IIDEPROQ

REVISTA CIENTÍFICA



Primera Edición

REVISTA CIENTÍFICA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS – IIDEPROQ

PRIMERA EDICIÓN

GESTIÓN 2024



Universidad Mayor de San Andrés

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, AMBIENTAL, ALIMENTOS, PETROQUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

REVISTA CIENTÍFICA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS – IIDEPROQ

PRIMERA EDICIÓN GESTIÓN 2024

AUTORIDADES

María Eugenia García Moreno, Ph.D.	RECTORA
Tito Estévez Martini, Ph.D.	VICERRECTOR
Freddy Gutiérrez Barea, M.Sc.	DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA
Juan José Torrez Obleas, M.Sc.	VICEDECANO FACULTAD DE INGENIERÍA a.i.
Jorge Vazquez Peñaranda, Ing.	DIRECTOR DE CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA
Waldo Vargas Ballester, M.I.A.	DIRECTOR INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

COMISIÓN EDITORIAL
Rene Alvarez Apaza, Ph.D.
Magalí García Cardenás, Ph.D.
Cristhian Carrasco Villanueva, Ph.D.
Boris Párraga Andrade, Ing.

EDITOR
Waldo Vargas Ballester, M.I.A.

DISEÑO DE PORTADA
Waldo Vargas Ballester, M.I.A.
Gabriel Larico Loayza, Est. I.Q.

DISEÑO DE CONTRATAPA
Jorge Mendez Benguria, Adm.

Depósito Legal: 4 - 3 - 307 - 2024 P.O.

INSTITUTO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS – IIDEPROQ
Oficina: Campus univeritario Cota Cota, ingreso Calle 30, Complejo Facultad de Ingeniería.
Portal: www.iideproq.umsa.bo
Correo: servicios.iideproq@gmail.com
Teléfono: (+591) 2774412

IMPRESIÓN Y DISEÑO GRÁFICO
ITM LATINOAMÉRICA

Derechos Reservados
Prohibida la reproducción total o parcial
Instituto de Investigacion y Desarrollo de Procesos Químicos – IIDEPROQ. Facultad de Ingeniería. Universidad Mayor de San Andrés.

La Paz, Bolivia , 2024

Prólogo



El Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) de la Universidad Mayor de San Andrés, en La Paz, Bolivia, se ha consolidado como un referente en la generación de conocimiento científico y tecnológico para enfrentar los desafíos actuales. A través de estudios innovadores y aplicados, el IIDEPROQ se compromete con un futuro en el que la ciencia se traduzca en mejoras tangibles para la sociedad boliviana, desde el cuidado ambiental hasta la implementación de tecnologías avanzadas.

En esta edición, presentamos investigaciones que son fruto del esfuerzo continuo y la dedicación de profesionales comprometidos con el avance de nuestra nación. Estos trabajos abordan temas de gran relevancia, como el aprovechamiento de recursos locales, la mitigación del cambio climático, la energía renovable y el uso responsable de los recursos naturales. Cada estudio responde no solo a preguntas científicas fundamentales, sino también a las necesidades prácticas de nuestra realidad regional, mostrando cómo la ciencia puede y debe ser una herramienta para el desarrollo sostenible.

Las investigaciones aquí compiladas no solo enriquecen el conocimiento académico, sino que también proponen soluciones concretas a problemáticas locales, creando oportunidades de innovación para mejorar la calidad de vida en Bolivia. En cada proyecto, el IIDEPROQ reafirma su misión de promover la transferencia de conocimientos y tecnologías, apoyando así a sectores estratégicos en su camino hacia un futuro más resiliente y sustentable.

Esperamos que estas páginas inspiren a nuevos investigadores, estudiantes y colaboradores a unirse en la construcción de un país más preparado para los retos del mañana, donde la ciencia y la innovación sean motores de cambio y progreso. El IIDEPROQ continuará su labor incansable para consolidarse como un pilar de conocimiento y transformación en Bolivia y más allá.

Waldo Vargas Ballester, M.I.A.
DIRECTOR INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

INVESTIGADORES IIDEPROQ – UMSA



Waldo Vargas Ballester M.I.A.
DIRECTOR - IIDEPROQ



René Alvarez Apaza Ph.D.
DIGESTIÓN ANAEROBIA
CATÁLISIS Y PETROQUÍMICA



Magali García Cárdenas Ph.D.
CLIMA Y MANEJO DE SUELOS



Cristhian Carrasco Villanueva Ph.D.
BIORREFINERÍA Y BIOINGENIERÍA



Santiago Morales Maldonado Ph.D.
MICROALGAS Y TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES



Boris Párraga Andrade Ing.
TECNOLOGÍA DE SALES



Marcelo Gorritty Portillo Ing.
CALIDAD DEL AIRE
EFICIENCIA ENERGÉTICA
MODELACIÓN NUMÉRICA



CONTENIDO

CO – DIGESTIÓN DE LENTEJA DE AGUA *(Lemna gibba)* CON ESTIÉRCOL VACUNO COMO ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DE PRODUCTOS DE LA EUTROFIZACIÓN
Rene Álvarez Apaza, Ph.D.
Ronald Perez,.....1

CULTIVANDO BAJO CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ANDES ALTOS, ANTIGUOS PARADIGMAS PARA NUEVOS DESAFÍOS
Magali García Cárdenas, Ph.D.
Edwin Yucra, Ing. Agr.
Jere Gilles.....8

MEJORAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LOS TALLOS DE QUINUA UTILIZANDO LA LEVADURA MUTADA *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054.....18

MEJORAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LOS TALLOS DE QUINUA UTILIZANDO LA LEVADURA MUTADA Scheffersomyces (Pichia) stipitis CBS 6054
Eliza Claure
Carlos Martín
Cristhian Carrasco Villanueva, Ph.D. 18

PRETRATAMIENTO DE LA PAJA BRAVA *(Festuca orthophylla)* CON SO2 COMO CATALIZADOR
Henrique Baudel,
Cristhian Carrasco Villanueva, Ph.D. 31

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO A PARTIR DE CLORURO DE POTASIO DE LA PLANTA INDUSTRIAL DEL SALAR DE UYUNI
Germán Callisaya Peña,
Boris Párraga Andrade, MSc.....40

OBTENCIÓN DE SALMUERA CONCENTRADA EN LITIO MEDIANTE ELECTRODIÁLISIS A PARTIR DE SALMUERAS DE SILVINITA PROVENIENTES DEL SALAR DE UYUNI
Geraldine Villa,
Boris Párraga Andrade, MSc
Daniel Peña,.....52

EFECTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE COCINAS MEJORADAS A BIOMASA
Christian Gonzalo Limachi, Ing.
Marcelo Antonio Gorritty Portillo. Ing.
Iris Calle Mendoza, Ing. 62

EL PAPEL FUNDAMENTAL DEL ESTUDIO DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA RESILIENCIA AGRÍCOLA EN LOS ANDES
Gaby Alavi Murrillo, Ing. Agr.
Magali Garcia, Ph.D. 72

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEL RÍO KATARI, POSIBLES SOLUCIONES A LA DE SUS AFLUENTES Y SUS IMPACTOS EN LA BAHÍA DE COHANA DEL LAGO TITICACA
Waldo Vargas Ballester, M.I.A.
Jhony Marquez Mejillón, Ing 80



CO – DIGESTIÓN DE LENTEJA DE AGUA (Lemna gibba) CON ESTIÉRCOL VACUNO COMO ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DE PRODUCTOS DE LA EUTROFIZACIÓN

CO-DIGESTION OF WATER LENTIL (Lemna gibba) WITH COW MANURE AS ALTERNATIVE TREATMENT EXPLOITING THE EUTROPHICATION PRODUCTS

René Alvarez*[1], Ronald Perez[1]
[1]Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, UMSA

RESUMEN

Lenteja de agua (*Lemna gibba*), una flora acuática fue estudiada en un proceso de co-digestión anaerobia (en ausencia de oxigeno), junto con estiércol de vaca con la intención de presentar un proceso alternativo de tratamiento y reducción de carga orgánica en circunstancias donde la eutrofización promueve el excesivo crecimiento de plantas acuáticas. Actualmente la lenteja de agua se constituye en un gran problema como consecuencia de la eutrofización en las riveras del Lago Titicaca. La eutrofización es una consecuencia de la acumulación de nutrientes por la descarga de aguas residuales y el escurrido de fertilizantes en aguas naturales, esto generalmente promueve excesivo crecimiento vegetal no deseado y la descomposición de otras plantas, causando reducciones severas en la calidad de aguas.

Experimentos de digestión anaerobia semi-continua fueron efectuados en reactores de 2 litros a temperaturas de 35°C y 55°C con 20 y 50 días de tiempo de retención hidráulico (HRT) y 10 a 50% de relación lenteja de agua/estiércol con 4 a 6% de contenido de sólidos volátiles (base húmeda). La fermentación semi-continua de mezclas de lenteja de agua – estiércol de vaca demostró ser un sistema robusto con buena estabilidad. Los resultados sugieren que co-digestando lenteja de agua junto a estiércol de vaca la máxima reducción de sólido volátil es 60.9% a 55°C y 46.7% a 35°C. La productividad de biogás en estado estacionario fue en el rango de 0.1 a 0.63 m^3 d-1m-3, con un contenido de metano en el biogás entre 36 a 52%. Los rendimientos de metano obtenidos fueron en los rangos de 0.048 a 0.115 m^3 CH_4/kg VS ad en temperaturas mesofílicas (35°C) y de 0.023 a 0.180 m^3 CH_4/kg VS ad en condiciones termofílicas (55°C). El máximo rendimiento de 0.180 ± 0.035 m^3 CH_4/kg VS ad a 55°C fue con 50 días de HRT, 50% de relación lenteja de agua/estiércol de vaca, y 4% de SV, mientras que el máximo rendimiento en condiciones mesofílicas fue 0.115 ± 0.002 m^3 CH_4/kg VS ad con 50 días de HRT, 50% de relación lenteja de agua/estiércol, y 4% de sólidos volátiles.

Los resultados obtenidos demuestran que técnicamente es viable el aprovechamiento de la lenteja de agua en proceso de biometanización; su utilización representaría importantes volúmenes de biogás cuyo uso como fuente energética constituye un beneficio extra de esta tecnología además de la posible utilización del digestato como bioabono o para el mejoramiento de terrenos.

Palabras Clave: Co-digestión, Digestión anaerobia, Estiércol, Lenteja de agua, Biogás.

ABSTRACT

Water lentil (Lemna gibba) an aquatic flora was studied in an anaerobic co-digestion process together with cow manure in order to present as alternative treatment process when the eutrophication promotes excessive aquatic plant growth. The water lentil nowadays constitutes a big problem on the Titicaca Lake

(Altiplano) as a result of the eutrophication. Eutrophication is a consequence of nutrient pollution such as the release of sewage effluent and run-off from lawn fertilizers into natural waters, it generally promotes excessive plant growth and decay, favours certain weedy species over others, and is likely to cause severe reductions in water quality.

Anaerobic semi-continuous experiments were performed in 2-L reactors at temperatures of 35°C and 55°C with 20 and 50 days of hydraulic retention time (HRT) and 10 - 50 % water lentil/cow manure ratio with 4 to 6% volatile solid content (whet basis).

The semi-continuous operation of mixture of cow manure-water lentil proved to be a reliable system with good stability. The results suggest that in a system co-digesting water lentil together cow manure the maximum volatile solid reduction is 60.9% at 55°C and 46.7% at 35°C. The steady state biogas productivity was in the range of 0.1 to 0.63 m^3 d-1m-3, with methane content in the gas of between 36 to 52%. The methane yields obtained were in the range 0.048 to 0.115 m^3 CH_4/kg VS add in mesophilic temperatures (35°C) and 0.023 to 0.180 m^3 CH_4/kg VS add in thermophilic conditions (55°C), the maximum yield of 0.180 ± 0.035 m^3 CH4/kg VS add at 55°C was with 50 days of HRT, 50% of water lentil/cow manure ratio, and 4% of VS, where the maximum yield at mesophilic conditions was 0.115 ± 0.002 m^3 CH_4/kg VS add at 50 days of HRT, 50% of water lentil/cow manure ratio, and 4% of VS.

The obtained results prove that the use of the water lentil in biomethanization process is viable technically; its use would represent important volumes of biogas whose use as energy source could be an extra benefit of this technology besides the possible use of the digestate as biofertilizer or for the land improvement.

Keywords: Co-digestion, Anaerobic digestion, Manure, Water lentil, Biogas

1. INTRODUCCIÓN

La flora acuática como resultado de la eutrofización de los lagos representa un gran potencial energético no explotado que podría ser aprovechado por la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica (AD). La eutrofización ha estado causando durante años proliferación anormal y espectacular de algas verdes en todo el mundo (Morand y Briand, 1996). La proliferación de esta flora acuática son una molestia suficiente para hacer que la cosecha sea esencial en algunos lugares (Briand y Morand, 1997). La lenteja de agua hoy en día constituye un gran problema en el lago Titicaca (Altiplano) como resultado de la eutrofización. La eutrofización es una consecuencia de la contaminación de nutrientes como la liberación de efluentes cloacales, escorrentía de fertilizantes y el estiércol de animales de la ganadería en la rivera de aguas naturales, generalmente promueve el crecimiento y la descomposición excesivos de las plantas, favorece a ciertas especies de malezas sobre otras y es probable que cause reducciones severas en la calidad del agua.

Los desechos animales y acuáticos constituyen una alta proporción de biomasa y su utilización y reciclaje es importante para los aspectos económicos y ambientales (Gunaseelan, 1997; Al-Masri, 2001). La co-digestión, es decir, la digestión simultánea de una combinación de dos o más sustratos, es una técnica atractiva mediante la cual las características complementarias de los sustratos mejoran el proceso de digestión (Alvarez y Lidén, 2007). La co-digestión del estiércol y los subproductos industriales o los residuos de la matanza, en condiciones mesófilas y termófilas, han sido objeto de estudio y comparaciones (Salminen y Rintala, 1999; Kaparaju y Rintala,

2005); Además, los datos disponibles sobre AD de la biomasa indican que se han explorado cerca de 100 géneros de plantas de biomasa terrestre, marina y de agua dulce para su digestión anaeróbica (Gunaseelan, 1997). Sin embargo, hay poca información sobre la co-digestión de la flora acuática con abonos, sobre la co-digestión de lentejas acuáticas (lemna gibba) y estiércol de vaca; no hay estudios publicados anteriormente.

El propósito de este trabajo es evaluar el efecto de la temperatura, el tiempo de retención hidráulica (HRT), la relación agua / lenteja de vaca, y la carga sólida en la producción de metano de la mezcla de lenteja de agua: estiércol de vaca en proceso de codigestión anaeróbica semicontinua.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La lenteja de agua (Lemna gibba) se recolectó durante la estación de verano en el lago Titicaca, de la bahía de Cohana (68 ° 39'36,01 "O, 16 ° 22'15,52" S, 3843 m sobre el nivel del mar). Las muestras se empacaron en bolsas de polietileno y se almacenaron en un congelador a -10oC de temperatura. El estiércol de vaca se recolectó en granjas del Altiplano boliviano (latitud 19 ° S, longitud 68 ° O). El estiércol fue envasado en bolsas de polietileno a y se almacenan en el congelador hasta su uso. Los materiales fueron analizados para sólidos totales (TS), sólidos volátiles (VS), nitrógeno Kjeldahl, de carbono orgánico total, potasio, fósforo. La caracterización de las materias primas se da en la Tabla 1.

El inóculo usado para sembrar los reactores iniciales a ser utilizado para el experimento de se obtuvo de digestores de biogás activos que trabajan con estiércol de vaca a los 30 días HRT y a 35°C (TS de 9 % y VS del 56%)

Tabla 1 *Caracterización de las materias primas*

Materia prima	N [%]	P [%]	K [%]	C organico [%]	Humedad [%]	S.T.[%]	S.V.[%]
Lenteja de agua	2,69	0,26	2,03	41,52	91,49	6,64	5,60
Estiercol de vaca	1,54	0,33	0,64	28,34	80,47	17,97	14,70

Fuente: Elaboración propia.

Configuración experimental

Los experimentos de digestión anaeróbica se llevaron a cabo en 14 digestores de acero inoxidable, cada uno con un volumen total de 2 l. El recipiente cilíndrico estaba equipado con una parte superior embridada a la que se ajustó una placa de brida con orificios taponados. En la tapa cada reactor tenía una válvula de 0,5 pulgadas que permitió la carga y descarga diaria mediante una jeringa metálica y una válvula de cobre para la salida del gas generado. Los digestores se operaron a 35 ± 1 °C o 55 ± °C por inmersión en un baño de agua, un termostato de inmersión en cada baño controlaba la temperatura del agua. La recolección de gas del reactor se realizó a través de un tubo de PVC flexible a una botella de vidrio de desplazamiento de agua separada llena de agua acidificada a un pH de 2. La presión positiva en las botellas permitió que el gas se transfiriera a un cilindro de gas de medición.

Procedimiento experimental

Los experimentos de co-digestión anaerobia con mezclas de lenteja de agua y estiércol de vaca se realizaron en un proceso semicontinuo en condiciones mesófilas (35°C) y termófilas (55°C) en diferentes proporciones (10% y 50% de

lentejas de agua en la mezcla), TRH diferente (20 y 50 días) con contenido de SV del 4% y 6%. La tabla 2 muestra el diseño experimental.

Las mezclas de estiércol de vaca y lenteja de agua se sacaron del congelador y se dejaron descongelar durante la noche. Los lotes de materia prima se prepararon de acuerdo con la tabla 2. Los sustratos se pesaron y diluyeron con agua corriente, se homogeneizaron con un mezclador eléctrico doméstico, se fraccionaron (volumen definido por el tiempo de residencia hidráulico) y se envasaron en bolsas de polietileno y se almacenaron en un congelador. Las muestras que se utilizarán al día siguiente se retiraron del congelador y se dejaron descongelar durante la noche.

Tabla 2. *Diseño experimental y preparación de las cargas diarias de cada experimento*

	Diseño Experimental				Formulación carga diaria		
	A	B	C	D			
N Exp	S.V. (%)	Lenteja/estiercol (%)	HRT (Días)	T (oC)	Lenteja de agua (g)	Estiercol (g)	Agua (g)
1	4	10	20	35	6.43	22.04	61.53
2	6	10	20	35	9.64	33.06	47.30
3	4	50	20	35	32.14	12.24	45.61
4	6	50	20	35	48.21	18.37	23.42
5	4	10	50	35	2.57	8.82	24.61
6	6	10	50	35	3.86	13.22	18.92
7	4	50	50	35	12.86	4.90	18.24
8	6	50	50	35	19.29	7.35	9.37
9	4	10	20	55	6.43	22.04	61.53
10	6	10	20	55	9.64	33.06	47.30
11	4	50	20	55	32.14	12.24	45.61
12	6	50	20	55	48.21	18.37	23.42
13	4	10	50	55	2.57	8.82	24.61
14	6	10	50	55	3.86	13.22	18.92
15	4	50	50	55	12.86	4.90	18.24
16	6	50	50	55	19.21	7.35	9.37

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento experimental

Cada reactor se cargó con 1800 g de sustrato que consiste en inóculo (10%), estiércol de vaca al 40% y agua del grifo al 50%. Los reactores se colocan en el baño de agua controlado por termostato a 35°C y 55°C y se dejaron fermentar como un proceso por lotes durante una semana, en el día 8, la alimentación diaria se inició con la mezcla de estiércol de vaca 60% y 40% de agua con HRT de 30 días, los reactores se mantuvieron hasta que la producción de biogás se estabilizó. El día 40, se iniciaron los experimentos según el diseño experimental. Los reactores se mantuvieron durante un período de 1,5 HRT, posteriormente, se iniciaron nuevas materias primas, utilizando el último sustrato activo como sustrato inicial. Se siguió este procedimiento hasta que se terminaron todos los lotes de materia prima preparada. La presión atmosférica durante los experimentos fue de 495 mm Hg (la presión atmosférica media en La Paz, Bolivia). Una vez al día, el volumen calculado de lodo (según HRT en cada experimento) se extrajo de cada reactor y se reemplazó con el mismo volumen de materia prima fresca a través del puerto de eliminación de muestra. Se analizaron el valor de pH y el contenido sólido de las muestras de

suspensión. El biogás se recogió y se midió por desplazamiento de agua una vez al día a presión manométrica cero y a temperatura ambiente. Los volúmenes se reajustaron a condiciones normales de temperatura y presión (0 °C, 760 mm Hg). Las mediciones tomadas durante los últimos 5 días de cada experimento, se promediaron para obtener un valor final de la productividad y la concentración de metano en estado estacionario. Se calculó la reducción VS de acuerdo 100* (VS carga - VS descarga) / VS carga.

Métodos analíticos

La concentración de metano y dióxido de carbono en el biogás se midió usando un cromatógrafo de gases (Shimadzu Modelo GC14B, Japón) como se describe en Alvarez y Lidén (2007). El TS, VS, pH, nitrógeno total y fósforo, en la materia prima y en las muestras de sustrato, fueron todos analizados usando métodos estándar como se describe por APHA (2000). El TS se determinó después de un calentamiento repetido (105 °C durante 1 h), enfriamiento, desecación y procedimiento de pesaje hasta que el cambio de peso fue menor que 4%. VS se determinaron mediante la calcinación del residuo producido en el análisis de TS hasta peso constante en un horno de mufla a una temperatura de 550 °C. El nitrógeno total (TKN) se midió mediante el método semi-micro-Kjeldahl según lo descrito por APHA (2000). El potasio y el fósforo se midieron por espectrofotometría (método 3500-K y 4500-P, respectivamente). El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante combustión a alta temperatura (método 5310 B).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características fisicoquímicas de la lenteja de agua se dan en la tabla 1, su bajo contenido de sólidos totales (6,6%) y baja relación carbono: nitrógeno de 15,4 puede imponer serias restricciones prácticas en su uso en procesos de DA húmeda como fuente de carbono, sin embargo, se puede usar como fuente de agua y formas suplementarias de nitrógeno en el proceso de co-digestión. Para garantizar un proceso de digestión anaerobia que funcione correctamente, la relación carbono: nitrógeno del sustrato nunca debería estar fuera del rango de 30: 1-50: 1 (NAS, 2001).

En general, la evolución de los experimentos de co-digestión anaeróbica utilizando mezclas de dos co-substratos: lenteja de agua - estiércol de vaca alcanzó perfiles estables con poca fluctuación en el pH, volumen de biogás y contenido de metano. Después del período de adaptación de aproximadamente 1 HRT; los valores de pH oscilaron entre 6.6 y 7.6 con una variación de menos una unidad (Tabla 3) . La composición del gas y la producción de metano es una función del tipo de material agregado al digestor , la carga sólida, la temperatura y el tiempo de retención hidráulica confirmando los trabajos de (Hashimoto, 1982); el bajo contenido de metano obtenido (36% -52%) podría atribuirse a la calidad de los VS en el estiércol y la lenteja de agua, esto indica un alto contenido de material más difícil de digerir y bajo contenido de lípidos y proteínas, muy probablemente un consecuencia de la fuente de alimentación de las vacas en el altiplano boliviano. Como era de esperar, el contenido medio de metano en el biogás disminuyó del 55% (a 35 °C, exp 1-8) al 44% (a 55 °C, exp 9-16), lo que contrarrestó en parte el aumento el rendimiento de producción volumétrico del gas. Comparando la digestión anaeróbica termófila y mesófila. La productividad de biogás calculada en condiciones normales estuvo en el rango de 0.11 - 0.64 m^3 / dm^3 de volumen neto de reactor versus 0.10 - 0.61 m^3 / dm^3. Con base en el diseño y el análisis de varianza, se encontró que el tiempo de retención hidráulica, la temperatura, el contenido de sólidos volátiles y la relación lentejas de agua - estiércol fueron factores significativos con respecto a la productividad de biogás y el rendimiento de metano en el proceso de digestión anaeróbica.

El rendimiento de metano en este trabajo (Tabla 3) indicó que la co-digestión de la lenteja de agua y estiércol de vaca obtenido estaban en el intervalo 0,048 a 0,115 m^3 CH_4 / kg VS añadir a temperaturas mesófilas y desde 0,023 hasta 0,180 m^3 CH_4 / kg VS agregar en condiciones termófilas (55 °C), el rendimiento máximo de 0.180 ± 0.035 m^3 CH_4 / kg VS agregado a 55 °C fue con 50 días de HRT , 50% de la relación lenteja/estiércol y 4% de VS(experimento 15), donde el rendimiento máximo en condiciones mesófilas fue 0.115 ± 0.002 m^3 CH_4 / kg VS añadido a los 50 días de HRT, 50% de lentejas de agua / estiércol de vaca , y 4% de VS (experimento 3) . Se podría argumentar que la ley de Arrhenius predeciría un aumento exponencial de la tasa en función de la temperatura. Sin embargo, la situación práctica es mucho más compleja ya que muchas especies de microorganismos operan en el reactor, y las diferentes temperaturas llevarán a una selección de ciertas especies. Los estudios sobre mesófilas frente a la digestión anaerobia termófila han sido reportados por varios investigadores (Mackie y Bryant, 1995; Kim et al, 2002), nuestros resultados muestran que son técnicamente posibles co-digestión mesófilas y termófilas semi-continua de la lenteja de agua y estiércol de vaca; la operación termófila fue un 56% más productiva que la co-digestión mesófila, sin embargo, la energía extra y los requerimientos de reactores más sofisticados para la fermentación termófila serán aspectos importantes a considerar, por lo tanto son necesarios más estudios (económicos y técnicos) antes de concluir a favor de digestión termófila o mesófila de lentejas de agua.

Tabla 3. *Principales resultados de co-digestion de lenteja de agua con estiércol*

Experimento	pH	Productividad de Biogás (m3/d m3)	Metano (%)	Rendimiento de biogás (m3/Kg SVad)	Rendimiento de metano (m3 CH4/Kg Svad)
1	6.7 (0.01)	0.38 (0.01)	51 (2)	0.189 (0.003)	0.097 (0.002)
2	6.8 (0.04)	0.62 (0.02)	49 (1)	0.206 (0.006)	0.102 (0.003)
3	6.9 (0.02)	0.44 (0.01)	52 (1)	0.219 (0.004)	0.115 (0.002)
4	7.2 (0.10)	0.64 (0.03)	52 (4)	0.211 (0.011)	0.109 (0.006)
5	6.8 (0.08)	0.14 (0.01)	48 (4)	0.174 (0.015)	0.084 (0.004)
6	6.9 (0.02)	0.11 (0.01)	49 (3)	0.097 (0.007)	0.048 (0.048)
7	7.2 (0.10)	0.14 (0.01)	52 (2)	0.184 (0.016)	0.094 (0.008)
8	7.2 (0.03)	0.21 (0.03)	44 (1)	0.176 (0.021)	0.078 (0.009)
9	6.6 (0.08)	0.24 (0.01)	36 (4)	0.119 (0.006)	0.043 (0.002)
10	6.6 (0.02)	0.36 (0.01)	39 (3)	0.120 (0.005)	0.046 (0.002)
11	5.7 (0.30)	0.10 (0.02)	44 (4)	0.053 (0.011)	0.023 (0.005)
12	7.0 (0.20)	0.61 (0.03)	45 (1)	0.204 (0.010)	0.092 (0.005)
13	6.9 (0.04)	0.20 (0.04)	47 (1)	0.243 (0.051)	0.115 (0.024)
14	7.0 (0.04)	0.34 (0.03)	44 (2)	0.287 (0.024)	0.126 (0.010)
15	7.5 (0.20)	0.32 (0.06)	45 (5)	0.396 (0.078)	0.180 (0.035)
16	7.6 (0.20)	0.33 (O.08)	48 (2)	0.273 (0.065)	0.132 (0.031)

Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Los experimentos de co-digestión anaerobia semi-continua de lenteja de agua y estiércol de vaca sugieren que estas pruebas han sido completamente estables a pesar de las amplias variaciones en la carga, TRH, temperaturas y relación de lenteja de agua - estiércol. El máximo rendimiento de la digestión anaerobia es de 0.180 ± 0.035 m^3 CH_4/kg VS ad a 55°C fue con 50 días de HRT, 50% de relación lenteja de agua/estiércol de vaca, y 4% de sólidos volátiles, mientras que el máximo rendimiento en condiciones mesofílicas fue 0.115 ± 0.002 m^3 CH_4/kg VS ad con 50 días de HRT, 50% de relación lenteja de agua/estiércol, y 4% de sólidos volátiles.

Los procesos termofílicos ratificaron ser más productivos en producción especifica de biogás que los mesofílico (17% mayor) así como en el grado de destrucción de materia orgánica (37% mayor), confirmando resultados comparativos del efecto de la temperatura en procesos de DA obtenidos con otras materias primas.

5. RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por la cooperación sueca dentro el convenio UMSA-ASDI.

6. REFERENCIAS

Al-Masri M.R. (2001). Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 77, 97-100.

Alvarez R., Lidén G. (2007). Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, 33, 726-734.

Alvarez R., Lidén G. (2007). Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. *Waste Management*, "(in press)"

Briand X., Morand P. (1997). Anaerobic digestion of *Ulva* sp. 1. Relationship between *Ulva* composition and methanisation. *Journal of applied Phycology*, 9, 511–524.

Gunaseelan V. N. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and Bioenergy*, 13(1/2), 83-114.

Hashimoto A. G. (1982). Methane from cattle waste: effect of temperature, hydraulic retention time, and influent substrate concentration on kinetic parameter (K). *Biotechnology and Bioengineering*, 24, 2039-2052.

Kaparaju P., Rintala J. (2005) Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure. *Resources Conservation and Recycling*, 43, 175-188.

Kim M., Ahn Y., Speece R. E. (2002). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. *Water Research*, 36, 4369-4385.

Mackie R. I., Bryant M. P. (1995). Anaerobic digestion of cattle waste at mesophilic and thermophilic temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 43(2), 346–350.

Morand P., Briand X. (1996). Excessive growth of macroalgae: a symptom of environmental disturbance. *Bot. mar.*, 39, 491-515.

National Academy of Sciences (2001). Methane generation from human, animal, and agricultural wastes. Book's for Business: New York, Hong Kong.

Salminen E. A., Rintala J. A. (1999). Anaerobic digestion of poultry slaughtering wastes. *Environmental Technology*, 20, 21-28.

Standard Methods for the Examination of water and Wastewater (2000). 20th ed, American Public Health Association/American Water Works Association/ Water Environment Federation, Washington DC. USA.

CULTIVANDO BAJO CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ANDES ALTOS, ANTIGUOS PARADIGMAS PARA NUEVOS DESAFÍOS

Farming Under Climate Change In The High Andes, Old Paradigms For New Challenges

Magalí Garcia[1], Edwin Yucra[2], Jere Gilles[3]

IIDEPROQ, Facultad de Ingeniería UMSA

RESUMEN

El altiplano tropical boliviano se sitúa por encima de los 3750 m de altitud. La dependencia de centros globales de alta y baja presión atmosférica y la altitud provocan elevada probabilidad de heladas y lluvias concentradas en verano. Pese a que, en las evaluaciones iniciales de los impactos de cambio climático y calentamiento global, se proyectaba menor probabilidad de heladas con poco cambio pluviométrico, los productores reportan que las heladas persisten en algunos meses del año y que la precipitación se concentró, efectos que podrían estar relacionados. Se analiza el comportamiento promedio y extremo de las temperaturas máximas, y mínimas y las tendencias de precipitación para dos zonas altiplánicas, siguiendo las experiencias de los agricultores. Se muestra que, la amenaza de heladas no ha disminuido e incluso aumentó en los meses invernales y de transición, aunque los promedios son ascendentes, mientras que la precipitación tiende a la concentración. Entonces, la ventana en que las condiciones productivas son benignas se acortó, pero mejoró con respecto a la probabilidad de heladas y a las bajas temperaturas, aunque no así en el resto del año, lo que debe llevar a cambios de paradigmas, quizás recuperando visiones productivas integrales prevalentes en antiguos sistemas

Palabras clave: Altiplano boliviano, heladas, calentamiento global, amenaza

ABSTRACT

The Bolivian tropical plateau is located above 3750 m altitude. The dependence on global centers of high and low atmospheric pressure and altitude causes a high probability of frost and concentrated rain in summer. Although, in the initial evaluations of the impacts of climate change and global warming, a lower probability of frost was projected with little change in rainfall, producers report that frost persists in some months of the year and that precipitation has become concentrated, effects that could be related. The average and extreme behavior of maximum and minimum temperatures and precipitation trends for two highland areas are analyzed, following the experiences of farmers. It is shown that the threat of frost has not decreased and has even increased in the winter and transition months, although the averages are increasing, while precipitation tends to be concentrated. So, the window in which productive conditions are benign has been shortened, but improved with respect to the probability of frost and low temperatures, although not in the rest of the year, which should lead to changes in paradigms, perhaps recovering productive visions integrated in old systems.

Keywords: Highlands, frosts, Global warming, hazard

1 Investigadora Instituto de Investigaciones de Procesos Químicos-Facultad de Ingeniería UMSA
2 Investigador Proyecto UMSA-UMissouri
3 Universidad de Missouri

1. INTRODUCCIÓN

Los Andes tropicales montañosos de América del Sur y el altiplano de Bolivia se consideran un punto crítico de impacto del cambio climático. Las tendencias meteorológicas han producido impactos significativos en los ecosistemas y los medios de vida e inducido a los agricultores a diversas decisiones de cultivo (Taboada et al., 2017; Valdivia et al., 2013).

Los riesgos climáticos no son inusuales para la longeva agricultura tropical altoandina boliviana que siempre ha enfrentado adversas y variables condiciones climáticas y ecológicas. La combinación de gran altitud, transparencia del aire y latitud definen sus bajas, pero habitables temperaturas; así como la fuerte dependencia de grandes y erráticos sistemas de circulación atmosférica tropical (Alta del Pacífico, PDO, ZCIT, etc.) (Segura, H. et al., 2019; Garreaud, et al., 2009) determina su habitual variabilidad pluviométrica lo que hace que la producción agrícola sea un gran desafío. El período de crecimiento, mayormente a secano y coincidente con el verano (octubre-abril), constituye la única ventana temporal cuando la lluvia (que va desde 750 mm en el norte hasta 250 mm en el sur), coincide con el período libre de heladas en gran parte del Altiplano, siendo que el resto del año (mayo a septiembre), la elevada frecuencia de heladas y la estación seca, hacen a la agricultura una actividad de alto riesgo.

Las expresiones más claras del cambio climático se producen en la temperatura del aire y la precipitación, y sus proyecciones estiman impactos poco claros que, con frecuencia, no son los enfrentados por los agricultores. Por ejemplo, estudios de cambio climático proyectaron para la zona, una menor probabilidad de heladas bajo una tendencia general de calentamiento, aunque con cierta estabilidad en la precipitación (Andersen y Mamani, 2009; Garreaud et al. 2003; Garreaud, 2009). Contrariamente, los agricultores al presente reportan persistencia de destructivas heladas durante el período de cultivo, al mismo tiempo que temperaturas máximas en ascendencia, efectos que confunden la toma de decisiones de cultivo. Diversos aspectos del impacto del calentamiento global en la agricultura no son claros especialmente si ocurren en combinación. Por ejemplo, los incrementos en las temperaturas mínimas podrían ser positivos en zonas como el Altiplano, pues una de sus limitaciones históricas son precisamente las bajas temperaturas, pero temperaturas máximas más elevadas reducirían los rendimientos debido a la mayor demanda evapotranspirativa de la atmósfera, poniendo bajo más estrés a ecosistemas frágiles o muy sensibles, incluso considerando que la precipitación no varíe. En el presente documento se presenta una primera aproximación a la evaluación de variables termo-pluviométricas de dos zonas representativas, en base a datos de estaciones meteorológicas de tierra y estimaciones adicionales de estaciones cercanas y de datos satelitales y de reanalisis.

