

POTENCIAL DE REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES NO DOMÈSTICAS DE UNA MINA DE CARBÒN

REUSE POTENCIAL OF NON-DOMESTIC WASTEWATER FROM A COAL MINE

POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO DE ESGOTOS NÃO DOMÈSTICOS DE UMA MINA DE CARVÃO

Darkys Geryeli Devia Torres¹

Walter Murillo Arango²

RESUMEN

El reúso de las aguas residuales industriales ha tomado relevancia en los últimos años, dada importancia de este recurso y la necesidad de su uso racional. Este estudio evaluó el potencial reúso de las aguas residuales no domesticas (ARnD) generadas en la explotación de la mina de carbón Aurora 1, ubicada el municipio de Sardinata, Norte de Santander. Se partió del diagnóstico del área delimitada por la vereda El Líbano y de las características de las ARnD generadas, analizando posteriormente los aspectos legales, técnicos y de percepción social que influyen en el reúso. Se encontró que la actividad agropecuaria es predominante en la zona y que el agua residual presenta concentraciones de Al, Be, Co, V, B, Cr, Hg, coliformes fecales y totales superiores a las permitidas por la norma para el uso agrícola, lo que implicaría la implementación de etapas de sistemas de tratamiento secundarias y terciarias; adicionalmente, se evidenció buena percepción social frente al eventual reúso por parte de la comunidad que a través de la aplicación del Método de Valoración Contingente (MVC) manifestó en su totalidad, la disposición a usar el agua (DAU) y una disposición a pagar (DAP) promedio de \$13.266/mes, sin embargo, desde el ámbito legal se encontró que existen aún limitaciones y falta de incentivos al reúso; aspectos que tendrán que tenerse en cuenta en la implementación de un proyecto para cualquier escenario de reúso identificado.

Palabras clave: explotación de carbón; drenajes mineros; recurso hídrico; sostenibilidad; uso agrícola.

¹ Universidad de Manizales_Manizales_Colombia_ Contacto: dgdevia93723@umanizales.edu.co

² Universidad de Manizales_Manizales_Colombia_ Contacto: wmurillo@umanizales.edu.co

ABSTRACT

The reuse of industrial wastewater has become relevant in recent years, given the importance of this resource and the need for its rational use. This study evaluated the potential reuse of non-domestic wastewater (NDWW) generated in the exploitation of the Aurora 1 coal mine, located in the municipality of Sardinata, Norte de Santander. It started with the diagnosis of the area delimited by the village of El Libano and the characteristics of the NDWW generated, after this, analyzing the legal, technical and social perception aspects, that influence its reuse. It was found that agricultural activity is predominant in the area and the wastewater has concentrations of Al, Be, Co, V, B, Cr, Hg, fecal and total coliforms higher than those allowed by the normativity for agricultural use, which would imply the implementation of secondary and tertiary stages for treatment systems; additionally, a good social perception was evidenced regarding the eventual reuse by the community, which through the application of the Contingent Valuation Method (CVM) manifested in its entirety the willingness to use the water (WTU) and a willingness to pay (WTP) average of \$13,266/month, however, from the legal field it was found that there are still limits and lack of incentives for reuse; aspects that will have to be taken into account in the implementation of a project for any reuse scenario identified.

Keywords: coal exploitation; mining drainage; hydric resource; sustainability; agricultural use.

RESUMO

A reutilização das águas residuais industriais tornou-se relevante nos últimos anos, dada a importância deste recurso e a necessidade de seu uso racional. Este estudo avaliou a potencial reutilização das águas residuais não domésticas (ARnD) geradas na exploração da mina de carvão Aurora 1, localizada no município de Sardinata, Norte de Santander. O ponto de partida foi o diagnóstico da área delimitada pela vila de El Líbano e as características do ARnD gerado, analisando posteriormente os aspectos legais, técnicos e de percepção social que influenciam a reutilização. Verificou-se que a atividade agrícola é predominante na área e que as águas residuais apresentam concentrações de Al, Be, Co, V, B, Cr, Hg, coliformes fecais e totais superiores às permitidas pela norma para uso agrícola, o que implicaria na implementação de etapas do sistema de tratamento secundário e terciário; além disso, houve evidência de uma boa percepção social da eventual reutilização pela comunidade que, através da aplicação do Método de Avaliação Contingente (MAC), expressou sua total disposição para usar a água (DUA) e uma

disposição média de pagamento (DMP) de \$13. 266/ mês, no entanto, do ponto de vista jurídico, verificou-se que ainda existem limitações e falta de incentivos para a reutilização; aspectos que deverão ser levados em consideração na implementação de um projeto para qualquer cenário de reutilização identificado.

Palavras-chave: exploração de carvão; drenagem de mineração; recurso hídrico; sustentabilidade; uso agrícola.

INTRODUCCIÓN

Ante el crecimiento constante de la demanda hídrica, se ha consolidado el reúso de agua proveniente de diferentes actividades industriales como una forma de mejorar la eficiencia de su uso, generando otras alternativas de uso (Zandaryaa & Jiménez Cisneros, 2017). Se considera que un aumento en la reutilización de aguas residuales, como se exhorta en la meta 6.3 de los ODS apoyaría la transición a una economía circular, además de contribuir indirectamente al logro de otros objetivos de desarrollo sostenible (Cordeiro & Connor, 2017). La creación de un entorno propicio para el cambio de paradigma en la gestión de aguas residuales dirigido al reúso incluye: alternativas técnicas, marcos jurídicos e institucionales, posibilidades de financiamiento, desarrollo de conocimiento, reducción de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente y promoción de la aprobación social (Connor et al., 2017).

La explotación de carbón genera aguas residuales producto de la infiltración de acuíferos y del agua lluvia a través de las labores, dichas aguas pueden ser de naturaleza básica, ácida o casi neutral dependiendo de los minerales asociados al macizo; en los últimos años se ha planteado el reúso del agua residual minera como un mecanismo de producción más limpia; para esto, se deben tener en cuenta las características del agua, el tipo de tratamiento aplicado, la calidad requerida para un uso posterior y las condiciones socioeconómicas y ambientales de la zona (Manga et al, 2001, citado por Villa, 2020).

