



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN REACTOR MBR PILOTO PARA EL TRATAMIENTO Y REUSO EN RIEGO DE EFLUENTES DE HOTEL

Ma. Lucía Póppolo Carrocio, M.Sc. Ing. Química (*)

IHE-Delft (Delft, Países Bajos) & Latitud (Montevideo, Uruguay)

Ingeniera Química egresada de la Udelar en el año 2016. En 2018 finaliza maestría doble titulación Univalle- IHE-Delft, en Ingeniería Sanitaria. Actualmente trabaja en ANCAP, en el área de operación y suministro de Gas Natural.

Prof. Carlos Madera, Ph.D., M.Sc.

Universidad del Valle, Cali, Colombia

Héctor García, Ph.D., M.Sc.

IHE Delft, Delft, Países Bajos

Tineke Hooijmans, Ph.D., M.Sc.

IHE Delft, Delft, Países Bajos

Diana Miguez, Ph.D., M.Sc.

Latitud, Montevideo, Uruguay

TEMA: 1

POLÍTICA O PLAN NACIONAL: Plan Ambiental Nacional para un Desarrollo Sostenible



(*): J.E. Rodó 1824/403 – Montevideo – 11200 – Uruguay – Tel.: (+598) 94292972 – e-mail: mloppolo@gmail.com

RESUMEN

Con el objetivo de promover y contribuir al desarrollo sostenible del turismo y la industria hotelera en Uruguay se estudió la aplicación de un bioreactor de membrana aerobio piloto (MBR) para tratar aguas residuales de hotel, con el fin de reutilizarlas para riego en campos de golf. Las eficiencias de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) fueron de 86% a 98%, y la concentración promedio de DQO en el permeado fue 34 mg/L. Para la remoción de amonio se alcanzó una eficiencia promedio de 94% (1,9 mg N/L). En el reactor no se promovió la remoción de fósforo ni de nitratos, ya que estos compuestos eran de interés para la irrigación del suelo. Comparando la calidad del permeado con los estándares internacionales publicados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la reutilización de efluentes en áreas urbanas, el permeado cumplió con todos los valores establecidos. Desde un punto de vista agronómico, el permeado no presentó riesgos de salinización del suelo. Además, el efluente del hotel podría cubrir el 55% del nitrógeno y el 100% del fósforo necesario para mantener los greens del campo de golf (6.000 m²). Si se escala el proyecto a las condiciones de operación del hotel (32 m³/d de efluente), el costo de inversión requerido para montar una planta MBR sería 120.804 USD y los costos operativos serían 8.623 USD anuales (1,3 USD/m³ de permeado tratado). En este caso de estudio, en el cual el hotel tiene dónde disponer el efluente, su calidad cumple con la normativa vigente y el reuso más factible del efluente sería para riego, no resulta rentable implementar una planta MBR. Sin embargo, bajo otros escenarios, esta tecnología podría ser rentable y competitiva con otros sistemas de tratamientos de efluentes.

Palabras clave: efluentes domésticos, hotel, MBR, reuso, riego

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo resume una investigación que se condujo en el marco de una tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria en un programa doble titulación con la Universidad del Valle (Colombia) e IHE Delft (Holanda), donde se estudió la aplicabilidad de la tecnología MBR para reuso de efluentes en el sector hotelero. A continuación se resumen las principales características y conclusiones del trabajo



X Congreso Nacional de AIDIS

Desafíos Ambientales: Estrategias Integrales y Acciones Coordinadas

28 y 29 de agosto 2019

Cámara Mercantil de productos del país



ANTECEDENTES

Uruguay tiene gran disponibilidad de recursos hídricos y la escasez de agua no es una amenaza a corto plazo. El índice de stress hídrico en el país es menor al 10% (Bordon 2017) y la cantidad de agua interna renovable per cápita es 28.000 m³, casi cinco veces más que el promedio mundial (The World Bank, 2014).

Por otro lado, el uso irresponsable de recursos naturales y la falta de un estricto control ambiental llevaron a un serio deterioro de la calidad del agua en el país. Actualmente, el 70% de los principales cuerpos de agua presentan eutrofización y el 40% de ellos tienen alta biomasa y/o concentraciones nocivas de fitoplancton (Kruk et al., 2013). A su vez, en los últimos años hubieron episodios de contaminación de agua en la costa este del país, comprometiendo la seguridad de suministro de agua potable en alta temporada, en una de las ciudades más turísticas del país (2016).

