alguien dijo un día que en el Altiplano no se producía la fermentación mesofílica porque las familias bacterianas no actuaban, como lo hacen a nivel del mar, debido a la baja presión atmosférica.

No había antecedentes que afirmaran o negaran tal aseveración. Estábamos como en el caso de Janauria.

Entonces, ¿existía o no la posibilidad de realizar, en el Altiplano, una fermentación mesofílica de los lodos de fosas sépticas o de cualquier otro tipo de residuo orgánico?

Nunca se había verificado tal posibilidad. En otros términos, no se sabía si existía o no un procedimiento que permitiera llevarla a cabo. En caso de tener un resultado positivo se habría dado un paso tecnológico, abriendo todas las posibilidades para crear procedimientos para fermentación anaerobia, modificarlos y perfeccionarlos.

Entonces, como en el caso del niño en que lo básico y fundamental era saber si existía Janauria, en el caso de esta investigación lo básico y fundamental era verificar si existía un procedimiento que permitiera realizar una fermentación mesofílica y para el caso se usaron como medio los lodos de fosas sépticas.

Eso fue lo que se hizo y el resultado fue positivo. La fermentación se produjo y se abrió un nuevo campo tecnológico.

En esta investigación, los medios para averiguar la existencia o no de Janauria, fueron los ensayos para intentar depurar los lodos de fosas sépticas.

Agradecimientos

A todo el personal del Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés, en particular, a su Director Ing. Freddy Camacho que puso a nuestra disposición el Taller y su personal para construir los distintos elementos de la Unidad de Ensayo y nos cedió espacio en su Instituto para la instalación de la misma. Al Ing. Emilio Montaña que diseñó e instaló un sistema automático de control y mantenimiento de la temperatura de la masa en el digestor.

Al subdirector del Instituto de Ingeniería Sanitaria, Ing. Grover Rivera que habilitó sábados y domingos el Laboratorio del Instituto para hacer análisis de las muestras de lodos en proceso.

En particular, a la hoy Ingeniera Mariela Zapata, quien eligió esta investigación para hacer su tesis para graduarse. Además colaboró: en las compras de materiales para la construcción de las Unidades de Ensayo, en los ensayos de sedimentación, en el trabajo de Laboratorio, aun los fines de semana, además de cumplir con sus tareas diarias de control del proceso durante todo el tiempo que duraron las pruebas, convirtiéndose de hecho en una Asistente.

INDICE

I.	Antecedentes -----	5
II.	Situación actual en el Altiplano -----	8
III.	Premisas que debe comprender lo que pretenda ser una solución -----	9
IV.	Resumen de los logros de la nueva tecnología---	10
V.	Metodología de la investigación -----	10
1.	Programa de investigación -----	11
2.	Operación del sistema -----	17
3.	Resultados -----	24
4.	Observaciones -----	25
5.	Conclusiones -----	25

I. ANTECEDENTES

- 1.1. Estrictamente, sobre el tema específico, no existen antecedentes. Los hay, y en abundancia, sobre la evolución general del problema de disposición final de residuos, comunes a toda la humanidad no importa su ubicación sobre la Tierra, campo muy amplio en el cual desde la época neolítica aparecen indicios de disposición de residuos mediante rellenos sanitarios.

Sobre tratamiento de residuos líquidos domiciliarios se encuentran en la civilización minoica, (II milenio A. C.), en el palacio de Cnosos, (Creta), donde existían tres sistemas independientes de conducción de aguas: pluviales, potable y residual. Estas últimas eran llevadas a siete fosas construidas en las proximidades del palacio.

Más adelante y hasta el día de hoy, por razones económicas, proliferaron las fosas sépticas como sistema de disposición de residuos líquidos, principalmente domiciliarios.

El sistema soluciona lo inmediato del problema, pero no la disposición final. Los pozos se llenan y hay que vaciarlos con camiones cisterna que extraen un líquido viscoso, un barro altamente contaminado, el cual debe tener un destino final.

En la actualidad, a partir de esa etapa pueden pasar dos cosas:

- a) que los barros extraídos se encuentren en las proximidades de una red de saneamiento con planta de tratamiento, diseñada con margen suficiente para absorber afluentes adicionales; o
- b) que esa posibilidad no exista.

En el primer caso, si se vierten los lodos de las fosas sépticas en algún punto de la red y el tema se resuelve sin crear ningún problema adicional.

Pero si esta posibilidad no existe, lo que se hace en la práctica es verter los lodos, aunque esté prohibido, en cualquier lado, sea una pequeña corriente de agua, una laguna o a campo abierto, basta que no moleste en lo inmediato a pobladores aledaños.

La diversificación tecnológica aparece notoriamente cuando en las grandes ciudades mediterráneas, siempre situadas en las cercanías de corrientes de agua dulce, se comienzan a desarrollar tecnologías para lograr la disposición final de los residuos líquidos de las comunidades.

Los más difundidos y que alcanzaron su mayor desarrollo durante este siglo, fueron los basados en la fermentación anaerobia de los lodos sedimentados de las aguas residuales.

- 1.2. Lo que en principio fueron soluciones ideales, el crecimiento de las comunidades puso los primeros inconvenientes. Obligó a ampliar las instalaciones de sedimentación y tratamiento conjunto de la masa, hasta que éstas también comenzaron a saturarse y las posibilidades de aumentarlas a limitarse, por problemas de espacio.

Pareció entonces una alternativa razonable, extraer los lodos más viejos de los sedimentadores y depositarlos en un «digestor» de tipo vaso cerrado. Lo que se esperaba era que continuara un proceso anaerobio, similar a lo que se daba en los fondos de un tanque Imhoff. Se tenía la idea que cuando aumentara la presión producida por el gas generado, la fermentación se iba a detener.

Pero no fue así y digestores de hormigón armado con paredes de 15 cm de espesor explotaron. En la Planta Experimental de Colombes, París, por muchos años, al menos hasta 1955, se conservó un ejemplar así dañado. Naturalmente que este hecho fue motivo más que suficiente para que se estudiara detenidamente el comportamiento de las bacterias mesofílicas y determinar si tenían o no un límite de presión para realizar su trabajo.