Colombia, es el primer productor de carbón de América Latina y uno de los diez primeros exportadores a nivel mundial (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2018) y en los últimos años a partir de la generación de normas como la resolución 1256 del 2021 ha buscado promover el reúso de las aguas residuales; lo que implicaría el reúso de las aguas residuales mineras como una solución al impacto ambiental causado por las mismas y a la demanda de agua en sectores rurales. En este contexto, la investigación que aquí se presenta tuvo como objetivo analizar el reúso de las aguas residuales mineras, tomando como estudio de caso la mina Aurora 1, ubicada en la zona rural del municipio

de Sardinata, Norte de Santander; y considerando los aspectos técnicos, legales y socioeconómicos que influyen en la potencialidad de la reutilización.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El proyecto mina Aurora 1 se desarrolla en el predio con nombre La Aurora con un área de 77,49 Ha, ubicado en las coordenadas 8° 8' 47,90''N; 72° 44'42,81'' O en la vereda El Líbano, del municipio de Sardinata, Norte de Santander

Diagnóstico de la zona de estudio

Reconocimiento del manejo actual de las Aguas Residuales no Domésticas. A través de una visita al área minera, la revisión de los planos del sistema facilitados por el titular minero y la aplicación de una entrevista semiestructurada al operador minero, se identificaron los aspectos relacionados con las ARnD: generación, evacuación, manejo en superficie, tratamiento, vertimiento/uso final y perspectivas sobre el manejo actual y futuro.

Diagnóstico del contexto socioeconómico del área. Se identificaron 19 grupos familiares en la vereda, de los cuales se seleccionaron como muestra dirigida 16 de ellos bajo los criterios de permanencia en el área y disposición a participar en la investigación. El diagnóstico se realizó aplicando una encuesta exploratoria a los jefes de familia de los grupos familiares que conformaban la muestra; de estos 14 acudieron presencialmente y 2 de manera telefónica. La convocatoria fue realizada a través del presidente de la junta de acción comunal. Se obtuvo información relacionada con las características socioeconómicas de los grupos familiares de los participantes, su ubicación respecto al proyecto minero (a través de la aplicación de la herramienta de cartografía social), las actividades económicas realizadas y su relación con el recurso hídrico. La información fue utilizada como insumo para elaborar la encuesta aplicada dentro de la ejecución del método de valoración contingente en la fase 2 del proyecto.

Determinación de la calidad y cantidad de las ARnD

Se revisaron los informes de caracterización de los años 2018, 2020 y 2021 facilitados por el titular minero, de estos se extrajo la información relacionada con caudales y con los parámetros establecidos en la resolución 1256 del 2021; esta información se

complementó con la toma y análisis a través de laboratorio acreditado de tres muestras en las fechas: 18/11/2021, 01/03/2022, 14/05/2022, teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la norma de reúso, y con la medición de caudal durante los meses diciembre del 2021, enero, febrero, marzo y mayo del 2022.

Análisis del Potencial de Reúso de las ARnD

Análisis de los aspectos legales. Partió de una revisión de las normas e instrumentos a nivel nacional y municipal relacionadas con el reúso del agua, vertimientos y beneficios tributarios por implementación de proyectos ambientales, identificando la viabilidad legal de un proyecto de reúso bajo en el contexto de la zona de estudio, así como las limitantes y oportunidades bajo los estándares legales actuales.

Análisis técnico. Se basó en la búsqueda bibliográfica de alternativas de tratamiento teniendo como puntos de partida los resultados de la caracterización y los potenciales usos y usuarios para el agua tratada.

Análisis socioeconómico. Se utilizó el método de valoración contingente para evaluar la percepción de los habitantes de la vereda sobre el reúso de las aguas residuales a través de su DAP (disponibilidad a pagar); se encuestaron 15 de los 16 participantes de la encuesta inicial, de acuerdo a su disposición a participar. Los datos seleccionados corresponden a aquellos considerados relevantes de la primera encuesta (Edad, Sexo, personas en el hogar, percepción de la cantidad de agua, percepción de la calidad de agua), los datos de la segunda encuesta (Ingreso mensual en pesos, pago actual por el servicio de agua, disposición a usar el agua residual, tipo de uso) y la distancia aproximada al punto de vertimiento (taller de cartografía social). Para el procesamiento de los datos se usó el programa estadístico IBM SPSS Statistics Versión 25, realizando análisis descriptivo de cada una de las variables dependientes y la variable independiente (DAP), por otra parte, el análisis inferencial se realizó a través de pruebas de hipótesis no paramétricas utilizando el coeficiente de Spearman para las variables escalares y la prueba de Kruskal- Wallis en el caso de las variables nominales.

Identificación de los escenarios de reúso

A partir de los resultados obtenidos durante el análisis y tomando como base los parámetros propuestos para el reúso de las aguas residuales planteados por el Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua [CETA] (como se citó en Villa, 2020), se identificaron los posibles escenarios de reúso del agua residual teniendo en cuenta: 1.

Definición de objetivos de reúso de las aguas residuales, 2. Discriminación del consumo, 3. Análisis de la compatibilidad entre la generación y el destinatario (conexión y disponibilidad hidráulica, requerimiento de tratamiento y disponibilidad de tecnología), 4. Posibilidades de sinergia (Con efluentes tratados y sin tratar, con otros establecimientos industriales, agrícolas y de servicios) y 5. Fuentes de financiación.