Respecto al turismo, en el 2015 este representó un 7,1 % del PBI y es la principal fuente de divisas al país (URUGUAYXXI 2017). En los últimos 10 años, el sector ha venido creciendo en promedio un 6% anual y se han invertido más de 1500 millones USD en la industria hotelera (Puig 2017). De acuerdo con el Plan Nacional de Turismo Sostenible 2030, Uruguay busca impulsar el sector a través de un desarrollo sostenible y dentro de los objetivos específicos están: promover y apoyar el uso de recursos renovables y tecnologías amigables con el medio ambiente, planear el desarrollo del sector teniendo en cuenta las áreas de protección nacional y gestionar responsablemente las inversiones, teniendo en cuenta su impacto en la economía, el medioambiente y la sociedad (MINTURD 2009).

JUSTIFICACIÓN

Los recursos hídricos en Uruguay se han ido deteriorando debido al mal ejercicio de actividades agroindustriales y al vertido de efluentes no tratados. Esto ha afectado regiones naturales atractivas para el turismo, una de las principales actividades económicas del país.

Para alcanzar un desarrollo sostenible en el turismo, es necesario implementar tecnologías de tratamiento eficientes, que aseguren una buena calidad de vertido, prevengan la contaminación de cursos de agua y minimicen los riesgos para la salud.

La tecnología MBR parece ser apropiada para el sector debido a su tamaño compacto y su capacidad para operar con cargas variables y asegurar una alta calidad de agua. Además, el potencial que tiene esta tecnología para la reutilización de agua la hacen una alternativa atractiva para el sector hotelero, donde el consumo de agua per cápita es más de dos veces el consumo doméstico (Cremona and Saliba 2012). A su vez, la implementación de nuevas tecnologías que optimicen el uso del agua está alineada con los objetivos del Plan Nacional de Turismo Sostenible 2030.

OBJETIVO PRINCIPAL DE INVESTIGACIÓN

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar a escala piloto el desempeño de un biorreactor aireado de membrana (MBR) para tratar efluentes provenientes de hoteles y verificar la calidad de vertido para reuso en riego de campos de golf.

MATERIALES Y MÉTODOS

REACTOR PILOTO MBR

Para la investigación se utilizó un reactor piloto de acero inoxidable de la compañía Almes-eko Co., diseñado para tratar 1 m³/d de efluente (flujo constante) y operar a una concentración de sólidos entre 8 y 12 mg/L.

El equipo tiene dos compartimientos principales, uno anóxico para denitrificar y uno aerobio, para nitrificar. En la parte aireada se encuentran un difusor de burbuja fina, un sistema de aireación de burbujas gruesas para el cuidado de las membranas, una bomba de recirculación y las membranas de microfiltración (área total de filtrado 6,6 m² y un tamaño de poro de 0,4 μm). El equipo está conectado a un PLC que controla a la bomba de alimentación en función de los niveles de agua en el reactor, la presión de filtrado, el régimen de aireación y el régimen de recirculación (Figura 1).