Dada su importancia, el fenómeno se estudió en varias partes del mundo y la conclusión fue que las familias bacterianas actuantes, mientras mantuvieran un pH de neutro a ligeramente alcalino y una temperatura mayor de 5°C y menor de 40°C, continuaban procesando la materia orgánica que tuvieran a disposición a presiones muy elevadas, tan elevadas como del orden de 700 Kg/cm².

En cambio, la influencia de las depresiones en el proceso bacteriano, casi no se tuvo en cuenta. No originaban ningún

peligro y, por otra parte, en ninguna de las ciudades de Europa o EE.UU, donde se aplicaba el sistema tenían ese problema. Lo único que se conocía del comportamiento bacteriano, frente a presiones por debajo de la presión atmosférica estándar, era que el rendimiento del trabajo bacteriano era menor.

- 1.3. Hasta 1983 no se tenían antecedentes de intentos de fermentación anaerobia de residuos orgánicos en el Altiplano.

Por esa época UNESCO propició la instalación en Bolivia de tres biodigestores, del muy conocido y probado modelo hindú, para tratar anaeróbicamente bosta de vacunos o de caballos, con el fin de obtener biogas y un residuo sólido incontaminado cuya aplicación como acondicionador de suelos daba excelentes resultados.

Tres unidades iguales se construyeron en los Departamentos de Santa Cruz, Chuquisaca y La Paz. La primera de las tres, funcionó normalmente como funcionaría en cualquier parte del mundo. La de Chuquisaca, con cierta ineficiencia también realizaba su procesamiento pero, la del Altiplano no produjo la fermentación esperada, sin explicación aparente.

UNESCO contrató entonces al autor de este trabajo, que ya había construido plantas de ese tipo que estaban en funcionamiento, para indagar las causas de esa anomalía.

- 1.3.1. El diagnóstico de lo que sucedió con el biodigestor hindú de La Paz fue que la depresión atmosférica ambiental impedía que se desarrollara la fermentación mesofílica.

Nunca se comprobó tal hipótesis, hasta que 14 años después se presentó la inquietud de probar si el procedimiento de bajo costo desarrollado en Montevideo, bajo el auspicio de PHI-UNESCO, para depuración de efluentes de pozos negros y fosas sépticas podía llegar también a beneficiar a poblaciones del Altiplano.

- 1.3.2. El procedimiento había sido desarrollado a nivel del mar y consistía esencialmente en concentrar los lodos de fosas sépticas mediante sedimentación, separando un líquido sobrenadante cuyo nivel de

contaminación era mucho menor, lo que permitía tratarlo separadamente.

Se había conseguido: un líquido sobrenadante, 80% del volumen de los lodos de fosas sépticas, inodoro, que se depuraba solo en piletas abiertas de poca profundidad, y un lodo concentrado que se sometía a una fermentación mesofílica, en un proceso de 11 días de retención, llegando a reducciones de 88.95% de DBO5 y de 99.89% en colifecales.

El tamaño de las instalaciones era 8.8% de las que se hubieran necesitado para tratar, por el sistema tradicional, un volumen de lodo tal como es extraído de la fosa séptica y el resultado de la depuración fue similar al de las instalaciones tradicionales para aguas residuales del saneamiento urbano.

- 1.3.3. Se ve claramente que la aplicabilidad de este procedimiento en el Altiplano o de cualquier otro procedimiento que requiriera una fermentación anaerobia dependía fundamentalmente que se pudiera producir tal fermentación a esas alturas.

Con los antecedentes mencionados, el camino a seguir, al menos en principio, estaba prácticamente indicado. Se utilizarían unidades similares a las usadas en la investigación realizada en Montevideo con la única variante que el digestor anaerobio, abierto a la presión atmosférica local, dejaría esa condición y se convertiría en un digestor cerrado al cual se le pudiera agregar una presión adicional. Por otra parte, esta solución ya había sido anunciada por el autor al final del capítulo V de la publicación «Depuración de efluentes de pozos negros y fosas sépticas», UNESCO, 1994.

II. SITUACION ACTUAL EN EL ALTIPLANO

No es distinta a la de cualquier otra región de escasos recursos económicos. El crecimiento de poblaciones estables produce una mayor concentración de residuos líquidos los cuales, sin ningún tipo de

descontaminación, se depositan en cualquier lugar, elevando los niveles de contaminación ambiental exponiendo a las poblaciones a graves epidemias.

La causa de esta deficiencia sanitaria, también es común a todos los países de la misma condición económica: carencia de recursos para hacer las obras.

Hoy existen asentamientos humanos, sean periféricos de ciudades importantes o poblados de escasos recursos que no pueden acceder a un sistema clásico de saneamiento, por lo cual la única solución tradicional de bajo costo que pueden alcanzar para disponer de los residuos líquidos familiares en forma inmediata, es la construcción de pozos negros o fosas sépticas, que luego, cuando hay que vaciarlos se ve que sólo se trasladó el problema de un lugar a otro.

En las zonas donde se puede hacer saneamiento en la forma tradicional, se hizo, como por ejemplo, en parte de la ciudad de La Paz y en las otras, en el mejor de los casos tienen fosas sépticas o nada, que es mucho más grave. En todos los casos, las aguas residuales, como se hace en todos los lugares con la misma problemática, o se vierten en corrientes de agua, contaminando todo aguas abajo o en cualquier otro lugar, aunque esté prohibido.

Si bien los problemas son comunes a todos los países de la misma condición económica, el Altiplano se enfrenta a un problema adicional. Los procedimientos de depuración comúnmente conocidos basados en la fermentación mesofílica de los lodos, no funcionan en la altura.

III. PREMISAS QUE DEBE COMPRENDER LO QUE PRETENDA SER UNA SOLUCION

Igual a como se planteó el problema originalmente, también para el Altiplano no basta con hallar una solución técnica sino que ésta debe ser de pequeña inversión y de costo operativo bajo, de manera que haga posible su aplicación en comunidades con escasos recursos económicos.

Debe ser sencilla de manejar para que los destinatarios, si son de bajo nivel sociocultural, puedan operarla por si mismos con muy poco esfuerzo. Esto implica una disposición de parte del usuario para emprender una pequeña tarea de capacitación en la que debe entender que con ello mejora su calidad de vida y la de su comunidad,

descontaminando su hábitat y ayudando a conservar el equilibrio ecológico preexistente.