RESULTADOS

Diagnóstico de la zona de estudio

Aguas residuales no domésticas generadas. El manejo actual de los drenajes consiste en la implementación de un sistema de desagüe compuesto por una serie de 4 tanquillas y 9 motobombas que extraen los drenajes a superficie donde se hacen pasar por un sistema de tratamiento primario para finalmente ser descargados en una quebrada denominada La Sonora, ubicada a aproximadamente 700 m de la bocamina (C.I Minas La Aurora, 2019), la cual es afluente de la quebrada La Chacona que descarga al Río Sardinata, en la microcuenca del mismo nombre (Alcaldía de Sardinata, 2001).

A través de los años, de acuerdo con el administrador minero, se ha percibido un aumento en el caudal generado, que ha causado inundaciones y que llevó a implementar el sistema de bombeo y la posterior ampliación del sistema de tratamiento, además, este aumento es más evidente en épocas de lluvia, donde las motobombas implementadas llegan a ser usadas de manera conjunta (J. Cristancho, comunicación personal, 2 de abril del 2022). Sin embargo, a pesar de que se pudo observar la variación de los caudales de aguas residuales durante las diferentes mediciones realizadas, encontrándose un caudal mínimo de 2,608 L/s, registrado el día 29 de enero del 2022 y un caudal máximo de 37, 715 L/s, registrado el día 23 de diciembre del 2021, con un promedio total de 16,891 L/s; no se puede asegurar su relación con la variación de precipitaciones en el área, ya que de acuerdo con las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2022) los meses históricamente más lluviosos son octubre y noviembre, mientras los más secos corresponden a junio y julio, siendo ninguno de estos meses en los que se registraron los caudales mínimo y máximo de aguas residuales.

En cuanto a las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual, en la tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización y su comparación con la norma actual de reúso.

Tabla 1. Caracterización de los drenajes mineros y comparación con la normatividad actual para reúso.

Parámetro	Unidades	Límites establecidos para reúso agrícola	Promedio/Rango	Desviación estándar
pH	Unidades de pH	*4,5-9	7,109	0,191
Nitratos	mgN-NO3-)/L	**11	1,126	0,681
Sulfatos	mg SO4 2-/L	**500	176,500	142,830
Arsénico	mgAs/L	*0,1	<0,0025-<0,01	
Cadmio	mg Cd/L	*0,01	<0,01	
Cinc	mg Zn/L	*2	<0,02- 0,254	
Cobre	mg Cu/L	*0,2	<0,04-<0,15	
Cromo	mg Cr/L	*0,1	<0,10-<0,11	
Hierro	mg Fe/L	*5	0,779	0,198
Mercurio	mgHg/L	**0,001	<0,001-<0,002	
Niquel	mg Ni/L	*0,2	<0,001-<0,15	
Plomo	mg Pb/L	*5	<0,01-<0,05	
Conductividad	Us/cm	**1500	441,185	600,468
Fenoles totales	mg/L	**0,2	<0,060-<0,100	
Hidrocarburos totales	mg/L	**1,0	<0,2-****<1,40	
Cianuro libre	mg/L	**0,2	<0,05	
Cianuro total	mg CN-/L		<0,1-<0,2	
Cloruros	mg Cl-/L	**300	<4-54	
Fluoruros	mg F-/L	**1,0	0,183-<0,2	
Sodio	mg Na/L	**200	46,350	22,840
Antimonio	mg Sb/L	**0,1	<0,02	
Cloro Total Residual	mg Cl2/L	**<1,0	<0,1-1,05	
Aluminio	mg Al/L	*5	<0,5-5,96	
Berilio	mg Be/L	*0,1	<0,02-0,58	
Cobalto	mg Co/L	*0,05	<0,03-0,601	
Litio	mg Li/L	*2,5	0,01- <0,02	
Manganeso	mg Mn/L	*0,2	0,200	
Molibdeno	mg Mo/L	*0,01	<0,005-0,006	
Selenio	mg Se/L	*0,02	<0,0025-<0,005	
Vanadio	mg V/L	*0,1	<0,10-0,335	
Coliformes Fecales	NMP/100 ML	*< 1000	<1,0-5000	
Coliformes totales	NMP/100 ML	*<5000	<1,0-24000	
Boro	mg B/L	*0,3-0,4	<0,25-0,705	
Carbonato sódico residual	meq/L	***	5,03	
Carbonatos	mg/L	***	<5,00	
Porcentaje de sodio Posible (PSP)	%	***	31	
Relación de Absorción de Sodio RAS		***	<0,68	
Salinidad Efectiva	meq/L	***	3	
Salinidad Potencial	meq/L	***	3,1	

* Según Artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 del 2015 ** Según artículo 5 de la resolución 1256 del 2021 *** Se establece obligatoriedad, pero no límites **** Limite del método de cuantificación <1,40.

Contexto socioeconómico del área de estudio

De acuerdo a la encuesta realizada a los habitantes de la vereda, las actividades económicas predominantes en el área corresponden a la ganadería realizada por el 56,5%

de los encuestados y la agricultura con una participación del 39,1 %, con un 4,3% restante que manifestó usar el área solo para vivienda (Figura 1), en conformidad, se identificaron los tipos de ganadería: bovina, porcina, equina y avícola y entre los cultivos agrícolas: cacao, plátano, yuca, maíz, aguacate, pasto y limón. Además de las actividades agropecuarias, se ubica en el área la Planta de gas La Florida, cuyas actividades se encuentran suspendidas temporalmente por lo que no fue posible incluirla en el estudio. Por otro lado la mina Aurora 1 es la única presente en la vereda y a través de la entrevista al administrador minero se manifestó la intención de diversificar las actividades productivas incluyendo actividades agropecuarias en el área de la finca donde se desarrolla (J.Cristancho, comunicación personal, 2 de abril del 2022). En lo relativo a las fuentes hídricas, se identifican como principales abastecedoras, las quebradas La Aurora, La Concepción y La Arenosita, siendo esta última la que abastece al acueducto veredal del cual se provee el 68,7% de la población.