2. METODOLOGIA

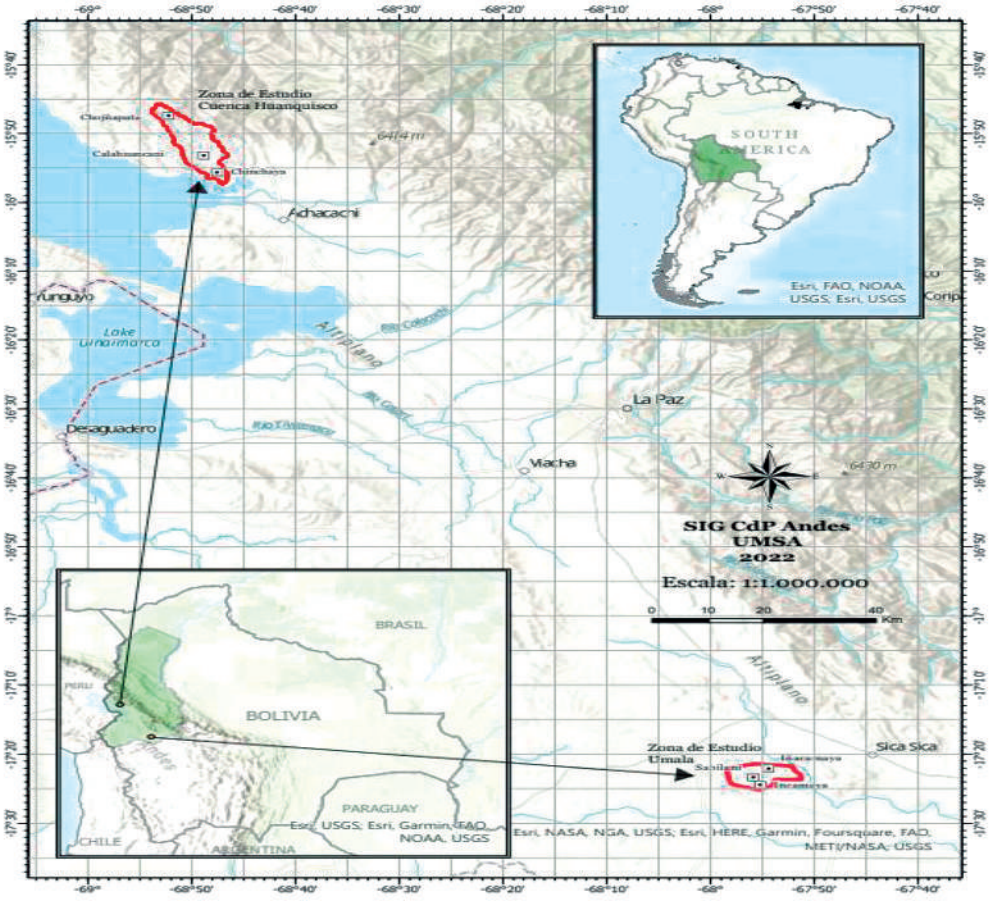
Áreas de Trabajo

El análisis se centra en la dinámica climática de 6 comunidades del Altiplano Boliviano, ubicadas en el Altiplano Norte (3) y Central (3). Las coordenadas y ubicación geográfica se presentan en el Mapa 1. La localización de las comunidades de Ancoraimes es representativa del Altiplano circunlacustre semi árido a sub húmedo cuya fisiografía es montañosa y su climatología fuertemente dependiente de la altitud. Por su parte, las comunidades de Umala representan al Altiplano Central semi-árido a árido, ubicado en la planicie altoandina, con particularidades térmicas y pluviométricas similares.

Tendencias de las variables meteorológicas

La primera fuente de información proviene de estaciones meteorológicas instaladas por la UMSA en cada comunidad, aunque con longitud de registro diario variable de hasta 6 años.

Mapa 1. *Ubicación geográfica de las comunidades de estudio, en el Altiplano Boliviano.*



Fuente: SIG Cdp Andes UMSA 2022

Sin embargo, la longitud de registro no es suficiente para evaluar tendencias de cambio. Por ello, se procedió a definir los valores diarios de 40 años de temperatura a partir de datos de reanálisis desde el sitio de ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF, con resolución de 31 km). En el caso de precipitación se acudió al sitio de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data, U.S. Geological Survey y University of California, Santa Bárbara), con resolución de 5 km aproximadamente, complementados con registros de lluvia de estaciones cercanas pertenecientes al SENAMHI (Patacamaya para Umala y El Alto para Ancoraimes), las que mostraron muy alta correlación con los eventos de lluvia, tanto a nivel diario con los registros cortos de las estaciones de comunidad, como a nivel 3 y 5-días con los datos de CHIRPS en el periodo 1981-2019.

Índices evaluados

La Tabla 1, presenta los índices climáticos seleccionados para ser evaluados tanto para Temperatura máxima como mínima, precipitación y derivados, así como la frecuencia de análisis.

Tabla 1. *Variables analizadas y lapso para el análisis tendencial*

Variable		Descripción	Lapso
Temperatura máxima (Tmax)	Promedio (Tmax_media)	Promedio de las Tmax diarias de cada mes del registro	Mensual
	Máxima extrema (Tmax-X)	Valor más alto de Tmax durante cada mes del registro	Mensual
	Mínima extrema (Tmax-N)	Valor más bajo de Tmax durante cada mes del registro	Mensual
Temperatura mínima (Tmin)	Promedio (Tmin-media)	Promedio de las Tmin diarias de cada mes del registro	Mensual
	Máxima extrema (Tmin-X)	Valor más alto de Tmin durante cada mes del registro	Mensual
	Mínima extrema (Tmin-N)	Valor más bajo de Tmin durante cada mes del registro	Mensual
	Días con helada	Número de días en que la Tmin descendió hasta <0 en cada mes del registro	Mensual
Precipitación (PP)	Acumulada	Suma de la PP de cada mes del registro	Mensual
	Días con lluvia	Número de días con PP diaria > 0.5 mm	Mensual
	Índice de estacionalidad	Concentración de la precipitación (cuanto más alto, mayor concentración de la precipitación)	Anual
Derivado	Índice de Aridez	Eficiencia de la precipitación para cubrir las necesidades atmosféricas de las zonas (PP/ETo FAO-PM) (cuanto más bajo, mayor el déficit atmosférico de agua de una zona)	Trimestral

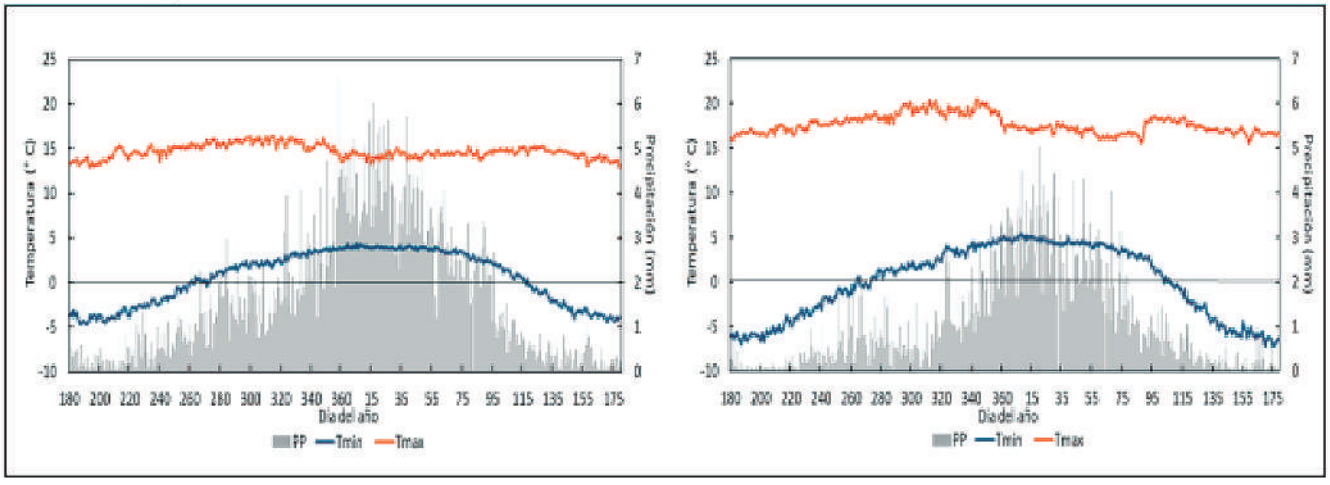
Fuente: Elaboración propia

3. RESULTADOS

La climatología de las comunidades y zonas que se exhibe en la Figura 1, se caracteriza por similar estacionalidad de la precipitación, pues las zonas se encuentran afectadas por el mismo sistema climático (Garreaud, R., 2009; Canedo-Rosso C. et al., 2019) aunque la magnitud es mayor en el Norte y en la comunidad de mayor altitud gracias a procesos de transporte de aire húmedo muy locales. Desde

un punto de vista térmico, la mayor diferencia entre los valores promedio de Tmax y Tmin en el Altiplano Central, demuestra una mayor aridez, pues la variación térmica no es suficientemente modulada por la humedad del aire, menos claro en el Altiplano Norte. Ambas zonas muestran inviernos severos, aunque la intensidad media de las heladas es mayor en el Centro que en el Altiplano Norte.

***Figura 1**. Valores promedio diarios del registro histórico de Ancoraimes (izquierda) y Umala (derecha) de Temperatura mínima, Temperatura máxima y Precipitación*



Fuente: Elaboración propia

Tendencias en las Temperaturas Máximas

Las Temperaturas máximas promedio muestran tendencias ascendentes en invierno y de transición (abril a septiembre) probablemente por el menor contenido de vapor de agua y la reducida nubosidad que disminuyen la capacidad de amortiguación de la atmósfera por lo que la energía acumulada se incrementa, siendo el proceso más moderado o desaparece en los meses de lluvia (Tabla 2). Similar comportamiento se presenta en los valores máximos de las temperaturas máximas que muestran suaves ascensos en invierno y claras tendencias de incremento en los meses primaverales, probablemente debido a la menor nubosidad en días puntuales, efecto producido por la concentración de la precipitación, lo que provoca que en días soleados se reciba mayor insolación directa. En el caso de los valores más bajos de las Tmax, estos muestran comportamientos variables probablemente por la menor ocurrencia de nevadas que antes reducían sus valores.

Tabla 2. *Tendencia y significancia estadística en las variables relacionadas a la Temperatura máxima*

	TMáx-media				Tmax-X				Tmax-N			
	Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala	
Mes	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.
Ene	1,19		1,02		1,41		1,22		1,93	+	0,73	
Feb	0,69		0,45		0,42		0,31		0,22		1,20	
Mar	1,53		1,97	*	0,28		1,31		0,68		2,36	*
Abr	1,69	+	3,06	**	1,83	+	3,07	**	1,55		2,98	**
May	1,63		2,94	**	0,98		2,78	**	0,37		2,10	
Jun	3,94	***	3,11	***	2,17	*	2,99	**	0,84		2,46	*
Jul	1,87	+	3,01	**	1,83	+	2,40	*	-0,24		2,27	*
Ago	3,00	**	2,21	*	1,42		0,86		1,60		2,14	*
Sep	3,00	**	2,94	**	3,20	**	0,64		2,68	**	2,67	**
Oct	2,63	**	0,98		2,59	**	0,41		1,74	+	0,49	
Nov	2,96	**	1,66	+	3,41	***	1,36		1,41		2,12	*
Dic	0,20		0,17		1,32		0,31		0,85		0,46	

Tendencia: + significativa al 90 %; *significativa al 95%; **significativa al 99%; ***significativa al 99.9%

Fuente: Elaboración propia.

Tendencias en las Temperaturas Mínimas

En Ancoraimes, la Tmin-media muestra tendencias claras de incremento en los meses de verano, pero no así en invierno y meses de transición (abril a septiembre), cuando, aunque con baja significancia, la tendencia es al descenso. Este proceso favorecería la acumulación energética para los cultivos entre noviembre y marzo, pero incrementa, o al menos mantiene la amenaza de helada al final y al inicio de la época de cultivo. Las Tmin-N varían en forma similar, con descensos entre abril y octubre, lo que significa mayor riesgo para los cultivos de secano en la época de cosecha, reduciendo las probabilidades de éxito de la poca agricultura invernal que se lleva adelante en la zona, incluso en un mundo más caliente, lo cual es confirmado por la tendencia a un mayor número de días con helada desde abril a noviembre. La aridez que podría estar incrementándose en general en la zona tropical, podría ser de mayor amenaza en el altiplano, pues la menor humedad atmosférica entre abril y noviembre incrementa la frecuencia e intensidad de heladas, particularmente en los meses de transición, situación no enfrentada en zonas de menor altitud. Las Tmin-X de Ancoraimes muestran incrementos moderados en invierno y altamente significativos en primavera y verano. Este parámetro se produce por el incremento de GEIs globales, que podrían invadir la zona altiplánica con mayor frecuencia, siguiendo la circulación atmosférica global (Tabla 3).

Umala enfrenta incrementos consistentes en la Tmin-media entre diciembre y febrero, y tendencias poco significativas, aunque variantes entre marzo y octubre. Sin embargo, la disgregación de las Tmin-N muestra que éstas parecen disminuir o al menos no presentar tendencias ascendentes, desde abril hasta noviembre, y solo aumentan en los meses de lluvia. Igualmente, el número de días en que las temperaturas bajan por debajo de

cero aumentan levemente en abril y noviembre y tienen poco cambio en resto del año (a excepción de septiembre). Esto sugiere que si bien, al igual que el resto del planeta, las temperaturas promedio han aumentado en la zona, la probabilidad de enfrentar heladas destructivas y los eventos puntuales de temperaturas bajas destructivas al inicio y al final del periodo de cultivo, no ha sido claramente influenciado y persiste en la zona. Las Tmin-X son consistentemente ascendentes, lo que es claramente influenciado por la mayor cantidad global de GEIs (Tabla 3).

Tabla 3. *Tendencia y significancia estadística en las variables relacionadas a la Temperatura mínima*

	TMin-media				Tmin-N				Tmin-X				Dias con helada			
	Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala	
Mes	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.
Ene	3,17	**	1,92	+	1,19		3,11	**	3,20	**	3,07	**				
Feb	3,70	***	3,04	**	0,46		2,51	*	3,45	***	3,17	**				
Mar	1,42		-0,16		-0,67		0,58		1,24		0,54					
Abr	-0,90		-0,54		-1,92	+	-0,61		1,15		0,67		2,32	*	0,43	
May	-1,27		0,13		-1,86	+	-0,16		0,26		1,16		1,37		-0,49	
Jun	-1,90	+	-0,08		-1,88	+	-0,12		-0,72		0,81		1,60		-1,46	
Jul	-1,23		1,11		-1,55	+	0,83		1,56		0,00		-0,45		-0,73	
Ago	-2,37	*	1,83	+	-1,92	+	0,26		0,04		1,67	+	-0,68		0,00	
Sep	-1,37		1,92	+	-1,63	+	-0,40		3,49	***	2,77	*	1,67	+	-2,08	*
Oct	0,43		1,41		-1,25	+	1,73	+	3,28	**	2,00	*	1,45		-0,76	
Nov	0,41		0,50		-0,89		0,80		4,16	***	0,94		0,58		0,32	
Dic	3,07	**	3,09	**	0,38		1,94	+	3,16	**	1,92	+				

Tendencia: + significativa al 90 %; *significativa al 95%; **significativa al 99%; ***significativa al 99.9%

Fuente: Elaboración propia

Tendencias en la Precipitación

En la Tabla 4 se presenta las tendencias históricas de los índices evaluados. La cantidad media de precipitación mensual muestra tendencias levemente negativas, aunque poco o no significativas en los meses de invierno, mientras que en verano existe cierta tendencia al incremento, aunque con baja significancia en diciembre y febrero en ambas localidades.

Tabla 4. *Tendencia y significancia estadística en las variables de Precipitación y derivados*

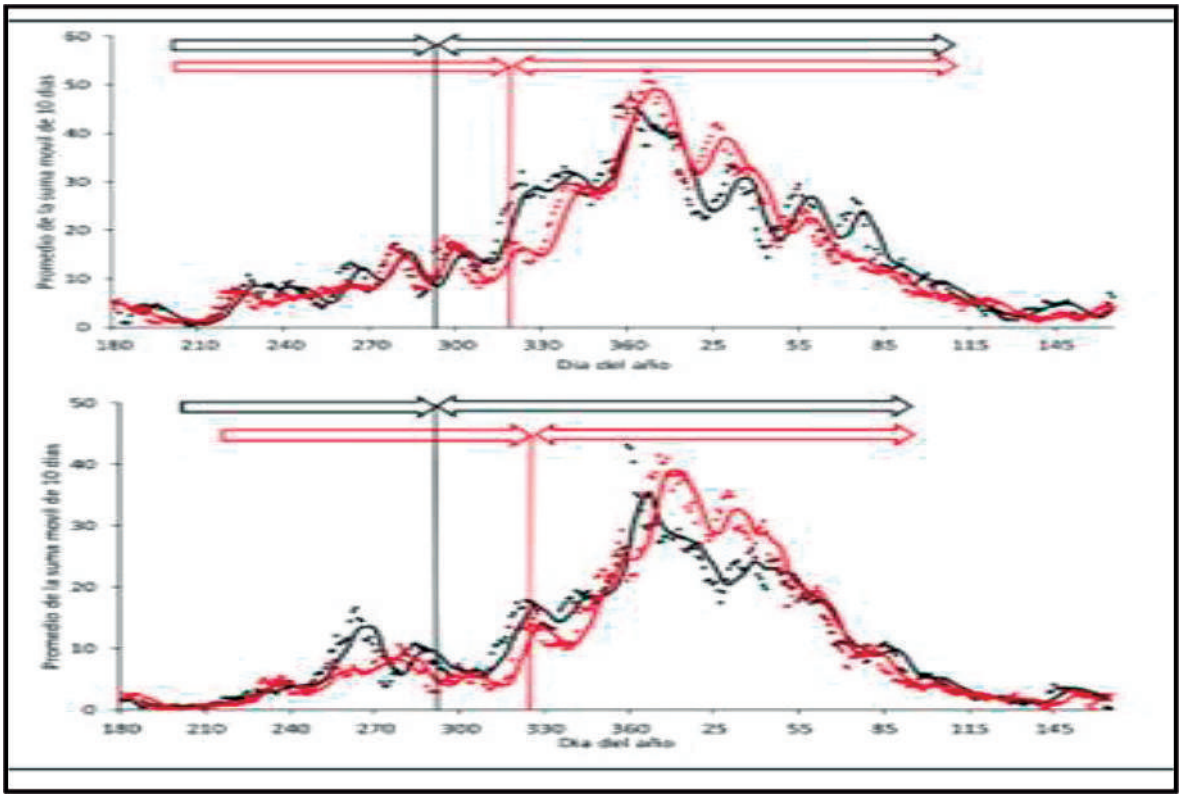
PP acumulada mensual					Días con precipitación				Índice de Aridez				Índice de estacionalidad de la PP			
	Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala	
Mes	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.	Test Z	Sig.
Ene	0,00		-0,25		-0,18		-0,75						2,29	*	2.26	*
Feb	1,45		1,01		1,06		2,14	*	1,45		0,37					
Mar	-0,56		-2,06	*	-0,46		-1,34									
Abr	-0,88		-0,91		0,04		-0,67									
May	-1,12		-0,56		-0,96		-0,57		-1,01		-3,00	**				
Jun	-1,07		-0,81		-1,04		-0,33									
Jul	1,65	+	-0,90		1,24		-0,10									
Ago	-1,27		-0,97		-2,28	*	-1,18		-1,82	+	-0,58					
Sep	-1,41		-2,12	*	-0,09		-1,78	+								
Oct	0,24		-0,96		-1,61		-1,29									
Nov	-0,64		-1,44		-1,88	+	-0,68		-1,29		-2,06	*				
Dic	2,31	*	2,72	**	1,62		1,30									

*** α = 0.001 de significancia; ** α = 0.01 de significancia; * α = 0.05 de significancia; + α = 0.1 de significancia

Fuente: Elaboración propia.

La baja significancia en todos los meses y en forma anual no permite concluir cambios en esta variable, aunque sí una cierta tendencia a la concentración entre los meses de diciembre a febrero. Similar comportamiento presenta el número de días con precipitación, con tendencia al descenso en la mayor parte de los meses, aunque con baja significancia. El poco cambio de los días con lluvia, incluso en los meses en que la precipitación asciende sugiere que la misma o mayor cantidad de lluvia ocurra en menos días. Al presentarse mayor cantidad de días sin nubosidad, se incrementa el riesgo de heladas durante el periodo de cultivo, incluso conociendo que la precipitación muestra ascensos en esos meses. Un análisis mas detallado de la precipitación en ambas zonas denota el comportamiento diario promedio de los registros de precipitación diaria entre 1980-1999 y desde 2000 hasta 2020 (Figura 1), confirmando las tendencias de concentración de la lluvia.

Figura 7. *Promedio de la suma móvil de la precipitación recibida en 10 días en las zonas estudiadas en los periodos 1980-1999 (línea negra) y 2000-2020 (línea roja), en Ancoraimes (arriba) y Umala (abajo). Las flechas exhiben el ciclo que podrían tener los cultivos a secano considerando el inicio y final de la época de lluvias para ambos periodos (en similares colores).*



Fuente: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El cambio climático ha incrementado la exposición de las zonas altiplánicas pues las tendencias observadas no se restringen al ascenso lineal de la temperatura, sino que muestran una combinación de condiciones atmosféricas altamente relacionadas. Gran parte de las tendencias encontradas confirman la percepción de los agricultores y podrían provocar confusiones en los productores y profesionales relacionados a la producción agropecuaria, pues, por ejemplo, con calentamiento global se esperaría un menor riesgo de heladas, lo cual no se verifica en la zona. La concentración de la precipitación en menos meses y en menos eventos se traduce en menor nubosidad, mayor riesgo de desecación por insolación directa y mayor probabilidad de heladas nocturnas producidas por irradiación, incrementada por la propia transparencia atmosférica y la poca cantidad relativa de gases existentes. Sin embargo, las temperaturas mínimas ascendentes también podrían significar mayor acumulación térmica en los cultivos y ciclos más cortos. Por ello, es necesario que el análisis de exposición de los ecosistemas altoandinos considere las particularidades de la atmósfera local que, a pesar de enfrentar el proceso global de calentamiento y sus consecuencias, también afrenta sus propias dinámicas. Como consecuencia de la concentración de la lluvia,

los suelos están más expuestos a la acción de precipitaciones más agresivas, sufriendo procesos erosivos más intensos. Dada la poca diversidad y reducido desarrollo de especies locales, los suelos no cuentan con una cobertura vegetal natural muy desarrollada. La ampliación de las áreas productivas, podría reducir aún más la cobertura e incrementar la exposición del suelo.

El Altiplano central muestra cierta tendencia a mayor concentración de la precipitación, así como un mayor riesgo de heladas, lo que, combinado con suelos más pobres, con menor materia orgánica y menor vegetación, con consecuencias de una relativa mayor vulnerabilidad. Por ello, es pertinente que las instituciones y organizaciones otorguen énfasis a las acciones que sí son manejables localmente, bajo antiguos paradigmas que eran los llevados por los agricultores en el anterior siglo como el descanso de los suelos, la permanente cobertura superficial y acciones de siembra de lluvia.

Los resultados presentados en este documento exhiben la necesidad urgente de enfrentar muy creativamente el impacto del cambio climático en el altiplano, desde una visión integral tanto ecosistémica como socio-productiva. No es posible aislar las problemáticas, y se deben diseñar propuestas creativas basadas en la interacción con los productores. Los procesos más claramente identificados, se relacionan con incrementos promedios de la temperatura del aire que resultan en mayor demanda de evapotranspiración, pero con persistencia de la amenaza de heladas y concentración de la precipitación durante el periodo agrícola. Al no ser capaces de modificarlos, las respuestas deben basarse en el manejo del ecosistema y del incremento de la capacidad adaptativa y así reducir la vulnerabilidad integral.

Es necesario puntualizar, que las priorizaciones de índices climáticos analizados (Tabla 1) fueron guiadas por los agricultores quienes discuten y expresan procesos y extremos meteorológicos poco esperables por modelos y proyecciones. Esto demuestra la urgencia de integrar los sistemas de conocimientos, lo cual, a pesar de parecer repetitivo, aun no se traduce en acciones concretas para ayudar a reducir la vulnerabilidad de una zona productiva tan importante para la seguridad alimentaria, no solo boliviana sino global.

5. REFERENCIAS

Andersen, L., & Mamani, R. (2009). Cambio climático en Bolivia hasta 2100: Síntesis de costos y oportunidades. Estudio Regional de Economía del Cambio Climático en Sudamérica.

Canedo-Rosso, C., Uvo, C. B., & Berndtsson, R. (2019). Precipitation variability and its relation to climate anomalies in the Bolivian Altiplano. International Journal of Climatology, 39(4), 2096-2107. https://doi.org/10.1002/joc.5937

Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 194(1-3), 5-22.

Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather, Adv. Geosci., 22, 3–11, https://doi.org/10.5194/.

Segura, H., Junquas, C., Espinoza, J. C., Vuille, M., Jauregui, Y. R., Rabatel, A., ... & Lebel, T. (2019). New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. Climate dynamics, 53(1), 405-426.

Taboada, C., Garcia, M., Gilles, J., Pozo, O., Yucra, E., & Rojas, K. (2017). Can warmer be better? Changing production systems in three Andean ecosystems in the face of environmental change. Journal of Arid Environments, 147, 144-154.

Valdivia, C., Thibeault, J., Gilles, J. L., García, M., & Seth, A. (2013). Climate trends and projections.

MEJORAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LOS TALLOS DE QUINUA UTILIZANDO LA LEVADURA MUTADA *Scheffersomyces* (*Pichia*) *stipitis* CBS 6054

Bioetanol Production Improvement From Quinoa Stems Using Mutated Yeast *Scheffersomyces (Pichia) stipitis CBS 6054*

C. Eliza Claure[1], Carlos Martín[2] y Cristhian Carrasco[1]

[1] Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

[2] Departamento de Química, Universidad de Umeå, SE-901 87 Umeå, Suecia

E-mail: ccarrasco@umsa.bo

RESUMEN

Debido al creciente interés en nuestro país por diversificar la matriz energética y la considerable expansión de los cultivos de quinua. La utilización de los tallos de quinua se revela como una potencial fuente de materia prima, para la producción de bioetanol como biocombustible de segunda generación. En la presente investigación se utilizó tallos de quinua como material lignocelulósico. La materia prima fue sometida a un pretratamiento por explosión de vapor con H_3PO_4 por 5 minutos a 190°C. El objetivo principal fue el de mejorar el rendimiento en la producción de bioetanol a partir de un proceso de la Pre-fermentación Sacarificación y Co-fermentación Simultánea (PSCFS) con base a estudios previos. La investigación fue desarrollada empleando un coctel enzimático Cellic Ctec3 (Novozymes), la levadura *Scheffersomyces* (*Pichia*) *stipitis* CBS 6054 genéticamente modificada con la adición de tres diferentes concentraciones (10, 30, 50 µL) del agente químico etilmetanosulfonato (EMS), y la adición de tres distintas concentraciones de sulfito sodio (10, 12.5 and 150 mM) como agente reductor.

Palabras clave: Tallos de quinua, Cellic Ctec3, *Scheffersomyces* (*Pichia*) *stipitis* CBS 6054, EMS, bioetanol.

ABSTRACT

Due to the growing interest in Bolivian government to diversify the energy matrix and the considerable expansion of quinoa crops, the usage of quinoa stalks is revealed as a potential source of raw material for the production of bioethanol as a second-generation biofuel. In the present research, quinoa stalks were used as lignocellulosic residues. The H_3PO_4 steam pretreatment was carried out with a holding time of 5 min at temperature of 190°C. The main objective was improved the ethanol yield based on a process of Simultaneous Pre-fermentation Saccharification and Co-fermentation (SPFSCF) based on previous research. This research was developed simultaneously through three relevant factors: the addition of Cellic Ctec3 (Novozymes), the yeast Scheffersomyces (Pichia) stipitis CBS 6054 genetically modified with the addition of chemical mutagen agent ethylmethanesulfonate (EMS) at three different volumes (10, 30 and 50 µL) and, the addition of different concentrations of sodium sulfite (10, 12.5 and 150 mM) as a reducing agent.

Keywords: Quinoa stalks, Cellic Ctec3, *Scheffersomyces* (*Pichia*) *stipitis* CBS 6054, EMS, bioethanol.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el gobierno boliviano ha mostrado gran interés en proyectos relacionados a los biocombustibles, con el objetivo de diversificar la matriz energética. La comercialización de un nuevo tipo de gasolina denominado "Súper Etanol 92[4]" (Flores, 2018) puede ser considerado como el punto de partida para la producción de biocombustibles en territorio boliviano. Sin embargo, la diversificación de la matriz energética debería considerar el uso de residuos agrícolas con el fin de promover una producción sostenible y amigable con el Medio Ambiente.

La presente investigación se encuentra encaminada a mejorar el rendimiento en la producción de bioetanol a partir de tallos de quinua como materia prima y la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 como agente biológico para la obtención de bioetanol. Sin embargo, la producción de biocombustibles de segunda generación presenta varios limitantes y desafíos relacionados principalmente por el complejo sistema de degradación de la biomasa lignocelulósica. En un principio se debe encontrar un pretratamiento adecuado para acceder a los azucares requeridos durante la fermentación contenidos en el material lignocelulósico (Gutierrez , 2016), además de evitar la formación excesiva de agentes inhibidores (Cavka, Martin, Alriksson, Mortsell, & Jonsson, 2015). Posteriormente se debe emplear una levadura capaz de producir cantidades considerables de etanol a partir de pentosas y hexosas. Finalmente, se debe encontrar un método adecuado para detoxificar el lodo de pretratamiento (sólido y licor hidrolizado) (Alriksson, Cavka, & Jonsson, 2011), y así evitar la inhibición durante el proceso de Pre-fermentación Sacarificación y Co-fermentación Simultánea (PSCFS).

4 Súper Etanol 92: Mezcla de alcohol anhidro al 12% y gasolina con un octanaje de 92

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Hidrolisis por explosión de vapor con catalizador acido

Los tallos de quinua fueron triturados y tamizados, para obtener muestras que tuvieran un tamaño de partícula de 1-1.7 mm determinado en estudios previos (Villamil Fernández, 2013). Las impurezas y saponinas fueron eliminadas mediante el lavado con agua a 50 °C y se realizó la prueba de altura de espuma (Lozano, Ticona , Carrasco, Flores, & Almanza , 2012), para verificar que toda la saponina fuera removida. Se retiró el exceso de agua, hasta lograr una humedad del 75,4%. A continuación, se procedió a realizar la impregnación acida, usando como catalizador ácido fosfórico 2% v/v, relación sólido-liquido 1:5 durante 8 horas.

Las muestras pretratadas de 200.00 ±1.00 g fueron colocadas en el equipo de explosión de vapor. En todos los casos el tiempo de retención fue de 5 minutos la temperatura 190°C y la presión 22 bares.

Finalmente, se analizó el contenido de azucares y sustancias inhibidoras en el equipo HPLC CBM-20A (Shimadzu Corp., Japón) equipado con un controlador del sistema (CBM-20ª), una bomba isocrática (LC-30AD), un detector de índice de refracción (RID-20A), un horno para la columna (CTO-10 ASVP), una unidad de desgasificación en línea (DGU-20A) y un auto-inyector (SIL-30AC).

Actividad enzimática de la Cellic Ctec3

Se utilizó el coctel enzimático Cellic Ctec3 (Novozymes), comparando los resultados obtenidos con su predecesora Cellic Ctec2. Se cuantifico diferentes tipos de actividades enzimáticas (celulasa, β-glucosidasa, β-xilosidasa, glucanasa y xilanasa). El método de análisis se obtuvo del trabajo de (Krisztina Kovacs, 2009) y

de la norma "Medición de la actividad celulasa" NREL/TP-510-42628.

Adaptación al licor de pretratamiento de la levadura Scheffersomyces (Pichia) stipitis CB 6054 genéticamente mutada con el agente químico EMS

Primeramente, se realizó la mutación de las cepas de levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CB 6054 utilizando distintas concentraciones del agente químico EMS (10,30 y 50 µL) y el protocolo detallado en estudios previos (Winston, 2008) y (Muralidhar, Chethan, Kavya, Qudsiya, & Aamir, 2014). A continuación, se adaptó las cepas mutadas y una cepa sin mutar al licor de pretratamiento. Durante el proceso de adaptación se intercalo los cultivos directo e indirecto y se incrementó la cantidad de licor de pretratamiento desde 25, 50 hasta llegar al 75%. El cultivo indirecto (medio liquido) fue preparado con los compuestos de las Tablas 1 y 2. Las muestras fueron inoculadas en la campana de flujo laminar HF 1200 (Heal Force, China). Estas fueron cultivadas por 24 horas, a 30°C pH 5 y 120 rpm.

Tabla 1. Preparación de la solución de trazas de metales

Reactivo	Cantidad
EDTA	6.00 g
Cloruro de calcio dihidratado	1.80 g
Sulfato de zinc heptahidratado	1.80 g
Sulfato ferroso heptahidratado	1.20 g
Ácido bórico	0.40 g
Cloruro de manganeso (II) heptahidratado	0.31 g
Molibdato de sodio dihidratado	0.16 g
Cloruro cobaltoso	0.12 g
Sulfato cúprico	0.12 g
Yoduro de potasio	0.04 g
Nota. Los componentes solidos fueron disueltos en 2 L de agua destilado y posteriormente autoclavados a 121°C por 20 minutos. La solución fue conservada estéril a 4°C.	

Tabla 2 Preparación de la solución de azúcares sintéticos y sales para el medio de cultivo liquido

Solución de azúcares		
Reactivo	**Cantidad**	
Xilosa	1.90 g	
Glucosa	0.08 g	
Arabinosa	0.02 g	
Nota. Los azucares fueron disueltos en 50 mL de agua destilada y autoclavados a 121°C por 20 min.		
Solución de sales		
Reactivo	**Concentración**	**Volumen**
Sulfato de amonio	7.5 g/L	5 mL
Fosfato mono potásico	3.5 g/L	2.5 mL
Sulfato de magnesio	0.75 g/L	0.8 mL
Trazas de metal	Ver Tabla 1	1 mL
Nota. Las sales fueron disueltas en 50 mL de agua destilada y autoclavadas a 121°C por 20 min.		

El cultivo directo (medio solido) fue preparado con los compuestos detallados en la Tabla 3.