IV. RESUMEN DE LOS LOGROS DE LA NUEVA TECNOLOGIA

El logro más importante del procedimiento investigado en La Paz, como se dijo anteriormente, fue hacer que los lodos de fosas sépticas se pudieran someter a una fermentación mesofílica en la altura del Altiplano.

El resto del trabajo consistió en hacer una pequeña adaptación a la tecnología, desarrollada en la parte baja del mundo, a la altura del Altiplano, abriendo la posibilidad de adaptar otras tecnologías que requieran fermentaciones de ese tipo. En consecuencia, la tecnología lograda es, como la desarrollada en Montevideo: de baja inversión, de bajo costo operativo y sencilla de manejar.

V. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Está basada en el procedimiento logrado en Montevideo, por lo que se comenzará por hacer un descripción somera de lo ahí hecho, los medios usados y sus resultados.

En la investigación realizada en Montevideo, la ausencia de todo antecedente impedía establecer una metodología, por lo que la misma se fue generando a medida que se iban probando las distintas etapas del proyecto.

En presente caso se contaba con ese antecedente, más la hipótesis enunciada de cómo solucionar el problema de la fermentación anaerobia en la altura, lo cual permitió elaborar un programa para la investigación.

Para poder llevar a cabo el programa, UNESCO-PHI celebró acuerdos con:

- a) El Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés para que la construcción e instalación de la Unidad de Ensayo, se hicieran en el mencionado Instituto el que además aportaría personal de apoyo durante la investigación.

- b) El Instituto de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Mayor de San Andrés para que brindara su apoyo realizando los análisis de Laboratorio que se requirieran para el control del proceso.

1. Programa de investigación

- 1.1. Elección, conjuntamente con el Director del Instituto de Hidráulica e Hidrología, de los espacios disponibles en el Instituto, donde fuera posible instalar la Unidad de Ensayo. Esta consta de dos partes:
 - a) Los «Tubos Largos», donde se concentran los lodos por sedimentación asistida por floculante y se separan éstos del líquido sobrenadante.
 - b) El sistema de fermentación anaerobia de los barros concentrados.

Basados en la experiencia de la investigación realizada a nivel del mar, en la que los ensayos de fermentación se hicieron usando una masa de lodo concentrado de 200 l, extraídas de 1.000 l de lodo de fosas sépticas, se repitió la instalación con las variantes necesarias para adaptarla a las condiciones de la altura.

1.1.2. Instalación de sedimentación

Consta de 4 tubos de plástico opaco, de 0.15 m de diámetro y 6 m de altura útil, cerrado en uno de sus extremos. Ahí se concentran los lodos y se separan del líquido sobrenadante.

Primero había que probar si el resultado de la sedimentación en el Altiplano era similar al obtenido en Montevideo y si así era, no había más que repetir la operación y verificar que el punto de corte estaría a 1.2 m del pie de la columna, (válvula 6), lo que daba, del volumen total de lodo de fosas sépticas, un 80% de sobrenadante y 20% de lodo concentrado. (Ver Anexo 1)

A dos de los tubos se le colocaron 9 válvulas de media pulgada cada metro, a partir del borde superior hasta 4 m, para continuar con una válvula cada 0.4 m hasta los 5.6 m, terminando con una válvula de pie de 1.5 pulgadas a los 6 m.

Se construyeron, se les hizo una prueba hidráulica y luego se empotraron en un barranco del río donde iba a ser su ubicación definitiva.

El lugar elegido es barranco es de unos 8 m de altura y el empotramiento se hizo de modo que la boca superior de los tubos quedara a nivel de la tierra y además tenía que tener un amplio espacio de maniobra, por tres razones:

- a) Porque hasta ahí tiene que llegar un vehículo de transporte que, en tres viajes, tiene que llevar los 1.000 l de lodos extraídos de fosas sépticas. (Dos días con 4 turiles de 100 l cada uno y el tercer día con 2 turiles)
- b) Porque hay que mezclar los lodos con el floculante, previamente a verterlo en los tubos.
- c) Para facilitar el llenado de los tubos.

Para poder trabajar sobre las columnas de sedimentación, se construyó una plataforma por debajo del pie de los tubos, de tal manera que desde ahí se pudieran extraer las muestras para determinar el punto de corte, en los tubos de las 9 válvulas, y luego, de las cuatro, separar el líquido sobrenadante del lodo concentrado.

La función de los dos primeros tubos, también proveniente de la experiencia anterior, es la de poder determinar el punto de corte de la columna líquida, por arriba del cual el líquido que se extrae tiene muy baja contaminación, es inodoro y termina su depuración en piletas abiertas de poca profundidad. Debajo del punto de corte se tiene el lodo concentrado.

Entonces se procedió a llenarlos con lodos de fosas séptica, previo agregado del floculante, y se dejaron decantar 14 horas. Se sacaron muestras de las 18 válvulas para determinar en cada una de ellas: colifecales, DBO5, sólidos totales, fijos y volátiles, sólidos suspendidos totales, fijos y volátiles, para determinar el punto de corte.

En uno de los tubos, el gran salto de los niveles de concentración se produjo entre los niveles 6 y 7, donde el contenido de colifecales se multiplica por 2.4, el de sólidos volátiles por 3.3, mientras en el otro tubo se produjo entre los niveles 7 y 8 donde los colifecales se multiplican por 12.8 y los sólidos volátiles por 22.6. Los niveles de contaminación del líquido sobrenadante permitían ser tratados en piletas abiertas, tal como se hizo en los ensayos hechos en Montevideo.

No obstante, en esos niveles los valores del DBO5 exceden ampliamente los límites dentro de los que se puede disminuir

eficientemente en piletas abiertas, ni aún en percoladores. Por lo tanto el punto de corte se tuvo que llevar al nivel 6, en los dos tubos, ya que ambos tienen un DBO5 del orden de 140 mg/l eliminable sin inconveniente en piletas abiertas, tal como se hizo en Montevideo.

Determinado el punto de corte, que dio igual al de los ensayos del procedimiento original a nivel del mar, a los dos tubos restantes sólo se le colocaron dos válvulas, de 1.5 pulgadas, una en el punto de corte, que permite extraer el líquido sobrenadante y otra en el pie de la columna por donde se extraerá el lodo concentrado.