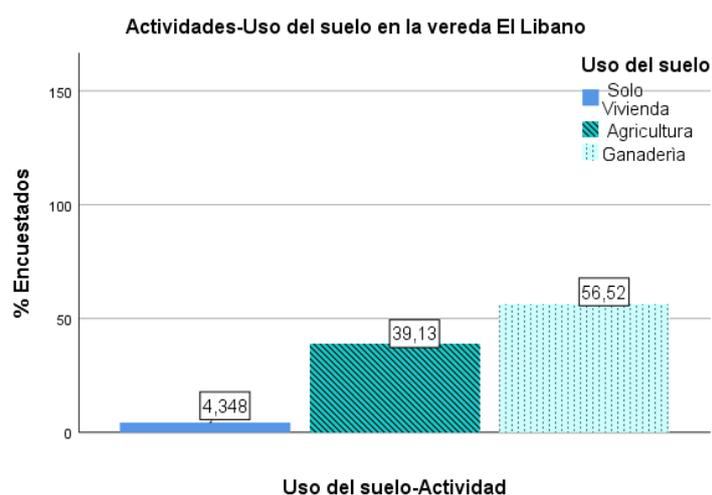


Fig. 1. Actividades realizadas por los habitantes de la vereda El Líbano en sus predios.

Potencial de reúso de los drenajes mineros

Aspectos legales

En Colombia se empieza a considerar el reúso del agua desde lo establecido en la Ley 373 del 1997, incluyéndose en posteriores Políticas generadas como la de Producción y Consumo Sostenible (2010), la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (2010) y finalmente la de Crecimiento Verde (2018); sin embargo al analizar la norma actual que regula el reúso de aguas residuales (Resolución 1256 del 2021) y que partió de un ajuste a la norma anterior (Resolución 1207 del 2014) se pueden observar limitantes al reúso,

inicialmente en cuanto a los usos permitidos (Uso agrícola y Uso Industrial), porque si bien en el caso de la zona de estudio pudiera ser aplicado en el riego agrícola, se desperdician otros posibles aprovechamientos como la descarga de sanitarios y limpieza de zonas comunes, cuyo punto más cercano de aprovechamiento serían las instalaciones de la propia mina. Por otro lado, se establece como permitido el uso industrial que no requiere parámetros de cumplimiento, sin embargo, en la zona solo hay una actividad industrial concerniente a la planta de gas La Florida, no incluida dentro del alcance de la investigación por la suspensión de sus actividades. En relación a los incentivos, en la actual norma no son incluidos, ni se hace articulación con los instrumentos económicos como la Tasa por Uso del Agua (TUA) y la Tasa Retributiva (TR); si bien un proyecto de reúso en la zona puede enmarcarse dentro de una inversión en control del medio ambiente como lo establece el art.1. del Decreto 3172 del 2003 al implicar una disminución en el área captada, falta claridad en la aplicación del instrumento.

Igualmente, el reúso dentro del contexto minero nacional está tomando relevancia a partir del proyecto “Mejoramiento de la competitividad para el Desarrollo del Sector Minero a Nivel Nacional” dentro del cual la Dirección de Minería Empresarial realizó los lineamientos de políticas de buenas prácticas para estandarizar, entre otros, los procesos relacionados con los Drenajes Ácidos Mineros (DAM), donde se establece como lineamiento la evaluación del reúso de los mismos dentro de la mina y los Procesos de Economía Circular, que incluye el reúso de aguas residuales dentro de la línea estratégica del potencial de generación de circularidad en la explotación. Se esperaría entonces que con esas iniciativas y con los resultados de proyectos de investigación como el presentado, se avance en temas como el acceso a subsidios y créditos, la creación de programas puntuales e incluso la reformulación de la normatividad; que faciliten la formulación de proyectos de reúso de aguas residuales mineras, que hasta el momento son viables legalmente pero aún encuentran impedimentos para su ejecución.

Análisis técnico del reúso

Tal y como se presenta en la tabla 1, las concentraciones promedio de Al, Be, Co, V, B, Cr, Hg, Coliformes fecales y Coliformes totales superan los límites establecidos para reúso agrícola de acuerdo a los estándares nacionales; pudiéndose identificar estos como los “elementos problema” y existiendo incertidumbre acerca del cumplimiento de los hidrocarburos totales debido al límite de cuantificación del método de análisis. Un análisis más detallado de los resultados fue realizado considerando las directrices para

interpretación de aguas de riego establecidas por Ayers & Wescot, 1987 para la FAO y las United States Environmental Protection Agency & Agency for International Development (EPA & USAID, 2012).

De acuerdo a Ayers & Wescot(1987), respecto al contenido de coliformes totales, las ARnD de la mina son aptas para irrigación de cereales, cultivos industriales, forrajes y árboles con irrigación por aspersión; los valores de RAS y la concentración de sodio no implican tampoco restricciones para el riego por aspersión de otro tipo de cultivos, por otro lado, la concentración de Boro se encuentra en un rango que puede afectar a cultivos sensibles (0,5- 0,75 mg/L) como el cerezol, el limonero y la cebolla, por fortuna, entre estos cultivos señalados por Ayers&Wescot(1987) no se mencionan los identificados en el área.

Por otro lado, según la (EPA & USAID, 2012) el agua podría ser toxica si el suelo presenta alta acidez, debido a la concentración de Al, toxica para plantas como la col y el frijol, debido a la concentración de Be y para el tomate, por su concentración de Co.

Se reconoce entonces, la selección de cultivos, de acuerdo a su sensibilidad, y la selección del sistema de riego, siendo el riego por aspersión el más acorde de acuerdo a los resultados, como aspectos imprescindibles a tener en cuenta para el reúso del agua con fines agrícolas.