Tabla 3 Preparación de la solución de azucares sintéticos y otros reactivos para el medio de cultivo solido

Reactivo	Cantidad
Xilosa	1.90 g
Glucosa	0.80 g
Arabinosa	0.02 g
Extracto de levadura	1.00 g
Peptona a partir de soya	2.00 g
Agar-Agar	2.00 g
Nota. Los compuestos fueron disueltos en 100 mL de agua destilada y autoclavados a 121°C por 20 min.	

Se sembró las cepas por el método de estría en placas solidificadas; posteriormente se incubo a 30°C por 48 horas y pH 5 para finalmente conservar las muestras en el refrigerador a 4°C. Finalmente, se analizó todas las muestras por duplicado (cultivo indirecto al 75% de hidrolizado), mediante cromatografía líquida de alta resolución empleando el equipo HPLC CBM- 20 (Shimadzu Corp., Japón).

Pre-fermentación Sacarificación y Co-Fermentación Simultánea (PSCFS)

Primeramente, se obtuvo un inoculo de 100 mL, utilizando la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada con 10 µL de EMS. Se preparó el mismo con los componentes de las tablas 1 y 2.

Posteriormente se procedió a obtener una concentración fortificada de la cepa de 4 g/L. Para esto se preparó 230 mL de medio sintético, 20 mL del inoculo. Se añadió 750 mL de licor de pretratamiento durante 16 horas, mediante bomba peristáltica. El licor fue suplementado con azucares sintéticos con el fin de llegar a una concentración de 35 y 45 [g/L] de glucosa y xilosa respectivamente (Magnus, Olofssom, & Liden, 2009).

Una vez terminado el tiempo de adaptación. Se procedió a filtrar el pellet de levadura, dentro de la campana de flujo laminar HF 1200 (Heal Force, China) a 3000 rpm por 7 minutos. Finalmente se obtuvo una muestra homogénea de concentración 4 g/L utilizando una solución de NaCl 0,9 % p/p.

Se inició las pruebas PSCFS con 200 g de lodo pretratado a pH 5 y 20 mL del inoculo obtenido en el proceso anterior. El tiempo de pretratamiento fue de 3 horas - 15 minutos antes de que finalice la fase de pretratamiento se agregó sulfito de sodio. Se varió la cantidad de sulfito de sodio (10 mM, 12.5 mM y 15 mM) para cada prueba. Finalizadas las 3 horas se pasó a agregar tres muestras de 100 g de lodo pre tratado y 3 muestras de enzima con la cantidad necesaria para 15 [FPU/ g glucano]. Se intercalo lodos y enzimas; agregando los mismos cada hora durante las 6 horas siguientes. Además, se mantuvo la temperatura en 35°C, el pH 5 y 600 rpm. Durante todo el proceso se tomó muestras de aproximadamente 3,0 ± 0,5 mL. Las cuales fueron sometidas a un baño de hielo, centrifugado y posteriormente analizadas mediante cromatografía liquida en el equipo HPLC CBM- 20 (Shimadzu Corp., Japón)

Caracterización de los tallos de quinua

Se caracterizó: los tallos de quinua de la variedad Quinua Real Blanca recolectados del Municipio Salinas de Garci y Mendoza del Departamento de Oruro, los lodos de pretratamiento obtenidos mediante la hidrolisis por explosión de vapor y los remanentes solidos provenientes de todas las pruebas de PSCFS. Para la caracterización se emplearon los reportes técnicos del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL por sus siglas en inglés). Las pruebas realizadas fueron: “Preparación de muestras para análisis de composición” NREL/TP-510-42620 “Determinación de los Sólidos Totales en la Biomasa y Sólidos Totales Disueltos en Muestras de Proceso de Líquidos” NREL/TP-510-42621, “Determinación de Carbohidratos Estructurales y Lignina en la Biomasa” NREL/TP-510-42618 y “Determinación de cenizas en biomasa” NREL/TP-510-42622

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hidrolisis por explosión de vapor con catalizador acido

Se determinó que la cantidad de saponina contenida en los tallos es de 0.28 ± 0.02 %, mientras que la cantidad de saponinas en los tallos lavados fue del 0% verificándose que todas las saponinas fueron retiradas.

El licor de pretratamiento fue analizado por cromatografía liquida en el equipo HPLC CBM-20 (Shimadzu Corp., Japón). Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4 Concentración de azucares (g/L) y de compuestos inhibidores (g/L)

	Detector A			
	Celobiosa [g/L]	Glucosa [g/L]	Xilosa [g/L]	Arabinosa [g/L]
Prom.	1.23	3.37	10.86	3.41

	Detector B		
	Ácido Acético [g/L]	HMF [g/L]	Furfural [g/L]
Prom.	6.66	0.51	1.94

Se puede observar que se cuenta con concentraciones significativas de xilosa y glucosa, pero también con cantidades considerables de sustancias inhibidoras como el ácido acético, el HMF y el furfural. Por lo cual se deberá usar agentes reductores para mitigar los efectos negativos que estos producen en la producción de etanol.

Actividad enzimática de la Cellic Ctec3

Para la medición de las distintas actividades enzimáticas se preparó curvas de calibración "absorbancia vs concentración". Interpolando la absorbancia promedio de cada una de las actividades enzimáticas se obtuvo las distintas concentraciones.

Finalmente se corrigió los valores obtenidos, utilizando la reacción de Biuret para la determinación de la cantidad de proteínas. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 5:

Tabla 5 Determinación de las actividades enzimáticas de la Cellic Ctec3

	Absorbancia	Factor de dilución	Actividad enzimática
Actividad Celulolitica [UI /g enzima]	0.4344	1:1000	1 456
Actividad Xilanolítica [UI /g enzima]	0.9077	1:75000	157 809
Actividad ß Glucosidasa [UI /g enzima]	1.1514	1:750000	44 874 516
Actividad ß Xilosidasa [UI /g enzima]	0.6425	1:10000	329 895
Actividad [UPF /g enzima]	0.7986	1:5000	214

Los resultados muestran que el coctel enzimático Cellic Ctec 3 cuenta con actividades enzimáticas superiores a su predecesor Cellic Ctec 2, lo cual es beneficioso para el proceso de Pre fermentación Sacarificación y Co-Fermentación Simultánea (PSCFS) (Cavka, Bjorn, & Jönsson, 2011). Para el caso de la Cellic CTec2 las actividades Xilanolítica ß-Glucosidasa y ß Xilosidasa son de solo 3 332, 10 653, 53 [UI/g] respectivamente y la Actividad en UPF es de 77 [UPF/mL] (Farfan Ramos , 2016). Por lo tanto, la cantidad de enzima necesaria en nuestro proceso PSCFS será significativamente menor, lo repercutirá en los costos de inversión. Además, los valores de la actividad enzimática muestran resultados similares a los obtenidos en otras investigaciones (Li, y otros, 2013).

Adaptación al licor de pretratamiento de la levadura Scheffersomyces (Pichia) stipitis CBS 6054 genéticamente mutada con el agente químico EMS

Al finalizar la adaptación de las 4 muestras hasta un 75 % de licor de pretratamiento (3 variaciones de la mutación y una muestra sin mutar), se procedió a analizar las mismas por duplicado en

el HPLC CBM- 20 (Shimadzu Corp, Japón) (ver Tabla 6).

Tabla 6 Concentración en (g/L) de bioetanol en los cuatro grupos de Scheffersomyces (Pichia) stipitis CBS 6054

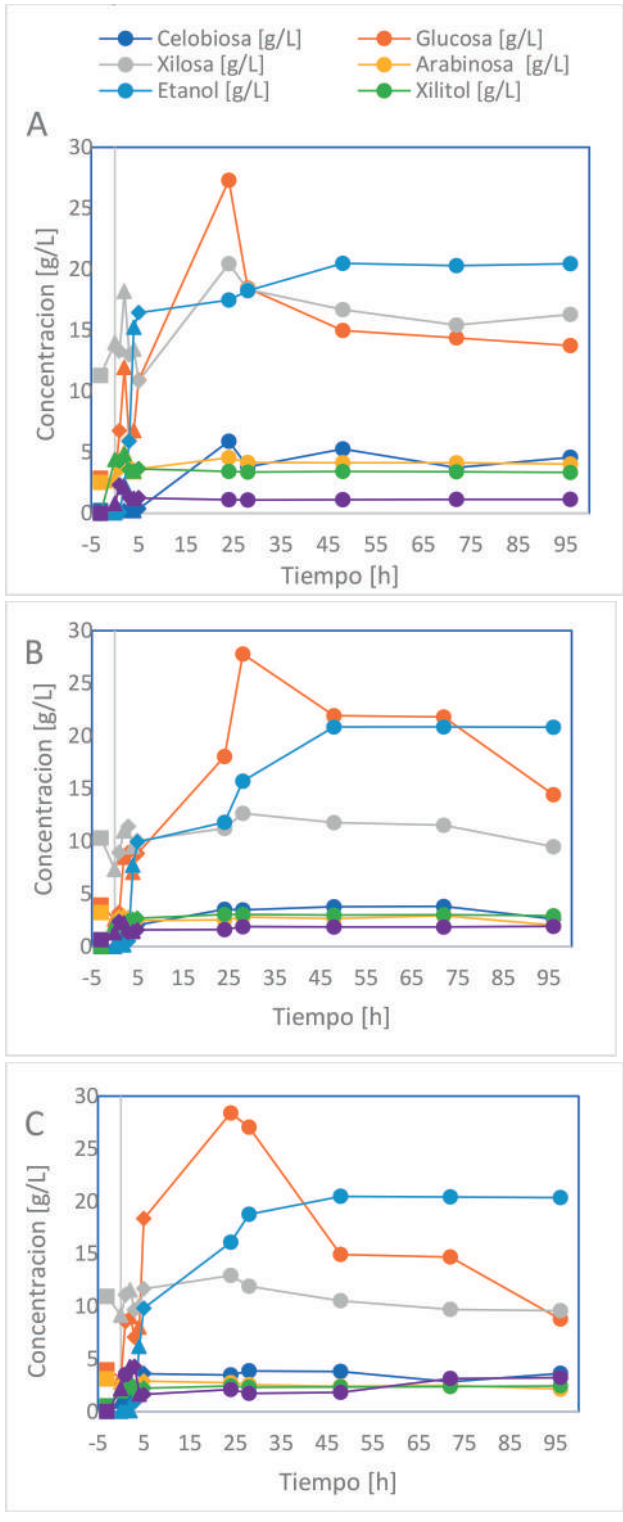
Concentración de EMS [µL]	Concentración de Etanol [g/L]
Muestra sin mutación	0.300
	0.292
10	**0.816**
	0.899
30	0.694
	0.641
50	0.434
	0.435

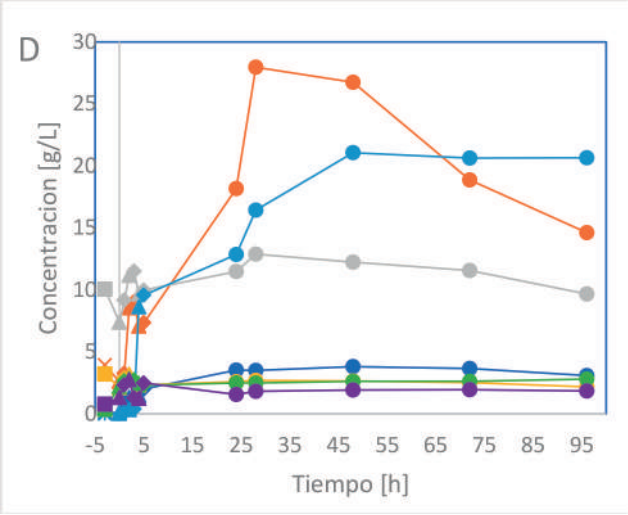
Los resultados de la Tabla 6 muestran que la cepa de la levadura *Scheffersomyces (Pichia) Stipitis* CBS 6054 mutada con 10 µL del agente EMS presenta mayor cantidad de bioetanol. Para las siguientes pruebas se trabajó exclusivamente con esta cepa.

Pre-fermentación Sacarificación y Co-Fermentación Simultánea (PSCFS)

Se realizó las pruebas de Pre-fermentación Sacarificación y Co-Fermentación Simultánea (PSCFS) variando la concentración de sulfito de sodio en cada muestra (10, 12.5 y 15 mM). Mediante cromatografía liquida de alta resolución en el equipo HPLC CBM- 20 (Shimadzu Corp, Japón) se obtuvo las siguientes curvas de fermentación (ver Figura 1).

Figura 1 Concentración de azucares (celobiosa, glucosa, xilosa arabinosa, etanol, xilitol y glicerol) durante las pruebas PSCFS A, B, C, y D



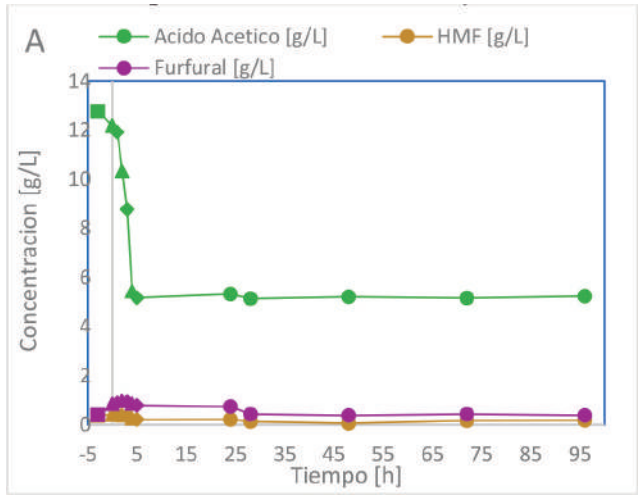


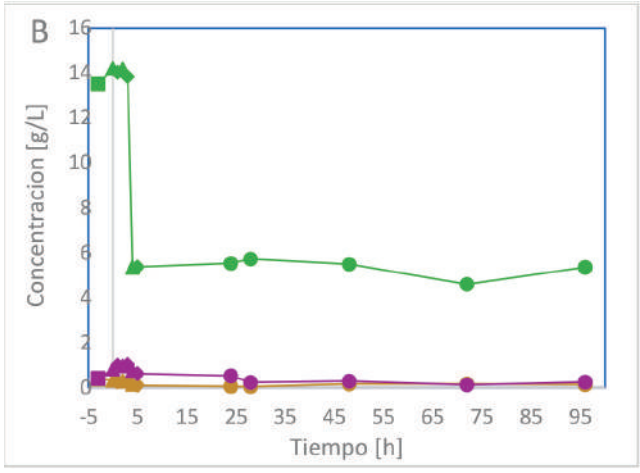
A Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 10 mM de sulfito de sodio **B** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 12.5 mM de sulfito de sodio **C** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 15 mM de sulfito de sodio **D** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 12.5 mM de sulfito de sodio (duplicado prueba B)

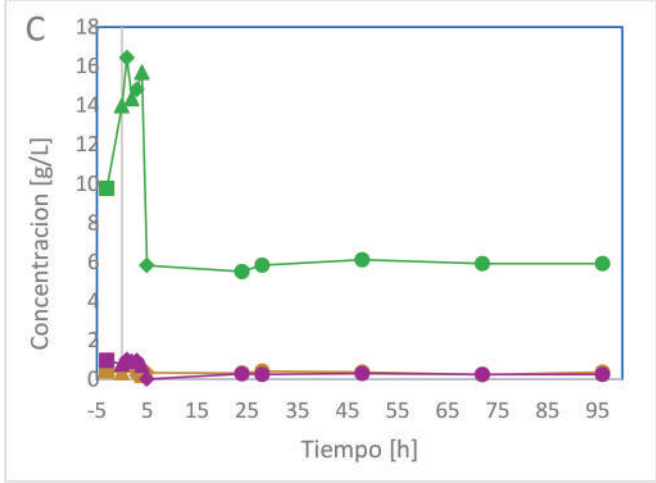
■ Inicio del proceso de pre fermentación ▲ Adición del coctel enzimático Cellic Ctec3 ♦ Adición de lodo de pretratamiento ● Únicamente toma de muestras

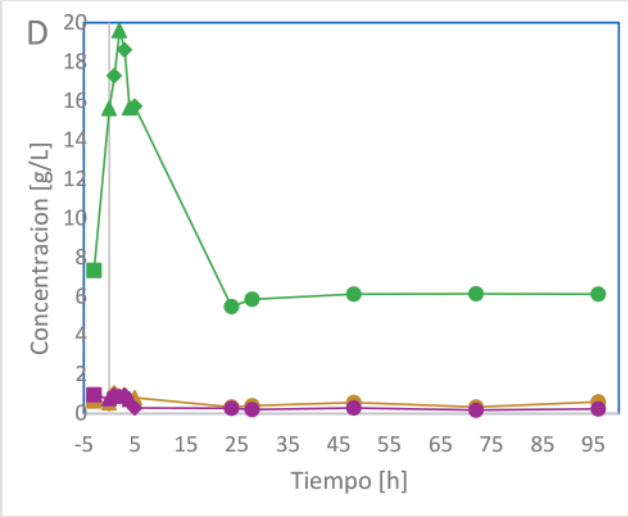
Se observa que la concentración de etanol aumenta paulatinamente hasta alcanzar su máximo a las 48 horas en todos los casos. En la Figura 1 se puede observar que la concentración máxima de etanol es de 20.49, 20.86, 20,36 y 21,06 g/L para los casos A, B, C y D respectivamente. Llegándose a comprobar que los mejores rendimientos de etanol se obtienen adicionando una concentración de 12,5 mM de sulfito de sodio. Por otra parte, la Figura 2 muestra la concentración de las sustancias inhibidoras a lo largo de las 96 horas de duración de los procesos de PSCFS.

Figura 2 Concentración de compuestos inhibidores (ácido acético, HMF y furfural) durante las pruebas PSCFS A, B, C, y D









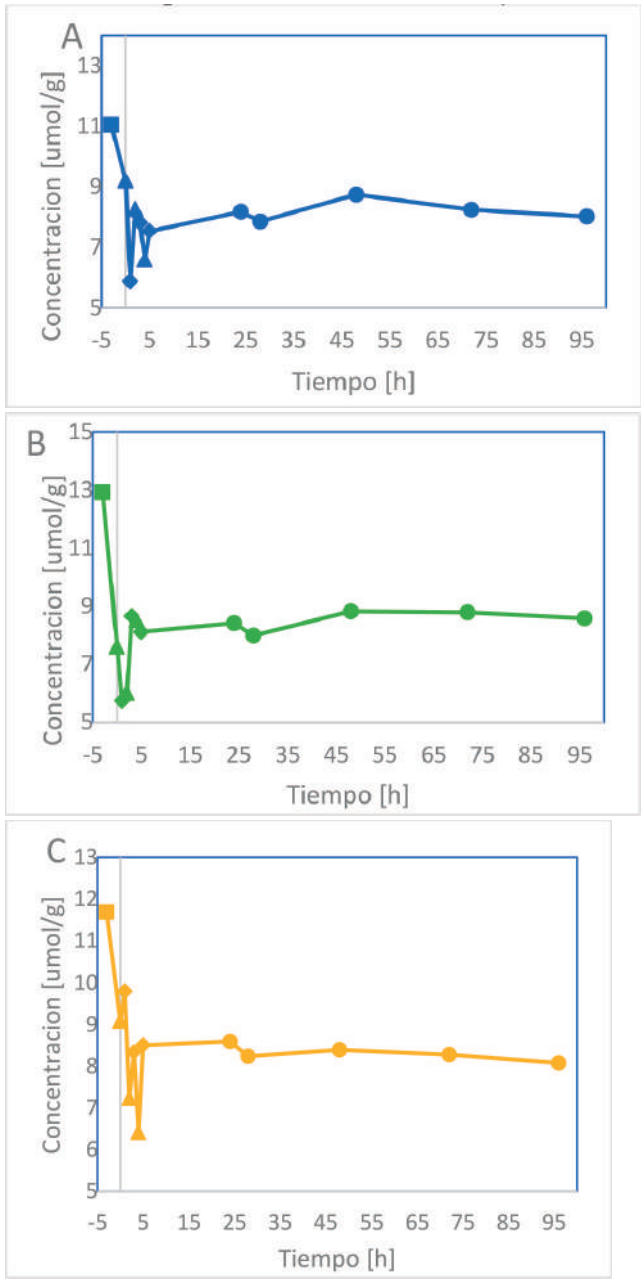
A Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 10 Mm de sulfito de sodio **B** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 12.5 Mm de sulfito de sodio **C** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 15 Mm de sulfito de sodio **D** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 12.5 Mm de sulfito de sodio (duplicado prueba B)

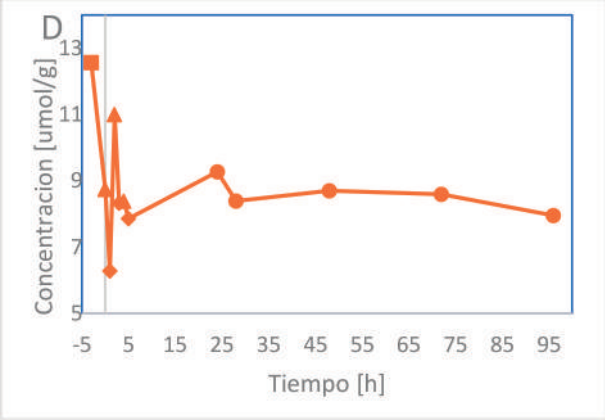
■ Inicio del proceso de pre-fermentación ▲ Adición del coctel enzimático Cellic Ctec3 ♦ Adición de lodo de pretratamiento ● Únicamente toma de muestras

La Figura 2 muestra que las concentraciones de furfural y HMF son relativamente bajas. Sin embargo, existen cambios significativos en la concentración de ácido acético. Se puede apreciar que en todos los casos la concentración del mismo disminuye dramáticamente pasadas las 24 horas de iniciado el proceso de PCSFS.

Se analizó también el contenido de Fenoles Totales por el método de Folin-Ciocalteu, obteniéndose los siguientes resultados (ver Figura 3).

Figura 3 Concentración de Fenoles Totales durante las pruebas PSCFS A, B, C, y D





A Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 10 Mm de sulfito de sodio **B** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 12.5 Mm de sulfito de sodio **C** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 15 Mm de sulfito de sodio **D** Prueba de PCSFS con la levadura *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 mutada y la adición de 12.5 Mm de sulfito de sodio (duplicado prueba B)

■ Inicio del proceso de pre fermentación ▲ Adición del coctel enzimático Cellic Ctec3 ♦ Adición de lodo de pretratamiento ● Únicamente toma de muestras

Los resultados muestran un comportamiento similar al de las curvas de ácido acético. Con la diferencia de que las concentraciones disminuyen a partir de las 6 horas iniciado el proceso. De igual forma que en la disminución de ácido acético se asume que la disminución de Fenoles Totales está relacionada a la adición de sulfito de sodio.

Caracterización de los tallos de quinua

Los resultados de la composición estructural de los tallos de quinua, el lodo de pretratamiento y los sólidos remanentes se detallan en las Tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7 Caracterización fisicoquímica de los tallos de quinua (variedad Real Blanca)

Por cada 100 g de muestra			
Glucano	38.65	±	0.18
Xilano	16.12	±	0.92
Arabinano	3.87	±	0.02
Lignina	18.96	±	1.27
Klason	15.04	±	1.26
Soluble en Acido	3.93	±	0.05
Grupos Acetilo	2.79	±	0.08
Cenizas	4.03	±	0.21
Otros (extractivos y proteínas)	15.57	±	

Los carbohidratos estructurales representan el 58.64% del total de la muestra. Razón por la cual los tallos de quinua representan un potencial material lignocelulósico para tratamientos posteriores.

Se puede observar un incremento considerable en la cantidad de glucanos con respecto a los valores obtenidos en la caracterización de los tallos de quinua. El contenido de carbohidratos estructurales representa el 68.94 % del total de la muestra. El porcentaje de lignina aumenta hasta un 23.25% pero no es un incremento significativo. Los porcentajes de cenizas y grupos acetilos no varían significativamente.

Tabla 8 Caracterización fisicoquímica de los lodos de pretratamiento

Por cada 100 g de muestra			
Glucano	55.65	±	0.62
Xilano	9.68	±	0.04
Arabinano	3.61	±	0.00
Lignina	23.25	±	0.26
Klason	21.77	±	0.26
Soluble en Acido	1.48	±	0.05
Grupos Acetilo	1.99	±	0.04
Cenizas	5.30	±	0.23
Otros (extractivos y proteínas)	0.52	±	

Tabla 9 Caracterización de los sólidos remanentes de los procesos de PSCFS A.B.C y D

A) Por cada 100 g de muestra			
Glucano	10.72	±	0.11
Xilano	5.99	±	0.09
Arabinano	0.00	±	0.00
Lignina	63.35	±	0.22
Klason	59.66	±	0.21
Soluble en Acido	3.69	±	0.02
Grupos Acetilo	2.04	±	0.01
Cenizas	4.71	±	0.68
Otros	13.19	±	

B) Por cada 100 g de muestra			
Glucano	10.33	±	0.50
Xilano	5.85	±	0.15
Arabinano	0.00	±	0.00
Lignina	63.51	±	0.76
Klason	59.58	±	0.75
Soluble en Acido	3.93	±	0.02
Grupos Acetilo	1.95	±	0.01
Cenizas	4.98	±	0.12
Otros	13.38	±	

C) Por cada 100 g de muestra			
Glucano	55.65	±	0.62
Xilano	9.68	±	0.04
Arabinano	3.61	±	0.00
Lignina	23.25	±	0.26
Klason	21.77	±	0.26
Soluble en Acido	1.48	±	0.05
Grupos Acetilo	1.99	±	0.04
Cenizas	5.30	±	0.23
Otros (extractivos y proteínas)	0.52	±	

D) Por cada 100 g de muestra			
Glucano	9.47	±	0.37
Xilano	4.87	±	0.19
Arabinano	0.00	±	0.00
Lignina	61.74	±	0.22
Klason	58.21	±	0.22
Soluble en Acido	3.54	±	0.01
Grupos Acetilo	1.93	±	0.01
Cenizas	4.81	±	0.69
Otros	17.17	±	

Los resultados obtenidos tras realizar la caracterización de los sólidos remanentes muestran que el mayor porcentaje de los glucanos y xilanos fueron consumidos durante los procesos de PCSFS. Con base en los resultados obtenidos de la caracterización y las lecturas de cromatografía liquida de alta resolución se calculó los rendimientos de etanol, xilitol y glicerol como se detalla en la Tabla 10:

Tabla 10 Rendimientos Y_{se} (g etanol/ g azucares), Y_{sx} (g xilitol/ g azucares). Y_{sg} (g glicerol/ g azucares) y productividad (g etanol /g azúcares•h) calculados en las pruebas de PSCFS

Proceso PSCFS	Y_{se} [g/g]	Y_{se} [%]	Tiempo (máxima producción de etanol) [h]	Productividad [(g etanol /g azúcar•h]	Y_{sx} [g/g]	Y_{sg} [g/g]
A	0.22	**42.85**	48	0.28	0.03	0.01
B	0.22	**43.43**	48	0.28	0.03	0.02
C	0.21	**41.82**	48	0.28	0.02	0.02
D	0.22	**44.03**	48	0.29	0.03	0.02

Mediante un Análisis de Flujos Metabólicos se calculó el rendimiento del resto de los compuestos como se detalla en la Tabla 11

Tabla 11 *Rendimientos Y_{sn} (g nitrógeno/ g azucares). Y_{so} (g oxigeno/ g azucares), Y_{sb} (g biomasa/ g azucares). Y_{sc} (g dióxido de carbono / g azucares), Y_{sw} (g agua/ g azucares calculados) resolviendo el sistema de ecuaciones lineal.*

Proceso PSCFS	Y_{sn} [g/g]	Y_{so} [g/g]	Y_{sb} [g/g]	Y_{sc} [g/g]	Y_{sw} [g/g]
A	0.11	0.06	0.57	0.17	0.34
B	0.11	0.05	0.55	0.17	0.33
C	0.11	0.06	0.57	0.17	0.34
D	0.11	0.05	0.55	0.17	0.32

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al realizar el pretratamiento de los tallos de quinua mediante explosión de vapor se obtuvo la siguiente concentración de azucares: 10.86 g/L de xilosa, 3.37 g/L de glucosa y 3.41 g/L de arabinosa. Sin embargo, debe resaltarse también la formación de sustancias inhibidoras como la formación de: 6.66 g/L de ácido acético producto de la auto-hidrólisis de la hemicelulosa 1.95 g/L de furfural producto de la degradación de pentosas (xilosas y arabinosas) y 0.51 g/L de HMF producto de la degradación de hexosas (glucosas).Se debe mencionar también que tanto las concentraciones de azucares y sustancias inhibidoras, como los valores obtenidos de la caracterización de los tallos de quinua y los lodos de pretratamiento mostraron resultados similares a los obtenidos en investigaciones previas.

Se determinó que el coctel enzimático Cellic Ctec3 diseñado por la empresa *Novozymes* presenta las siguientes actividades enzimáticas: actividad celulolitica = 1 456 UI/g enzima; actividad xilanolítica = 157 809 UI/g enzima; actividad β-glucosidasa = 44 874 517 UI/g enzima; actividad β-xilosidasa= 329 895 UI/g enzima y actividad celulasa= 214 UPF/ (g enzima).

Se calculó la cantidad necesaria del coctel enzimático para 15 (UPF/g glucano) en las pruebas de PSCFS basándonos en estudios previos. Sin embargo, dada la alta efectividad del coctel enzimático la cantidad de glucosas liberadas durante dichos procesos duplico la cantidad de xilosas presentes. Lo cual se presume pudo producir una inhibición por competitiva por el transporte de azúcares.

Al realizar la mutación de la *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 con el agente mutagénico *EMS*, se observó la cepa mutada con 10 µL del mismo presenta un rendimiento 51.27% superior al de la cepa sin mutar transcurridas 24 horas de cultivo en una solución conformada por 25% de azucares sintéticos y 75% por licor de pretratamiento. Por lo cual el uso de esta levadura mutada incrementa las posibilidades de mejorar el rendimiento de etanol en los procesos de PSCFS.

La adición de sulfito de sodio está relacionada con la drástica disminución en la concentración de ácido acético y fenoles totales. El uso de sulfito de sodio como agente detoxificante reduce las posibilidades de inhibición.

Al comparar la caracterización de los lodos de pretratamiento con los sólidos remanentes se observa que una cantidad significativa de glucanos y xilanos fueron consumidos durante los procesos de PSCFS. Dichos valores también nos permitieron calcular los rendimientos respecto al valor teórico. Se observa que los mejores rendimientos se obtuvieron con la adición de 12.5 mM de sulfito de sodio. Obteniéndose un rendimiento entre 43.43 – 44.02% con la adición de 12.5 mM de sulfito de sodio. Si bien dicho valor no es lo suficientemente alto como para considerar un escalamiento de dicho proceso. Los resultados obtenidos en esta investigación permitirán realizar mejoras en procesos futuros. Sin embargo, la presencia de xilitol y glicerol muestra que no todos los azucares se convirtieron en etanol, sino que una parte de los mismos siguió otra ruta metabólica.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la cooperación SIDA y la Administración Sueca de Energía. A la investigadora Leslie Tejeda por la determinación de fenoles totales.

6. REFERENCIAS

Sluiter. A.. Hames. B.. Hyman. D.. Payne. C.. Ruiz. R.. Scarlata. C.. . . . Wolfe . J. (2008). Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Samples.

Alriksson. B.. Cavka. A.. & Jonsson. L. (2011). Improving the fermentability of enzymatic hydrolyzates of lignocellulose through chemical in-situ detoxification with reducing agents. *Bioresour Technol*. 1254-1263.

Álvarez–Castillo. A.. Garcia Hernandez . E.. Dominguez Dominguez . M.. Granados Baeza. J.. Aguirre Cruz. A.. Morales. C. A.. . . . Mendoza Martinez. A. (2012). Aprovechamiento Integral de los materiales lignocelulosicos. *Revista Iberoamericana de polimeros*. 140-150.

Capellan. I.. Mediavilla. M.. Castro. C.. & Carpintero. O. (2014). *Fossil Fuel Depletion and Socio-Economic Scenarios: An Integrated Approach.* Bilbao: Universidad del País Vasco.

Carrasco . C.. Cuno. D.. Carlqvist. K.. & Guran. L. (2014). SO2-catalysed steam pretreatment of quinoa stalks. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*.

Cavka. A.. Bjorn. A.. & Jonsson. L. (2011). Effect of Sulfur Oxyanions on Lignocellulose-Derived Fermentation Inhibitor. *Biotechnology and Bioengineer*. 2592-2599.

Cavka. A.. Martin. C.. Alriksson. B.. Mortsell. M.. & Jonsson. L. (2015). Techno-economic evaluation of conditioning with sodium sulfite for bioethanol production from softwood. *Bioresource Technology*. 129-135.

Farfan . V. (2016). *Producción de etanol a partir de tallos de quinua (Tesis de pre grado).* La Paz: Universidad Mayor de San Andres.

Farfan Ramos . V. (2016). *Produccion de bioetanol a partir de tallos de quinua .* La Paz.

Flores. Y. (10 de Octubre de 2018). Venta de Súper Etanol 92 comienza en unos 85 surtidores. *La Razon* .

Gutierrez . G. (2016). *Desarrollo de bioprocesos: produccion de biobutanol a partir de tallos de quinua (Tesis de pregrado).* La Paz: Universidad Mayor de San Andres.

Gutierrez Flores. G. (2016). *Desarrollo de Bioprocesos: Producción de biobutanol a partir de los tallos de la quinua (Chenopodium quinoa Willd.).* Universidad Mayor de San Andres: La Paz.

Hassan. S. (1999). 2-Deoxyglucose as a Selective Agent for Derepressed Mutants of Pichia stipitis. *Applied Biochemistry and biotechnology*. 77-99.

IPPC. (2014). *Impacts.Adaptation and Vulnerality. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change .* Cambridge University.

Jeffries. T.. Headman . J.. & Vleet. V. (2009). Pichia stipitis genomics. transcriptomics. and gene clusters. *Blackwell Publishing Ltd*. 793-807.

Krisztina Kovacs. S. M. (2009). Enzimatic hydrolysis of steam-pretreated lignocellulosic materials with Trichoderma atroviride enzymes produced in house. *Biomed central. 2*(14). 1-11.

Li. J.. Li. S.. Han. B.. Yu. M.. Li. G.. & Jiang. Y. (2013). A novel cost-effective technology to convert sucrose and homocelluloses in sweet sorghum stalks into ethanol. *Biotechnology fo Biofuels*. 1-12.

Lozano. M.. Ticona . E.. Carrasco. C.. Flores. Y.. & Almanza . G. (2012). Cuantificacion de saponinas en residuos de Quinua Real Chenopodium quinoa wild. *Revista Boliviana de Quinua*. 131-138.

Magnus. B.. Olofssom. K.. & Liden. G. (2009). Prefermentation improves xylose utilization in simultaneous saccharification and co-fermentation of pretreated spruce. *Biotechnology for Biofuels*. 2-8.

Morales. G.. & Sanchez Riano. A. M. (2010). Bioethanol Production from agroindustrial lignocellolosic byproducts. *Tumbaga*. 61-91.

Muralidhar. T.. Chethan. C.. Kavya. S.. Qudsiya. S.. & Aamir. J. (2014). Induced mutational studies on Sacharomyces cerevisiae for bioethanol production from fruit waste. *International Journal of Research in Engineering and Technology* . 274-279.