Estos 2 tubos se empotraron en el barranco, al lado del primero.

El punto de corte determinado, dividió el lodo en 20 % de lodo concentrado y 80 % de sobrenadante.

1.1.2.1. *Observaciones sobre los análisis Altiplano-Montevideo*

El resultado de los análisis enumerados anteriormente permitieron hacer algunas observaciones interesantes:

- a) Los niveles de contaminación, en materia de colifecales, exceden entre 10 y 13 veces al máximo obtenido durante toda la investigación realizada en Montevideo.
- b) Que a pesar de ello el punto de corte, nivel donde se separa el líquido sobrenadante del lodo concentrado, coincide con el obtenido en Montevideo.

1.1.3. Unidad de ensayo de lodos concentrados

Su concepción fue similar a la usada en Montevideo, (ver Anexo 2), con los agregados y variantes que posibilitaran su adaptación a las nuevas exigencias

1.1.3.1. *Características de las unidades de ensayo, para lodos concentrados, usadas en Montevideo (Anexo 2)*

Estas consistían esencialmente en un recipiente cilíndrico cerrado de 210 l que desempeñaba la función de digestor y un gasómetro para acumular los gases producidos por la fermentación.

El digestor, en su parte superior tenía una junta de goma, para evitar fugas de gas en su unión con una tapa abulonada al recipiente cilíndrico. La tapa tenía cuatro caños que penetraban la masa en proceso, para evitar la entrada de aire exterior. Sus funciones eran:

- a. Un tubo para la introducción de sensores directamente en la masa de lodo concentrado, para medición de temperatura y pH.
- b. Un rebosadero con una la doble función: como elemento de seguridad para la eventualidad de que se desarrollara una sobre presión en el proceso y otra como vía de descarga del barro digerido para el caso que se hiciera trabajar la unidad como digestor continuo, en cuyo caso el tubo mencionado en a) tendría una función adicional que sería la de admisión de la carga diaria.
- c. Un tubo manométrico.
- d. Una guía para el agitador. Es el caño central por el cual pasa un vástago, en cuyo extremo inferior lleva soldada una platina perforada.

Un quinto caño, que no penetra en la masa, era para permitir la salida de los gases generados directamente al gasómetro, de modo que la presión de almacenamiento del gas estuviera siempre en equilibrio con la presión en el digestor.

Todo el digestor estaba sumergido en agua, dentro de un tanque con tapa aislado térmicamente. En esta forma, la conservación de la temperatura de la masa en proceso se hacía al «baño de María», calentando el agua cuando era necesario.

El gasómetro era un tanque lleno de agua en el cual está sumergida la campana, para almacenar los gases generados. La altura a que podía ascender la campana, depende de la presión que se desee mantener en el digestor. Cualquiera sea ésta, la campana deberá quedar sumergida a una altura equivalente a la presión de generación, pues de lo contrario el gas escapará a través del sello hidráulico. Esto constituía otro elemento adicional de seguridad, para el caso de sobre presiones en el digestor.

1.1.3.2. *Adaptaciones del diseño utilizado a nivel del mar para su uso en el Altiplano (Anexo 3)*

Lo esencial de la adaptación estaba en pasar de un sistema abierto a la atmósfera a un sistema cerrado que trabajaría con presión interior superior a la atmosférica ambiental.

De los tubos que salían de la tapa del digestor, el tubo manométrico se suprimió y había que sustituir todos los demás tubos que ponían en contacto la masa a procesar con la atmósfera exterior pues, se pasaba de un sistema abierto a uno cerrado que trabajaría a presión superior a la atmosférica del Altiplano.

Como se iba a trabajar a una presión superior a la atmosférica local, hubo que hacer cambios en el diseño de sistema de fermentación. Los cambios más importantes realizados respecto a la Unidad de Ensayo usada en Montevideo, consistieron en:

- a) Agregar una Cámara Intermediaria de Presión, (CIP), cuya función era mantener la presión interna del sistema, además de constituir un depósito de gas a presión con el cual se podía agitar la masa.

Consistió en un pequeño turil metálico de unos 50 l de volumen, (suficiente con exceso para llenar la cámara de gas del digestor, las cañerías y accesorios), al que se hallaban conectados tres tubos, un manómetro y una válvula de seguridad.(Ver anexo 3)

Uno de los tubos provenía de la tapa del digestor, separado de la masa procesada por la cámara de gas. A través suyo, teniendo cerrada la VG4 y abiertas la VG3 y VG5, llegarían a la CIP los gases generados por la fermentación. Ese tubo tiene una válvula de retención VR2 que sólo permite el pasaje hacia la CIP, impidiendo el retroceso.

Un segundo tubo, la conectaba al gasómetro por la válvula VG7. En el caso que se generara en el proceso mayor cantidad de gas, que la necesaria para mantener la presión del sistema, generación que sería acusada en el manómetro por un aumento de presión, este tubo permitiría la salida del gas de la CIP al gasómetro.

El tercer tubo estaba destinado a mantener la presión del sistema y a la agitación por burbujeo. La presión del sistema se mantenía con la válvula VG2 cerrada y abiertas la VG1 y la VG6. La

válvula de retención VR1 permitía solamente el pasaje del gas desde la CIP hacia el Digestor. O sea que la igualdad de presiones en el digestor y en la CIP estaba asegurada, porque la presión inicial se daría desde la CIP hacia el Digestor, a través de este tercer tubo, así como cualquier presión adicional que proviniera de la generación de gas, en el proceso, el cual llegaría a la CIP a través del primer tubo.

Este tercer tubo termina dentro del digestor en una T con los extremos abiertos lo que permite, además, realizar la agitación por burbujeo haciendo funcionar el dispositivo intercalado en su recorrido, el cual recircula el gas contenido en la CIP en circuito cerrado CIP- Digestor-CIP.

- b) En la tapa del digestor se colocó además:
1. Un tubo de cobre para introducir el sensor que registre la temperatura de la masa. Este tubo se introduce en la masa y su extremo interior es ciego.
 2. Un tubo destinado a la extracción de muestras, fundamentalmente para el control del pH de la masa en proceso. Tiene una válvula VE, normalmente cerrada, que abriéndola ligeramente permite extraer muestras de la masa en proceso, la que fluye por diferencia de presiones entre el interior y el exterior.