Por otra parte, en la tabla 2, se consolidan los principales tratamientos encontrados en la literatura para la remoción de los elementos problema, en esta no se incluyen tratamientos basados en la precipitación de metales a través de la neutralización del agua, ya que de acuerdo con Masindi, et al. (2022), estos son eficientes en drenajes ácidos mineros (DAM) y las ARnD de Aurora 1 por su pH neutro y concentraciones bajas de metales corresponden a un drenaje minero de tipo circumneutral. Como factor común en las investigaciones sobre sistemas basados en la fitorremediación se mencionan las ventajas relacionadas con los costos, que son enunciadas principalmente en términos cualitativos, mientras que la desventaja principal se relaciona con el requerimiento de grandes áreas, que en el caso de estudio no sería una limitante, pudiendo ser una opción viable para el tratamiento. Sin embargo, de contarse con un mayor capital, los sistemas fisicoquímicos podrían generar también buenos resultados y podrían ser adquiridos a través de empresas especializadas; estas alusiones en torno a los costos asociados son de tipo cualitativo, ya que como se observa en la tabla 2, la mayoría de investigaciones consultadas no refieren valores que puedan tomarse de referencia, debido principalmente a la escala en la cual se

han realizado, así, es importante que a la implementación de un sistema de reutilización de las ARnD preceda un estudio de factibilidad.

Tabla 2. Tipos de tratamiento aplicados para la remoción de los contaminantes problema.

Tipo de Tratamiento	Referencia	Descripción	Sustancias de interés eliminadas	Costo
Fitorremediación	Guerrero, C. (1985)	Escala laboratorio. Empleo de <i>Eichhornia crassipes</i>	Cr, Cu, Hg, Ag.	N.R
	Carrión et al.(2012)	Empleo de <i>Eichhornia crassipes</i>	Acumulación en raíces de: Al, Cr, Co	N.R
	Ayala et al (2018)	Escala laboratorio. Tratamiento de flujo discontinuo. Empleo de : <i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Nymphoides humboldtiana</i> y <i>Nasturtium officinale</i> .	<u><i>Eichhornia crassipes</i></u> , CT (91,9%),CF (92,2%); <i>Nymphoides humboldtiana</i> CT (93,46%), CF (93,79%); <i>Nasturtium officinale</i> :CT (90,77%) CF (90,69%)	N.R
	García et al (2019)	Construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial usando <i>Phragmites australis</i> TRH= 3 d.	B (78%), Cr(36%)	N.R
	Belmer, N & Wright, I.A.(2018)	Estudio in situ. Estudio de bioacumulación de metales pesados del agua de mina en la vegetación ribereña <i>Acacias Rubida</i> .	En términos de bioacumulación: Al (22%), Be (335%) y Co (3060%).	N.R
	Kiiskila et al(2019)	Estudio a gran escala usando humedales flotantes con <i>Chrysopogon zizanioides</i>	Al (11%), Cr(21%)	N.R
	Lara, S y Navarro, R. (2017)	Estudio piloto in situ. Utilización de balsas flotantes con <i>Chrysopogon zizanioides</i> para el tratamiento de agua destinada a la agricultura. Estanque de 25 m x 15 mts.	B (19%-35%) T=5 d	US\$6489.82 /1 Ha.
Biorremediación	Jarvis, et al. (1999)	Implementación a escala real de un Humedal construido usando Una combinación de piedra caliza y tres tipos de estiércol. Q= 30 L/min-420L/min	Al= 45,7%	US\$17541.00
	Diloreto et al.(2016)	Estudio a gran escala. Implementación de Biorreactores con forma trapezoidal usando como sustrato con concha de mejillones. Identificación de <i>Desulfotomaculum acetoxidans</i> como organismo responsable de la eliminación.	Al (99%)	N.R
	López et al. (2020)	Fotorreactor de lecho fluidizado, usando carbón <i>activado granular inoculado con el consorcio microalga-cianobacterias (Desmodesmus maximus – Planktothrix pseudoaeruginosa)</i>	Cr (72%)	N.R

	Uster et al. (2014)	Biorreactores reductores de flujo ascendente con conchas de mejillones	Al(>90%)	N.R
	Molahid et al.(2018)	Escala laboratorio. Sustratos mixtos a base de ocre, escoria de acero y piedra caliza. SM1 (10% SMC,20 % de ocre, 30 % de escoria de acero y 40 % de piedra caliza) y SM2 (20 % de SMC, 30 % de ocre, 40 % de escoria de acero y 10 % de piedra caliza)	Al (> 97 %)	N.R
Adsorción	González et al(2017)	Escala laboratorio. Uso de Zeolitas modificadas con CaCl ₂ , NiCl ₂ y Aminopropyltrimethoxysilane (APS) para la remoción de boro de una solución preparada.	B (80%)	N.R
	Mamani et al (2019)	Escala laboratorio. Uso de carbón activado proveniente de la lenteja de agua con partículas de tamaño ≤ 2.094 mm ≥ 150.5 μ m. Muestras de agua de una zona con presencia de minería oro.	Hg(99,34%),	N.R
Filtración	Triana, 2018	Escala piloto. Filtración usando grava, zeolita, carbón activado y arena. carga hidráulica de 100 L/(m ² -d) por 60 días.	B= (96,6% carbón activado)	N.R

N.R=No reporta

Análisis socioeconómico del reúso

En relación a los datos sociodemográficos de los participantes, el usuario promedio es un hombre adulto joven, de clase media y con una familia conformada por cinco personas. En relación al uso del agua residual, el 100% de los encuestados estaría dispuesto a usar las aguas residuales no domésticas generadas por la mina Aurora 1; por otro lado, la variable *disposición a pagar (DAP)* que corresponde al monto, en pesos colombianos, que están dispuestos a pagar por mes tiene un valor promedio de \$13.266 con una desviación de \$8.416, y es ligeramente inferior al pago actual promedio por el uso del agua que es del \$15.533/mes. La distribución de los resultados está sesgada hacia la izquierda, lo que implica que la mayoría de los usuarios tuvo una disposición de pago inferior a la media (Figura 2).