Sluiter. A.. Hames. B.. Ruiz. R.. Scarlata. C.. Sluiter. J.. Templeton. D.. & Crocker. D. (2011). Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass.

Villamil Fernández. A. (2013). *Modelaje y Simulación de un Hidrolizador Batch (Proceso Explosión De Vapor) para el Proceso de Obtención de Xilosa Y Xilo - Oligosacáridos a partir de residuos de la cerveza.* La Paz.

Winston. F. (2008). EMS and UV Mutagenesis in Yeast. *Current Protocols in Molecular Biology*. 13-82.

PRETRATAMIENTO DE LA PAJA BRAVA (*Festuca orthophylla*) CON SO_2 COMO CATALIZADOR

Pretreatment of Brava Straw (Festuca orthophylla) with SO2 as a Catalyst

Henrique Baudel 1 y Cristhian Carrasco 2

[1] *American Biomass Technologies, P.O. Box 13419-100, Piracicaba, Sao Paulo, Brasil*

2 Ingeniería Química e Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

E-mail: ccarrasco@umsa.bo

RESUMEN

La utilización de recursos lignocelulósicos como la paja brava como una de sus especies, Festuca orthophylla, representa un potencial sustrato para la producción de alcohol carburante y otros productos biotecnológicos, teniendo un alto contenido de carbohidratos y gran disponibilidad como materia prima en el Altiplano Boliviano. En este trabajo, la paja brava fue pretratada e hidrolizada con SO_2 (2.5 %) utilizando vapor a alta presión en un reactor de 10 litros de capacidad a 190 ºC por 5 min. Los resultados de extracción obtenidos respecto a la xilosa (35.66 g/L); arabinosa (3.66 g/L) y glucosa (1.41 g/L) dieron un rendimiento de un 60% respecto a la fibra del sustrato y también bajas concentraciones de los sub-productos como ácido acético (0.23 g/L), furfural (1.69 g/L) y trazas de 5-HMF; concentraciones que posibilitan obtener un hidrolizado idóneo para la fermentación utilizando distintos microorganismos.

Palabras Clave: Paja brava, Festuca orthophylla, hidrólisis ácida, oligómeros, monómeros, hidrolizado

ABSTRACT

The use of lignocellulosic materials such as the wild straw (Festuca orthophylla) represents a potential substrate for the production of fuel alcohol and other biotech products, having a high carbohydrate content and high availability as a raw material in the Bolivian Altiplano. In this study, the wild straw was pretreated with SO_2 (2.5%) and hydrolyzed using high pressure steam in a reactor of 10-L at 190 °C for 5 min. The sugar extraction obtained, xylose (35.66 g/L); arabinose (3.66 g/L) and glucose (1.41 g/L), had a good yield of 60% based on fiber content and also low concentrations of by-products as acetic acid (0.23 g/L), furfural (1.69 g/L) and traces of 5-HMF; concentrations that enable to obtain a suitable fermentation hydrolysate for various microorganisms testing.

Keywords: Wild grass, Festuca orthophylla, acid hydrolysis, oligomers, monomers, hydrolysate.

1. INTRODUCCIÓN.

Los residuos lignocelulósicos se caracterizan por su gran disponibilidad, por ser una fuente de energía renovable y principalmente por su bajo costo. Debido a las crisis del 1973 y 1990 (agosto), así como la previsible desaparición de los combustibles de tipo fósil, se han visto potenciados tanto a nivel de investigación como en el campo industrial para la producción de bioetanol o alcohol carburante (Lis y Carrillo et al., 2000).

La sacarificación de residuos agrícolas y madereros ha sido siempre considerada como una de las más promisorias maneras de producir combustibles y productos químicos de alto valor agregado siendo estos recursos considerados como renovables (Parisi, 1989 y Ghosh, 1993). Una de las diversas formas de pretratamiento es la que se basa en agentes químicos ácidos, concretamente con H2SO4 y HCl (Fanta et al., 1984; Jiménez et al., 1991, y Carrasco, 1992). La hidrolisis con ácido sulfúrico diluido es un método simple y rápido (Clausen y Gaddy, 1988 y Jones, 1984). Casi siempre la hidrólisis ácida diluida fue evaluada a una escala comercial, debido a que la degradación de azúcares fue encontrada como eficiente respecto a sus sub-productos. Además de los inhibidores que se formaban en la hidrólisis, en la fermentación, se presentaban otros problemas, tal es el caso de la corrosión producida por los ácidos y el impacto negativo que tenia el proceso en su descarga (Wayman, 1988).

Una sacarificación exitosa de residuos celulolíticos eficiente puede ser obtenida, utilizando enzimas específicas. Altos rendimientos de etanol pueden obtenerse con la hidrólisis enzimática (Parekh y Wayman et al., 1986); casi siempre el uso de este método tendría una alta dependencia en el alto costo que tienen las enzimas (Quereshi et al., 1994).

El pretratamiento físico, como por ejemplo el tamizado (Rivers, 1987) e irradiación por microondas (Nakayama et al, 1989) pueden utilizarse en la hidrolisis de materiales lignocelulósicos (Ghosg, 1993).

El pretratamiento biológico resulta una parcial deslignificación de los lignocelulósicos usando microorganismos para la degradación de la lignina tales como hongos y bacterias (Ghosg, 1993).

Las mejores opciones de pretratamiento son las que combinan ambas, la física con la química (Ghosh, 1993; Saddler, 1993 y Ramos, 1994). En este procedimiento se utiliza vapor a alta presión, con o sin una rápida descompresión (explosión) pudiéndose obtener un exitoso fraccionamiento de la lignocelulosa en sus tres mayores componentes y dejando a la celulosa para el ataque enzimático (Schwald, 1989; Ramos, 1992; Saddler, 1982 y Excoffier, 1991). Muchas patentes (Delong, 1983 y 1990) fueron desarrolladas para este proceso y muchas plantas piloto de diferentes capacidades fueron desarrolladas para propósitos de investigación y comercial, estas son como la de Canadá (Universidad de Sherbrooke; Universidad de British, Columbia, Vancouver BC), USA (National Renewable Energy Laboratory, NREL, Golden, CO), España (Department of Renewable Energies, CIEMAT, Madrid), Suecia (Universidad de Lund, Lund), Francia (Institute Français du Pétrole, Souston), Italia (Renewable Energy Division, ENEA, Policoro), Japón (Wood Research Institute, Kyoto University, Kyoto) y Brasil (Faenquil, Department of Biotechnology, Lorena SP; UFPR, Department of Chemistry, Curitiba, PR) (Pereira et al, 2003).

La combinación del tiempo de residencia y la temperatura durante la hidrólisis dentro de una reacción sencilla (Overend y Chornet) esta definida por un factor de severidad acorde a la siguiente ecuación:

$$R_o = t * \exp\left[\frac{T_r - T_b}{14.75}\right] \qquad \text{Ec.-1}$$

donde *t* es el tiempo de residencia (min), *Tr* es la temperatura de reacción (ºC), y *Tb* es la temperatura de referencia (100 ºC).

La producción de alcohol carburante a partir de paja brava es relativamente reciente especialmente para esta especie *Festuca orthophylla*, ya que comúnmente la especie más

conocida es la *Stipa ichu*, ambas son recursos lignocelulósicos silvestres que se encuentran en el Altiplano de Bolivia. La paja brava es una planta nativa, perenne, recta, forma macollos densos de 40 a 60 cm de diámetro, llega a medir un metro de altura y es abundante en esta región. Aunque es importante resaltar que existen pocos estudios acerca de la productividad de esta planta, solo se referencia que la misma es muy baja, debido a su elevada rusticidad (*i.e.* alta radiación que tiene un efecto fisiológico), siendo necesario profundizar dicho tema en futuros estudios. El objetivo es poder incrementar de forma considerable el rendimiento y la extracción de los azúcares fermentables de esta gramínea en su pretratamiento e hidrólisis, basados en estudios anteriores y usando otro catalizador como es el SO_2 diferente al H_2SO_4. Durante estos pretratamientos se genera una cantidad apreciable de xilosa, producto principal de la hidrólisis de la fracción hemicelulósica del sustrato, y que puede fermentarse a etanol u otros productos químicos por varios microorganismos (Wrigth, 1988 y Bulock, J. y Kristiansen, B., 1987).

El presente estudio pretende evaluar las mejores condiciones del pretratamiento ácido en función de la concentración de ácido, la temperatura y el tiempo, basados en estudios referentes con el bagazo de caña de azúcar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Sustrato

El sustrato utilizado en el procedimiento experimental fue la paja brava (*Festuca orthophylla*) cultivada en la región del Lago Poopó, departamento de Oruro, Bolivia. El muestreo se llevó a cabo en época seca del año. La paja brava fue cortada y tamizada a un tamaño uniforme con un diámetro exterior de 2.0 mm en un molino de martillos, y posteriormente lavada con agua a 50 ºC por tres veces consecutivas en un mezclador de concreto, y posteriormente se removió el agua con un filtro tipo prensa, esto permitió obtener una humedad promedio del 58% y aspecto físico muy homogéneo. Posteriormente, el material preparado fue conservado a 4 °C antes de la hidrólisis.

Análisis de la composición de la paja brava

El material como materia prima fue analizado en el Instituto Sueco de Investigación de Pulpa y Papel en Estocolmo, Suecia, siendo los principales métodos de análisis; monosacáridos (descrito en este trabajo), el método Klason para la lignina (TAPPI 222 om-88, 1994), extractivos (NREL, 2005) y cenizas (NREL, 2005). Las muestras tenían una longitud de 2 de cm y fueron lavadas con agua antes de los análisis mencionados.

Los monosacáridos y oligosacáridos de la paja brava fueron analizados después de la hidrólisis ácida por cromatografía gaseosa (GC) usando el método descrito por Theander y Westerlund (1986). El tipo de columna de GC utilizada fue la BP 225 (12 m largo, 0.32 mm de diámetro y 0.25 µm de espesor) y He como gas transportador. La temperatura inicial del horno fue de 150 ºC y mantenida por 1 min, incrementándose el flujo en 14 ºC/min hasta un a temperatura final de 220 ºC. Los componentes analizados fueron detectados por un detector FID. La composición de los monosacáridos y otros componentes de la paja brava puede observarse en la Tabla 1. Asimismo, se puede observar la composición de oligómeros de este sustrato en la Tabla 2. El contenido de cenizas fue determinado en 7.6% de peso en base seca y los extractivos en un 2 % de peso seco (Sánchez et al., 2003).

Tabla 1. *Composición de la paja brava*

Compuesto	Cantidad (wt%)[a]
Glucosa	38.44
Xilosa	28.63
Arabinosa	2.68
Galactosa	0.66
Manosa	0.38
Klason Lignina	21.24
Lignina Ácida soluble	3.46

Otros compuestos no determinados = 4.51%.

Tabla 2. *Composición de oligómeros de la paja brava*

Compuesto	Cantidad (wt%)[a]
Glucano	34.17
Xilano	25.20
Arabinano	2.36
Galactano	0.59
Manano	0.34

[a] Basada en una muestra seca. Los azúcares son reportados como azúcares anhidros.

Pretratamiento e hidrólisis de la paja brava

La paja brava fue impregnada con SO_2 (2.5 w/w húmedo) y se uso el equivalente a 300 g en base seca (DW, siglas en inglés), pruebas realizadas con otra especie de paja brava – *Stipa ichu* (Carrasco et al., 2011). La impregnación del SO_2 fue llevada adelante en bolsas plásticas herméticamente cerradas y garantizando con ello la impregnación de este gas en la materia prima por el lapso de tiempo de 30 min a baja temperatura. Posteriormente se abrieron las bolsas para medir por simple diferencia qué cantidad de gas quedaba impregnado en la materia prima tratada y con una humedad promedio de lavado. El pretratamiento con vapor o más conocido como el proceso de explosión de vapor (*the steam explosion process*) se desarrolló en un reactor por lotes (*ver* Figura 1) de 10 litros de capacidad a una temperatura de 190 ºC por 5 minutos (pruebas realizadas en duplicado). Después, las muestras hidrolizadas, fases sólida y liquida, fueron descargadas por despresurización en un tanque ciclón hasta presión atmosférica (*ver* Figura 2).

Figura 1. *Reactor (Planta piloto -Universidad de Lund): Vista general.*

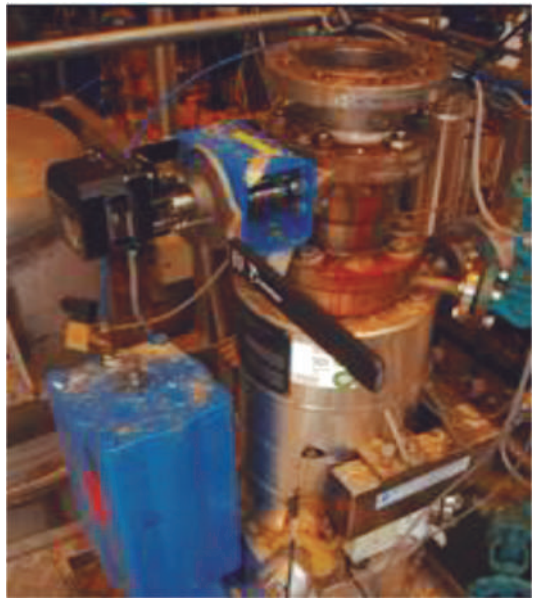


Figura 2. *Tanque-Ciclón (Planta piloto -Universidad de Lund): Vista general.*



El hidrolizado obtenido fue separado por filtración, tanto la parte líquida como la parte sólida. La

primera de estas se analizo los monosacáridos y oligómeros.

Análisis

Preparación de los monómeros y oligómeros.

Las muestras liquidas o hidrolizados fueron preparadas para el análisis en el equipo HPLC, siguiendo el método denominado *Determinación de azúcares, sub-productos y degradación de productos en muestras liquidas fraccionadas* (National Renewable Energy Laboratory, USA, 2008). Separándose cada análisis mencionado. En los monómeros se toman 30 mL de la muestra hidrolizada y se adiciona carbonato de calcio (calculo no estequiométrico) hasta obtener un pH de 5 – 6, posteriormente se centrífuga a 1200 rpm por 10 min (Z 200 A, HERMLE Labortechnik, Weshingen, Germany) y se obtiene el sobrenadante, filtrándolo con filtros esterilizados de 0.2 µm de porosidad, conservándose la muestra a –20 ºC para analizarla posteriormente.

Para los oligómeros y sub-productos se tomaron 30 mL de muestra y se mide el pH, observando la tabla que se encuentra en el anexo del mencionado procedimiento se adiciona la cantidad de H_2SO_4 (72%). Se autoclava la muestra a 121ºC y 60 min. Posteriormente se adiciona carbonato de calcio (calculo no estequiométrico) hasta pH 5 – 6 y se centrífuga a 1200 rpm por 10 min (Z 200 A, HERMLE Labortechnik, Weshingen, Germany), y se separa el sobrenadante, filtrándose con filtros esterilizados de 0.2 µm de porosidad. Los análisis de los más importantes analitos y sustratos fueron analizados en el HPLC.

La determinación de las concentraciones de glucosa, xilosa, arabinosa fue analizada usando una columna polimérica Aminex HPX-87P (Laboratorios Bio-Rad, Munchen; Germany) a 85ºC en un equipo HPLC (Waters, Milford, MA, USA). La fase móvil usada fue agua MilliQ a un flujo de 0.6 mL/min. Las concentraciones de glucano, xilano, arabinano, ácido acético, 5-HMF y furfural fueron determinados usando una columna Aminex HPX-87H (Laboratorios Bio-Rad, Munchen; Germany) a 60ºC. Usando como fase móvil H_2SO_4 (5mM) a un flujo de 0.6 mL/min. Los compuestos mencionados fueron detectados por dos detectores: Índice de refracción y UV (210 nm) (Waters 2410, Waters, Milford, MA, USA).

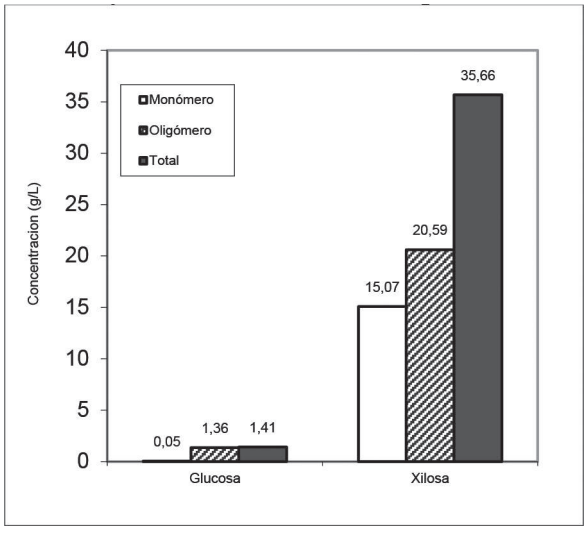
Cálculo de los rendimientos

Los rendimientos fueron calculados en base a la cantidad de azucares extraídas respecto al peso en base seca de la materia prima.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

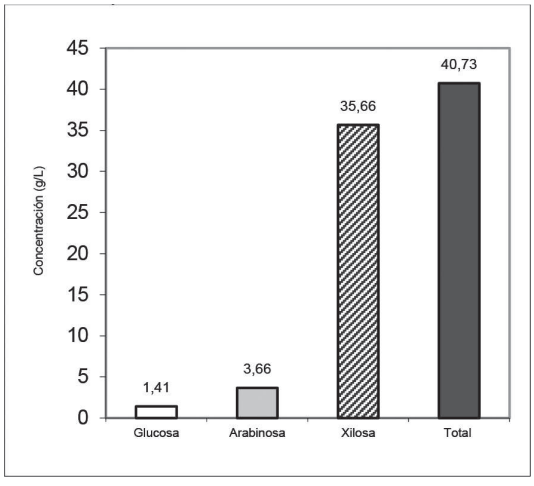
El factor de severidad (Ecuación 1), utilizado en todo este pretratamiento de la paja brava fue igual a 3.349; este resultado se lo puede considerar como un pretratamiento medianamente severo comparándolo con los otros estudios de esta misma materia prima, pero de otra especie (Carrasco et al., 2011). Los resultados obtenidos en el pretratamiento de la paja brava a la condición 190 ºC, 5 min, 2.5 % SO_2, son los que siguen en las siguientes figuras:

Figura 3. *Concentración de Monómeros y Oligómeros en el hidrolizado. Todas las muestras fueran analizadas en duplicado.*



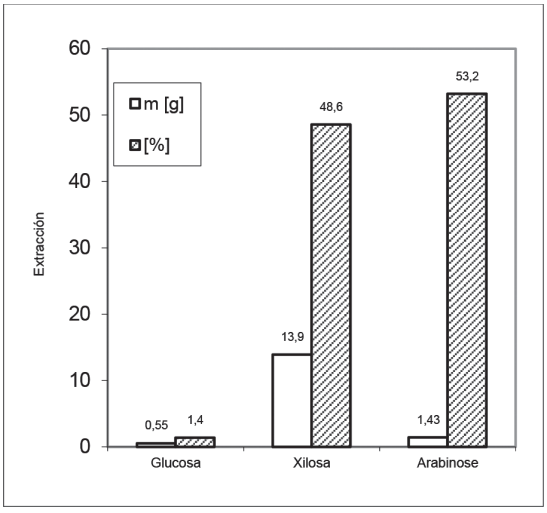
La Fig. 3, muestra las concentraciones en su forma monomérica y oligomérica tanto para la glucosa y la xilosa; observándose una gran diferencia entre ambas concentraciones totales, 1.41 y 40.73 g/L, respectivamente.

Figura 4. *Concentración de la glucosa, arabinosa y xilosa en el hidrolizado.*



Se corroboran estudios previos donde la hemicelulosa es primeramente separada y fraccionada en sus monosacáridos mayoritarios (Ramos, 1994), aunque estos hidrolizados se encuentran mayoritariamente en su composición oligomérica en comparación con estudios previos (Carrasco et al., 2011). Posiblemente esto se debe a la diferencia estructural de la matriz celulosa-lignina respecto a la hemicelulosa de esta especie.

Figura 5. *Extracción de la glucosa, xilosa y arabinosa en el hidrolizado.*



La Fig. 4, muestra la alta concentración de xilosa (35.66 g/L) y arabinosa (3.66 g/L) y una baja concentración de glucosa (1.41 g/L), resultados confirmados por el mismo pretratamiento con otros lignocelulósicos de similar composición (Wrigth, 1988 y Bulock, J. y Kristiansen, B., 1987), generándose con la baja brava una cantidad apreciable de xilosa, como producto principal de la hidrólisis y siendo potencialmente fermentable a alcoholes carburantes (i.e. etanol y butanol), y otros productos biotecnológicos como son los biopolímeros o producción de diferentes enzimas.

En la Fig. 5, se muestra la extracción de los azúcares en este pretratamiento. Las pentosas extraídas representan un porcentaje de extracción por encima del 45% en ambos casos; (48.6% de xilosa) y (53.2% de arabinosa). Representando estos resultados un buen porcentaje de extracción entre materiales lignocelulósicos de muy parecida composición (Ramos et al., 1994, Martín et al.,

2002, Lis y Carillo, 2002, Pereira, 2003 y Sánchez, 2005), tal es el caso del bagazo de caña de azúcar (composición similar a la paja brava), como se puede observar en las siguientes tablas:

Tabla 3. *Rendimientos después del pretratamiento con SO_2 con bagazo de caña de azúcar (composición en base seca)*

Compuesto	g/100g
Rendimiento de glucosa	1.00
Rendimiento de xilosa	8.20
Rendimiento de arabinosa	0.90
Rendimiento de ácido Acético	4.30
Rendimiento de fibra	69.20

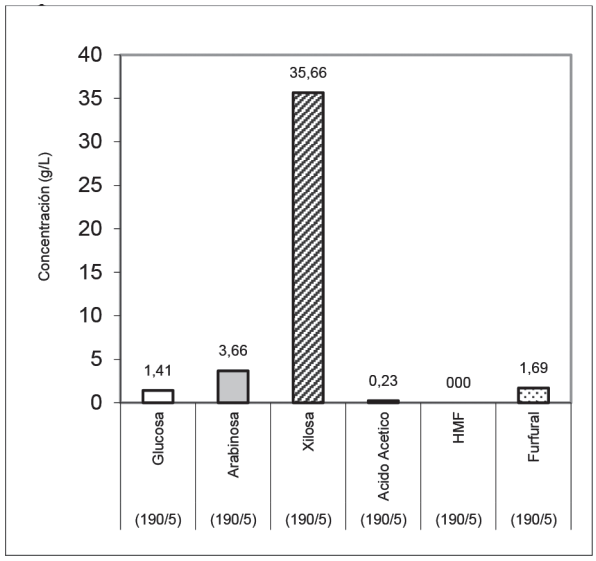
Fuente: Martín et al, 2002

Tabla 4. *Rendimientos después del pretratamiento con SO_2 con paja brava (composición en base seca)*

Compuesto	g/100g
Rendimiento de glucosa	1.40
Rendimiento de xilosa	13.90
Rendimiento de arabinosa	1.43
Rendimiento de ácido Acético	0.09
Rendimiento de fibra	60.27

Las Tablas 3 y 4 muestran el rendimiento comparable de fibra después del pretratamiento del bagazo de caña de azúcar con la paja brava, el primero es un recurso lignocelulósico de muy semejante composición al sustrato estudiado y fue pretratado con 2.0% SO_2 a 205 ºC por 10 min (factor de severidad alto) (Martín et al, 2002). También, puede observarse mayores rendimientos respecto a los azúcares; referente al bagazo de caña de azúcar.

Figura 6. *Concentración de azucares y subproductos.*



La Fig. 6 muestra las concentraciones de azúcares y de subproductos o inhibidores formados. Como se sabe, la concentración de estos últimos depende de las condiciones de la hidrólisis (Clausen y Gaddy et al., 1988). Las azucares pueden degradarse a furfural que son formados a través de las pentosas y el 5-hidroximetilfurfural (5-HMF) que es formado a través de las hexosas (Wright, 1987; Clausen y Gaddy, 1988 y Sánchez y Bautista, 1988). Al observar la Fig. 6 se obtiene por el pretratamiento con vapor (factor de severidad medio) bajas concentraciones de estos subproductos, ácido acético (0.23 g/L), furfural (1.69 g/L) y HMF (0.0 g/L), lo que favorecería en la fermentabilidad de microorganismos.

4. CONCLUSIONES

La hidrólisis con SO_2 es un excelente proceso para la preparación de materiales lignocelulósicos como han demostrado estudios anteriores. Los estudios de pretratamiento de la paja brava de la especie *Festuca orthophylla* utilizando como catalizador SO_2 (2.5%) a las condiciones de 190 ºC por 5 min; permitieron determinar un factor de severidad medio obteniendo con ello un

rendimiento de la fibra del sustrato de 60.27g /100 g, a su vez un porcentaje de extracción de las pentosas (xilosa y arabinosa) del 41 %, representando estos resultados para este estudio, un pretratamiento aceptable comparado con otros pretratamientos previos de otros sustratos como el bagazo de caña de azúcar.

La generación de subproductos en el pretratamiento como el ácido acético, furfural, y 5-HMF tienen concentraciones relativamente bajas lo que posibilita obtener una mezcla hidrolizada apta tanto para la hidrólisis enzimática como para la fermentación del hidrolizado. Es necesario poder llevar a cabo otras condiciones de pretratamiento de esta especie para poder comparar si el factor de severidad es mayor de especie a especie de paja brava.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la cooperación SIDA y la Administración Sueca de Energía. Agradecimientos especiales a los profesores Mats Galbe, Guido Zacchi y Gunnar Lidén de la Universidad de Lund, Suecia,

6. REFERENCIAS

1. Lis M. J., y Carrillo F. (2000); Hidrólisis ácida previa a su tratamiento enzimático, Tratamiento de Residuos, *Revista de Ingeniería Química, Universidad Politécnica de Cataluña*, España.

2. Parisi, F. (1989); *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol. 38*, 53.

3. Ghosh, P.; Singh, A.; (1993) *Adv. Appl. Microbiol.*, *39*, 295.

4. Fanta, G.F., Abbott, T.P., Herman, A.I., Burr, R.C. y Doane, W.M.; (1984) *Biotechnology and Bioengineering*, vol. XXVI, pág. 1.122-1.125.

5. Jiménez, L. y Ferrer, J.L.; (1991) *Process Biochemistry*, pág. 153-156.

6. Carrasco, J. y Martínez, J., (febrero, 1992); *Ingeniería Química*, pág. 195-200.

7. Clausen, E. C. y Gaddy, J. L., (1988) Etanol from biomass by concentrated acid hydrolysis and fermentation. *Energy biomass Wastes*, **pág. 12**, 1319-1342.

8. Jones, J. L. y Semrau, K. T., (1987) Wood hydrolysis for ethanol production-Previous experience and the economics of selected processes. *Biomass*, **pág. 5**, 109-135.

9. Wayman M. y Sarad R. P. (1988),

10. Rivers, D. B.; Emert, G. H., (1987); *Biotechnol. Lett, 9*, 365.

11. Nakayama, E.; Okamura, K.; (1989), *Mokuzai Gakkaishi*, *35*, 251.

12. Saddler, J. N.; Ramos, L. P.; Breuil, C. Em, (1993) *Bioconversion of Forest and Agricultural Plant Wastes*; Saddler, J.N., ed.; C. A. B. International: London, p. 73.

13. Ramos, L. P.; Saddler, J. N. Em, (1994) *Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production*; American Chemical Society Symposium Series *566*: Washington, pág. 325.

14. Schwald, W.; Breuil, C.; Brownell, H. H.; Chan, M.; Saddler, J. N.(1989); *Appl.Biochem. Biotechnol. 20/21*, 29.

15. Ramos, L. P.; Breuil, C.; Saddler, J. N.; (1992) *Appl. Biochem. Biotechnol. 34/35*, 37.

16. Saddler, J. N.; Brownell, H. H.; Clermont, L. P.; Levitin, N.; (1982) *Biotechnol.Bioeng.*, *24*, 1389.

17. Excoffier, G.; Toussaint, B.; Vignon, M. R.; (1991) *Biotechnol. Bioeng.* **pág. *38***, 1308.

18. DeLong, E. A.; *Canadian pat. 1,141,376* **1983**.

19. Foody, P.; *US pat. 4,461,648* **1984**.

20. Pereira, L. R.; (2003), The Chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials; *Quim. Nova,* Vol. 26, No. 6, 863-871.

21. Overend, R. P. y Chornet, E.; (1987) Fractionation of lignocellulosic by steam-aqueos pretreatments. Phil. Trns. R. Soc. Lond. 1987, **321 (A)**, 523-536.

22. Sánchez, G. (2005), Ethanol from Paja Brava: Diluid acid hydrolysis and fermentation of a Bolivian straw material; *Licenciate Thesis, Chemical Engineering Departament*, Lund University, Sweden.

23. Wright, J.D. agosto (1988); *Chemical Eng. Progress*, pág. 62-74.

24. Bulock, J. y Kristiansen, B.; (1987) *Basic Biotechnology*. Academic Press Inc., London.

25. Carrasco C, Baudel H, Peñarrieta M, Solano C., Tejeda L., Roslander C, Galbe M., y Lidén G.; (2011); Steam Pretreatment and Fermentation of the Straw Material “Paja Brava” using Simultaneous Saccharification and Fermentation, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 111, 2, 167-174.

26. Martín C, Galbe M, Nilvebrant, N. O., y Jonsson, L. J.; (2002); Comparison of the fermentability of Enzymatic Hydrolyzates of Sugarcane Bagasse Pretreated by Steam Explosion Using Different Impregnating Agents, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vols. 98-100, pág. 699-175.

27. Wright, J.D. y Power, A. J., (1987); Comparative Technical evaluation of acid hydrolysis processes for conversion of cellulose to alcohol. *Energy Biomass Wastes*, 10, 949-971.

28. Sánchez, B. Y Bautista, J., (1988) Effects of furfural and 5-hydroximethilfurfural on the fermentation of Saccharomyces cerevisiae and biomass production from Candida guillierimondii. *Enzyme Microb. Technol.*, 10, 315-318.

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO A PARTIR DE CLORURO DE POTASIO DE LA PLANTA INDUSTRIAL DEL SALAR DE UYUNI

Determination of electrochemical parameters for obtaining potassium hydroxide from potassium chloride from the industrial plant of the Uyuni salt flat.

Germán Callisaya Peña1

ORCID:0009-0000-9924-6075

Boris I. Párraga Andrade1

ORCID:0000-0002-1690-806X

1Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

La investigación determinó los parámetros electroquímicos óptimos para la obtención de hidróxido de potasio (KOH) a partir de cloruro de potasio (KCl) a escala laboratorio. Se utilizó la celda C-Flow LAB5x5 con membrana Flemion F-8080 y electrodos de grafito. Las condiciones experimentales fueron, caudal de 1,06 ml/s (cátodo) y 1,12 ml/s (ánodo), temperatura de 50 °C y tiempo de proceso de 1 hora. Se identificaron las mejores condiciones de operación a concentración de KCl en el ánodo 28 g/100mlH_2O, voltaje de 4,9 V, concentración de hidróxido de potasio (KOH) en el cátodo 1% (p/v) para bajas concentraciones y 16,17% (p/v) para altas concentraciones. Se trató una muestra de cloruro de potasio (KCl) del salar de Uyuni, la concentración de hidróxido de potasio (KOH) aumentó de 15,38% a 18,74% (p/v) después del tratamiento, se obtuvo un rendimiento del 81% respecto al cloruro de potasio (KCl) de grado p.a. Los resultados obtenidos permiten proceder al escalamiento a nivel Bench y evaluar la factibilidad económica del proceso.

Palabras Clave: Electroquímica, hidróxido de potasio, membrana.

ABSTRACT

This study determined the optimal electrochemical parameters for producing potassium hydroxide (KOH) from potassium chloride (KCl) at laboratory scale. The C-Flow LAB5x5 cell with Flemion F-8080 membrane and graphite electrodes was used. Experimental conditions included a flow rate of 1.06 ml/s (cathode) and 1.12 ml/s (anode), temperature of 50 °C, and process time of 1 hour. The optimal operating conditions were identified as KCl concentration at anode of 28 g/100mlH_2O, voltage of 4.9 V, and KOH concentration at cathode of 1% (p/v) for low concentrations and 16.17% (p/v) for high concentrations. A sample of KCl from the Uyuni salt flat was treated, increasing the KOH concentration from 15.38% to 18.74% (p/v) after treatment, with a yield of 81% compared to p.a.-grade KCl. The results enable scaling up to Bench level and evaluating the economic feasibility of the process.

Keywords: Electrochemistry, potassium hydroxide, membrane.

1. INTRODUCCIÓN

El hidróxido de potasio se utiliza en diversas aplicaciones químicas, industriales y de fabricación. En los productos alimenticios actúa como un agente de control del pH, estabilizador y espesante de alimentos [8]. Debido a la alta competitividad en el mercado externo del cloruro de potasio y su bajo precio internacional ($289,38 (USD)/tm [6]). Se plantea la obtención de hidróxido de potasio a partir de cloruro de potasio mediante el método electroquímico, basado en la electrólisis por membranas, obteniendo reducción en el tiempo de procesamiento, minimizando los residuos y dando un mayor valor agregado al cloruro de potasio (KCl) del salar de Uyuni. Esta alternativa ofrece una mayor oportunidad externa gracias a las diversas aplicaciones del hidróxido de potasio y su mayor precio en el mercado ($291.5 USD por 25 kg, al 85% [3]).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

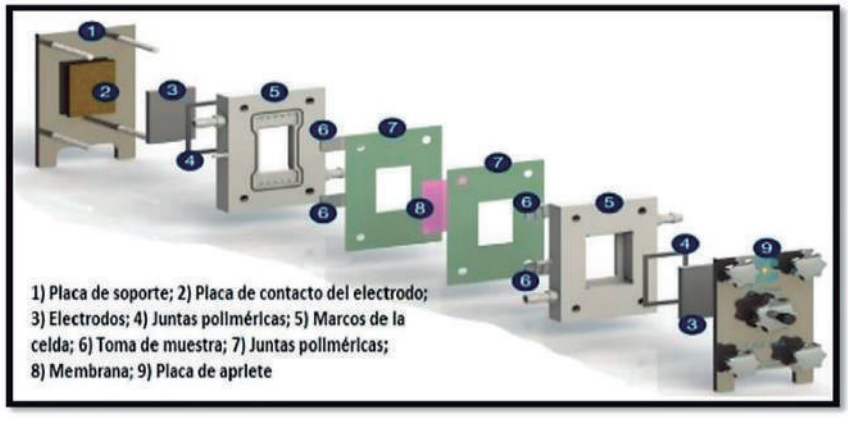
El cloruro de potasio (KCl) de grado fertilizante, proviene de los Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) del Salar de Uyuni. Se emplearon hidróxido de potasio grado analítico, cloruro de potasio al 99.99% p.a., agua desionizada e hidróxido de potasio (KOH) con una pureza de 85% y 86.6%. Se utilizó un reactor electroquímico C-Flow LAB 5x5 con electrodos de grafito y membrana flemion 8080. Se controló el proceso mediante técnicas de volumetría, espectrofotometría de llama, espectrofotometría de absorción atómica y difracción de rayos X (DRX).