1.1.3.3. *Al gasómetro no se le alteró el diseño, por lo que su volumen de almacenamiento quedó del orden de 100 l.*

1.1.3.4. *Seguridad*

Al pasar de un sistema abierto a uno cerrado, todos los elementos que indirectamente daban seguridad al sistema, ante cualquier sobre presión que se originara en el proceso, fueron eliminados. En consecuencia, en la Cámara Intermediaria de Presión que está conectada directamente con la Cámara de Gas del digestor, se colocó una válvula de seguridad de manera que si se daba una situación de riesgo por sobre presión en el proceso, tendría un escape.

- 1.1.4. La unidad de ensayo, así diseñada se construyó en el Instituto de Hidráulica e Hidrología.

Antes de instalarse las columnas de sedimentación en su ubicación definitiva, se le hicieron pruebas hidráulicas a cada una.

El sistema de fermentación se ensayó previamente con agua y aire a 1 Kg/cm² de presión.

2. Operación del sistema

2.1. Primer Etapa. Concentración de lodos

Con las columnas de sedimentación construidas según el diseño, antes de instalarlas fueron sometidas a pruebas hidráulicas.

En los ensayos realizados en Montevideo, el tiempo de sedimentación que se había tomado era de, al menos, 12 horas, no para tener mejor rendimiento, sino pensando en la forma que tendría la operación en una planta de tratamiento real en la cual se reciben lodos hasta las 18 o 19 horas y se vuelve a recibir al día siguiente a las 7 u 8 horas.

En la Unidad de ensayo se podían sedimentar simultáneamente 400 l, ya que las columnas de sedimentación tenían una capacidad de 100 l cada una y eran cuatro.

- 2.1.1. Uno a uno, a los lodos contenidos en los turiles se les agregó floculante. Se agitaba enérgicamente y se vertía en una de las columnas de sedimentación. Toda la operación se realizaba en dos minutos para obtener mejor rendimiento en la sedimentación.

El flóculo para formarse necesita estar en contacto íntimo con la materia en suspensión contenida en el líquido a tratar, de ahí la agitación enérgica indicada. En cuanto a la velocidad a que se realizaba la operación, era para aprovechar el torbellino provocado por el vertimiento para mejorar el contacto entre la masa y el floculante, formándose definitivamente el flóculo dentro de la columna. Así se evitaba la posibilidad de su rotura, durante el llenado de las columnas, ya que es un elemento de muy poca resistencia.

Si bien la floculación en sedimentadores suele hacerse en más tiempo, el flóculo no está sometido a las presiones hidráulicas producidas por el torbellino generado al verterlo en una columna de 6 m de altura.

- 2.1.2. Esta operación se hacía generalmente en la tarde y a la mañana siguiente se hacía la separación del sobrenadante del lodo concentrado. Se abría la válvula

6, de cada columna, dando salida al sobrenadante que se depositaba en una pileta abierta de m 1.5 x 1.5 x 0.45, con capacidad para el total.

Luego se abría la válvula 9, la de pie en todas las columnas, extrayéndose el lodo concentrado. Este se depositaba en un turil.

Terminada esta operación, se repetía lo mismo que el día anterior, llenándose nuevamente las 4 columnas, las que al día siguiente se vaciaban de igual forma que la descrita anteriormente. Al tercer día se repetía nuevamente la operación, pero en dos columnas para completar la sedimentación de los 1.000 l de lodos que se necesitaban para obtener los 200 l de lodos concentrados a usarse en el ensayo de fermentación.

- 2.2. Los 200 l de lodos concentrado obtenidos de la operación de sedimentación, se vertieron en el digestor de la unidad de ensayo. Se colocó la junta de goma y la tapa, conectándolo mediante las cañerías a la cámara intermedia de presión y ésta a su vez al gasómetro.
- 2.3. Segunda Etapa. Tratamiento de lodos concentrados
 - 2.3.1. Programa del ensayo

En base a los antecedentes de la investigación realizada a nivel del mar y a las consideraciones realizadas sobre la altura en que se iba a realizar la operación, se hizo el siguiente programa:

1. Probar todo el sistema con agua y aire y constatar la inexistencia de pérdidas de aire a la presión absoluta de 1.2 kg/cm².
2. Sacar la tapa del digestor y desconectar las cañerías que lo vinculan con la cámara intermedia de presión (CIP).
3. Sacar el agua del digestor. Verificar sus medidas internas y marcar el nivel a donde debían llegar los lodos, de manera que quedara una cámara de gases con una altura de 10 cm.
4. Llenar el digestor con lodos concentrados hasta la marca indicada, sacar muestras y medir el pH.

5. Tapar el digestor, conectar las cañerías a la CIP.
 6. Volver a probar el sistema con aire a presión y corregir las pérdidas, si las hubiere.
 7. Verificada la inexistencia de pérdidas, barrer el aire con CO₂, manteniendo una presión manométrica de 0.51 Kg/cm².
 8. Controlar el peso de la garrafa de CO₂, antes y después de la operación 7.
 9. Elevar la temperatura de la masa a digerir a 30°C.
 10. Durante el tiempo de calentamiento, agitar la masa por burbujeo, abriendo y cerrando la válvula de la garrafa de CO₂.
 11. Terminada la operación anterior, volver a pesar la garrafa.
 12. El mantenimiento de la presión interna se hará abriendo cualquiera de las válvulas VG2 o VG4.
- 2.3.2. Ejecución de tareas para fermentación anaeróbica de los lodos concentrados

1. Se llenó el digestor con agua, dejando una cámara de aire de 0.1 m de altura. Se conectaron todas las cañerías dejando abiertas todas las válvulas menos VE, VG2, VG4 y VG7.

Por la VG7 se inyectó aire hasta llevar la presión manométrica a 0.52 Kg/cm², lo que sumada a la presión ambiental de 0.677 Kg/cm² daba una presión absoluta de 1.2 Kg/cm² lo que servía para probar la resistencia mecánica de la instalación y la posible existencia de pérdidas, ya que la presión de ensayo sería 1.1 Kg/cm², ligeramente más alta que la presión normal a nivel del mar.