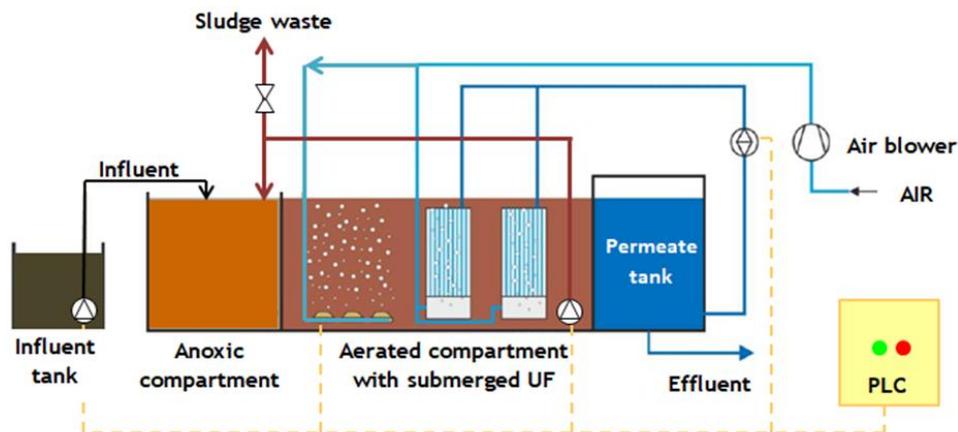


Figura 1 Diagrama de operación del MBR

LOCALIZACIÓN DEL REACTOR

La investigación se llevó a cabo en alta temporada (de enero a marzo) en un hotel 5 estrellas ubicado en el litoral del país. El hotel tiene una capacidad de 200 huéspedes y su consumo de agua potable per capita es de 270 litros. Los efluentes generados, aprox. 60% del consumo de agua, se tratan en un sistema de lodos activados convencional y luego se disponen por infiltración al terreno. Además, el hotel consume hasta 15.000 m³/mes de agua de tajarar para regar los campos de golf.

En cuanto al reactor, éste se ubicó a continuación del tanque de equalización de la planta de tratamiento del hotel, para así recibir la misma agua que recibe el sistema de lodos activados actual.

OPERACIÓN DEL REACTOR

El caudal promedio de operación fue 1,87 m³/d y el influente se caracterizó como un efluente doméstico de carga media (Tabla 1).



Tabla 1 Caracterización del influente

Parámetros	Valor	Parámetros	Valor
pH	6,6	Nitrógeno Soluble (mg N/L)	45
Temperatura(°C)	28	TKN (mg/L)	49
DQO total (mg/L)	417	Amonio (mg N/L)	39
DQO soluble (mg/L)	262	Fósforo Total (mg P/L)	14
DBO5 total (mg/L)	258	Sólidos Suspendidos Totales (SST) (mg/L)	50
Nitrógeno Total (mg N/L)	51	Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) (mg/L)	38

Debido a la baja concentración de SST en el reactor, durante los dos meses de operación no hubo purga de lodos y la concentración final de SST alcanzada fue 2,8 g/L. La temperatura de operación promedio fue 26,5 °C, el pH fue 6,54 y el oxígeno disuelto (OD) 3,5 mg/L.

Las membranas operaron con ciclos de 10 minutos de succión y un minuto de retrolavado. El flujo y la permeabilidad promedio de operación fueron 11,9 L/m².h y 73,9 L/m².h.bar respectivamente. Durante los dos meses que el reactor estuvo operativo nunca se alcanzó la presión máxima ni mínima de las membranas (0,40 bar) por lo que no fue necesario aplicar tratamientos químicos de limpieza.

El reactor operó sin recirculación para evitar la denitrificación y así mantener los nitratos en el permeado como fertilizantes para el riego.

ANÁLISIS Y MUESTREO

Para evaluar el desempeño del reactor, del influente y efluente se analizaron, una vez por semana, los siguientes parámetros: DQO, nitratos, nitritos, amonio, nitrógeno total, fosfato, fosforo total, temperatura y pH. También se hicieron dos análisis de DBO₅ y tres análisis de E.Coli, Coliformes Fecales y Coliformes Totales.

Del influente también se analizó la concentración de SST y SSV (tres veces), y la concentración de calcio, magnesio y sodio (una vez).

Otros parámetros que se analizaron en el permeado para evaluar su calidad agronómica fueron: turbiedad (cinco veces), conductividad (tres veces), boro (una vez), cloro total y cloruros (dos veces), carbonato de calcio (una vez) y sulfuros (2 veces).

Los mismos parámetros que se analizaron en el permeado también se analizaron dos veces en el efluente de salida del hotel y en el agua que utilizan para el riego del campo de golf.

Para el monitoreo del reactor, se analizó una vez por semana el contenido de SSV y SST, pH y temperatura del compartimiento aireado.

Los análisis de DQO, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, TN, TP, y PO₄³⁻ se realizaron con test kits y el espectrofotómetro Spectroquant® Move 100. El contenido de sólidos se midió de acuerdo al "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" y el resto de los parámetros fueron analizados en los laboratorios del LATU.



DISCUSIÓN Y RESULTADOS

DESEMPEÑO DEL REACTOR

Se analizaron las eficiencias de remoción respecto a la carga orgánica, los nutrientes y el contenido de patógenos.