2.2 Métodos

2.2.1 Descripción de la Celda de Membrana

La celda de membrana de tipo filtro prensa, está compuesta por las partes que se muestran en la Figura 1. Es un sistema continuo y hermético, contiene juntas poliméricas que impiden el escape de líquidos y gases producidos durante la electrólisis en su interior.

Figura 1 *Diagrama de la Celda de Membrana de Tipo Filtro Prensa*



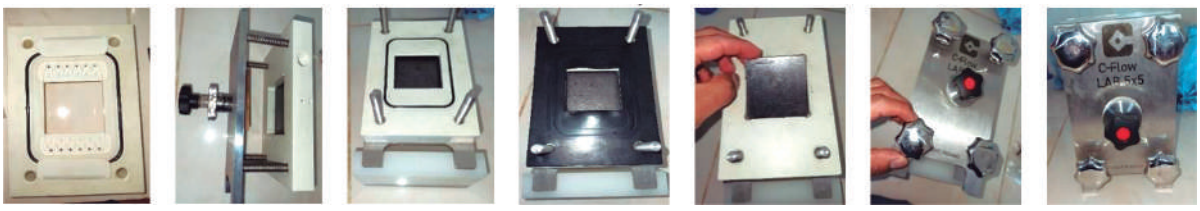
Nota. La Figura muestra las partes del equipo electroquímico Flow LAB 5x5, descrito en [5].
Especificaciones Técnicas del Equipo C-Flow LAB:
Dimensiones: 185 x 110 x 90 mm
Peso: 4.4 kg

Condiciones de Operación:

- Temperatura máxima: 80 ºC

- Rango de tensión: 0 a 6 V

Figura 2 *Ensamblaje de la Celda Electroquímica. Se muestran los elementos principales del ensamblaje.*



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Electrodos de Grafito

El grafito es resistente a la corrosión contra ácidos y disolventes más comunes. Tiene una resistencia limitada contra medios oxidantes y bases, con buena conductividad eléctrica y baja resistencia, resistente al calor y a altas temperaturas, tiene una alta superficie específica que favorece las reacciones [7]. La porosidad del grafito favorece las reacciones en la estructura interna, incrementando el caudal de gases generados al aumentar el grosor de los mismos [9].

2.2.3 Características de las membranas Flemion

La membrana Flemion F 8080 está diseñada específicamente para la producción de soda cáustica (NaOH) y potasa cáustica (KOH) mediante electrólisis, y presenta menor consumo de energía, mayor densidad de corriente y menor influencia de impurezas [1].

Tabla 1 *Impurezas típicas, fuentes y efectos en la técnica de celda de membrana*

Impurezas	Fuente	Límite superior	Efectos	Mecanismo
Ca^{+2} Mg^{+2}	Sal	20 ppb	Ca: CE Mg: V	Calcio (Ca): precipitación con varios aniones como sílice y yodo en la membrana, cerca del lado del cátodo Magnesio (Mg): precipitación fina con OH^- cerca del lado del ánodo de la membrana
SO_4^{-2}	Sal, decloración con NaHSO3	<4-8 g/l (como Na_2SO_4)	CE	Precipitación con sodio cerca del lado del cátodo de la membrana, recubrimiento del ánodo con bario
(*) Se podrían permitir concentraciones más altas de hierro en los casos de salmuera de alimentación no acidificada. NB: CE = la eficiencia actual disminuye; O = otros efectos; V = aumenta el voltaje de la celda.				

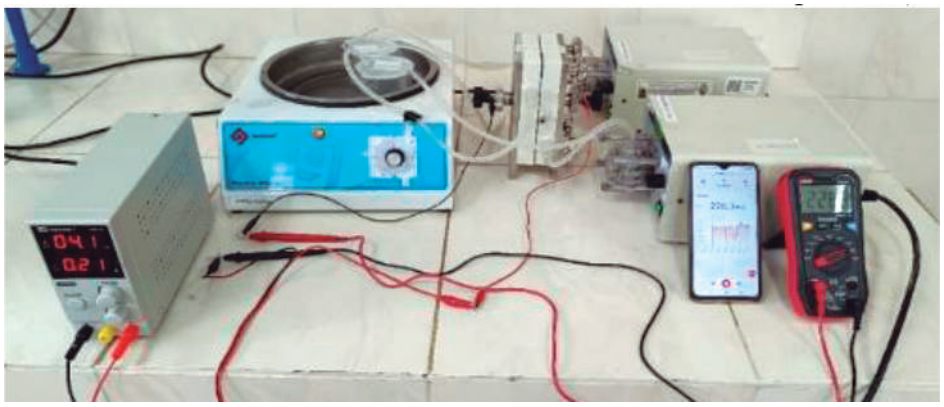
Nota. La tabla se basa en [4].

2.3 Etapas del proceso

Etapa 1

Se procede al montaje y configuración del sistema de electrólisis representado en la Figura 3, con el objeto de evaluar la aplicación de la membrana de intercambio iónico Flemion F-8080 para la obtención de hidróxido de potasio (KOH). Se determina la influencia de variables operativas, como voltaje, caudal y temperatura. Además, se realizó la visualización del flujo, se determina el caudal de trabajo, se construye la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) y establecimiento del rango de voltaje adecuado.

Figura 3 *Sistema de electrólisis utilizado en la obtención de hidróxido de potasio (KOH)*

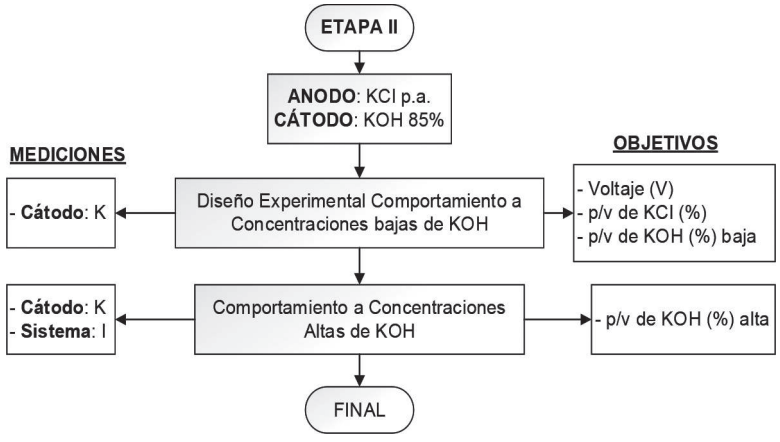


Fuente: Elaboración propia

Etapa 2

Se realiza el diseño experimental, evaluando el comportamiento del sistema de electrólisis a concentraciones bajas y altas de hidróxido de potasio (KOH), el procedimiento utilizado se detalla en la Figura 4.

Figura 4 *Determinación de las mejores condiciones para la obtención de KOH a bajas concentraciones y su comportamiento a altas concentraciones, en el lado catódico*



Fuente: Elaboración propia.

Etapa 3

Se caracteriza el cloruro de potasio (KCl) grado fertilizante antes y después de someterlo a un tratamiento de filtración en caliente y cristalización. Utilizando los parámetros obtenidos en la etapa 2, se aplicó el tratamiento electroquímico a la muestra tratada.

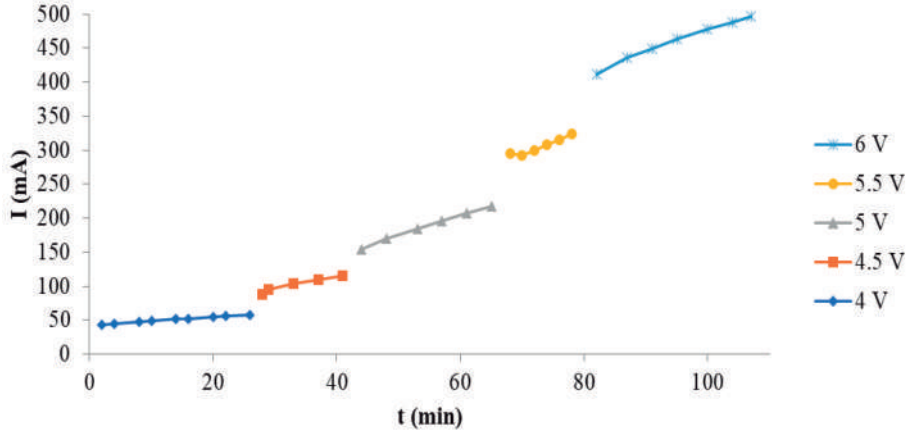
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa 1

3.1 Aplicación de la membrana flemion f-8080

La aplicación del voltaje en el sistema, tiene relación directa con la concentración del cloruro de potasio, a mayor voltaje mayor concentración, ya que su aumento provoca un incremento en la concentración de potasio, pasando de 392.1 ppm a 2087.5 ppm (Figura 5), este incremento de voltaje tiene sus desventajas, como el desgaste del electrodo anódico que se inicia a partir de 5.5 V, considerando que el reactor C-Flow LAB 5x5 está diseñada para operar en un rango menor a 0 - 6 V [2]. Por tanto, se sugiere trabajar por debajo de este valor para minimizar el desgaste y prolongar la vida útil del sistema.

Figura 5 *Variación de la intensidad de corriente en función del tiempo a diferentes voltajes (0-6 V)*

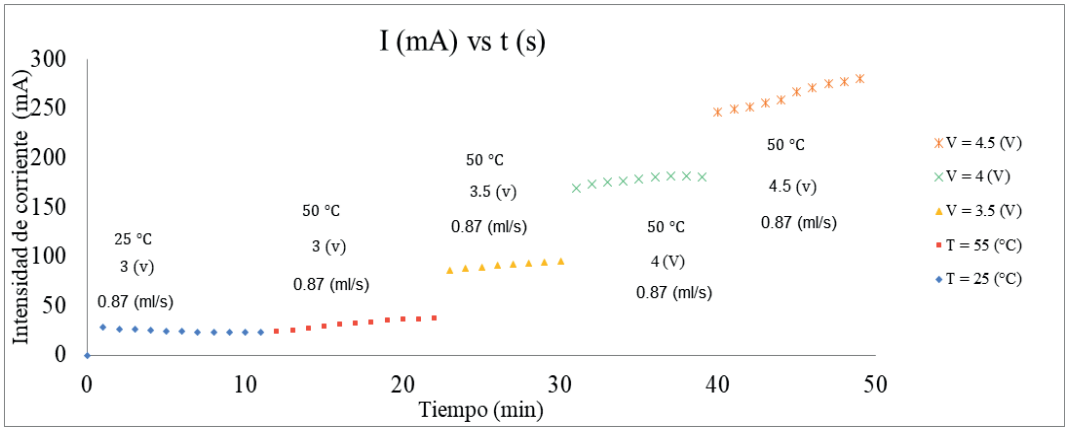


Fuente: Elaboración propia.

3.2 Influencia de variables

El incremento en la temperatura aumenta la densidad de corriente (mA/cm²) y la concentración de potasio (ppm) en el cátodo, reduciendo las sobretensiones anódicas y catódicas. Esto favorece la actividad del electrodo y aumenta la eficiencia del proceso [12]. La Figura 6 muestra el voltaje y la temperatura son variables que favorecen la reacción química. Considerando la recomendación de temperatura para la membrana Flemion 8080 (<60 °C) [1], se seleccionó una temperatura de trabajo de 50 °C para maximizar el rendimiento del proceso.

Figura 6 *Evaluación del efecto de la temperatura y voltaje en la reacción química: Análisis de la intensidad de corriente del cátodo.*

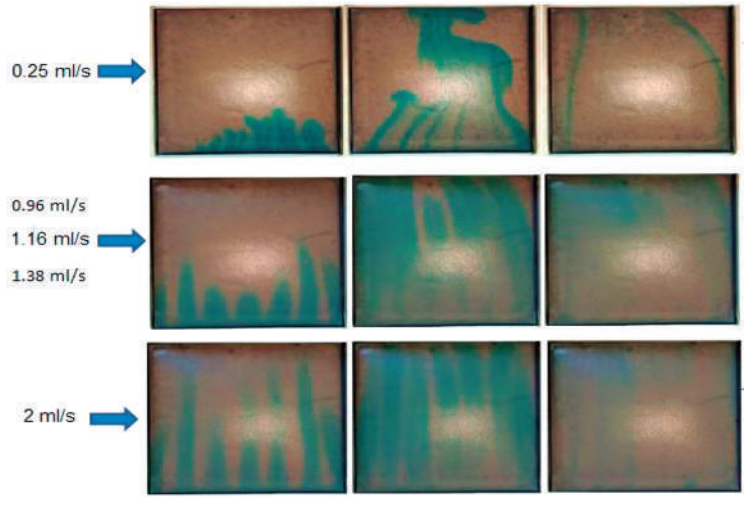


Fuente: Elaboración propia.

3.3 Visualización de flujo

La visualización de flujo permite ver zonas de estancamiento dentro del reactor debido a bajas velocidades y también permite observar que conforme va aumentando la velocidad, una parte del fluido sale más rápido que el promedio [13]. La Figura 7 muestra un flujo uniforme para caudales en el rango de 0,96-1,167 ml/s, caracterizado por una distribución completa del colorante a través de los puertos verticales, cubriendo todo el volumen sin dejar espacios vacíos. Sin embargo, por debajo de estos caudales, se presentan espacios no cubiertos, generando un flujo asimétrico. Por encima de estos caudales, la mala distribución del flujo se atribuye a la geometría de los colectores consecutivos.

Figura 7 *Visualización del flujo de proceso de electrolisis*

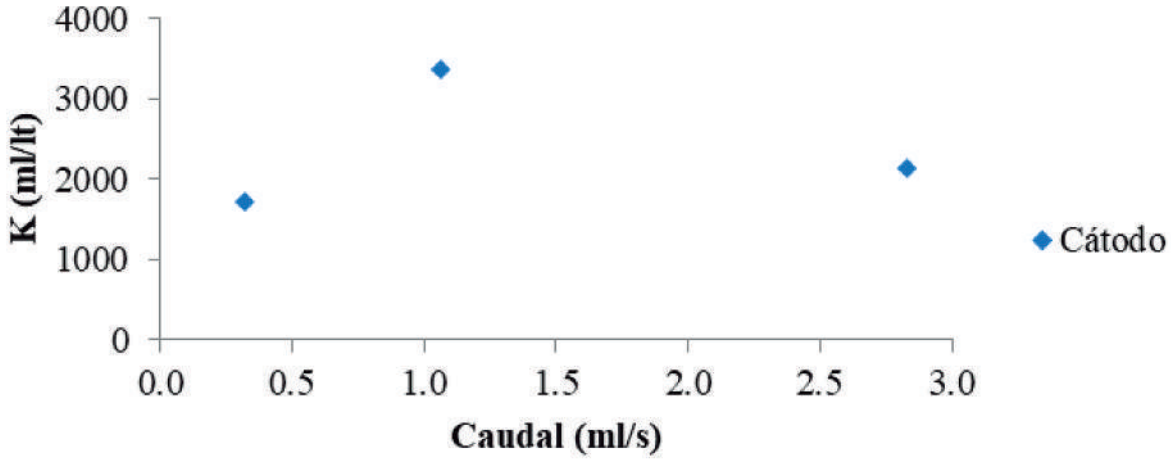


Nota. La Figura muestra las imágenes obtenidas del estudio de visualización de flujo en el compartimento de electrodos, las cuales permiten observar el comportamiento del flujo en la zona de electrodos. (Fuente: Elaboración propia).

3.4 Determinación del caudal de trabajo

La evaluación de la conductividad y la concentración de potasio en el cátodo, indicó que un caudal de 1,06 ml/s (cátodo) y 1,12 ml/s (ánodo) es óptimo para obtener la mejor conductividad y concentración de potasio en el catolito, según se ilustra en la Figura 8. Es necesario que el caudal del anolito sea mayor que el del catolito, ya que la formación de hidróxido de potasio en el compartimento catódico necesita la convección y difusión para facilitar la migración de cationes potasio [2].

Figura 8 *Variación de la concentración de potasio en el cátodo con el caudal de trabajo*



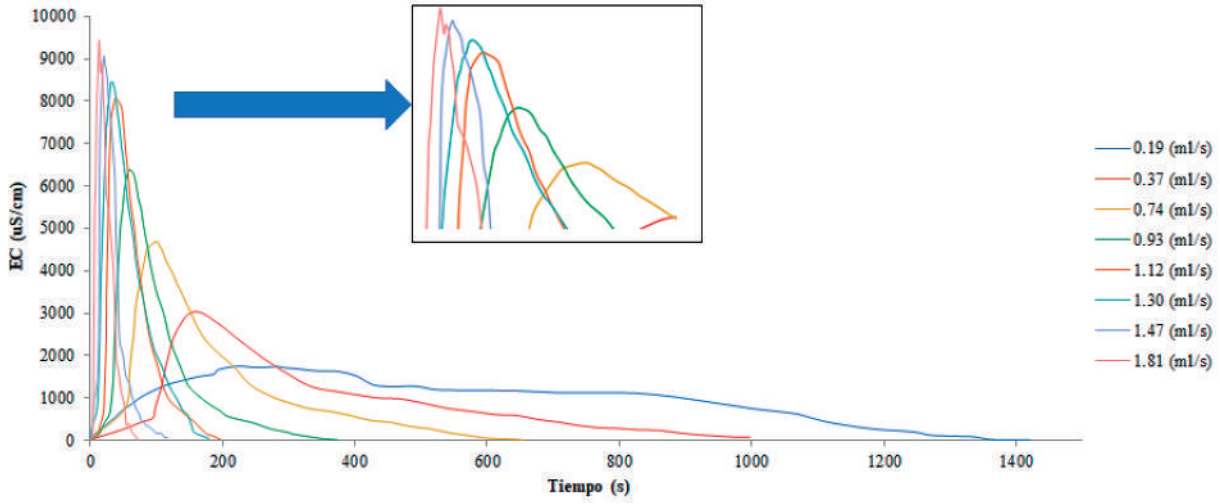
Fuente: Elaboración propia.

3.5 Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR)

Se determina a través de pruebas experimentales mediante el empleo de trazadores con señal en pulso. El movimiento de la materia puede presentar diferentes tiempos de residencia, debido a configuraciones geométricas, velocidades de flujo, homogeneidad, entre otros [10].

La evaluación de la distribución del tiempo de residencia reveló que a un caudal de 1,12 ml/s en el ánodo, garantiza una distribución uniforme de las moléculas del trazador en todo el sistema, como se muestra en la Figura 9. Este caudal minimiza los estancamientos y asegura una salida uniforme del fluido, con un tiempo de residencia medio de 38 segundos.

Figura 9 *Análisis comparativo de las curvas experimentales de distribución del tiempo de residencia.*



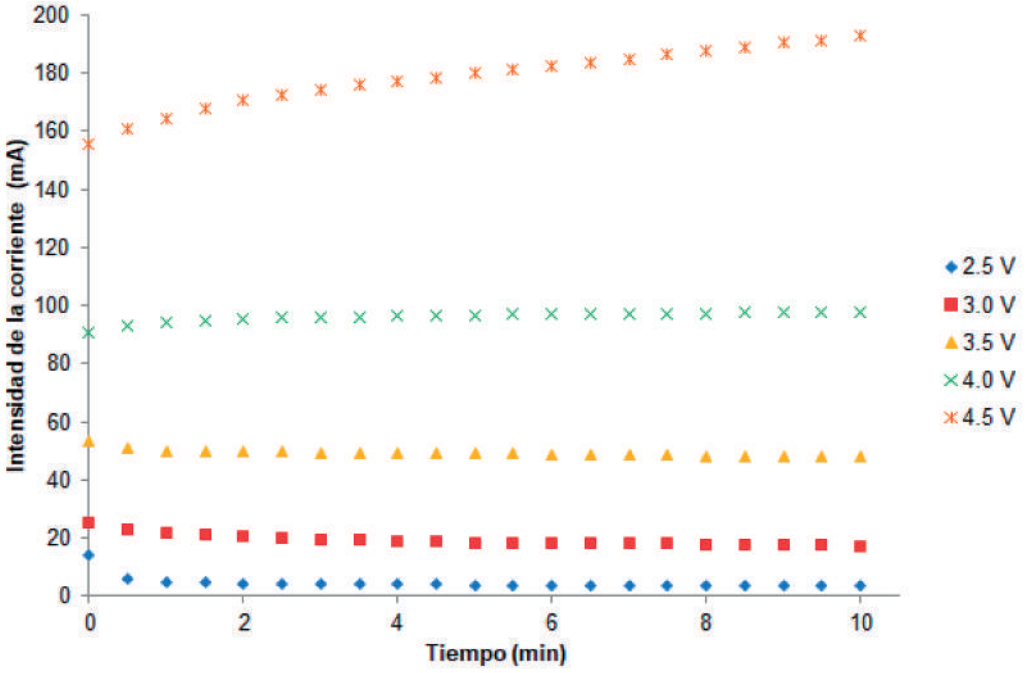
Fuente: Elaboración propia.

3.6 Voltaje mínimo y Rango de voltaje

El voltaje teórico calculado para la reacción química es de 2.2947 V. Posteriormente, se evaluó la intensidad de corriente en función del tiempo a voltajes de 2.2, 2.3 y 2.4 V, observándose que a 2.4 V, se inicia la reacción química, reflejada en una variación en la corriente eléctrica. Este voltaje comprende el potencial de equilibrio, los sobrepotenciales de concentración anódica y catódica, y las pérdidas de tensión en el sistema (soluciones, membrana y cables conductores) [11]. Para determinar el voltaje total de trabajo, es necesario considerar el sobrepotencial de superficie de los electrodos.

El análisis de la Figura 10 muestra un mejor comportamiento de la intensidad de corriente a partir de 4.5 V. Los sobrepotenciales de superficie anódica y catódica, respecto a electrodos de grafito, presentan un valor de 1.26436 V cada uno [2]. Considerando el potencial estándar de celda (4.92872 V), se establece un rango de trabajo entre 4.6 V y 4.9 V.

Figura 10 *Comportamiento de la intensidad de corriente en función del voltaje y tiempo.*



Fuente: Elaboración propia.

Etapa 2

3.7 Diseño experimental (software design expert 12)

Se determinó los parámetros electroquímicos óptimos utilizando el software Design Expert 12 y un diseño factorial de 2k con 2 niveles y tres factores. Las variables independientes evaluadas son el voltaje (V), concentración de cloruro de potasio (g KCl/100mlH_2O) y porcentaje peso-volumen de hidróxido de potasio (%KOH). La variable dependiente es el incremento de la concentración de potasio en el cátodo (g potasio/lt de solución).

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2. Bajo estos parámetros óptimos, se obtiene una concentración máxima de iones potasio, facilitando un mayor flujo de iones potasio a través de la membrana, desde el compartimento anódico al catódico, y resulta en una mayor producción de KOH.

Tabla 2 *Parámetros óptimos para la obtención de hidróxido de potasio KOH (Concentraciones bajas y altas)*

Variable	valor
tiempo (min)	60
temperatura (°C)	50
cátodo (ml/s)	1.06
ánodo (ml/s)	1.12
voltaje (v)	4.9
p/v KCl (%) p.a. (ánodo)	28
Concentraciones bajas de KOH	
p/v KOH (%) (cátodo)	1
Concentraciones altas de KOH	
p/v KOH (%) (cátodo)	16.17

Fuente: Elaboración propia.

Etapa 3

3.8 Disminución de impurezas de la materia prima: Filtración en caliente y cristalización

Los iones Ca+2, Na+ y K+ fueron cuantificados utilizando absorción atómica. Los aniones SO_4-2 y Cl- se determinaron mediante técnicas volumétricas y espectrofotométricas. La identificación cualitativa de los componentes se llevó a cabo mediante Difracción de Rayos X (DRX).

La filtración en caliente logró una reducción significativa de los niveles de calcio y sulfato. La cristalización permitió una disminución considerable de la concentración de sodio, mientras que el calcio quedó por debajo del límite de detección instrumental (<LDD)

La membrana requiere niveles de impurezas específicos: 20 ppb de Ca+2 y SO_4−2 <4-8 g/l (como Na2SO4). Debido a que el calcio precipita con varios aniones cerca del lado catódico de la membrana y el anión sulfato precipita con sodio en la misma región, es crucial controlar sus concentraciones [4]. Los resultados presentados en la Tabla 3 demuestran que las concentraciones de Ca y SO_4 se encuentran dentro de los rangos requeridos por la membrana. El proceso empleado permitió concentrar la muestra de KCl desde un 90% hasta un 96%.

Tabla 3 *Resultados del proceso de filtración en caliente y cristalización*

	Muestra Uyuni	**Filtración en caliente 80°C**		**Cristalización 5°C**
Parámetro	(%m/m)	Inicio (g/lt)	Final-Análisis (g/lt)	Análisis (%m/m)
Ca	1.5	**4.43**	**0.06**	< LDD
K	**47.5**	140.43	….	**50.1**
Na	**3.3**	9.76	….	**0.042**
SO4	4.2	**12.42**	**1.58**	< 1.58
Cl	43.3	128.02	….	< 50.16
Análisis Cualitativo				
Componente mayoritario				**Componente mayoritario**
Silvita	KCl			Silvita KCl
Componentes minoritarios				**Componentes minoritarios**
Halite	NaCl			Arcanite K_2SO_4
Aphthitalita	$K_3Na(SO_4)_2$			Aphthitalita $K_3Na(SO_4)_2$
Anhydrita	$Ca(SO_4)$			

Fuente: Elaboración propia.

3.9 Tratamiento electroquímico en la muestra tratada de cloruro de potasio (KCl) de grado fertilizante del salar de Uyuni

Utilizando los parámetros óptimos determinados para concentraciones altas y un tiempo de proceso de una hora, se aplicó el tratamiento en la muestra de KCl grado fertilizante del salar de Uyuni. Los resultados indicaron un aumento significativo en la concentración de potasio, con un incremento de 28.36 g/L para el grado fertilizante, comparando con el grado p.a. (34.83 g/L) la concentración de hidróxido de potasio KOH incremento de 15.38% a 18.74% (p/v). El rendimiento obtenido en relación al cloruro de potasio grado p.a es el siguiente:

$$\%\eta = \frac{\Delta K_{uyuni}}{\Delta K_{p.a.}} * 100\% = 81.42\% \quad (1)$$

4. CONCLUSIONES

Al aplicar el método electroquímico para la obtención de hidróxido de potasio utilizando la membrana Flemion F-8080 y electrodos de grafito, se observa un aumento significativo en la concentración de potasio en el catolito, pasando de 394.1 ppm a 2089.5 ppm.

Se lograron determinar los parámetros fijos de operación para el proceso electroquímico, específicamente (Tiempo, Temperatura y Caudal). Además, se establecieron las variables y rangos para el diseño experimental.

Mediante el diseño experimental y el análisis de varianza se determinaron los parámetros electroquímicos para la obtención de hidróxido de potasio, usando la membrana flemion F-8080, con electrodos de grafito:

Variable	Valor
Tiempo (min)	60
Temperatura (°C)	50
Cátodo (ml/s)	1.06
Ánodo (ml/s)	1.12
Voltaje (V)	4.9
p/v KCl (%) (ÁNODO)	28
Concentraciones bajas de KOH	
p/v KOH (%) (CÁTODO)	1
Concentraciones altas de KOH	
p/v KOH (%) (CÁTODO)	16.17

Los resultados obtenidos muestran que la filtración en caliente redujo significativamente los niveles de calcio y sulfato, mientras que la cristalización fraccionada logró disminuir los niveles de sodio y calcio, cumpliendo con los requisitos específicos establecidos por la membrana.

El tratamiento de la muestra de cloruro de potasio (KCl) de grado fertilizante permitió obtener una solución de hidróxido de potasio (KOH) con una concentración de 18,74% (p/v), a partir de una concentración inicial de 15,38% (p/v) y un rendimiento del 81,42% en comparación con el KCl de grado p.a.

5. RECONOCIMIENTO

Se agradece al Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) por brindar la oportunidad de realizar este proyecto en sus instalaciones y por el apoyo institucional recibido.

6. REFERENCIAS

[1] AGC Chemicals. (2012). Direction for Use of Flemion F-8080 Membrane. Amsterdam: AGC Chemicals Americas.

[2] Aguirre, B.R. (2022). Estudio básico de una celda de membrana a nivel bench scale para el proceso cloro-sosa. Universidad Mayor de San Andrés.

[3] Beer H. B. (1972). EE.UU. patent Nº 3.632.498.

[4] Brinkmann, T. et al. (2014). Brine Supply. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[5] Downs, C. (2022). Research Scientist at c-Tech Innovation. Electrochemical Experiment. Recuperado el 1 de marzo de 2023, de https://www.ctechinnovation.com/product/cflow-5x5/.

[6] Index Mundi. (s.f.). Cloruro de potasio Precio Mensual. Recuperado el 12 de diciembre de 2023, de https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=cloruro-de-potasio.

[7] Pérez, L., García M.C., Chinarro E., y Guinea D. (2020). Electrodos de grafito para la generación de hidrógeno mediante electrólisis en disolución alcalina de un residuo orgánico. Alpechín. Madrid, España.

[8] Stea, M. (2019, 14 de agosto). Lifeder: Hidróxido de potasio: estructura, propiedades, usos. https://www.lifeder.com/hidroxido-de-potasio/.

[9] Santos, M., Guinea, E. y García, D. (s.f.). Reactor de Cámara única para la generación de hidrógeno a partir de residuos orgánicos [Tesis Doctoral]. Universidad Internacional Menéndez Pelayo.

[10] Quintal-Franco, C. A., Giácoman-Vallejos, G., Jiménez, M., González, R. A., Quintal, C. A., & Giácoman, G. (2009). Distribución de tiempos de residencia en un sistema continuo de flujo bidimensional. Tecnología, Ciencia, Educación, 24(1), 57-65.

[11] Romero Polanco, J. (2018). Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción. Universidad, Valladolid, España.

[12] Rodríguez Cuesta, J. M. (2016). Electrolisis a alta temperatura. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética.

[13] Wu, L., Arenas, L. F., Graves, J. E., y Walsh, F. C. (2020). Flow Cell Characterisation: Flow Visualisation, Pressure Drop and Mass Transport at 2D Electrodes in a Rectangular Channel. Journal of The Electrochemical Society.

OBTENCIÓN DE SALMUERA CONCENTRADA EN LITIO MEDIANTE ELECTRODIÁLISIS A PARTIR DE SALMUERAS DE SILVINITA PROVENIENTES DEL SALAR DE UYUNI

Obtaining lithium-concentrated brine through electrodialysis from sylvinite brine from the Uyuni Salar

Geraldine Villa5, Boris Párraga5, Daniel Peña5

ORCID: 0009-0001-4156-3067

ORCID: 0000-0002-1690-806

ORCID: 0000-0003-2414-7907

RESUMEN

Bolivia posee la mayor reserva mundial de litio, con 21 millones de toneladas métricas, la extracción enfrenta desafíos debido a la alta proporción de magnesio en las salmueras del Salar de Uyuni. La presente investigación se centra en las tecnologías de Extracción Directa de Litio (EDL), particularmente en la electrodiálisis (ED), para reducir la relación magnesio/litio (Mg/Li) y aumentar la concentración de litio. Se emplearon membranas iónicas selectivas (MIA 7000 y CMI 7001) y se analizaron factores como el caudal (0.57–0.21 cm³/s) y el voltaje (4–7 V) mediante un diseño experimental. Los resultados óptimos indicaron que un menor caudal y mayor voltaje (0.57 cm³/s y 7 V) lograron una reducción del 46.99% en la relación Mg/Li en una salmuera sintética. Cuando se aplican estos parámetros a una salmuera real del Salar de Uyuni, la reducción es del 45.38%, ligeramente menor debido a contaminantes presentes en las sales naturales. El costo estimado del proceso a escala de laboratorio es de $38.77/kg de salmuera concentrada, con una concentración final de 201.11 ppm de litio, lo que indica la viabilidad de este enfoque en condiciones óptimas.

Palabras Clave: EDL (Extracción directa de litio), electrodiálisis, relación Mg/Li, salmuera de silvinita, Salar de Uyuni.

ABSTRACT

Bolivia holds the world's largest lithium reserve, with 21 million metric tons, but extraction faces challenges due to the high magnesium content in the brines of the Salar de Uyuni. This research focuses on Direct Lithium Extraction (DLE) technologies, particularly electrodialysis, to reduce the magnesium/lithium (Mg/Li) ratio and increase lithium concentration. Selective ionic membranes (MIA 7000 and CMI 7001) were used, and factors such as flow rate (0.57–0.21 cm³/s) and voltage (4–7 V) were analyzed through an experimental design. Optimal results showed that a lower flow rate and higher voltage (0.57 cm³/s and 7 V) achieved a 46.99% reduction in the Mg/Li ratio in synthetic brine. When these parameters were applied to real brine from the Salar de Uyuni, the reduction was 45.38%, slightly lower due to contaminants present in natural salts. The estimated cost of the process at laboratory scale was $38.77/kg of concentrated brine, with a final lithium concentration of 201.11 ppm, indicating the viability of this approach under optimal conditions.

Keywords: DLE (Direct Lithium Extraction), Electrodialysis, Mg/Li Ratio, Sylvinite Brine, Uyuni Salt Flat.

5 Instituto de Desarrollo de Procesos Químicos – Facultad de Ingeniería – Universidad Mayor de San Andrés

1. INTRODUCCIÓN

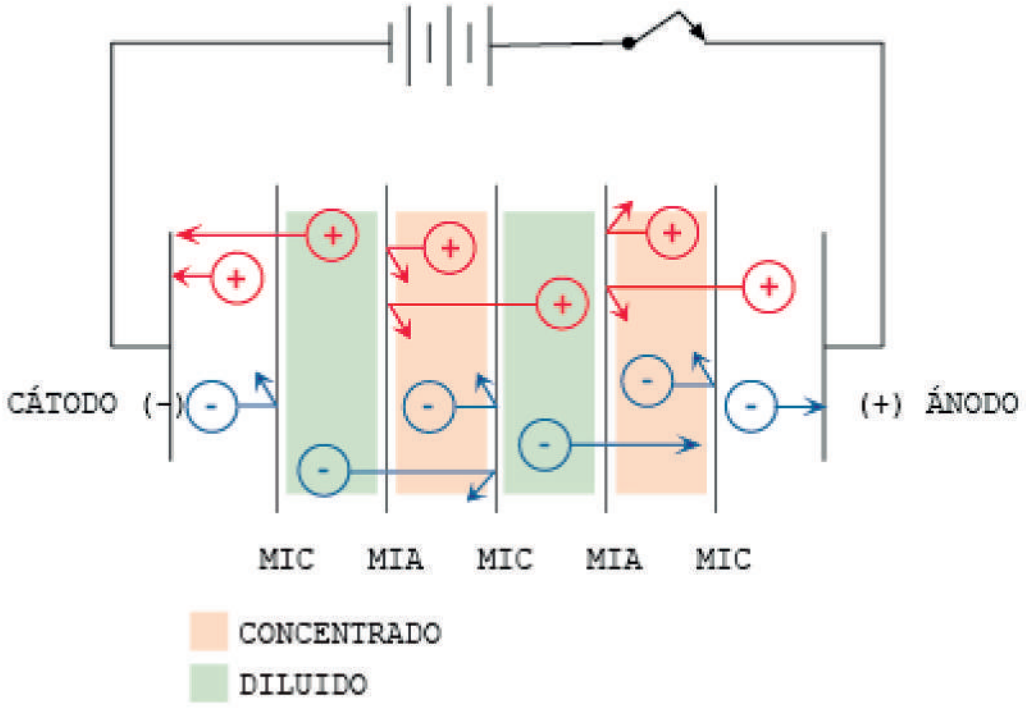
El litio en un elemento cuantioso que se encuentra en la corteza terrestre en diversas formas. El "Triángulo de litio" compuesto por Chile, Argentina y Bolivia, representa más del 50% de las reservas mundiales. [1] El Salar de Uyuni, ubicado en el departamento de Potosí, es uno de los salares más importantes de Bolivia. su industrialización se basa en un plan de "Desarrollo integral de las salmueras del Salar de Uyuni" [2-4]. Aunque alberga alrededor de 21 millones de toneladas métricas (TM) de litio, la industrialización resulta compleja debido a la alta relación másica Mg/Li que alcanza valores de hasta 23.5. [5]

En la actualidad, para la explotación de litio en el Salar de Uyuni se emplean pozas de evaporación, que corresponden a una secuencia de piscinas que permiten la decantación de sales mediante la evaporación de grandes cantidades de agua, aunque su aplicación tiene como ventajas el bajo costo operativo y reducido consumo eléctrico, implica efectos ambientales críticos, alto consumo de agua, alteración en la biodiversidad, incremento en solidos suspendidos en el aire, incremento de salinidad en la calidad de suelo y agua y cambio de la dinámica hidrológica, entre otros.