Esta verificación se hace manteniendo cerradas las válvulas VE, VG2, VG4 y VG7 y abiertas las restantes. Una vez que el manómetro indica la presión de prueba del sistema, para el caso 0.52 Kg/cm², la VG7 se cierra. Si la presión no cae, no hay pérdidas. Si baja, hay que

ubicarlas y sellarlas. La operación está terminada cuando repuesta la presión de prueba, esta no baja durante 4 horas.

Lo particularmente importante de esta prueba es verificar la estanqueidad del sistema ya que el aumento de presión manométrica es el único indicador externo que se tiene para saber si se está produciendo gas y, por consiguiente, la fermentación anaerobia.

Asegurada la estanqueidad del sistema, se prueba el sistema de agitación a la presión de trabajo, 1 Kg/cm². Cerradas las válvulas VE, VG2, VG4 y VG7, con las demás válvulas abiertas se hace funcionar el dispositivo para agitación por burbujeo, que no es más que un fuelle intercalado en la línea. Como todo el sistema está lleno de aire, igual que lo estará de gas cuando la fermentación se produzca, se apreta el fuelle el cual desplaza el volumen de aire que él contiene más el contenido en la cañería VR1-VG1. El aire desplazado sale por los extremos abiertos del caño colocado en T sobre el fondo del digestor, produciendo burbujas que, en su ascenso, agitan la masa. Afloran en la cámara de gas del digestor y retornan a la CIP a través de la cañería VG3-VR2. El aire no tiene ninguna posibilidad de retroceder en ninguna de las cañerías del circuito porque las válvulas de retención VR1 y VR2 se lo impiden.

2. Eliminadas todas las pérdidas y pasado el período de 4 horas, se puso el sistema a la presión ambiental, se destapó el digestor y se desconectaron las cañerías que lo unen a la CIP.

El lapso de 4 horas se aprovechó para probar el funcionamiento de los sistemas de calentamiento y de agitación.

3. Se extrajo el agua del digestor, se verificaron sus dimensiones internas y se marcó el nivel hasta donde debían llegar los lodos.

Las dimensiones internas eran: diámetro = 0.56m, altura = 0.84m, altura fijada para los lodos concentrados = 0.74m, altura de la cámara de gas = 0.10m.

En consecuencia, el volumen de lodos concentrados a tratar fue de 0.182m³ y el de la cámara de gas 0.024m³.

4. Se llenó el digestor con lodos concentrados hasta la marca indicada, se sacaron muestras y se midió el pH.
5. Se tapó el digestor y se volvieron a conectar las cañerías que lo vinculan a la CIP.
6. Dado el movimiento que tuvieron las cañerías, nuevamente se volvió a probar el sistema con aire a presión y se sellaron las pérdidas producidas .
7. Se puso a funcionar el sistema de calentamiento agitando la masa cada 3 horas usando el dispositivo de agitación por burbujeo, usando el aire que quedó atrapado dentro del sistema. El aire para agitar sólo se puede usar en la puesta en marcha.

Los primeros gases que se desprenden de la fermentación tienen una baja proporción de metano, siendo la mayoría gases inertes. Estos sirven para desalojar el aire contenido en el sistema eliminando el peligro de explosión de la mezcla metano- aire que en proporciones, de 1 de metano y de 5 a 15 o 18 de aire, la combustión puede comenzar con la chispa generada por un interruptor eléctrico, un cigarrillo encendido o la chispa producida por una herradura.

- 2.4. Descripción del ensayo en el que se produjo la fermentación mesofílica por primera vez

Con los lodos concentrados del proceso de sedimentación descrito en los párrafos 2.1 y siguientes, se comenzaron las operaciones prescritas.

- 2.4.1. Se llenó el digestor de lodos concentrados hasta la altura predeterminada de 0.74 m.

Su condición era: pH = 7.1; temperatura = 17°C; coliformes fecales = 8.4×10^7 ucf/100 ml; DBO₅ =9100 mg/l

2.4.2. Puesta en marcha

Se hicieron las pruebas de estanqueidad del sistema y una vez verificada se inyectó aire hasta elevar la presión manométrica a 0.5 Kg/cm², lo cual llevaba al sistema a una presión absoluta mayor que la ambiental de las tierras bajas donde el procedimiento funcionaba.

A las 16 horas del 2/12/97 se conectó el sistema de calentamiento de la masa a procesar. Como la temperatura se regulaba automáticamente, se dejó en funcionamiento hasta el día siguiente ya que cuando la temperatura de la masa llegara a 30°C se iba a apagar y cuando descendiera nuevamente se conectaría.

A las 8h15' del 3/12/97, la temperatura de la masa había descendido a 23°C porque, un sereno, al ver en la noche el sistema eléctrico funcionando, por precaución, lo apagó. No obstante el registro gráfico de la temperatura indicó que mientras el sistema estuvo conectado, la temperatura de la masa había llegado y se había mantenido en 30°C, hasta que fue desconectada la fuente de calor y comenzó a descender.

A pesar de ese inconveniente, la presión manométrica había aumentado 0.4 Kg/cm² o sea que la fermentación se había producido.

Además se detectaron dos nuevos lugares de pérdidas en acoplamientos, lo que permite deducir que durante la noche la masa en proceso estuvo generando gas suficiente para cubrir las pérdidas y aumentar la presión en 0.4 Kg/cm², a pesar de la disminución de la temperatura que de por sí disminuye la generación gaseosa ya que ésta es función de la temperatura.

A las 9 horas se volvieron a conectar los calefactores aumentándose la potencia de los mismos hasta 6 Kw, con lo cual a las 12h, la temperatura de la masa volvió a estar en 30°C y salvo pequeñas oscilaciones permaneció estable durante todo el proceso.

Para corregir las pérdidas se cerraron las válvulas de salida VG3 y de retorno al digestor VG1, para poder desarmar los acoplamientos, cambiar las juntas y sellarlas, sin perder el gas almacenado en la cámara de gas del digestor. La presión de la CIP quedó en cero.

A las 13h se abrieron nuevamente las válvulas de salida y retorno al digestor. El gas almacenado en la cámara de gas del digestor llenó todo el sistema y la presión quedó en 0.495 Kg/cm². A las 14h30', la presión había llegado a algo más de 0.5 Kg/cm².