En la tabla 3 y tabla 4 se presentan los resultados de correlación y significancia para las variables escalares y nominales respectivamente. En relación a la tabla 3 se evidencia que la DAP decrece con la edad de jefe de familia; crece con el número de personas en el hogar y la distancia al vertimiento. Sin embargo, la DAP no está relacionada con el ingreso mensual y si levemente con el monto de pago actual por el servicio de agua. Por otro lado, Los resultados plasmados en la tabla 4 permiten inferir, que la DAP solamente

podría diferir entre usuarios de acuerdo a su percepción de la cantidad de agua. El resto de los predictores no resulta significativo.

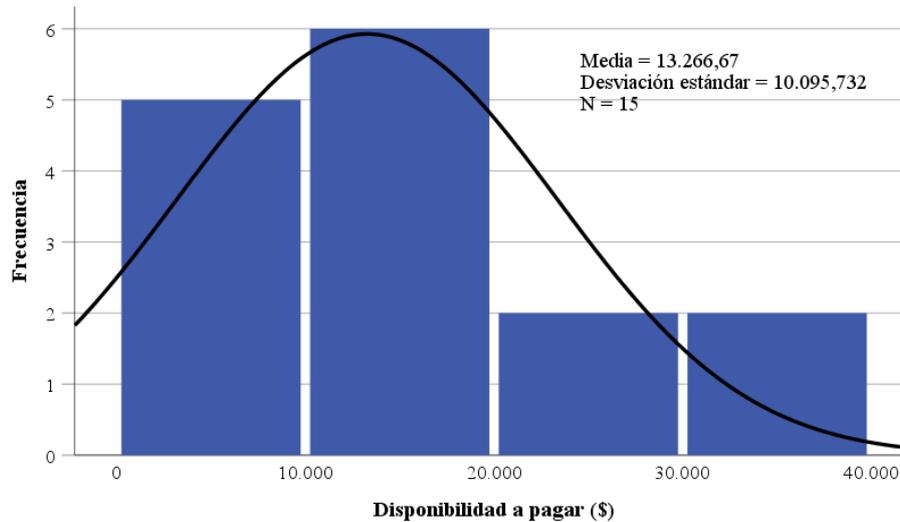


Fig. 2. Histograma de la disponibilidad a pagar de los encuestados.

Tabla 3. Prueba de Spearman entre DAP y variables escalares.

Variable	Edad	Personas en el hogar	Distancia al vertimiento	Ingreso mensual	Pago actual servicio agua
Coefficiente	-0,400	0,370	0,055	0,123	0,342
Significancia	(0,157)	(0,174)	(0,846)	(0,662)	(0,212)

Tabla 4. Contrastes de Kruskal-Wallis entre DAP y nominales.

Variable	Coefficiente H	Significancia
Sexo	0,921	0,337
Percepción cantidad de agua	2,385	0,303
Percepción calidad de agua	1,312	0,252
Tipo de uso		
<i>Consumo humano</i>	0,131	0,718
<i>Agricultura</i>	0,004	0,952
<i>Ganadería</i>	0,196	0,658
<i>Piscicultura</i>	1,480	0,224

En general, se puede decir que no existe correlación significativa entre ninguna de las variables independientes y la variable dependiente, a diferencia de estudios referentes como los realizados por Alcón et al (2010) que encontró correlación entre la DAP y la edad, ingreso, conocimiento del pago por agua y conocimiento del pago por tratamiento que tenían los entrevistados, Lanzaridou et al (2019) que encontró correlación con todas las variables insertadas en el modelo mientras y Deh-Haghi et al. (2020) que evidenció

correlación significativa entre la DAP con el nivel educativo y la información sobre el tema de los entrevistados, esta disparidad con los estudios de referencia puede deberse al tamaño de la muestra, ya los autores referenciados encuestaron a 352, 109 y 302 personas, respectivamente; en contraparte a las 15 personas encuestadas en esta investigación, debido al tamaño de la población. En este caso específico solo se puede inferir sobre la voluntad de la población y su percepción del reúso, identificándola como potenciales usuarios del recurso.

Escenarios de reúso

De acuerdo al análisis realizado se identificaron tres posibles escenarios de reúso: Escenario 1: Reúso interno, Escenario 2. Reúso Externo y Escenario 3. Reúso externo e interno, en la tabla 5 se presentan los principales aspectos a tener en cuenta en cada uno.

Tabla 5. Aspectos relacionados con cada escenario de reúso identificado.

Aspecto	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Objetivos del reúso	Riego agrícola dentro del área del proyecto en el marco de su diversificación productiva.	Abastecimiento de un distrito de riego para la comunidad de la vereda El Líbano.	Abastecimiento de un distrito de riego que surta a la mina y a la comunidad de la vereda
Discriminación del consumo.	Sujeto al cumplimiento de los límites establecidos en el art. 5. de la resolución 1256 del 2021.	Sujeto al cumplimiento de los límites establecidos en el art. 5. de la resolución 1256 del 2021.	Sujeto al cumplimiento de los límites establecidos en el art. 5. de la resolución 1256 del 2021
Compatibilidad entre la generación y el destino.	-Requerimiento de un sistema secundario y terciario para la eliminación de iones y desinfección del agua. -Requerimiento de un reservorio. -Implementación sistema de riego. -Implementación de un plan agrícola.	-Requerimiento de un sistema secundario y terciario para la eliminación de iones y desinfección del agua. -Requerimiento de un reservorio principal y de varios secundarios. -Implementación sistema de riego. -Instalación de un sistema de distribución. -Implementación de un plan agrícola.	-Requerimiento de un sistema secundario y terciario para la eliminación de iones y desinfección del agua. -Requerimiento de un reservorio principal y de varios secundarios. -Implementación sistema de riego. -Instalación de un sistema de distribución. -Implementación de un plan agrícola.
Posibilidad de sinergia	-Uso conjunto con aguas lluvias	-Gobierno Local- Comunidad- Empresa. -Uso conjunto con aguas lluvias	-Gobierno Local- Comunidad- Empresa -Uso conjunto con aguas lluvias.
Fuentes de financiación	-Internas -Externas privadas: Créditos verdes	-Internas -Externas privadas. -Pagos de regalías con proyectos.	-Internas -Externas -Pago de regalías con proyectos.