Para enfrentar estos desafíos, Bolivia pretende implementar a su plan de industrialización de litio la aplicación de tecnologías de Extracción Directa de Litio (EDL), que son un conjunto de tecnologías que permiten reducir de forma significativa el tiempo de procesamiento y limitar el impacto ambiental, una de ellas es la electrodiálisis (ED). Bolivia ha comenzado a implementarla en colaboración con empresas internacionales, como el consorcio CBC de China, en los salares de Uyuni y Coipasa. Se espera que esta planta permita una producción anual de hasta 25,000 toneladas de carbonato de litio grado batería en cada salar para el 2025. En el caso de Uyuni, el proyecto ya contempla fases de prueba y producción escalonada, con una meta inicial de 14,000 toneladas por año. (15-17)

La ED es un proceso electroquímico que se utiliza para separar iones en soluciones mediante el uso de membranas selectivas y potencial electroquímico. Esta tecnología se basa en el movimiento de iones a través de membranas semipermeables que permiten el paso de cationes (iones positivos) y aniones (iones negativos) bajo la influencia de un campo eléctrico, estas membranas permiten la separación de iones monovalentes de iones polivalentes. En la puesta en marcha existen 4 compartimentos: diluido, concentrado, compartimento anódico y compartimento catódico Está conformado por un par de electrodos, una serie de membranas posicionadas en secuencia y una fuente de corriente continua. (6-14) A continuación se ilustra un esquema del sistema ED. (fig. 1)

Figura 1. *Esquema del sistema ED*



Fuente: Elaboración propia.

La investigación pretende explorar la electrodiálisis (ED) como tecnología alternativa a las pozas de evaporación, siendo que Bolivia pretende incursionar en la aplicación de EDL, empleando membranas selectivas de intercambio iónico no comerciales, (catiónico MIC 7001 y aniónico AMI 7000), con el objetivo de analizar la capacidad de reducción de la relación magnesio/litio y la concentración de litio. Se selecciona la salmuera proveniente de la piscina de silvinita, debido a que esta presenta una cantidad menor de cloruro de sodio y cloruro de potasio, lo que promueve a la separación de los iones monovalentes de los polivalentes. Si se demuestra que esta tecnología es efectiva empleando las membranas en cuestión, se espera tener datos fehacientes de la aplicación de la ED en la salmuera de silvinita de Salar de Uyuni, explorando a pequeña escala las posibles dificultades y oportunidades de mejora. De este modo, se podría, no solo reducir el impacto ambiental asociado con el consumo de agua y la salinización del suelo, sino también aumentar los beneficios económicos en términos de regalías a nivel regional y nacional. La adaptación exitosa de la ED en Uyuni podría posicionar a Bolivia como un líder en la extracción sustentable de litio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se trabajó con salmuera sintética, en la que se emplearon reactivos de grado analítico, a excepción del cloruro de litio, que fue de pureza química. Esto permitió obtener una solución estándar, utilizada para la calibración del sistema ED. Las pruebas de electrodiálisis (ED) se llevaron a cabo utilizando un par de bombas peristálticas, una fuente de corriente continua, electrodos de

titanio, membranas de intercambio catiónico (MIC 7000) y membranas de intercambio aniónico (AMI 7001). Como instrumentos de medida de control del pH se utilizó un medidor de pH electrónico; para el pesaje de muestras, una balanza analítica; y agua destilada para la preparación de las salmueras sintéticas.

La celda ED fue diseñada procurando: reducir el volumen de los compartimentos, sin impedir el flujo, usar toda el área disponible de los electrodos y disminuir lo máximo posible la distancia entre membranas, para la construcción de la celda se empleó un material acrílico trasparente de alta resistencia, pegamento dieléctrico y teflón para evitar fugas, así mismo se emplearon placas plásticas irregulares entre las membranas para promover la turbulencia.

2.2 Métodos

La investigación mediante el diseño experimental determino los valores de los parámetros operacionales de la ED, el diseño factorial seleccionado fue un 2^2 con puntos centrales en duplicado. Las pruebas se realizaron con una salmuera sintética, formulada en función de la composición química característica de la salmuera de silvinita del salar de Uyuni, cuyos valores fueron proporcionados por la Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos y se encuentran detallados en la Tabla 1.

Para la sinterización se utilizó cloruro de litio, cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de calcio, cloruro de magnesio hexahidratado y sulfato de magnesio pentahidratado, los cálculos se realizaron por la descomposición iónica de estos compuestos y un balance iónico para buscar el valor óptimo de requerimiento de cationes y aniones. A continuación, se presenta la composición química de la salmuera estudiada y la relación Mg/Li.

Tabla 1 *Composición química de la salmuera de silvinita*

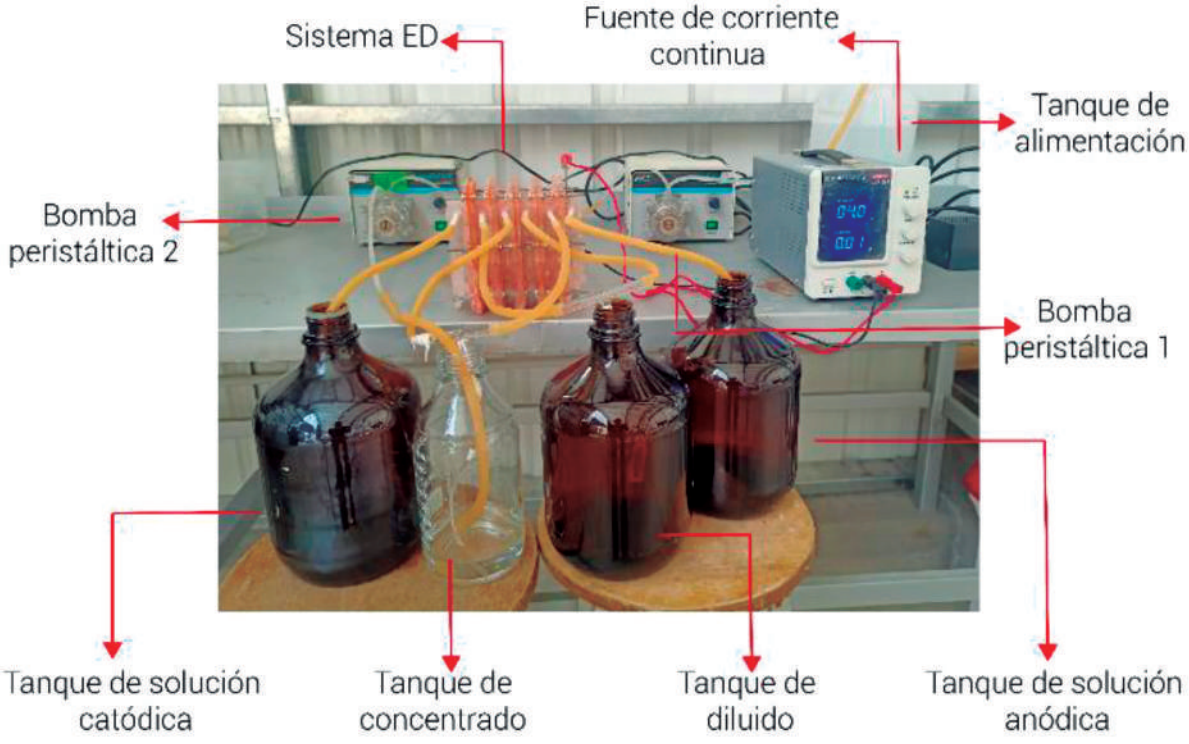
	Salmuera de silvinita							R (Mg/Li)
	Li^+	Mg^{+2}	K^+	Na^+	Ca^{+2}	$SO_4{}^{+2}$	Cl^-	
$mol/_{m^3}$	71	289	10	15	0	36	590	4,07

Fuente: Elaboración propia.

Diseño experimental

Para seleccionar el diseño experimental, se estudiaron las variables de respuesta y las variables de estudio con el objetivo de reducir la relación Mg/Li e incrementar la concentración de litio en los compartimentos de concentrado. Se realizó el análisis de resultados y la optimización del proceso utilizando el software Design Expert. Las pruebas se llevaron a cabo durante un periodo de 2 horas, controlando el pH de las soluciones anódica y catódica para mantenerlo dentro de los límites permitidos por las membranas. El diagrama del sistema empleado se muestra en la figura 2.

Figura 2 *Sistema ED empleado*



Fuente: Elaboración propia.

Comparación de salmuera sintética y salmuera del Salar de Uyuni

Para la comparación se realizó una salmuera sintetizada con sales provenientes del Salar de Uyuni y fue sometida a los parámetros operacionales más adecuados que fueron determinados por el diseño experimental.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño experimental

Tras realizar pruebas preliminares, se seleccionaron como variables de respuesta la relación magnesio-litio y la concentración inicial de litio C_Li. Las variables de estudio son el caudal y el voltaje, con valores de 5.7×10^{-7} y 20.1×10^{-7} (m^3/s), y 4 y 7 (V) respectivamente. Se controló el pH para garantizar la integridad de las membranas, ya que el límite de tensión es de 8V. La tabla 2 detalla los parámetros empleados en cada prueba, mientras que la tabla 3 presenta la variación de la concentración de litio y de la relación Mg/Li al finalizar la prueba. Se observa que los mejores resultados —mayor concentración de litio y menor relación Mg/Li— se obtienen con menor caudal y mayor voltaje, ya que el menor caudal incrementa el tiempo de residencia, y el mayor voltaje favorece una mayor migración de iones. Los límites de estos valores están determinados por las propiedades de las membranas y la disponibilidad de materiales y equipos.

Tabla 2 *Parámetros operativos de las pruebas experimentales*

	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Unidades
I_{lim}	4	4	4	4	4	[A]
I	0,02	0,07	0,02	0,07	0.05	[A]
V	4	7	4	7	5.5	[V]
Q_{alim}	5.7	5.7	20.1	20.1	12.9	$x10^{-7}$ $[\frac{m^3}{s}]$
Q_{conc}	1.4	1.4	5.0	5.0	3.2	$x10^{-7}$ $[\frac{m^3}{s}]$

Fuente: Elaboración propia.

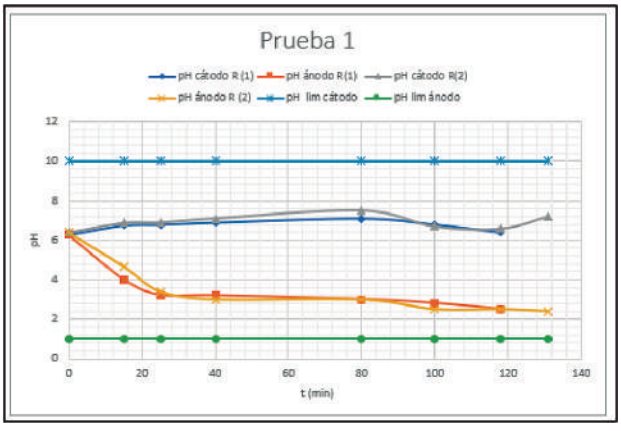
Tabla 3 *Resultados de las pruebas del diseño experimental*

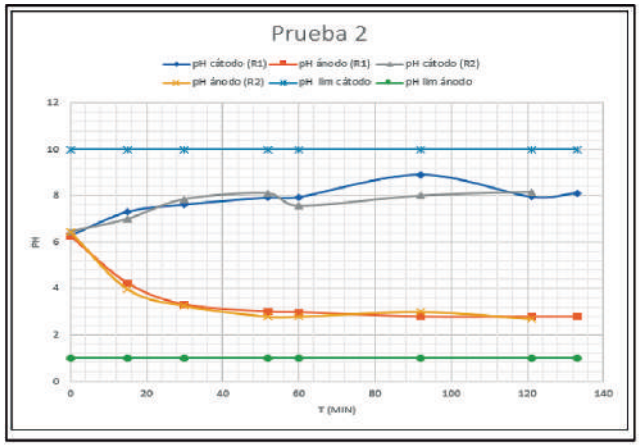
	Replica 1 R (1)			Replica 2 R (2)		
	Mg [ppm]	Li [ppm]	R (Mg/Li)	Mg [ppm]	Li [ppm]	R (Mg/Li)
Inicial	1536,20	103,55	14,84	1536,20	103,55	14,84
Prueba 1	1547,11	144,81	10,68	1551,22	152,40	10,18
Prueba 2	1555,25	196,86	7,90	1589,48	202,11	7,86
Prueba 3	1552,31	146,28	10,61	1598,27	152,09	10,51
Prueba 4	1558,02	156,31	9,97	1601,31	166,21	9,63
Prueba 5	1564.28	140.93	11.10	1584.56	147.23	10.76

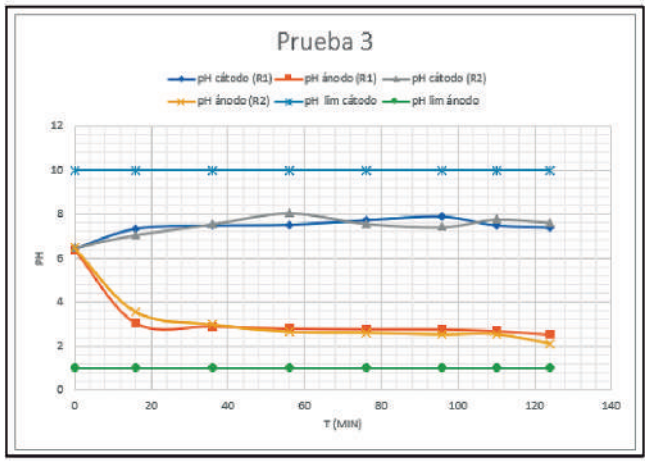
Fuente: Elaboración propia.

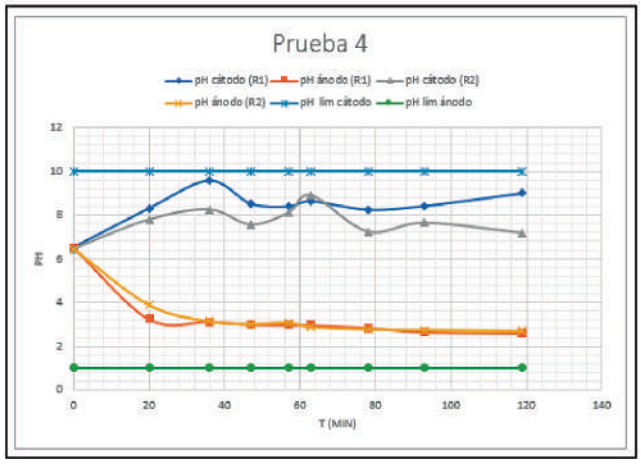
La figura 3 muestra los resultados de control de pH, donde se observa que durante la prueba 4 – mayor voltaje y mayor caudal - la variación de pH es considerable, esto debido a que al tener un mayor caudal existe un menor tiempo de residencia del ácido clorhídrico diluido que ayuda a la acidificación en el compartimento anódico.

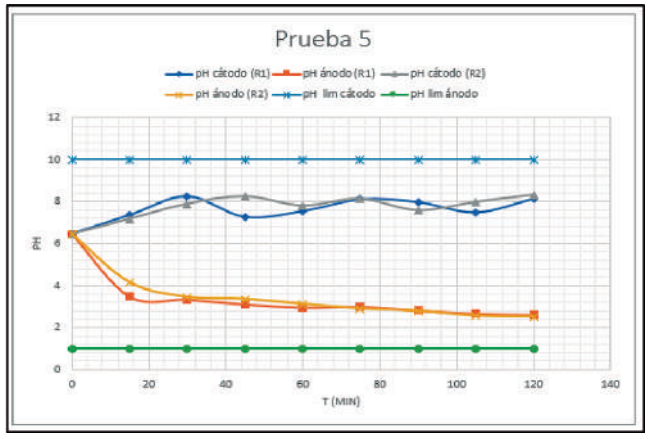
Figura 3. *Resultados de las pruebas de control de pH*







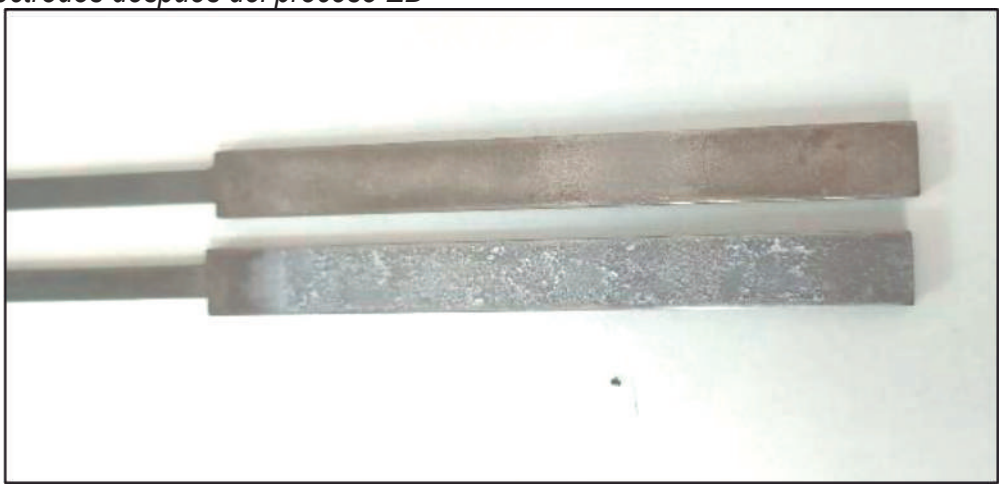




Fuente: Elaboración propia

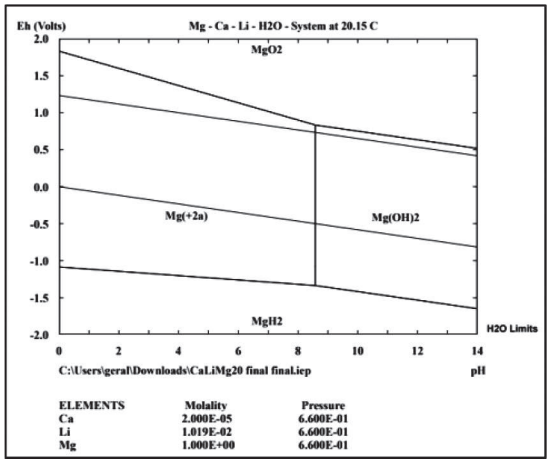
Durante el proceso de electrodiálisis se forma material precipitado en el electrodo catódico, tal como se ilustra en la figura 4. Se analizo utilizando diagramas de Pourbaix, figura 5, que permitem identificar el material precipitado como hidróxido de magnesio. El hidróxido de magnesio es un compuesto que se forma en condiciones específicas de pH y potencial eléctrico. La presencia de este precipitado influye en el rendimiento del proceso de electrodiálisis porque que afecta la conductividad y la eficacia de la separación de iones.

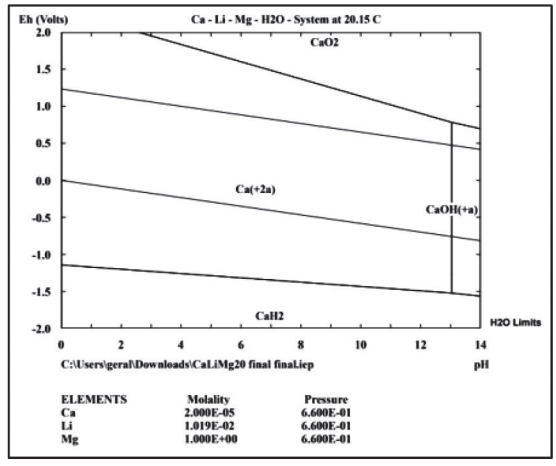
Figura 4. *Electrodos después del proceso ED*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. *Diagramas de Porubaix*





Fuente: Elaboración propia.

Comparación de salmuera sintética y salmuera del Salar de Uyuni

Una vez obtenidos los valores de los mejores niveles de las variables independientes (Voltaje = 7 V, caudal = 5.7×10^{-7} m^3/s) se aplicaron estos valores para una prueba de comparación de reducción de R(Mg/Li) e incremento de concentración de litio, con la salmuera sintética con componentes puros y una salmuera sintetizada con sales provenientes del Salar de Uyuni, Se obtuvo una reducción de la R (Mg/Li) de la salmuera sintética de 14.84 a 7.86, mientras que la salmuera sintetizada con sales naturales presentó una reducción de 14.91 a 7.97 debido a la presencia de contaminantes químicos y/o iónicos.

Tabla 3 *Porcentaje de reducción de la R (Mg/Li)*

	R (Mg/Li)o	R (Mg/Li)f	% reducción
Salmuera sintética	14.84	7.86	46.99
Salmuera sintetizada con sales provenientes del Salara de Uyuni	14.91	7.97	45.38

Fuente: Elaboracón propia.

4. CONCLUSIONES

El planteamiento del diseño experimental y el desarrollo de las pruebas experimentales permitieron determinar los niveles más adecuados de las variables aplicando un diseño experimental 2^2 con puntos medios y pruebas en duplicado, cuyos datos fueron procesados en el software Design Expert, como:

El análisis de varianza concluyó que el modelo planteado es significante para ambas variables de respuesta donde el voltaje es el parámetro más significativo.

La optimización del proceso se realizó buscando minimizar la R (Mg/Li) e incrementar la C_Li, la solución encontrada concluyó que para un voltaje de 7 [V] y un caudal de 5.7×10^{-7} m^3/s se obtuvo la mejor deseabilidad correspondiente a 0.975.

Durante el proceso de ED, el control del pH es primordial. En el compartimento catódico, existe una tendencia al aumento del pH, lo cual favorece la formación de precipitados en el electrodo. Esto, a su vez, disminuye la eficiencia del proceso de ED y provoca daños en las membranas.

La caracterización química de la salmuera concentrada obtenida del proceso ED realizada mediante espectrometría de absorción atómica, determinó la reducción de la R (Mg/Li) como 46.99% (mostrando una reducción de 14.84 a 7.86), mientras que la concentración de litio tuvo un incremento del 94.22% (mostrando un incremento de 103.55 ppm a 201.11 ppm).

5. RECONOCIMIENTO

Es fundamental reconocer a la Universidad Mayor de San Andrés, en particular a la Facultad de Ingeniería y la Carrera de Ingeniería Química, Petroquímica, Ambiental, Alimentos y Bioquímica, por las facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto. Un reconocimiento especial al Instituto de Investigaciones y Procesos Químicos por su impulso al estudio y desarrollo de proyectos en múltiples disciplinas.

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

ED = Electrodiálisis

EDL = Extracción Directa de Litio

R(Mg/Li) = Relación másica magnesio – litio

MIC = Membrana de Intercambio Catiónico

AMI = Membrana de Intercambio Aniónico

V = Voltaje

m^3/s = metro cubico por segundo

ppm = partes por millón

6. REFERENCIAS [Referenciar números]

[1] Fuentes Claros, E. (2020). La industrialización de litio del Salara de Uyuni en Bolivia: Entre el desarrollo y la seguridad hídrica

[2] Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos (2011). Memoria Institucional.

Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos (2017). Memoria Institucional.

[4] Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos (2020). Memoria Institucional

[5] American Water Works Association. (1995). Electrodialysis and Electrodialysis Reversal

Bonet Rimbau, N. (2010). Modelización de la concentración de salmueras de desalinización mediante procesos de electrodiálisis.

Lee Yin, M. (2020). Tecnologías de concentración de litio alternativas a las pozas de evaporación. Santiago de Chile.

Peng-Yuan, J., Zhi-Yong, J., Qing-Bai, C., Jie, L., Ying-Ying, Z., Shi-Zhao, W., . . . Jun-Sheng, Y. (2018). Effect of coexisting ion on recovering lithium from high Mg/Li ratio brines by selective-electrodialysis. EL SEVIER.

Xiao-Chai, Z., Jing, W., Zhi-Yong, J., Peng-Yuan, J., Jie, L., Ying-ying, Z., . . . Jun-Sheng, Y. (2021). Preparation og Li2CO3 from high Mg/Li brine based on selective-electrodialysis with feed and bleed mode. El Sevier.

Xlao-Yao, N., Shu-Ying, S., Ze, S., Xingfu, S., & Jian-Guo, Y. (2016). IOn-fractionation of lithium ions from magnesium ions by electrodialysis using monovalent selective ion-exchange membranes. ELSEVIER.

Ying, J., Luo, M., Jin, Y., & Yu, J. (2020). Selective separation of lithium from high Mg/Li ratio brine using single-stage and multi-stage selective electrodialysis processes. ELSEVIER.

Ying, J., Luo, M., Jin, Y., & Yu, J. (2020). Selective separation of lithium from high Mg/Li ratio brine using single-stage and multi-stage selective electrodialysis processes. El Sevier.

Yong, X., Qingbai, C., Yang, G., Jianyou, W., Huiging, F., & Fei, Z. (2023). Performance comparison of lithium freactionation from magnesium via continuous selective nanofitration/electrodialysis. EL SEVIER, 42-50.

Youjing, Z., Huaiyou, W., Yan, L., Min, W., & Xu, X. (2020). An integrated membrane process for preparation of lithium hydroxide from high Mg/Li ratio salt lake brine. EL SEVIER.

El Diario Bolivia. (2023). Desafíos y reveses en la ruta del litio.

Bolpress. (2023). No solo Uyuni, ahora se impulsa una planta de extracción de Litio en el salar de Coipasa.

Cedib.org. (2023). Perspectivas locales sobre el Litio en el Salar de Uyuni.

EFECTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE COCINAS MEJORADAS A BIOMASA

Effect of altitude on the energy performance indicators of improved biomass stoves

Christian Gonzalo Limachi2, Iris Jabneel Calle6,*, Marcelo Antonio Gorritty6

RESUMEN

El estudio analiza el efecto de la altitud sobre los indicadores de desempeño energético de cocinas mejoradas que utilizan biomasa como combustible, aplicando el protocolo de Prueba de Hervor de Agua (WBT, por sus siglas en inglés). Se seleccionaron cinco localidades de Bolivia, a diferentes altitudes que oscilan entre 418.5 - 3937.2 msnm, para llevar a cabo las pruebas experimentales. Los indicadores incluyen la tasa de combustión, la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible.

A través de un análisis de varianza, se determinó que la altitud afecta de manera estadísticamente significativa el desempeño de las cocinas, particularmente en lo que respecta a la tasa de combustión y la eficiencia térmica. A mayores altitudes, existe una disminución en la tasa de combustión debido a la menor cantidad de oxígeno disponible, mientras que la eficiencia térmica mostró un aumento progresivo.

Los resultados sugieren que las cocinas mejoradas deben adaptarse para optimizar su funcionamiento en regiones situadas a gran altitud, donde las condiciones atmosféricas afectan el rendimiento energético. Este estudio contribuye al diseño de tecnologías más eficientes y sostenibles para la cocción, promoviendo la reducción de emisiones nocivas, el ahorro de combustible, y mejora de la salud pública.

Palabras Clave: Altitud, cocinas mejoradas, biomasa, prueba de hervor de agua, eficiencia energética.

ABSTRACT

The study analyzes the effect of altitude on the energy performance indicators of improved stoves that use biomass as fuel, applying the Water Boiling Test (WBT) protocol. Five locations in Bolivia, at different altitudes ranging from 418.5 to 3937.2 meters above sea level, were selected to conduct experimental tests. The indicators include combustion rate, thermal efficiency, and specific fuel consumption.

Through an analysis of variance (ANOVA), it was determined that altitude significantly effects stove performance, particularly in terms of combustion rate and thermal efficiency. At higher altitudes, there is a decrease in combustion rate due to the lower oxygen availability, while thermal efficiency showed a progressive increase.

The results suggest that improved stoves need to be adapted to optimize their performance in high-altitude regions, where atmospheric conditions affect energy efficiency. This study contributes to the design of more efficient and sustainable cooking technologies, promoting the reduction of harmful emissions, fuel savings, and improvements in public health.

Keywords: Altitude, improved stoves, biomass, water boiling test, energy efficiency.

6 Centro de Pruebas de Cocinas (CPC) del Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
2 Profesional en Ingeniería Química, La Paz, Bolivia.
*Autor de correspondencia.
Correo: jabneeliris@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La cocción de alimentos con biomasa sigue siendo una práctica común en las áreas rurales de países en desarrollo, con cerca de 3 mil millones de personas que dependen de este tipo de combustibles para satisfacer sus necesidades diarias. La combustión ineficiente de biomasa en cocinas rudimentarias genera altos niveles de contaminación intradomiciliaria, lo que afecta gravemente la salud, especialmente de mujeres y niños. Además, este tipo de cocción incrementa la deforestación y la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático.

El uso de cocinas mejoradas a biomasa surge como una alternativa tecnológica para mitigar estos efectos, aumentando la eficiencia energética y reduciendo las emisiones nocivas. Sin embargo, se ha identificado que las condiciones ambientales, en particular la altitud, pueden influir en el desempeño de estas cocinas. Este estudio se centra en evaluar el efecto de la altitud sobre indicadores clave de rendimiento energético como la tasa de combustión, eficiencia térmica y consumo de combustible, mediante la aplicación del protocolo de prueba de hervor de agua (WBT, por sus siglas en inglés).

La importancia de estudiar el efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de la combustión radica en que permite definir criterios que sean apropiados para el diseño de quemadores, intercambiabilidad de combustibles, seguridad de la combustión, eficiencia en el uso de combustibles, etc., para regiones situadas en altura (Velasco Hurtado & Velasco Villarroel, 2014)

La relevancia económica y social de esta investigación radica en optimizar el uso de cocinas mejoradas en regiones rurales situadas a diferentes altitudes, lo que permitirá mejorar la calidad de vida de las comunidades afectadas y promover prácticas más sostenibles de consumo energético.

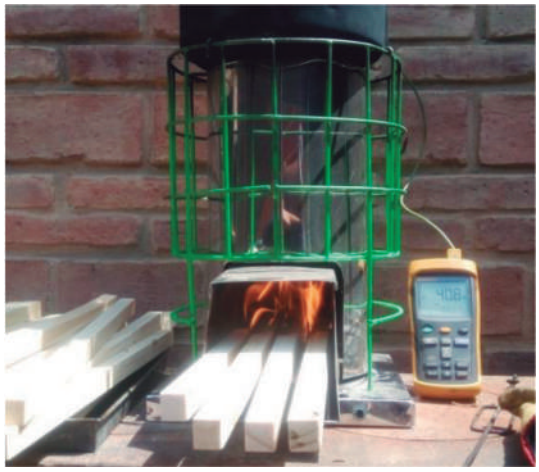
2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Se utilizó una cocina mejorada portátil tipo “rocket” diseñada y construida dentro del Programa ENDEV-Bolivia (Figura 1), con una cámara de combustión cuadrada para mejorar el flujo de aire, con cierta altura para mejorar el tiro de la combustión, con rejillas alrededor de la cocina por cuestiones de seguridad para evitar quemaduras al momento de manipular la cocina.

Se realizaron pruebas previas al estudio con la cocina para conocer sus condiciones de operación en alta y baja potencia, además para determinar el consumo aproximado de combustible por prueba para determinar la cantidad de combustible para todo el lote de pruebas.

Figura 1. *Cocina mejorada portátil evaluada tipo rocket.*



Fuente: Elaboración propia.

El combustible utilizado fue madera de pino, seleccionada y preparada en piezas uniformes de 1.5x1.5x45 cm. La humedad del combustible fue controlada, y su poder calorífico se determinó en laboratorio.

Por otro lado, se utilizaron equipos para el registro de datos como: balanza eléctrica, termómetro digital, medidor de humedad GPS y ollas estándar sin tapa. Estos fueron transportados de un lugar a otro para las pruebas sin cambiar los mismos y manteniendo protocolos básicos de verificación de funcionamiento y calibración

Todos los ambientes contaban con acceso a agua y energía eléctrica necesarios para la realización de cada prueba. Se realizaron las repeticiones respectivas para considerar un análisis estadístico.

2.2. Método

Las pruebas de eficiencia energética se realizaron en cinco ciudades de Bolivia con diferentes altitudes: Santa Cruz (418.5 msnm), Coroico (1743.2 msnm), Cochabamba (2646.68 msnm), La Paz (3490.08 msnm), y Viacha (3937.2 msnm).

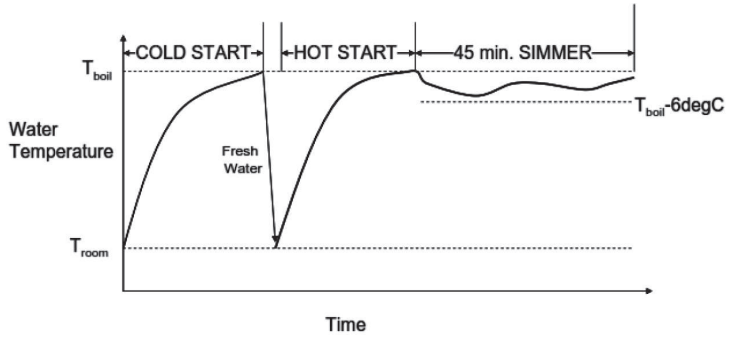
Todas las pruebas se realizaron en ambientes semiabiertos simulando condiciones de campo, pero tratando de que el viento no afecte o altere el proceso de combustión.

Se aplicó el protocolo WBT en tres fases (ver Figura 2): alta potencia en frío, alta potencia en caliente, y baja potencia (simmer). Las mediciones incluyeron el tiempo de hervor, la tasa de combustión, la eficiencia térmica, y el consumo específico de combustible entre otros, de acuerdo a reportes estandarizados de la planilla electrónica del protocolo WBT.

Para dar inicio a las pruebas se determinó la temperatura de ebullición local, previamente se verificó que el clima sea lo más aceptable. Para la primera etapa, se enciende con el iniciador, se registra la temperatura del agua y se pesa el filtro y combustible.