Se sacó una muestra para medir el pH y estaba en 7.2.

2.4.3. Estado de régimen

Subsanados los inconvenientes mencionados en el párrafo anterior, se entró en la rutina.

El 4/12/97, a las 8h30', la presión había alcanzado 0.95 Kg/cm².

Como la válvula de seguridad estaba regulada a 1 Kg/cm², estaba a punto de abrirse, por lo cual se conectó la CIP con el gasómetro de campana y lentamente se dejó que el gas se expandiera hasta llegar a tener en la CIP una presión de 0.6 Kg/cm².

Lo que no se esperaba era que el volumen de gas generado fuera tal que desbordara la capacidad del gasómetro, por lo que una vez superada su capacidad el gas escapó a la atmósfera.

El diseño del gasómetro preveía un volumen diario de generación gaseosa como el que se había dado en Montevideo, que nunca superó el volumen de la campana que era de 100 l, el que notoriamente fue ampliamente superado, perdiéndose la posibilidad de medirlo. Esto sucedió cada vez que se repitió la operación de trasiego entre el CIP y el gasómetro, salvo en los últimos días de desarrollo del proceso.

Nuevamente se sacó una muestra para medir el pH el que seguía siendo 7.2. La temperatura de la masa se mantenía en 30°C.

La agitación de la masa en proceso se hizo dos veces por día, usando el propio gas generado impulsado por el dispositivo de agitación intercalado en la cañería VG6, VR1, VG1.

A las 18h la presión estaba nuevamente en 0.95 Kg/cm², por lo cual se repitió la operación de la mañana, dejando salir gas hasta que la CIP quedó en 0.6 Kg/cm². La temperatura y la presión permanecieron constantes.

Los días siguientes, 5 y 6, se repitió la misma situación que el 4/12/97, por lo cual se repitieron las mismas operaciones.

El 7/15/97, a las 8h45', la situación era igual a la de los días anteriores, pero a las 18h la presión alcanzaba sólo a 0.9 Kg/cm². Igualmente se pasó el gas para el gasómetro hasta que la presión en la CIP fuera de 0.6 Kg/cm².

Los días 8 y 9, el aumento de presión fue disminuyendo regularmente 0.05 Kg/cm² en la medición de la mañana y la misma cantidad en la medición de la tarde. Es decir que el 9/12/97 a la tarde la presión sólo se había elevado hasta 0.7 Kg/cm².

Continuando con la rutina, nuevamente se pasó el gas al gasómetro hasta que la presión en la CIP llegara a 0.6 Kg/cm².

El 10/12/97 a las 8hh55, la presión se había elevado a 0.675 Kg/cm². Siguiendo con la rutina se bajó la presión hasta 0.6 Kg/cm². A las 18h30' la presión estaba en 0.65 Kg/cm² y nuevamente se llevó a 0.6 Kg/cm².

El 11/12/97, a las 8h55', la presión se había elevado hasta 0.62 Kg/cm². Se bajó nuevamente a 0.6 Kg/cm² y a las 18h, no había variado.

El 12/12/97, a las 8h30', la presión tampoco había variado. En consecuencia se dio por terminado el proceso.

Exactamente 11 días después de haberse iniciado, terminó la fermentación, lapso idéntico al del proceso desarrollado en Montevideo.

La condición de los lodos procesados fue: pH = 7.4; temperatura = 30°C; coliformes fecales = $=1.8 \times 10^5$ ucf/100ml; DBO₅ = 1050 mg/l.

3. Reesultados

1. El más importante fue demostrar que la fermentación anaerobia de lodos es posible en el Altiplano, con lo cual se abrió un nuevo campo tecnológico.
2. Se probó que si se daban las condiciones de presión, pH y temperatura el procedimiento de depuración de lodos de fosas sépticas desarrollado en Montevideo, Uruguay, también era aplicable en el Altiplano.
3. El contenido de colifecales descendió de 8.4×10^7 ufc/100ml a 1.8×10^5 , por lo que su reducción fue de 99.8 %.
4. El DBO₅ descendió de 9100 mg/l a 1050 mg/l por lo que su reducción fue del 88.4 %.

5. Ambas reducciones fueron del mismo orden que las alcanzadas a nivel del mar que fueron 99.9 % y 88.9 %. En ambos casos se está en los mismos órdenes que los niveles de depuración alcanzados en las plantas de tratamiento de lodos de aguas residuales realizados en plantas tradicionales .

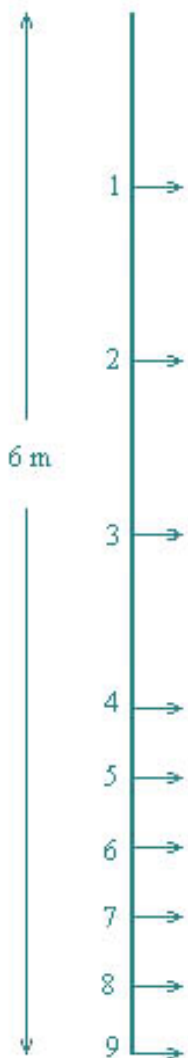
4. Observaciones

Salvo la presurización del sistema, el diseño de la planta y el procedimiento de depuración coincidieron con lo realizado a nivel del mar, lo que permitiría decir que el orden de inversión para su construcción y su costo operativo también deben ser similares. O sea: Inversión US\$ 45.7 por fosa servida, teniendo las instalaciones una vida útil global de 50 años; Costo operativo, incluido: el mantenimiento, el servicio de los camiones cisterna en un radio de 2.5 Km. de la Planta, consumo de energía eléctrica incluida iluminación del predio, salarios y leyes sociales, es de 3.57 US\$/mes por pozo servido.

5. Conclusiones

1. Queda demostrado que es posible realizar la fermentación mesofílica a 3.800 m de altura, lo cual abre la posibilidad de depurar los lodos de las aguas residuales del saneamiento de La Paz u otras en condiciones similares de altitud o mayores.
2. El tiempo de retención de los lodos concentrados es igual al que se dio en Montevideo.
3. Las reducciones de los niveles de contaminación de los lodos, tanto en el Altiplano como a nivel del mar, son del mismo orden.
4. El líquido sobrenadante tuvo el mismo comportamiento que cuando se realizó a nivel del mar.