En cuanto a las eficiencias de remoción de DQO total, las mismas estuvieron entre un 86% y un 98%, y la concentración promedio en el permeado fue 34 mg/L (Figura 2). Respecto a la DBO₅, la concentración promedio alcanzada fue 17 mg/L y la eficiencia de remoción promedio fue 94%. Si se comparan estos valores con las eficiencias de remoción alcanzadas en la planta de tratamiento convencional del hotel, éstos son entre un 34% y 40% mayores. Esto se debe principalmente a que en alta temporada, el caudal del efluente puede superar el caudal de diseño del sedimentador secundario del hotel y algunas partículas de sólido se escapan junto con el efluente.

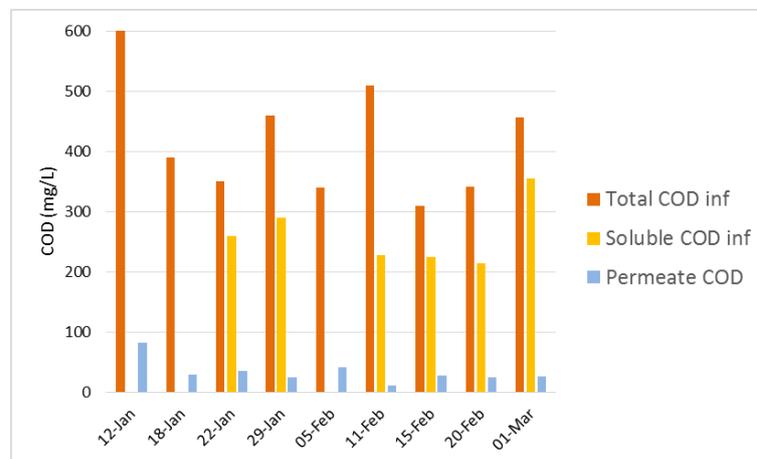


Figura 2 Eficiencias de remoción de DQO

Para el amonio, la eficiencia de remoción promedio fue 94% y la concentración media del permeado fue 1,9 mg N/L (Figura 3). La concentración media del nitrógeno total y de los nitratos fue 25 mg/L y 17 mg/L respectivamente.

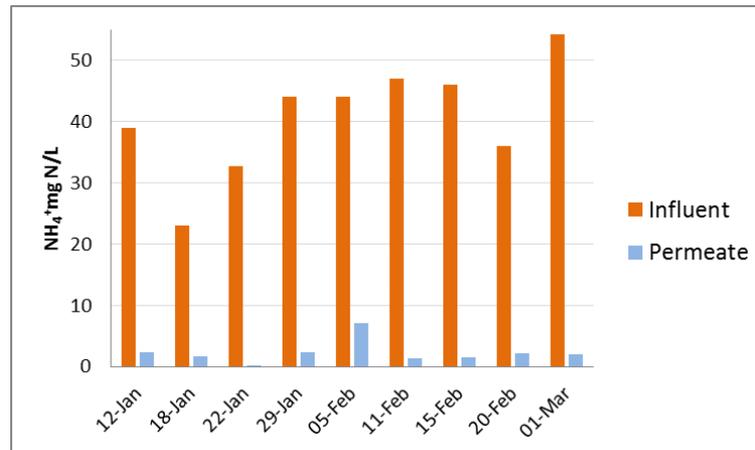


Figura 3 Eficiencias de remoción de amonio

Respecto al fósforo total, las eficiencias de remoción máximas, mínimas y promedio fueron 37%, 2% y 15%. Estos valores son inferiores a los reportados por bibliografía, donde las eficiencias de remoción van de 30% a 60% ((Libralato et al. 2009; Cunha 2015). La concentración promedio de fósforo total en el permeado fue 12,1 mg/L.

Considerando los parámetros microbiológicos, la concentración final de Coliformes Fecales fue 71,5 UFC/100 mL y 63,5 UFC/100 ml de E.Coli. Para ambos parámetros las eficiencias de remoción fueron de 3 a 4 unidades log₁₀.