Los indicadores relativos se refieren a valores que usan razones o proporciones de magnitudes como el consumo de biomasa en gramos por unidad de volumen de agua (g/L) o la eficiencia energética como se ve en la definición de la Tabla 1, corresponde a una fracción de dos magnitudes. Los indicadores absolutos se refieren a magnitudes que se miden sin comparación con otras del mismo sistema, en este caso el tiempo de hervor o la masa de leña total u otras del mismo tipo.

Figura 2. *Temperatura durante las tres fases de la prueba de hervor (cleancookstoves.org, 2018).*



Fuente: Elaboración propia.

La prueba del WBT no permite comparar pruebas en diferentes zonas geográficas si no se controlan elementos de operación de la prueba como la humedad y tipo de madera, aspecto que se controló utilizando mismos lotes de leña empaquetados herméticamente para mantener su humedad hasta antes del inicio de las pruebas. Actualmente el WBT utiliza los siguientes indicadores de rendimiento energético de una cocina mejorada, (GACC, 2016) como se ve en la Tabla 1.

Tabla 1. *Indicadores de rendimiento energético para una cocina mejorada.*

Indicador	Símbolo	Unidades	Tipo	Definición
Tiempo de hervor	$\Delta t_c, \Delta t_h$	minutos	Absoluto	Tiempo necesario para hervor de 5L de agua tanto para arranque en frío como en caliente.
Tiempo de hervor corregido	$\Delta t^T{}_c, \Delta t^T{}_h$	g/min	Relativo	Es el mismo que el anterior pero ajustado a un cambio de temperatura de 75ºC
Tasa de combustión	r_{cb}, r_{hb}, r_{sb}	g/min	Relativo	Promedio de la masa de leña quemada por minuto durante la prueba
Eficiencia térmica	h_c, h_h, h_s	%	Relativo	Fracción del calor producido por el combustible que se transfiere a la olla.
Consumo específico de combustible	SC_c, SC_h, SC_s	g/L	Relativo	Cantidad necesaria de combustible necesario para el hervor (o hervor constante) de un litro de agua.
Consumo específico de combustible corregido	$SC^T{}_c, SC^T{}_h, SC^T{}_s, BF$	g/L	Relativo	Es el mismo que el anterior pero ajustado a un cambio de temperatura de 75ºC
Consumo especifico de energía corregido	BE	KJ/L	Relativo	Cantidad de energía utilizada para el hervor (o hervor constante) de un litro de agua.
potencia	FP_c, FP_h, FP_s	watts	Relativo	Medida de la velocidad con la que se quema el combustible
Razón de cambio de potencia	TDR	-	Relativo	Indica la relación de cambio de potencia entre las fases de alta y baja potencia.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la ecuación de uno de los indicadores como la eficiencia térmica (). Ésta es la cantidad de energía utilizada para calentar y evaporar el agua por unidad de energía de combustible quemado. Se calcula de la siguiente manera de acuerdo al número de ollas de la cocina:

$$h_c = \frac{\left(C_{agua} * \left(P_{cf} - P\right) * \left(T_{cf} - T_{ci}\right)\right) + \lambda_{agua} * W_{cv}}{f_{cd} * LHV} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde: Peso de la olla con agua después de la prueba

Peso de la olla vacia

Valor calorífico inferior

Temperatura del agua después de la prueba

Temperatura del agua antes de la prueba

Calor especifico del agua

Valor del calor latente del agua a Tb

Peso del combusstible

En el caso de la primera fase de la prueba (inicio en frio), es una medida de la cantidad de combustible requerido para llevar un litro de agua a ebullición, con la cocina fría.

Los resultados se analizaron utilizando el método de análisis de varianza (ANOVA) y prueba de turkey para determinar si la altitud tenía un impacto significativo respecto a la diferencia de las métricas entres pruebas. Para la determinación del valor crítico F se determinaron los grados de libertad ya que k=5 (número de lugares) y N=25 (cantidad total de datos), donde el valor critico F obtenido es 2.86, obtenido de la tabla de distribución de F con α = 0.05.

Cuando una prueba de F es usada para evaluar una hipótesis concerniente a la media de tres o más poblaciones, la técnica es llamada análisis de varianza (abreviada comúnmente como ANOVA).

Cuando se compara dos medias, el resto de las medias son ignoradas, con la prueba de F, todas las medias son comparadas simultáneamente. Además, al comparar dos medias, la probabilidad de rechazar una hipótesis nula que es verdadera se incrementa, por lo que, entre más medias haya para comparar, más pruebas de t serán requeridas.

Con la prueba F, se puede realizar dos estimaciones diferentes de variación de la población. La primera estimación es llamada la varianza entre grupos, y consiste encontrar la varianza de las medias. La segunda estimación, la varianza intra grupos es realizada para calcular las varianzas usando toda la información y no es afectada por la diferencia de las medias.

Cuando la hipótesis nula es rechazada usando la prueba de F. Se han desarrollado varios métodos para determinar donde se encuentran las diferencias significativas, entre las mas utilizadas está la prueba de Tukey. La prueba se usa después de que el análisis de varianza se ha completado para hacer comparaciones entre las medias, cuando los grupos tienen el mismo número de muestras. El símbolo para el valor estadístico en la prueba de Tukey es “q”.

$$q = \frac{\overline{X}_i - \overline{X}_j}{\sqrt{s_w^2/n}}$$

Donde son las medias de las muestras a ser comparadas, n es el tamaño de las muestras, y es la varianza intra grupo.

Cuando el valor absoluto de q es mayor que el valor critico para la prueba de Tukey, hay una diferencia significativa entre las dos medias comparadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

La tasa de combustión y la eficiencia térmica mostraron variaciones significativas con la altitud. En particular, a altitudes superiores a los 3000 msnm, la tasa de combustión disminuyó notablemente debido a la menor disponibilidad de oxígeno en el aire, lo que afectó la intensidad de la llama y, por ende, la velocidad de combustión. La eficiencia térmica, por otro lado, aumentó con la altitud, probablemente debido a una mayor retención de calor en la cámara de combustión.

A continuación, se presentan los resultados en una tabla resumen (Tabla 2) que compara los indicadores obtenidos en las distintas altitudes. Se observa que el tiempo de hervor es menor en Santa Cruz, Cochabamba y Coroico, por su baja altitud comparando con La Paz y Viacha. Por otro lado, la eficiencia térmica es mayor en La Paz y Viacha porque el consumo de combustible es menor debido al bajo nivel de oxigeno que hay a esa altitud.

Tabla 2. *Valores promedio de las métricas de pruebas realizadas en las cinco regiones a diferentes altitudes para las tres etapas del protocolo WBT.*

1. ALTA POTENCIA (INICIO EN FRIO)	unidades	Santa Cruz	Coroico	Cochabamba	La Paz	Viacha
Tiempo de hervor	Min	24	25	25	30	33
Tiempo de hervor corregido	Min	27	27	27	32	33
Tasa de Combustión	g/min	15	15	14	11	10
Eficiencia Térmica	%	28%	28%	29%	30%	31%
Consumo especifico de combustible	g/liter	78	76	71	71	70
Cons. Especf. de Comb. Corregido	g/liter	85	83	76	74	71
Cons. Especf. de Energía Corregido.	kJ/liter	1531	1482	1365	1325	1276
Potencia	Watts	4631	4461	4071	3409	3092
2. ALTA POTENCIA (INICIO EN CALIENTE)						
Tiempo de hervor	Min	22	23	24	29	30
Tiempo de hervor corregido	Min	25	26	26	30	30
Tasa de Combustión	g/min	15	15	13	11	10
Tasa de Combustión	%	30%	30%	32%	33%	34%
Consumo especifico de combustible	g/liter	70	69	64	63	63
Cons. Especf. de Comb. Corregido	g/liter	78	77	69	67	64
Cons. Especf. de Energía Corregido.	kJ/liter	1402	1377	1231	1204	1153
Potencia	Watts	4537	4343	3851	3199	3085

3. BAJA POTENCIA (SIMMER)						
Tasa de Combustión	g/min	10	9	8	8	7
Tasa de Combustión	%	22%	24%	26%	27%	28%
Consumo especifico de combustible	g/liter	116	100	91	83	82
Cons. Especf. de Energía Corregido.	kJ/liter	2077	1798	1637	1488	1474
Potencia	Watts	2897	2721	2495	2297	2244
Razón de cambio de Potencia	--	2	2	2	1	1

Fuente: Elaboración propia.

La etapa más representativa para comparar las métricas es la etapa de inicio en caliente. Todos los valores de F calculados son mayores al valor critico obtenido de tablas (F = 2.86) por lo q se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una alta probabilidad que exista un efecto de la altura en estos indicadores. Lo siguiente fue determinar donde yace la diferencia en los indicadores, esto se hizo mediante al análisis de la prueba de Turkey. Se comparó los indicadores obtenidos en 2 lugares a la vez, comparando el lugar de menor altitud con los demás lugares de acuerdo a su altitud de forma ascendente. Para encontrar el valor crítico para la prueba de Turkey se usó la tabla de valores críticos de “q”. Ya que k = 5, d.f. = 20 y α = 0.05 se tiene que el valor critico de q es 3.96.

A continuación, se presenta los resultados de dos métricas principales: tiempo de hervor corregido y eficiencia térmica:

a) Tiempo de hervor corregido

Como se ve en la Tabla 3 el valor de “q” calculado es mayor cuando se compara el indicador obtenido en Santa Cruz con el de La Paz.

Tabla 3. *Prueba de Turkey - Tiempo de hervor corregido, inicio en caliente*

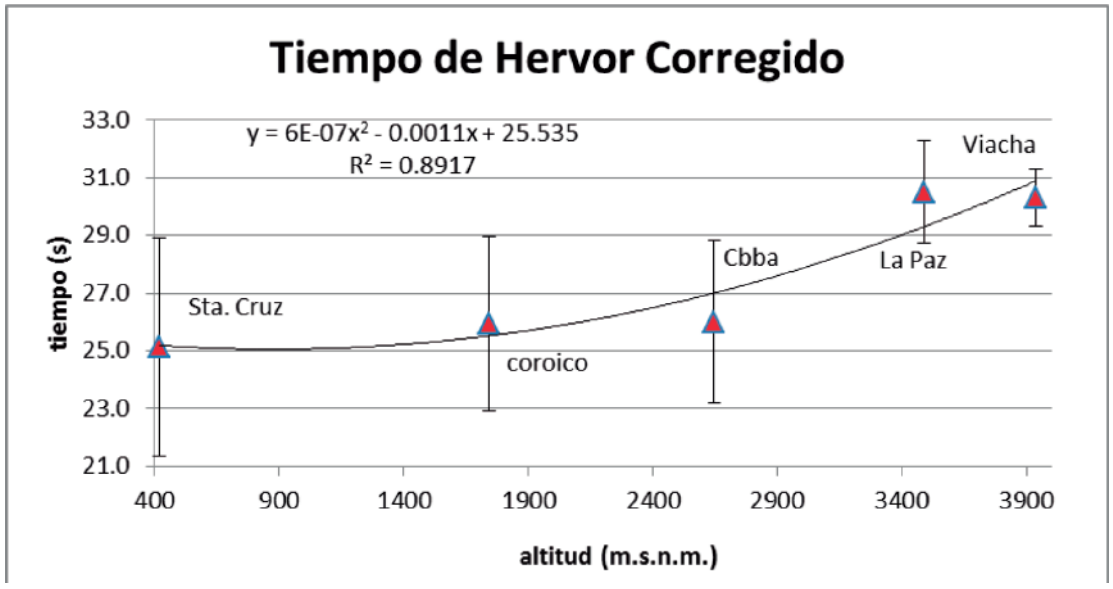
	Variación de altura (m)	$q_{calculado}$
Santa. Cruz vs Coroico	1324.7	0.60
Santa. Cruz vs Cochabamba	2228.2	0.63
Santa. Cruz vs La Paz	3071.6	3.96
Santa. Cruz vs Viacha	3518.7	3.81

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, la diferencia en el tiempo de hervor corregido es significativa para una variación de altitud mayor o igual a 3071.6 m aproximadamente.

En la Figura 2, se relaciona el tiempo de ebullición del agua con la altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.); la curva muestra una tendencia creciente en el tiempo de hervor a medida que aumenta la altitud. La curva sigue una ecuación cuadrática ajustada con un coeficiente de determinación R_2=0.8917, lo que indica un buen ajuste de la curva a los datos.

Figura 2. *Tiempo de Hervor Corregido, Alta Potencia - Inicio en Caliente.*



Fuente: Elaboración propia.

b) Eficiencia térmica

Como se ve en la Tabla 4 de comparación el valor de "q" calculado es mayor solo cuando se compara el indicador obtenido en Santa Cruz con los indicadores obtenidos en Viacha

Por tanto, existe una diferencia significativa en la eficiencia térmica para una variación de altitud mayor o igual a 3518 m aproximadamente.

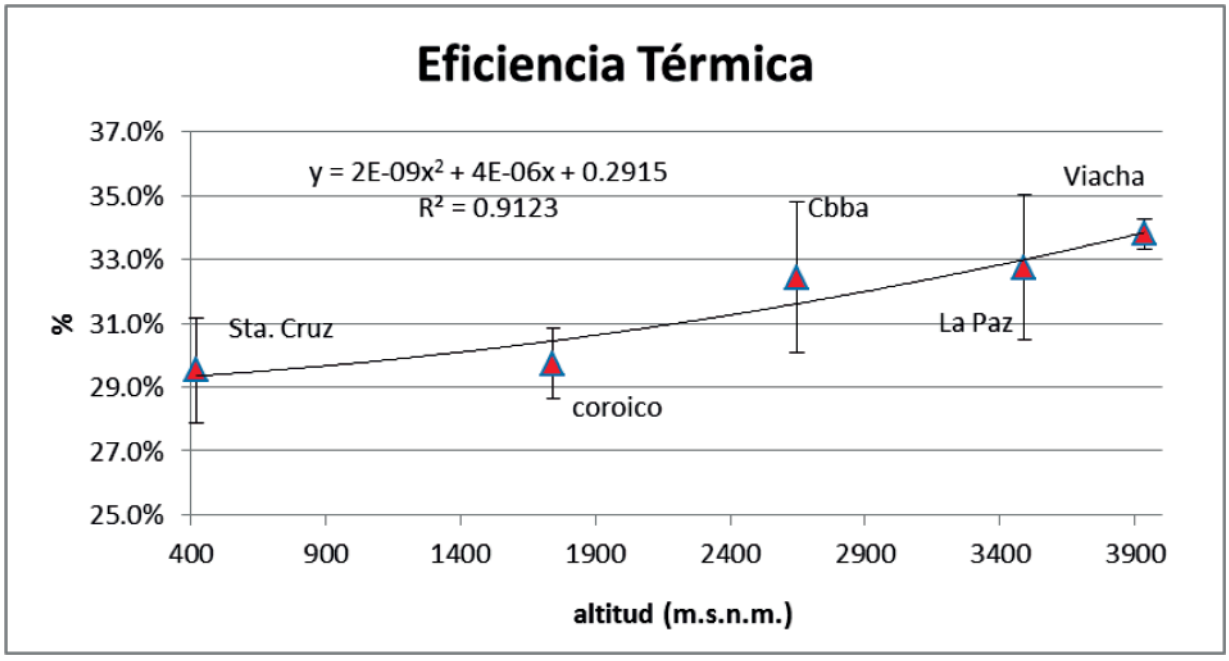
Tabla 4. *Prueba de Turkey - Eficiencia térmica, inicio en caliente*

	Variación de altura (m)	$q_{calculado}$
Santa. Cruz vs Coroico	1324.7	0.25
Santa. Cruz vs Cochabamba	2228.2	3.33
Santa. Cruz vs La Paz	3071.6	3.69
Santa. Cruz vs Viacha	3518.7	4.87

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra que, a mayor altitud, la eficiencia térmica aumenta. Esto puede estar relacionado con el hecho de que la menor densidad del aire en altitudes más altas podría mejorar ciertos aspectos de la transferencia de calor. El ajuste cuadrático sugiere una relación no completamente lineal entre la altitud y la eficiencia térmica, pero el aumento es claro en el rango de altitudes observadas.

Figura 3. *Eficiencia térmica - inicio en caliente.*



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Discusión

Los resultados confirman que la altitud tiene un impacto directo en los indicadores de desempeño energético de las cocinas mejoradas. La disminución de la tasa de combustión a mayores altitudes puede explicarse por la reducción de la presión atmosférica, lo que limita el tiro natural en la cámara de combustión y reduce la cantidad de oxígeno disponible para la quema eficiente del combustible. Este hallazgo coincide con estudios previos que identifican la altitud como un factor determinante en los procesos de combustión.

El incremento de la eficiencia térmica en altitudes superiores a los 3000 msnm puede deberse a la combustión más lenta, que permite una mejor transferencia de calor hacia la olla y, por tanto, un mayor aprovechamiento energético. No obstante, el aumento en el consumo específico de combustible en estas altitudes sugiere que es necesario considerar ajustes en el diseño de las cocinas para optimizar su funcionamiento en áreas de gran altitud. Estas modificaciones podrían ser en la cámara de combustión ya que sus características dependen del tipo y dimensión del combustible empleado (Winiarski and Baldwin, 1987; Aprovecho, 2006); por otro lado, la altura de la cámara de combustión es un factor que influye en la eficiencia térmica por radiación y la eficiencia de la combustión, el tipo de aislante para impedir perdida de calor (Rivera, 2016), base de la cocina, uso de una parrilla o artefacto que ayuden a la combustión.

4. CONCLUSIONES

El análisis de varianza reveló que la altitud tiene un efecto significativo sobre la tasa de combustión y la eficiencia térmica en cocinas mejoradas a biomasa. A mayores altitudes, la tasa de combustión disminuye, mientras que la eficiencia térmica aumenta. Estos resultados sugieren la necesidad de adaptar el diseño de cocinas para su implementación en regiones de altitud elevada, garantizando así un uso eficiente del combustible y una reducción de las emisiones nocivas.

Se recomienda realizar estudios adicionales para optimizar el diseño de cocinas mejoradas que se adapten mejor a las condiciones de altitud, y para validar estos hallazgos en una mayor diversidad de modelos de cocinas.

5. RECONOCIMIENTOS

Se agradece al programa ENDEV-Bolivia por apoyar en la evaluación experimental para la realización de este estudio y al Centro de Pruebas de Cocinas por el equipamiento necesario que facilitó para la parte experimental.

La inclusión del presente artículo en la revista de divulgación del IIDEPROQ “Revista Científica” está aprobada por Christian Gonzalo Limachi Chávez quien realizó esta investigación como proyecto de grado “Estudio del efecto altitudinal sobre los indicadores de desempeño energético para cocinas mejoradas a biomasa”

6. LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

WBT: Water Boiling Test (Prueba de Hervor de Agua).

HHV: High Heating Value (Valor Calorífico Superior).

LHV: Low Heating Value (Valor Calorífico Inferior).

msnm: Metros sobre el nivel del mar.

Tasa de Combustión: Masa de biomasa consumida por minuto.

Eficiencia Térmica: Relación entre el calor transferido y el generado.

Consumo específico: Cantidad de combustible consumido por litro de agua hervida (g/L).

7. REFERENCIAS

Aprovecho Institute, Shell Foundation. (2006). *Principios de diseño para estufas de coccion con leña*. Oregon EEUU: U.S. Environmental Protection Agency

Baldwin-Winiarski. (2006). *Diseñar estufas con Baldwin y Winiarski.* Oregon, EEUU: Aprovecho Research Center. https://pclive.peacecorps.gov/pclive/index.php/pclive-resources/resource-library/599-cookstoves-tpics-4c-improved-cookstoves-handbook-spanish/file

Bryden, M., Still, D., Scott, P., Hoffa, G., Ogle, D., & Drouin, T. (2006). *Design Principles for Wood Burning Cook Stoves*. Aprovecho Research Center.

Bluman, A. G. (2012). *Elementary Statistics: A Step by Step Approach*. McGraw-Hill Education.

cleancookstoves.org. (5 de 11 de 2017). Global Alliance for clean Cookstoves. Recuperado el 1 de 10 de 2017, de http://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf

Global Alliance for Clean Cookstoves (GACC). (2016). *Clean Cooking Solutions: Reducing Energy Consumption and Deforestation*. GACC.

Rivera, A. R. (2016). *Nuevas pruebas de rendimiento en una cocina a leña para la agricultura familiar pampeana. medición de emisi lones y dimensionamiento de la entrada de aire.*

Velasco Hurtado, C., & Velasco Villarroel, A. (2014). *Impact of Altitude on Combustion Efficiency*. Journal of Environmental Studies, 23(4), 56-65.

EL PAPEL FUNDAMENTAL DEL ESTUDIO DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA RESILIENCIA AGRÍCOLA EN LOS ANDES

The fundamental role of soil organic carbon study in climate change mitigation and agricultural resilience in the Andes

Alavi-Murillo, Gavi[7], y Garcia, Magali[8]

RESUMEN

La presencia de carbono orgánico en el suelo (COS) es esencial para la salud y fertilidad del suelo, incrementando su capacidad de resistencia frente al cambio climático. Adicionalmente, el suelo funciona como depósito de carbono, capturando el CO_2 atmosférico y contribuyendo a mitigar el cambio climático. El potencial del suelo para almacenar carbono sobrepasa a la vegetación, lo que resalta la relevancia de monitorear el COS tanto espacial como temporalmente para entender su capacidad de captura de carbono a largo plazo. Dada la escasez de investigaciones particulares en la región andina, resulta vital incrementar la investigación para crear estrategias eficaces de gestión del carbono que salvaguarden estos terrenos y potencien su función en la batalla contra el cambio climático. Hay diversas técnicas para cuantificar el ciclo del carbono en campo, desde el estudio directo de muestras hasta la utilización de sensores a distancia y modelos de simulación que facilitan una apreciación más precisa del COS.

Palabras clave: Carbono orgánico, cambio climático, resilencia agrícola, Andes.

ABSTRACT

The presence of soil organic carbon (SOC) is essential for soil health and fertility, enhancing its resilience against climate change. Additionally, soil functions as a carbon reservoir, capturing atmospheric CO_2 and contributing to climate change mitigation. The soil's potential for carbon storage surpasses that of vegetation, highlighting the importance of spatial and temporal SOC monitoring to understand its long-term carbon sequestration capacity. Given the scarcity of specific studies in the Andean region, it is crucial to increase research efforts to develop effective carbon management strategies that safeguard these soils and enhance their role in the fight against climate change. There are various techniques for quantifying the soil carbon cycle in the field, from direct sample analysis to the use of remote sensors and simulation models, which enable a more accurate assessment of SOC.

Keywords: Organic carbon, climate change, agricultural resilience, Andes.

7 Department of Earth and Environmental Sciences, Division of Soil and Water Management, KU Leuven, Celestijnenlaan 200E, 3001 Leuven, Belgium. gavi.alavimurillo@gmail.com

8 IIDEPROQ, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

1. INTRODUCTION

El carbono orgánico del suelo (COS) constituye un componente esencial para la salud del suelo, ya que mejora su estructura, fertilidad y capacidad de retención de agua. Bajo este contexto, el COS se convierte un recurso clave para fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas. Además, el secuestro de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico por parte del suelo y su subsecuente transformación en COS representa una estrategia relevante para la mitigación del cambio climático (Rodrigues et al., 2023). De esta manera, el suelo desempeña un papel dual en la lucha contra el cambio climático, contribuyendo tanto a la mitigación como a la adaptación por medio del almacenamiento de carbono y la mejora de la productividad agrícola en las condiciones cambiantes actuales.

El alto potencial de secuestro de carbono de los suelos permite que la cantidad de carbono almacenado supere la de la vegetación, incluso en sus 30 cm superficiales superiores. Esto hace que sea muy importante monitorear el carbono orgánico del suelo espacial y temporalmente si se necesita comprender la distribución y la capacidad del suelo para secuestrar CO_2 en el largo plazo. El ciclo del carbono del suelo es muy dinámico y está impulsado por el uso de la tierra, la cubierta vegetal, el estado de los nutrientes, la humedad del suelo, la temperatura del suelo y también el microclima local y las condiciones micro hidrológicas (Oertel et al., 2016; Wiesmeier et al., 2019).

Asimismo, cuando hablamos de los ecosistemas más vulnerables del planeta a los impactos adversos del cambio climático, nos localizamos en los ecosistemas altoandinos de Sudamérica (Herrador-Valencia and Paredes, 2016). Esta vulnerabilidad se suma a las ya difíciles condiciones ambientales de los Andes, especialmente en el Altiplano Boliviano, lo que plantea desafíos adicionales para la agricultura en la región. En este escenario, el manejo sostenible de ecosistemas, y en particular el carbono orgánico del suelo adquiere una relevancia aún mayor. Por todo lo mencionado, es imperativo el entendimiento de la dinámica del carbono orgánico en los suelos andinos.

2. EL CARBONO Y SUS DOS CARAS: UN ANÁLISIS DEL CARBONO EN EL CONTEXTO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTAL

El carbono en el contexto socioeconómico y medioambiente actual juega dos papeles contrastantes. Por un lado, el carbono atmosférico, principalmente en forma de CO_2, se ha convertido en una amenaza significativa debido a su contribución directa al cambio climático. En el estudio global de Oertel et al. (2016) se resalta las emisiones de CO_2 por diferentes coberturas de suelo, por un lado, los humedales (media: 550 $mgCO_2$ m-2 h-1), forestales (media: 420 $mgCO_2$ m-2 h-1), pastizales (media: 380 $mgCO_2$ m-2 h-1) tienen los mayores rangos de emisión de GEI totales. Por otro lado, las tierras cultivadas (media: 350 $mgCO_2$ m-2 h-1) y las tierras áridas (media: 100 $mgCO_2$ m-2 h-1) presentan emisiones menores, la variabilidad en todos estos datos es significativamente alta. En cuanto al carbono terrestre almacenado se han reportado estimaciones de suelo 2500 Gt en el primer metro de profundidad, 450 Gt en la vegetación, y 800 Gt en la atmosfera (Canadell et al., 2021; Lal et al., 2018). Adicionalmente, Lal (2004) resume el potencial de almacenamiento de carbono en diferentes ecosistemas de suelos alrededor del planeta como las tierras cultivadas (área: 1350 Mha) con un potencial de secuestro de 0.4 a 0.8 Gt C año-1, mejorando con prácticas como la labranza conservacionista, cultivos mixtos y agroforestería. Los pastizales (área: 3.7 mil millones de hectáreas) con un potencial de 0.01 a 0.3 Gt C año-1, optimizando el manejo

del pastoreo y el fuego. Las tierras degradadas y desertificadas (área: 1.1 mil millones de hectáreas) con un potencial de 0.2 a 0.4 Gt C año-1, mediante control de la erosión y reforestación. Finalmente, los suelos irrigados (area: 275 Mha) con un potencial de 0.01 a 0.03 Gt C año-1, que puede potenciarse mediante la irrigación por goteo y el manejo de la salinidad.

3. DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS) BAJO EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA PRESIÓN DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS

Previamente se ha mencionado que la región andina es particularmente vulnerable al cambio climático, con temperaturas extremas en aumento y patrones de precipitación inciertos (Herrador-Valencia and Paredes, 2016). Las estaciones húmedas más cortas e intensas y los patrones de lluvia irregulares plantean desafíos tanto para los ecosistemas naturales como para la agricultura. Por lo tanto, el impacto del cambio climático sobre el COS depende de múltiples factores que incluyen la temperatura, la humedad del suelo determinado por los cambios en los patrones de precipitación (sequias e inundaciones), alteraciones en la vegetación por perdida de especies o cambios en la productividad afectando la materia orgánica para el suelo (Alavi-Murillo et al., 2021). Por el cambio de las condiciones ambientales, las comunidades microbianas que descomponen materia orgánica pueden sufrir alteraciones importantes (Cavicchioli et al., 2019; Jansson and Hofmockel, 2020). Finalmente, la liberación de carbono del suelo va a contribuir al cambio climático convirtiéndose en un ciclo de retroalimentación entre perdida de COS y calentamiento global.

Por otro lado, las actividades humanas como la deforestación y la agricultura intensiva impactan significativamente los niveles de COS. La sobrepastoreo o cambio de uso de suelo de pasturas nativas, especialmente en las regiones tropicales, conduce a la liberación de grandes cantidades de carbono almacenado (Zamora-Morales et al., 2018). Las prácticas agrícolas intensivas, como el arado profundo, exponen la materia orgánica a la oxidación, liberando CO_2 (Muñoz et al., 2010). El documento destaca que las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) representan el 18,4% de las emisiones globales, con proyecciones que sugieren un aumento potencial del 30% para 2050 si continúan las tendencias actuales (Tubiello et al., 2014).

4. EL COS EN LOS SUELOS ANDINOS

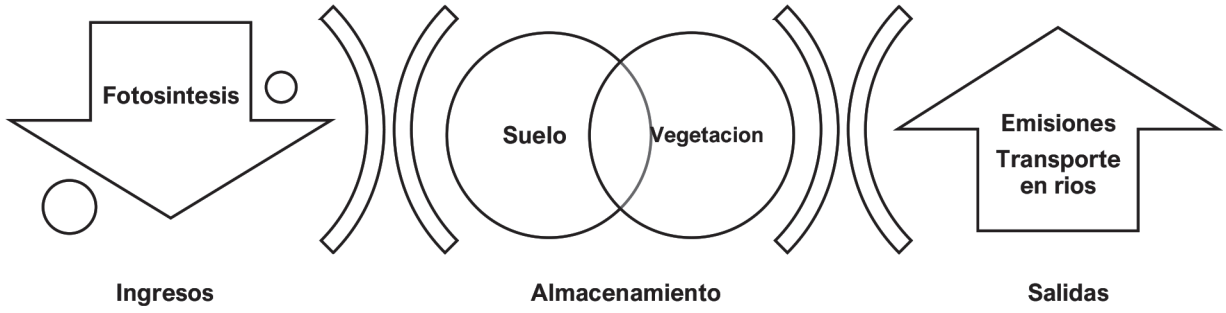
A pesar de la diversidad ecológica de la región andina, pocos estudios se centran en el COS en sus suelos. Los bofedales (turberas, suelos ricos en carbono), en los Andes también muestran un alto contenido de COS, comparable a los suelos de los bosques tropicales. Sin embargo, aún queda mucho por saber sobre los niveles de COS y los factores de emisión en otros ecosistemas andinos, particularmente en Bolivia. Entre algunos estudios locales, Andersen et al. (2016) resalta las variaciones significativas en cuanto a contenido de COS y emisiones a nivel país (primeros 100 cm, de 6 a 209 tCOS ha^{-1}), sin embargo, la variabilidad a nivel de los Andes es menor (primeros 100 cm, de 6 a 50 tCOS). Adicionalmente, Pari (2021) en su estudio de meta data focalizado en el Altiplano boliviano muestra que en el Altiplano norte (0.8 - 480 tCOS ha^{-1}) de Bolivia muestra concentraciones más altas comparadas a la región sur (0.8 - 80 tCOS ha^{-1}). Asimismo, la revisión de los estudios sobre COS en la región andina realizada por Alavi-Murillo et al. (2022) muestra no solamente la escasez de investigaciones en esta temática, sino también el contenido de COS bastante significativo y comparable a otros sitios con condiciones ambientales más favorables, el contenido de COS fluctúa significativamente de norte (forestales de

Ecuador, superando 400 g/kg) a sur (forestales en Argentina, alrededor de 100 g/kg) pero también de cobertura de suelo, las turberas muestran valores significativos independientemente de la región (superando los 500 g/kg). Estos resultados, su falta de variabilidad a escala nacional y las evidencias de que ciertamente los Andes es un ecosistema altamente variable, muestra que la necesidad de mayor investigación sobre el COS y sus factores de control plantea un desafío para desarrollar estrategias efectivas de gestión del carbono.

5. ENFOQUES METODOLÓGICOS PARA EVALUAR LA DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)

Con el proyecto de investigación "Anthropogenic influence on erosion rates in a typical basin to develop reduce land degradation strategies in the Bolivian Andes" se ha iniciado con diferentes metodologías para estudiar los diferentes estados en el ciclo del carbono en el suelo, los ingresos (por la fotosíntesis), las salidas (por emisión, y transporte en ríos) y el almacenamiento (contenido de COS en la cuenca) (Figura 1).

Figura 1. *Componentes y procesos de la dinámica del carbono en el suelo considerados a evaluación*



Fuente: Elaboración propia

La principal hipótesis de la investigación es que la actividad antropogénica en la cuenca altera la dinámica del carbono. Nuestro enfoque metodológico tiene como objetivo entender los factores clave que controlan la dinámica del COS en estos ecosistemas y eventualmente establecer comparaciones con otros contextos climáticos y topográficos. Bajo estas consideraciones, el análisis de los ingresos de carbono a través de la fotosíntesis permitirá identificar a las especies más eficientes en cuanto a la captura de carbono. El estudio del almacenamiento de COS en distintas coberturas y profundidades del suelo contribuirá con datos de contenido de carbono a nivel de cuenca. Por último, la estimación de las pérdidas de carbono, por emisiones de CO_2 o por transporte de carbono orgánico en cuerpos de agua, permitirá cuantificar el efecto de prácticas de manejo de suelos agrícolas y los procesos de pérdida y deposición del COS a lo largo del sistema fluvial.

5.1. Almacenamiento de carbono

El carbono en el sistema terrestre se puede almacenar en el suelo y la vegetación. Las mediciones pueden ser directas e indirectas. Por un lado, los métodos directos suelen ser los más precisos sin embargo son destructivos, en este caso los muestreos. Para el suelo, la muestra es sometida a oxidación húmeda, combustión a

alta temperatura o el uso de espectroscopia de infrarrojo que estima el contenido de carbono mediante la absorción de luz infrarroja. Para la vegetación, el muestreo consiste en cortar y pesar la vegetación para obtener la biomasa total, luego secarla y determinar su contenido de carbono. Por otro lado, los métodos indirectos incluyen el uso de sensores remotos que no solo permite la estimación de biomasa sino contenido de carbono. Equipos más sofisticados como el LIDAR permite medir la estructura y altura de vegetación, permitiendo estimar biomasa y por lo tanto carbono almacenado. Finalmente, se pueden incluir modelos de simulación de carbono, entre ellos enlistamos modelos biogeoquímicos (e.g., CENTURY, RothC, DayCent) que simulan el ciclo de carbono en suelo y vegetación. Estos modelos utilizan datos de campo y consideran factores como la descomposición, la entrada de residuos y el clima.

Nuestra área de estudio se localiza en la cuenca de Huanquisco localizada en el Altiplano Norte, limitando con el lago Titicaca con un rango altitudinal de 3800-4600 msnm. La metodología empleada fue el muestreo de suelo para luego emplear la combustión por el TOC-L (total organic carbon analyzer, Shimadzu Corporation, Japan) así también por la oxidación húmeda, conocida como el metodo Walkey-Black (Goretti, 2021). Asimismo, se utilizaron productos de los sensores remotos como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), BSI (Bare Soil Index) y CI (Coloration index). La combinación de estos métodos nos permitió el desarrollo de modelos de estimación, estos modelos de estimación incluyeron regresión múltiple linear y algoritmos de aprendizaje automático como Random Forest y Boosted Regression Trees. Estos modelos utilizaron como datos de ingreso la densidad aparente del suelo e índices de vegetación. Parámetros muy importantes bajo el contexto de cambio climático que se expresa en los cambios de vegetación y cambio de uso de suelo expresado en la densidad aparente por la perturbación.