CONCLUSIONES

Se analizaron los aspectos técnicos, legales y socioeconómicos que afectan el potencial de reúso de las aguas residuales no domésticas de la mina Aurora 1, encontrando que en

general, existe una demanda actual y futura para el riego agrícola, sujeta al cumplimiento de la norma actual del reúso y a la creación de alianzas estratégicas.

Las aguas residuales no domésticas generadas por la mina Aurora 1 presentan gran variabilidad en el caudal generado ($Q_{\min}= 2,608$ L/s, $Q_{\max.}=37,715$ L/s) así como trazas de Aluminio(<0,5-5,96 mg/L), Berilio(<0,02-0,58 mg/L), Cobalto(<0,03-0,601 mg/L), Vanadio(<0,10-0,335 mg/L), Boro(<0,25-0,705 mg/L), Cromo(<0,10-<0,11 mg/L), Mercurio(<0,001-<0,002 mg/L), Coliformes Fecales(<1,0-5000 mg/L) y Coliformes Totales(<1,0-24000 mg/L) que superan los límites establecidos por la normatividad colombiana para el reúso en riego agrícola, condicionando su reúso a la implementación de un sistema de almacenamiento que garantice un caudal fijo y a la optimización del sistema de tratamiento actual que de acuerdo a la literatura podría tratarse de un sistema biológico.

La percepción social del reúso del agua es positiva, con un 100% de aceptación de las personas encuestadas y una disposición a pagar promedio de \$13.266/mes, valor sobre el cual no influyen significativamente, de acuerdo a lo arrojado por las pruebas de Spearman y Kruskal Wallis, variables como: edad, sexo, personas en el hogar, percepción de la cantidad y calidad de agua, ingreso mensual en pesos, pago actual por el servicio de agua, disposición a usar el agua residual, tipo de uso y distancia al punto de vertimiento.

Una de las principales limitaciones que presenta el reúso se relaciona con la normatividad actual al momento de incentivar el reúso que compensen los costos relacionados con la implementación de los sistemas de tratamiento requeridos.

Habiéndose identificado una demanda y uso potencial para el ARnD, la creación de sinergias entre el sector público, privado y la comunidad del área, son claves para el avance en una propuesta formal para el reúso de las aguas residuales de la mina Aurora 1

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la empresa C.I Minas La Aurora S.A.S por facilitar la información requerida para la investigación y financiar parte de la misma y a la comunidad de la vereda El Líbano por su disponibilidad y participación en el desarrollo del estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de Sardinata. (2001). *T.4.9.3. Mapa de Cuencas*. [Plano]. Esquema de Ordenamiento Territorial.
- Alcón, F., Pedrero, F., Ortega, J., Arcas, N. (2010). The non-market value of reclaimed wastewater for use in agriculture: A contingent valuation approach. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(S2), pp. 187-196. [10.5424/sjar/201008S2-1361](https://www.researchgate.net/publication/49292097_The_non-market_value_of_reclaimed_wastewater_for_use_in_agriculture_A_contingent_valuation_approach). [/https://www.researchgate.net/publication/49292097_The_non-market_value_of_reclaimed_wastewater_for_use_in_agriculture_A_contingent_valuation_approach](https://www.researchgate.net/publication/49292097_The_non-market_value_of_reclaimed_wastewater_for_use_in_agriculture_A_contingent_valuation_approach)
- Ayala, R., Calderòn, E., Rascòn, J. y Silva, R. (2018). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de investigación en agroproducción sustentable* 2(3), 42-53. [10.25127/aps.20183.403](https://doi.org/10.25127/aps.20183.403)
- Ayers, R.S. & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agricultura*. FAO Irrigation and Drainage Paper.29 Rev. 1. Roma, Italy.
- Belmer, N & Wright. (12-15 de agosto del 2018). Heavy metal contamination of water column from a coal mine waste water discharge resulting in mobilisation of metal contaminants to riparian vegetation. Wollangambe River, Blue Mountains Australia. *Proceedings Of The 9Th Australian Stream Management Conference*, Hobart, Tasmania. <http://9asm.org.au/assets/9ASM-Complete-Proceedings-2018-Final.pdf>
- Carrión, C., Ponce-de Leòn, C., Cram, S., Sommer, I., Hernández, M., y Vanegas, C. (2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia*, 46 (6), 609-620. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v46n6/v46n6a7.pdf>
- C.I Minas La Aurora. (2019). *Origen, Cantidad y Localización del vertimiento* [Plano]. Sección 3. Permiso de vertimientos. Estudio técnico para la modificación de la licencia ambiental.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES].(2018). *Política de Crecimiento Verde*. Bogotá D.C.
- Connor, R., Cordeiro, A., Koncagül, E. & Unlenbrook, S. (2017). Capítulo 18. La creación de un entorno propicio para el cambio. En UNESCO (Ed.). *Informe*

Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado (pp. 146- 153). UNESCO, Francia.

https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarc_def_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F_%3D247647spa.pdf&locale=en&multi=true&ark=/ark:/48223/p

Cordeiro, A. & Connor, R. (2017). Capítulo 2. Aguas residuales y la agenda de desarrollo sostenible. En UNESCO (Ed.). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado* (pp. 23- 28). UNESCO, Francia.

https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarc_def_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F_%3D247647spa.pdf&locale=en&multi=true&ark=/ark:/48223/p

Decreto 3172 del 2003. Por medio del cual se reglamenta el artículo 158-2 del Estatuto Tributario. Noviembre 7 del 2003. DO 45368.