CALIDAD DEL PERMEADO

A continuación se resumen los valores promedios de los principales parámetros analizados del permeado (Tabla 1):

Tabla 2 Caracterización del permeado

Parámetros	Permeado	Parámetros	Permeado
pH	6,64	P total soluble (mg PO4-P/L)	12,1
Temperatura (°C)	27,8	SST (mg/L)	0
DQO total (mg/L)	28	SSV (mg/L)	0
DQO soluble (mg/L)	28	Cl2 (mg/L)	<1,6E-5
DBO5 (mg/L)	17	Cloruro (mg/L)	46,9
N total (mg N/L)	25,0	Turbidez (NTU)	1,5
NO ₂ ⁻ (mg N/L)	0,772	OD (mg/L)	4,49
NO ₃ ⁻ (mg N/L)	17	Conductividad eléctrica (CE) (dS/m)	0,652
NH ₄ ⁺ (mg -N/L)	1,9	C.F. (UFC/100MI)	71,5
PO ₄ ³⁻ (mg P/L)	12,0	E. coli (UFC/100MI)	63,5

La calidad del permeado se comparó con los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud para el reuso de aguas domésticas (WHO, 2006) y se comprobó que el permeado cumple con los requisitos

para irrigación de áreas verdes (parques, plazas o campos de golf) , sin presentar riesgos para la salud de los usuarios del hotel.

A su vez, el permeado también cumple con excelentes cualidades estéticas (Figura 4).

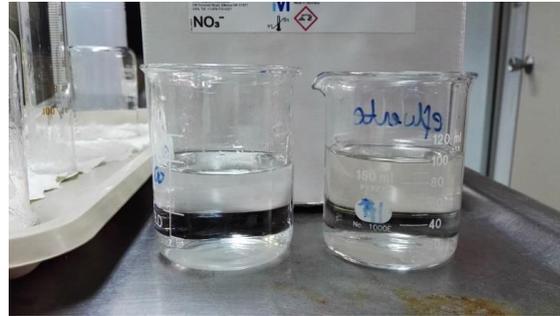


Figura 4 Agua potable (izquierda) vs. permeado (derecha)

Respecto a las características agronómicas del permeado, éstas se compararon con los valores recomendados para irrigación de césped (Landschoot) y también con la clasificación de aguas de riego del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP (2003)). A continuación se presentan los resultados (Tabla 1):

Tabla 3 Parámetros agronómicos del permeado

Parámetros	Permeado			Valores recomendados para irrigación de césped	Lineamientos uruguayos para irrigación (Clase 1)
	Max	Min	Promedio		
pH	7.37	5.90	6.64	6-7	-
Bicarbonato (mg CaCO ₃ /L)		52.8*		<120	<250
CE (Ds/m)	0.693	0.611	0.652	0.31-0.78	<2
Na (mg/L)		37*		<70	
RAS		2.7*		<3	<6
Cloruro (mg/L)	51.9	41.9	46.9	<100	<150
Boro (mg/L)		<0.050*		<2	

*Un único análisis pudo realizarse

Analizando los resultados, a excepción del pH, todos los parámetros cumplen con los límites establecidos y el permeado no comprometería las condiciones del suelo.

Si se compara la calidad el agua del permeado con la calidad del agua de irrigación que actualmente utiliza el hotel, el permeado presenta mejores características porque tiene mayor contenido de fósforo y nitrógeno (1,8 mg P/L vs 12.1 mgP/L y 1mg N/L vs. 25 mg N/L) y menor contenido de coliformes fecales (1800 UFC/100mL vs 71.5 UFC/100mL).



Si se compara el caudal diario de efluente generado (en promedio 18 m³/d) con la demanda de agua total para regar el campo de golf (500 m³/d), el volumen de efluente es despreciable y el ahorro en el consumo de agua es insignificante.

Por otro lado, respecto a la demanda de nutrientes del campo de golf, actualmente solo se fertilizan los greens (6.000 m²) y el efluente del hotel podría cubrir el 55% del nitrógeno y el 100% del fósforo necesario para su mantenimiento.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para determinar la viabilidad económica de implementar la tecnología MBR dentro del hotel, se diseñó una planta de tratamiento MBR a escala (caudal máximo de 32 m³) y se estudiaron los costos y beneficios del proyecto.

El costo total de inversión se calculó en 120.804 USD y se consideraron los costos de construcción (compra de membranas, bombas, sistema de aireación, costos electrotécnicos, construcción de tanques) más un 47% de overhead debido a impuestos (22%), imprevistos (10%) y costos de ingeniería (15%).