ANEXO 1

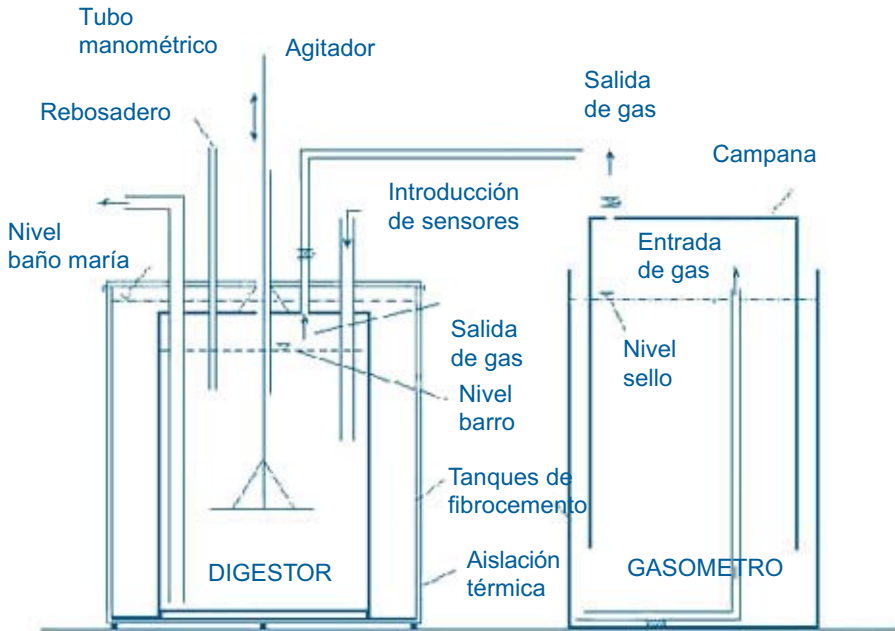


Esquema de “Tubo Largo” para ensayos de sedimentación en el Altiplano

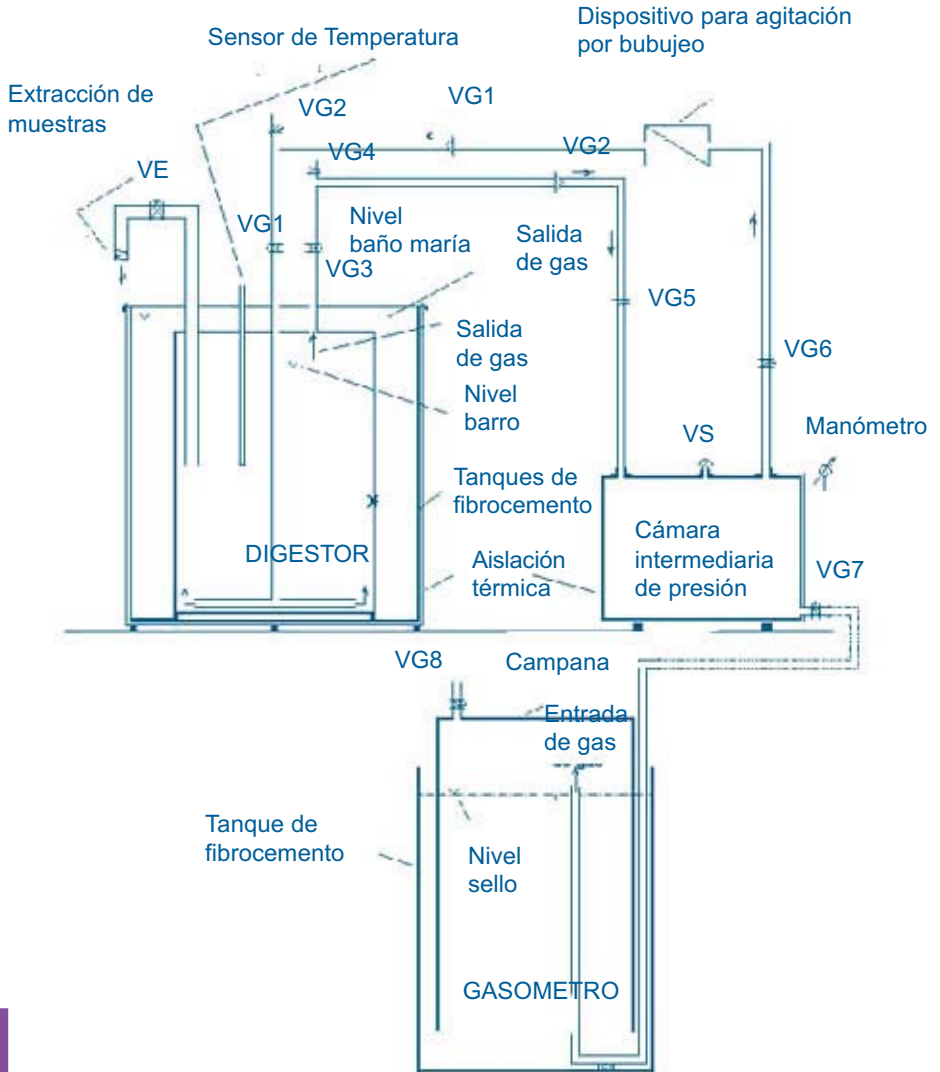
El “Tubo Largo” usado para los ensayos es un tubo de plástico opaco cerrado en uno de sus extremos. Tiene 0.15 m de diámetro y 6 m de altura con válvulas de media pulgada cada metro, a partir del borde superior hasta 4 m, para continuar con una válvula cada 0.40 m hasta los 5.6 m, más otra de 1.5 pulgadas a los 6 m.

Por las válvulas se extraen las muestras: 100 ml para análisis microbiológico; 250 ml para DBO5; 1000 ml para determinación de sólidos totales, fijos, volátiles y pH.

Esquema de la Unidad de Ensayo usada en Montevideo



Esquema de la Unidad de Ensayo usada en Montevideo



Las ideas expresadas por los autores de los artículos firmados pertenecen a los mismos y no reflejan necesariamente las de la UNESCO.