Deh-Haghi, Z., Bagheri, A., Fotourehchi, Z. y Damalas, C. (2020). Farmers' acceptance and willingness to pay for using treated wastewater in crop irrigation: A survey in western Iran. *Agricultural Water Management*, 239. (1-9).
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106262>

Diloreto, Z., Weber, P., Olds, W., Pope, J., Trumm, D., Chaganti, S., Heath, D. & Weisener, C. (2016). Novel cost effective full scale mussel shell bioreactors for metal removal and acid neutralization *Journal of Environmental Management*. 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.023>

EPA & USAID. (2012). *Guidelines for water reuse*. Office of Wastewater Management, ed., Washington, D.C.

García, A., Martínez, S., Terrero, M., Faz, A., Muñoz, M., Gómez, M., y Acosta, J. (3-6 de septiembre 2019). Fitorremediación de aguas residuales industriales en

humedales artificiales para uso agrícola. X Congreso Ibérico de Agroingeniería, Huesca, España. [10.26754/c_agroing.2019.com.3439](https://doi.org/10.26754/c_agroing.2019.com.3439) .

González, K., Pérez, A., y Ramírez, A. (2017). Adsorción de boro sobre zeolitas modificadas. *Ciencias naturales y exactas*, 3(2), 12-30. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2142>

Guerrero, C. (1985). Remoción de Metales de Aguas Residuales Industriales. *Revista Colombiana de Química*, 14(1 y 2), 89-97. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/10812>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2022). *PTM_CON_16035030*.

Jarvis, A. & Younger, P. (2007). Design, Construction and Performance of a Full-Scale Compost Wetland for Mine-Spoil Drainage Treatment at Quaking Houses. *Water and Environmental Journal* 13 (5), 313-318. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1999.tb01054.x>

Kiiskila, J., Sarkar, D., Panja, S., Sahi, S., & Datta, R. (2019). Remediation of acid mine drainage-impacted water by vetiver Grass (*Chrysopogon zizanioides*): A multiscale long-term study. *Ecological Engineering* 129, 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.018>

Lara, S. y Navarro, R. (2017). *Resultados y lecciones en sistema vetiver para descontaminación de agua y mayor disponibilidad para riego*. https://opia.fia.cl/601/articles-87024_archivo_01.pdf

Lazaridou, D., Michailidis, A. y Mattas, K. (2019). Evaluating the willingness to pay for using recycled water for irrigation. *Sustainability*. 11 (19), 1-8. <https://doi.org/10.3390/su11195220>

Ley 373 de 1997. Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Junio 6 de 1997. DO 43.058.

López, A., Zuñiga, M., Vázquez, G. y Mejía, C. (2020). Análisis exploratorio de la implementación de un fotorreactor de lecho fluidizado para el reúso seguro de agua residual en agricultura. *Revista CiBlyT* 43, 191-196. <https://www.researchgate.net/publication/341412922>

- Mamani, W., Inofuente, W., De la Cruz, D., Zea, N., Salas, R., Mamani, D. y Sucapuca, R. (2019). Adsorción de Metales Pesados de Aguas Residuales de la Mina Lunar de Oro con Carbón Activado de Lenteja de Agua (*Lemna gibba L.*). *Revista de Investigación Científica*, 1 (2), 13-20. <http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/handle/UNAJ/25>
- Masindi, V., Foteinis, S., Renforth, P., Ndiritu, J., Maree, J.P., Tekere, M., & Chatzisyneon, E. (2022). Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorization in circular economy: A review. *Ecological Engineering*, 183, 106740. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106740>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. [MAVDT]. (2010) *Política Nacional de Producción y Consumo*. Bogotá, DC.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. [MAVDT]. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C.
- Ministerio de Minas Y Energía. [MinMinas]. (2020). *Propuesta de lineamiento técnico de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de drenajes mineros*. <https://servicios.minminas.gov.co/documents/10192/24281330/PROPUESTA+LINEAMIENTOS+T%C3%89CNICOS+DE+POL%C3%8DTICA+DE+BUENAS+PR%C3%81CTICAS+DRENAJES+ACIDOS+MINEROS.pdf>
- Ministerio de Minas Y Energía. [MinMinas]. (2020). *Propuesta de lineamiento técnico de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de economía circular en la actividad minera*. <https://servicios.minminas.gov.co/documents/10192/24335711/Propuesta+Lineamientos+T%C3%A9cnicos+de+Pol%C3%ADtica+de+Buenas+Pr%C3%A1cticas-Economía+Circular+en+Minería.pdf>
- Molahid, V., Kusin, F. & Madzin, K. (2018). Role of multiple substrates (spent mushroom compost, ochre, steel slag, and limestone) in passive remediation of metal-containing acid mine drainage. *Environmental Technology* 40, 1323-1336. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1422546>
- Resolución 1207 del 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Julio 25 del 2014. DO. 49242. Resolución 1256 del 2021. Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones. Noviembre 23 del 2021. DO 51868.

- Triana, V., Ruiz, Y., Romero, E., Zuluaga, H. y Chaur, M. (2018). New chitosan-imine derivatives: from green chemistry to removal of heavy metals from water. *Revista Facultad de Ingeniería*, 89, 34-43. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43060744005>.
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2018). Boletín Estadístico de Minas y Energía 2018. http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf
- Uster, B., O'Sullivan, A., Young, S., Evans, A., Pope, J., Trumm, D., Caruso, B. (2015). The Use of Mussel Shells in Upward-Flow Sulfate-Reducing Bioreactors Treating Acid Mine Drainage. *Mine water and thje Environmental* 34, 442-454. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-014-0289-1>
- Villa, J. (2020). *Reúso de las aguas residuales como alternativa al estrés hídrico en Colombia* (Monografía presentada como requisito de especialización). Universidad de Antioquia. Recuperado de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14961/7/VillaJuan_2020_ReusoEstresHidrico.pdf.
- Zandaryaa, S., & Jimenèz-Cisneros, B. (2017). Capítulo 16. Reutilización del agua y recuperación de recursos. En UNESCO (Ed.). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado* (pp. 126- 138). UNESCO, Francia. https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarc_def_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F_%3D247647spa.pdf&locale=en&multi=true&ark=/ark:/48223/p