En cuanto a los costos operativos, el monto anual es de 8.623 USD, y tiene en cuenta los costos de aireación (60%), de disposición de lodos (4%), de productos químicos (1%), mantenimiento (6%) y los honorarios de un operador (29%). El costo por volumen de agua tratado es 1,3 USD/m³.

Si se compara el consumo de energía eléctrica de la planta MBR con el consumo del lodos activados convencional, ésta consume un 39% más de energía. Sin embargo, ese incremento representa solo un 0,8% del consumo total de energía eléctrica del hotel.

Comparando la generación de lodos, el tratamiento convencional genera 4 veces más lodo que un sistema MBR, lo cual representa 1.148 USD anuales (disposición por barométrica).

Respecto a los ahorros en fertilizantes, si los greens se regaran con el permeado se ahorrarían 478 kg/año y 78kg/año de sulfato de amonio y superfosfato triple respectivamente, lo cual solo representa 270 UDS anuales (3% de los costos operativos del MBR).

Considerando que en este caso la planta de tratamiento del hotel cumple con la normativa ambiental vigente, instalar una planta MBR no es económicamente rentable debido a su costo de inversión y los mayores costos de operación.

CONCLUSIONES

Se concluye que los reactores MBR son una alternativa confiable para asegurar una excelente y constante calidad de agua en el efluente. Al tratar efluentes de hotel se alcanzaron eficiencias de remoción de DQO y amonio de 93% y 94% respectivamente. Además, a excepción del fósforo, todos los parámetros cumplen con los límites establecidos para vertido a curso de agua.

Comparando la calidad el permeado con los estándares internacionales publicados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la reutilización de efluentes en áreas urbanas, se concluye que el permeado es una fuente de riego segura para los usuarios del hotel.

Considerando las características agronómicas del permeado, éste no presenta riesgos de salinización del suelo y podría cubrir el 55% del nitrógeno y el 100% del fósforo necesario para mantener los greens del campo de golf.



Por otro lado, la tecnología MBR no resulta una alternativa competitiva ya que tiene mayores costos de aireación que tecnologías convencionales y un alto costo de inversión. A su vez, las exigencias ambientales actuales y la falta de incentivos que promuevan la reutilización del agua tampoco favorecen a la difusión e implementación de esta tecnología.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bordon A (2017) Emerging Risks in Latin America.
2. Cremona M, Saliba G (2012) Water Consumption Benchmarks – a step towards reduced consumption.
3. Cunha N (2015) Evaluation of a MBR for treating slaughterhouse wastewater in Evaluation of a MBR for treating slaughterhouse wastewater in Montevideo , Uruguay. UNESCO-IHE
4. Kruk C, Suárez C, Ríos M, et al (2013) Análisis Calidad de Agua en Uruguay. 9.
5. Landschoot P Irrigation Water Quality Guidelines for Turfgrass Sites — Center for Turfgrass Science — Penn State University. <http://plantscience.psu.edu/research/centers/turf/extension/factsheets/water-quality>. Accessed 10 Mar 2018
6. Libralato G, Volpi Ghirardini A, Avezù F (2009) Performance assessment of AS-SBR and UF-MBR for hotel wastewater treatment. Water Sci Technol 60:1701–1709. doi: 10.2166/wst.2009.027
7. MGAP (2003) Resolución MGAP –14/05/2003: Aprobación de normas técnicas sobre el uso del agua para riego.
8. MINTURD (2009) Plan Nacional de Turismo Sostenible 2009-2020.
9. Puig E (2017) Uruguay recibió U\$S 1.500 de inversión en hotelería. <http://www.radiomontecarlo.com.uy/2017/08/25/nacionales/uruguay-recibio-us-1500-de-inversion-en-hoteleria/>. Accessed 2 Oct 2017
10. The World Bank Renewable internal freshwater resources per capita (cubic meters) | The World Bank Data. <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC>. Accessed 3 Oct 2017
11. URUGUAYXXI (2017) Investment opportunities TOURISM.
12. WHO (2006) Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater.
13. (2016) Una cuarta parte de la Laguna del Sauce está cubierta de cianobacterias | El Observador. <http://www.elobservador.com.uy/una-cuarta-parte-la-laguna-del-sauce-esta-cubierta-cianobacterias-n869922>. Accessed 3 Oct 2017