5.2. Salidas de carbono

Los dos tipos de salidas considerados fueron las emisiones de CO_2 del suelo y el carbono perdido por transporte de sedimentos a sistemas hídricos. Entre los métodos más comunes para cuantificar las emisiones de CO_2 del suelo incluyen cámaras de flujo estático (cámaras cerradas), flujo dinámico (cámaras abiertas) equipadas con sensores NDIR (Non-Dispersive Infrared) o trampas álcali, cámaras infrarrojas de gas (IRGA), análisis de isótopos de carbono, y el método Eddy Covariance. Por los objetivos de nuestros estudios, a escala de parcela experimental y comparación emisiones de diferentes usos de suelo, se utilizaron las cámaras de flujo estático (cámaras cerradas) equipadas con trampas álcali (Rodriguez, 2021) y sensores de CO_2 (NDIR) (Blanco, 2024). Adicionalmente, la temperatura del suelo a 5 cm de profundidad y la humedad de suelo a 10 cm de profundidad mediante muestreo y secado en el horno fueron tomados en cada medición.

Los métodos más comunes para cuantificar el transporte de carbono orgánico en sistemas hídricos son: la recolección de muestras y sensores in situ para medir carbono orgánico disuelto. Las muestras recolectadas se someten a oxidación para el carbono orgánico disuelto (COD), o análisis de combustión para el carbono orgánico particulado (COP). Los métodos de isotopos de carbono también pueden ser utilizados principalmente para entender las fuentes y el ciclo del carbono orgánico en sistemas hídricos. Para los fines de nuestro estudio se instalaron tres puntos de monitoreo a lo largo del rio principal, en la parte alta, media y baja. En estos tres puntos se tomaron datos de caudal (manual con correntómetro y data logger de niveles de agua),

sedimentos suspendidos y carbono orgánico suspendido. Estos datos se utilizaron para ser modelados en HEC-RAS y HEC-HMS y obtener la dinámica de los flujos de agua y sedimentos (Villa Gomez, 2021). Para el carbono orgánico transportado se empleó modelos lineares y algoritmos de machine learning. En este caso las variables estimadoras fueron el caudal y los sedimentos suspendidos.

5.3. Ingresos de carbono

Se utilizó un fluorómetro (FluorPen FP110), es un equipo portátil para medir la actividad fotoquímica por medio de los parámetros de fluorescencia, como la fluorescencia instantánea de clorofila (Ft) y el rendimiento cuántico del fotosistema II (Qy) (Condori, 2024). El equipo mide la fluorescencia de la clorofila en las plantas usando luz azul para evaluar su capacidad fotosintética. La Ft muestra cuánta energía está usando la planta en la fotosíntesis en ese momento, lo cual indica su salud y funcionamiento. Si la planta está estresada, la fluorescencia cambia, señalando posibles problemas. Por otro lado, la Qy mide qué tan bien la planta convierte la luz en energía durante la fotosíntesis; un valor alto de Qy significa que la planta está utilizando la luz de manera efectiva, mientras que un valor bajo sugiere posibles problemas de salud o estrés. Nuestro estudio se enfocó en identificar ecosistemas perennes y nativos por lo que se seleccionaron parcelas experimentales de pastizal, bofedal, pajonal, th'olar.

Las metodologías empleadas en nuestros estudios nos brindan una comprensión completa de la dinámica del COS. La combinación de métodos directos e indirectos para evaluar el almacenamiento, las salidas y los ingresos de carbono, así como el uso de tecnologías avanzadas como sensores remotos y algoritmos de aprendizaje automático, permite un mejor entendimiento del ciclo del carbono en ecosistemas como los Andes. Los hallazgos serán cruciales para crear estrategias efectivas para reducir la degradación del suelo en un entorno de cambio climático, y manejo intensivo de suelos especialmente en zonas de gran vulnerabilidad como los Andes bolivianos.

6. CONCLUSIONES

El carbono orgánico del suelo (COS) es fundamental para la salud del suelo y la agricultura ya que contribuye a la fertilidad del suelo, mejora la estructura y la capacidad de retención de humedad fortaleciendo la resiliencia del suelo frente al cambio climático y asegurando la productividad agrícola. Asimismo, el COS es clave para mitigar el cambio climático, el potencial de secuestrar CO_2 por parte de los suelos andinos es alto, contribuyendo a la reducción de la concentración en la atmósfera. Por lo tanto, la dualidad del suelo en la lucha contra el cambio climático es primordial considerarlo en todo momento.

A nivel global, se ha determinado el alto potencial de secuestro de carbono en los suelos superando el de la vegetación. Lo que hace esencial su monitoreo a nivel de la región andina y de esa manera entender su capacidad de almacenar CO_2 a largo plazo por parte de suelos en una lucha no solo de mejorar la productividad sino reducir la vulnerabilidad de estos suelos.

A pesar de la diversidad ecológica de los Andes, hay una falta de estudios específicos sobre el COS en esta región. Por lo tanto, es crucial realizar más investigaciones para entender los niveles de COS y sus factores de control, lo que permitirá desarrollar estrategias efectivas para su gestión. La combinación de métodos directos e indirectos para medir el almacenamiento de carbono, junto con el uso de sensores remotos y modelos de simulación, permitirá una evaluación más precisa de la dinámica del COS.

7. REFERENCIAS

Alavi-Murillo, G., Arce, A., Garcia, M., Gilles, J., Goretti, L., 2021. Análisis temporal del uso y manejo de suelos andinos en función de conocimientos y percepciones locales bajo un contexto de cambio climático, in: Agroecología En Los Sistemas Andinos. Buenos Aires, Argentina, pp. 167–196.

Alavi-Murillo, G., Diels, J., Gilles, J., Willems, P., 2022. Soil organic carbon in Andean high-mountain ecosystems: importance, challenges, and opportunities for carbon sequestration. Reg. Environ. Chang. 22. https://doi.org/10.1007/s10113-022-01980-6

Andersen, L.E., Doyle, A.S., Del Granado, S., Ledezma, J.C., Medinaceli, A., Valdivia, M., Weinhold, D., 2016. Net carbon emissions from deforestation in Bolivia during 1990-2000 and 2000-2010: results from a carbon bookkeeping model. PLoS One 11, 1–18. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151241

Blanco, G., 2024. Evaluación de la emisión de dióxido de carbono en suelos de una cuenca típica interandina en relación a una cuenca de una zona altoandina. Universidad Mayor de San Andres.

Canadell, J.G., Monteiro, P.M.S., Costa, M.H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P.M., Eliseev, A.V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P.K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., Zickfeld, K., 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (Eds.), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, New York, NY, USA, pp. 673–816. https://doi.org/10.1017/9781009157896.007

Cavicchioli, R., Ripple, W., Timmis, K., Azam, F., Bakken, L., Baylis, M., Behrenfeld, M., Boetius, A., Boyd, P., Classen, A., Crowther, T., Danovaro, R., Foreman, C.M., Huisman, J., Hutchins, D.A., Jansson, J., Karl, D., Koskella, B., Mark Welch, D., Martiny, J., Moran, M.A., Orphan, V., Reay, D.S., Remais, J. V., Rich, V.I., Singh, B.K., Stein, L.Y., Stewart, F.J., Sullivan, M.B., van Oppen, M.J.H., Weaver, S.C., Webb, E.A., Webster, N.S., 2019. Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. Nat. Rev. Microbiol. 17, 569–586. https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5

Condori, V., 2024. Cuantificación de captura de carbono y evaluación de la actividad fotosintética en suelos con cobertura nativa en zonas altoandinas de Bolivia. Fundam. Geod. Universidad Mayor de San Andres.

Goretti, M., 2021. Evaluación de la aptitud de uso de la tierra en la subcuenca del río Huanquisco del municipio de Ancoraimes. Universidad Mayor de San Andres.

Herrador-Valencia, D., Paredes, M., 2016. Cambio climático y agricultura de pequeña escala en los Andes ecuatorianos: un estudio sobre percepciones locales y estrategias de adaptación. J. Lat. Am. Geogr. 15, 101–121. https://doi.org/10.1353/lag.2016.0021

Jansson, J., Hofmockel, K., 2020. Soil microbiomes and climate change. Nat. Rev. Microbiol. 18, 35–46. https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7

Lal, R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science (80-.). 304, 1623–1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396

Lal, R., Smith, P., Jungkunst, H.F., Mitsch, W.J., Lehmann, J., Ramachandran Nair, P.K., McBratney, A.B., De Moraes Sá, J.C., Schneider, J., Zinn, Y.L., Skorupa, A.L.A., Zhang, H.L., Minasny, B., Srinivasrao, C., Ravindranath, N.H., 2018. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. J. Soil Water Conserv. 73, 145A-152A. https://doi.org/10.2489/jswc.73.6.145A

Muñoz, C., Paulino, L., Monreal, C., Zagal, E., 2010. Greenhouse gas (CO2 and N2O) emissions from soils: A review. Chil. J. Agric. Res. 70, 485–497. https://doi.org/10.4067/s0718-58392010000300016

Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., Erasmi, S., 2016. Greenhouse gas emissions from soils—A review. Chemie der Erde 76, 327–352. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002

Pari, R., 2021. Evaluacion del contenido de carbono organico del suelo en la region andina de Bolivia. Universidad Mayor de San Andres.

Rodrigues, C.I.D., Brito, L.M., Nunes, L.J.R., 2023. Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review. Soil Syst. 7, 1–21. https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064

Rodriguez, J., 2021. Evaluación de la emisión y almacenamiento de carbono en un ecosistema de altura - Municipio de Ancoraimes. Universidad Mayor de San Andres.

Tubiello, F.N., Salvatore, M., Cóndor Golec, R.D., Ferrara, A., Rossi, S., Biancalani, R., Federici, S., Jacobs, H., Flammini, A., 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. ESS Work. Pap. No.2 2, 4–89.

Villa Gomez, S., 2021. Determinación del modelo hidrológico y sedimentario de la cuenca Huanquisco del altiplano boliviano. Universidad Mayor de San Andres.

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.J., Kögel-Knabner, I., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma 333, 149–162. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026

Zamora-Morales, B.P., Mendoza-Cariño, M., Sangerman-Jarquín, D.M., Quevedo Nolasco, A., Navarro Bravo, A., 2018. El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico. Rev. Mex. ciencias agrícolas 9, 1787–1799.

"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEL RÍO KATARI, POSIBLES SOLUCIONES A LA DE SUS AFLUENTES Y SUS IMPACTOS EN LA BAHÍA DE COHANA DEL LAGO TITICACA"

WATER QUALITY ASSESSMENT OF KATARI RIVER, POSSIBLE SOLUTIONS TO THAT OF ITS TRIBUTARIES AND ITS IMPACTS ON THE COHANA BAY OF LAKE TITICACA

Waldo Vargas Ballester[1] y Jhony Marquez Mejillón [2]

1 Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

2 Entidad Ejecutora de Medio Ambiente y Agua (EMAGUA), La Paz, Bolivia

E-mail: *wpvargas@umsa.bo*

RESUMEN

La calidad de las aguas del binacional Lago Titicaca constituye una de las mayores preocupaciones de los habitantes circunlacustres que demandan a sus gobiernos, una pronta atención para resolver los problemas de contaminación que afectan a la biodiversidad, suelo, salud y las diversas actividades económicas humanas. La Bahía de Cohana es uno de los sitios más contaminados en el lado boliviano y el segundo más contaminado del Lago Titicaca, después de la Bahía de Puno, en el lado peruano. Las cada vez más intensas actividades antrópicas en las ciudades de El Alto, Viacha y la población de Laja constituyen las fuentes de contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica, y provienen de las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, así como del lanzamiento indiscriminado de residuos sólidos a los cauces de ríos afluentes y el propio Río Katari que las conduce hasta la Bahía de Cohana.

Este estudio tiene la finalidad de determinar la calidad de las aguas de los cuerpos receptores naturales de la Cuenca del Rio Katari, mediante la aplicación del modelo computacional Simulador de Oxígeno Disuelto (SIMOD) que fue calibrado con datos obtenidos durante las Campañas del Muestreo Intensivo realizadas y luego, validado con datos de campañas similares efectuadas en anteriores ocasiones por IBTEN. Se utilizaron como datos de entrada al modelo, los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Oxígeno Disuelto (OD), Temperatura del agua (T), altitud sobre el nivel del mar, velocidad media del río, caudal, profundidad y ancho del río.

Una vez realizada la calibración y validación del modelo, se efectuó también un análisis de sensibilidad, aplicando simulaciones para determinar el comportamiento de los ríos: Seco (afluente del río Pallina), Pallina (principal afluente del río Katari) y Katari, considerando un escenario actual y ciertos escenarios futuros supuestos que se dispusieron. Con los resultados obtenidos, se evidenció que las corrientes naturales de agua de la Cuenca del Río Katari presentan niveles altos de contaminación, pese a que las descargas de la PTAR Puchukollo fueron debidamente tratadas. En sus nacientes los ríos Seco, Seque, Pallina y Katari, tienen aguas de categoría A que se van deteriorando hasta la categoría D a medida que sus flujos van recibiendo descargas residuales durante sus recorridos.

Surgió una importante recomendación para establecer una red permanente de monitoreo básico en la Cuenca del Río Katari, con veinticinco estaciones de control, a fin de conocer el comportamiento de los parámetros físicos, químicos y biológicos que hacen a la calidad del agua y que conjuntamente con el modelo SIMOD, contribuyan para una eficiente gestión de calidad del agua en la cuenca. Además de los esfuerzos técnicos y científicos realizados, es transcendental la participación de la sociedad civil y de las autoridades responsables, para la recuperación de los cuerpos naturales de agua de la Cuenca **del Río Katari y por ende de la Bahía de Cohana y la Bahía de Chojasiwi, del lago Titicaca.**

Palabras clave: Lago Titicaca, Cuenca del Río Katari, Calidad del Agua, Modelo SIMOD, Contaminación, Eutrofización, Bahía de Cohana, Análisis de Sensibilidad.

ABSTRACT

The quality of the waters of the binational Lake Titicaca constitutes one of the greatest concerns of the circumlacustrine inhabitants who demand prompt attention from their governments to resolve the pollution problems that affect biodiversity, soil, health and various human economic activities. Cohana Bay is one of the most polluted sites on the Bolivian side and the second most polluted in Lake Titicaca, after Puno Bay, on the Peruvian side.

The increasingly intense anthropogenic activities in the cities of El Alto, Viacha and the small town of Laja constitute the sources of pollutants of an organic and inorganic nature, and come from the discharges of domestic and industrial wastewater, as well as the indiscriminate launching of solid waste to the channels of tributary rivers and the Katari River itself that leads them to Cohana Bay.

The purpose of this study is to determine the quality of the waters of the natural receiving bodies of the Katari River Basin, through the application of the computational model of Dissolved Oxygen Simulator (SIMOD), that was calibrated with data obtained during the Intensive Sampling Fields Campaigns and then after validated with data from similar campaigns carried out on previous occasions by IBTEN. The parameters Biochemical Oxygen Demand (BOD), Dissolved Oxygen (DO), Temperature (T), altitude above sea level, average river speed, flow, depth and width of the river, were used as input data required by the model SIMOD.

Once the calibration and validation of the model was carried out, a sensitivity analysis was also carried out, applying simulations to determine the behavior of the rivers: Seco (tributary of the Pallina River), Pallina (main tributary of the Katari River) and Katari, considering a scenario actual and certain assumed future scenarios that were available. With the results obtained, it was evident that the natural water currents of the Katari River Basin have high levels of contamination, despite the fact that the discharges from the Puchukollo WWTP were properly treated. At their sources, the Seco, Seque, Pallina and Katari rivers have category A waters that deteriorate to category D as their flows receive residual discharges during their journeys.

An important recommendation emerged to establish a permanent network of basic monitoring in the Katari River Basin, with twenty-five control stations, in order to know the behavior of the physical, chemical and biological parameters that affect water quality and that, together with the SIMOD model, contribute to efficient water quality management in the basin. In addition to the technical and scientific efforts made, the participation of civil society and the responsible authorities is essential for the recovery of the natural bodies of water of the Katari River Basin and therefore of Cohana Bay and the Bay of Chojasiwi, from Lake Titicaca.

Keywords: Lake Titicaca, Katari River Basin, Water Quality, SIMOD Model, Water Pollution, Eutrophication, Cohana Bay, Sensitivity Analysis.

1. ANTECEDENTES

El uso sostenible de las aguas del binacional Lago Titicaca constituye una de las mayores preocupaciones de los habitantes circunlacustres que demandan a sus gobiernos, una pronta atención para resolver los problemas de contaminación que afectan a la biodiversidad, la calidad del agua, suelo, salud y las diversas actividades económicas humanas. Del lado boliviano la Universidad Mayor de San Andrés a través de sus instancias científicas y técnicas, tales como la Facultad de Ingeniería y las Carreras de Ingeniería Química, Ambiental y Alimentos y su Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) ha tomado con gran interés y dedicación el contribuir a la solución demandada. En dicho contexto, el mes de Noviembre de 2014 fue suscrito un Convenio Específico de Cooperación Interinstitucional entre la Universidad Mayor de San Andrés (U.M.S.A.) y la Autoridad Autónoma Binacional (ALT) del Sistema Hídrico del Titicaca-Desaguadero-PoopóSalar de Coipasa (Sistema TDPS) que en cumplimiento con su rol de promover y conducir; acciones, programas y proyectos relacionados al control y protección en la gestión del agua del Sistema Hídrico TDPS, venía impulsando los programas SIGAR, RECONT y PITAR. Posteriormente, en Octubre de 2015 se sumaron a este Convenio el Consejo de Juventudes Indígenas, Originarios e Interculturales de Bolivia (CAOI) y el Gobierno Autónomo Municipal de Viacha (GAMV) con el propósito de apoyar a la causa señalada.

El alcance de soluciones ha sido estructurado en cuatro fases secuenciales, que en conjunto conforman el PROGRAMA DE GESTIÓN AMBIENTAL INTEGRAL APLICADA EN LA BAHÍA DE COHANA DEL LAGO TITICACA (GAIA-BC), destacando la primera fase denominada Iniciativas para la Recuperación Ambiental Progresiva de la Bahía de Cohana del Lago Titicaca, que está constituida por una diversidad de estudios técnico- científicos (ETC's), independientes pero complementarios entre sí, como es el caso del presente Estudio.

Dentro de esos estudios técnico-científicos se encuentra este proyecto denominado: "Modelación y evaluación de la calidad del agua en la Cuenca del Rio Katari" que se desarrolló en la Cuenca del Rio Katari, donde se evaluó la calidad y la capacidad de autopurificación de los cuerpos receptores naturales de agua, donde son vertidas aguas residuales domésticas e industriales; así también, residuos sólidos en las ciudades de El Alto y Viacha, y la población de Laja, que son transportadas por el Rio Katari hasta la Bahía de Cohana, causando la eutrofización de las aguas del Lago menor del Lago Titicaca.

2. INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Río Katari se encuentra ubicada en la región del Altiplano boliviano, en el Departamento de La Paz, al Sureste del Lago Menor del Lago Titicaca. Geográficamente, está entre las coordenadas 16°0'0" - 17°0'0" de latitud Sur y 68°0'0" - 69°0'0" de longitud Oeste. Posee una superficie aproximada de 2864,82 Km^2. (Fig. 1).

El Río Katari es el cauce principal de la cuenca, discurre en dirección Sureste -Noroeste, con una longitud aproximada de 120 Km desde sus nacientes en los Cerros Jarrotani, Pacoloma, Andamarca y Parca en el municipio de Comanche hasta su desembocadura en la Bahía de Cohana y cuyo tributario principal es el Río Pallina que a su vez recibe las aguas de los distintos ríos que atraviesan la ciudad de El Alto (Seco, Seque, Hernani, etc.). (Fig. 2)

El Río Pallina nace en los Cerros Surichata en el Municipio de Colquencha y Jupaca en el Municipio de Calamarca, a lo largo de su recorrido llega a

bordear la Ciudad de Viacha y la población de Laja. Sus principales tributarios son los Ríos Seco, Jalaqueri, Ch'alla Jawira y Wilake. El río Jalaqueri es la continuación del Seque. Los Ríos Seco y Seque, nacen en las estribaciones de la Cordillera Oriental, pasan por la ciudad de El Alto, a estos se unen otros cursos menores e intermitentes como el Kantutani, San Roque y Hernani.

Figura Nº 1: Localización de la Cuenca CRK

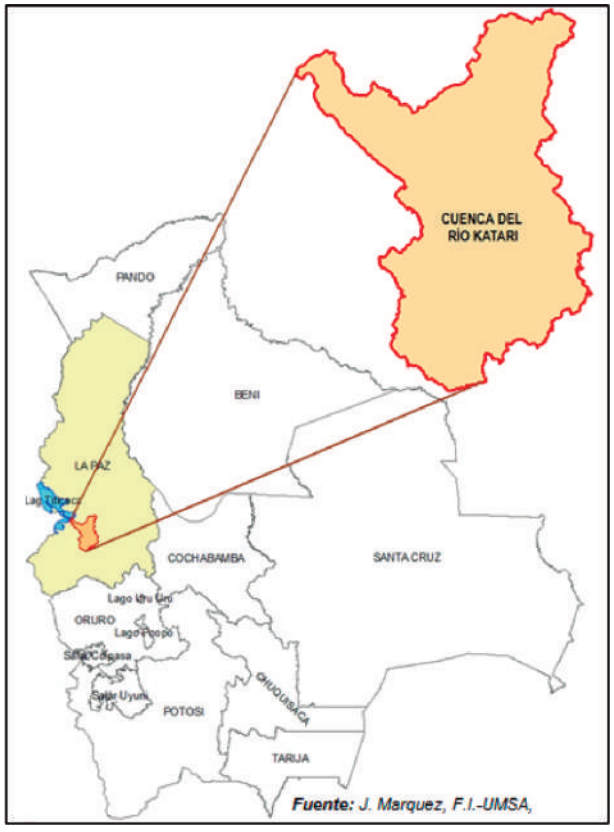
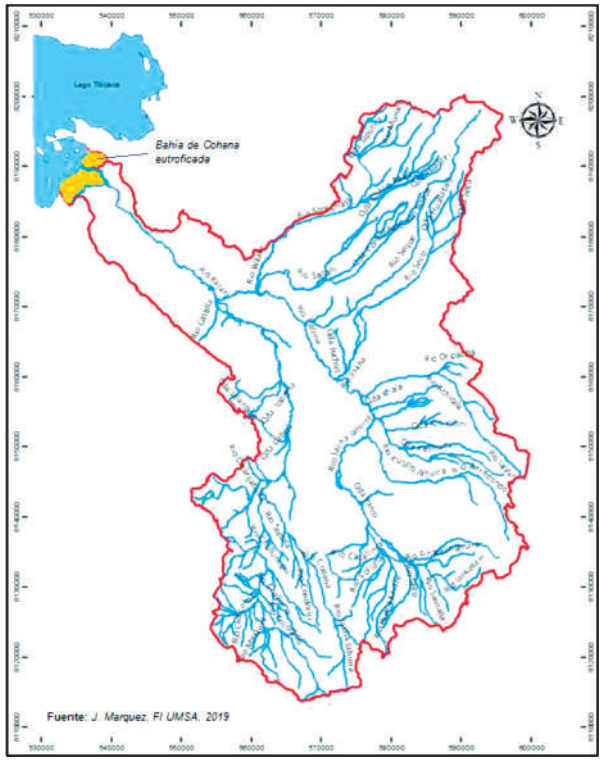


Figura Nº 2: Hidrografía de la Cuenca CRK



En la Cuenca del Rio Katari, se cuenta con una sola estación hidrométrica, que está a cargo del SENAMHI, la misma está ubicada en cercanías de la población de Tambillo. Esta estación es del tipo limnimétrica y realizan mediciones de nivel del agua. Por lo que refiere a las mediciones de caudales en la represa Milluni, EPSAS, es la que realiza estas mediciones.

Dentro de la cuenca y a nivel nacional, el monitoreo de los parámetros climatológicos está a cargo del SENAMHI. Cuenta con un número importante de una red de estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca y sus alrededores. Hay que mencionar, que estas estaciones son de diferentes tipos; es decir, que unas registran más parámetros que otras, y cuentan con periodos de registros diferentes.

En la Cuenca del Río Katari se cuenta con una gran riqueza hídrica, almacenada principalmente

en el subsuelo y en los nevados de la Cordillera Oriental. El agua de la cuenca se lo utiliza para distintos propósitos; de uso doméstico, riego, ganadería e industria.

Se emplean grandes cantidades de agua para consumo doméstico e industrial en la ciudad de El Alto, y en una menor proporción en la ciudad de Viacha. La Empresa Pública y Social de Agua y Saneamiento (EPSAS) es la empresa encargada de prestar servicios de abastecimiento de agua y saneamiento a las ciudades de El Alto y La Paz, y la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado Viacha (EMAPAV) a la ciudad de Viacha.

En cuanto al uso del agua en la actividad ganadera, que es la principal actividad en el área rural de la cuenca, seguido de la actividad lechera, los habitantes utilizan agua de pozo, bofedales (en el sector de Puchukollo y Bahía de Cohana), lluvia (que se acumula en pequeñas lagunas artificiales en temporadas de lluvia), ríos (como abrevaderos) y ojos de agua para el consumo del ganado ovino, bobino, camélido y otros.

Algunos habitantes de la cuenca que se dedican a la producción de hortalizas y verduras en carpas solares, emplean agua de pozo para riego. Por otra parte, en el sector de la PTAR Puchukollo, en temporadas secas, comunidades como Puchukollo Alto, extraen agua del Río Seco para consumo del ganado y riego de sus cultivos (papa, haba, cebada, avena forrajera, alfalfa y forrajes).

Las aguas de los Ríos Seco y Seque que atraviesan la ciudad de El Alto, son utilizadas para el lavado de vehículos. Además, el agua del Rio Negro, que posteriormente pasa a denominarse Sallani, se lo emplea para el lavado de áridos.

Figura Nº 3: Sistema ambiental hídrico CRK y Bahía Cohana

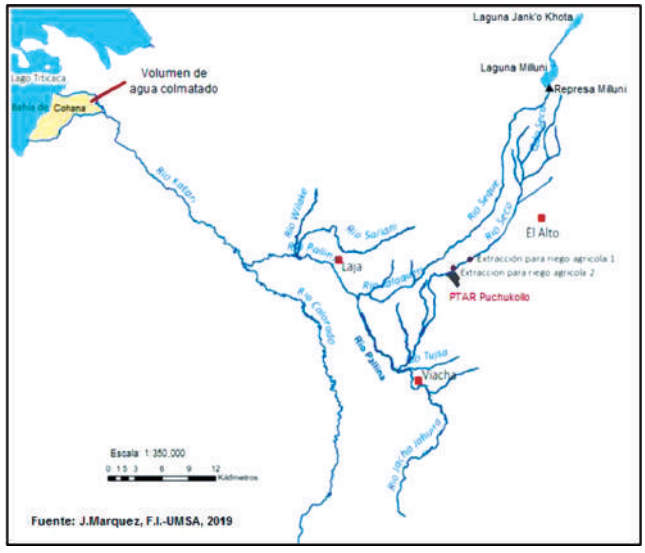
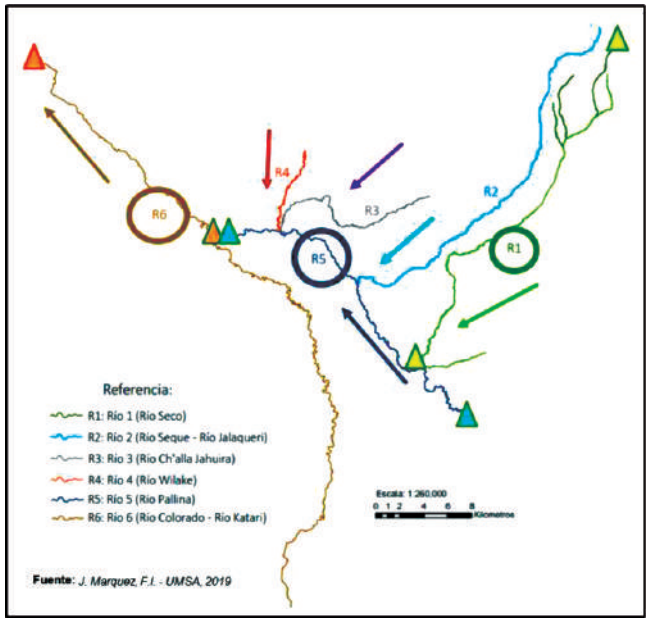


Figura Nº 4: Configuración Sistémica CRK



La red hidrográfica de la CRK de la Figura 3, puede ser considerada como un sistema hidrográfico, que estructuralmente está compuesto por su núcleo o corriente principal que recibe una serie de entradas externas como escurrimientos superficiales (afluentes) y subsuperficiales, lluvias, vientos, radiación solar, y otros. Además de influencias antrópicas como la descarga de aguas residuales e industriales, así como del lanzamiento indiscriminado de residuos sólidos de naturaleza orgánica e inorgánica. Las salidas del sistema son la evapotranspiración, evaporación, extracciones de agua, infiltración al subsuelo y el flujo total de la corriente principal que desemboca en la Bahía de Cohana.

Como se puede observar en la Figura 4, el principal afluente del R6 es el R5, se considera el tramo del R5 comprendido desde las afueras de la ciudad de Viacha hasta su confluencia con el Río Colorado. Así también, el R5 tiene como afluentes al R1, R2, R3 y R4 en el tramo que ha sido considerado, de los cuatro afluentes, se considerará al R1, en el tramo comprendido desde aguas abajo de su naciente hasta su confluencia con el R5.

Parte del trabajo de campo, fue la identificación de los puntos más críticos, así como: Entradas, salidas, aportes, descargas y extracciones en el R1, R2, R3 y R5. En el tramo del R1 que se consideró, se han identificado las siguientes descargas y extracciones: 21 puntos de descarga de aguas residuales domésticas, 9 canales embovedados que descargan aguas residuales domesticas e industriales, 9 puntos de descarga de aguas residuales industriales, 2 extracciones de agua, una descarga de aguas residuales tratadas (PTAR Puchukollo) y alrededor de 23 descargas de pluviales.

Sobre el R2, en el trayecto que recorre por la ciudad de El Alto, se identificaron y cuantificado: 14 puntos de descarga de aguas residuales domésticas, 11 puntos de descarga de aguas residuales de industrias y mataderos clandestinos y 2 canales embovedados que descargan aguas residuales domésticas.

El crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de El Alto, logro alcanzar los cauces naturales de agua que son afluentes del R3, como se los menciona a continuación: el Río Larka Jawira, la Quebrada Ponkora y el Río Chiyar Jawira (Río Negro), que son tributarios del Río Sallani, y esta última pasa a llamarse Río Ch'alla Jawira (R3).

De los tres ríos mencionados anteriormente; el Río Larka Jawira es el más afectado por la descarga de aguas residuales, donde se identificaron 12 descargas de aguas residuales domésticas, la Quebrada Ponkora tiene menor afectación por descargas de aguas residuales, y finalmente, la calidad del agua del Río Chiyar Jawira está siendo afectado principalmente por la extracción de áridos y algunas descargas de aguas residuales. Además, cabe mencionar que en el sector de la comunidad Pomakollo, sobre el cauce del Río Sallani, en los últimos años se viene desarrollando la explotación de áridos a una gran escala.

Finalmente, sobre el R5, se identificaron 7 descargas de aguas residuales (en el segmento que bordea la ciudad de Viacha) y una descarga de agua residual de la población de Laja.

Siendo el objetivo del estudio evaluar la calidad del agua de los ríos que conforman la CRK, para identificar y ejercer acciones sostenibles de planificación y control ambiental en la Cuenca mediante el uso de modelos matemáticos computacionales, ha sido seleccionado el Modelo SIMOD *[Vargas Ballester W. P. 2019].*

Una vez identificados y definidos, la frontera o condiciones de borde, los componentes, sus atributos y el núcleo del sistema ambiental, se considera que están reunidas las condiciones apropiadas para realizar el seccionamiento

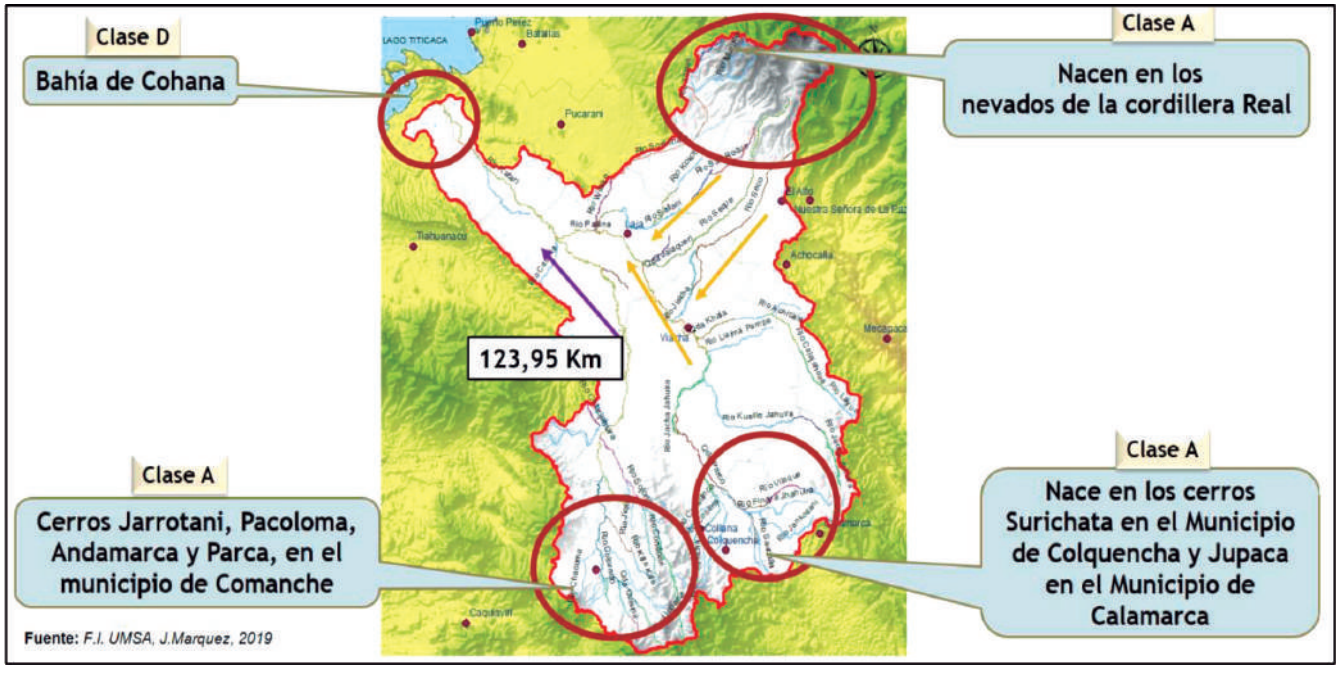
ambiental del río, para completar la configuración del sistema.

El seccionamiento ambiental consiste en dividir por tramos al núcleo del sistema, donde cada tramo posee condiciones homogéneas de comportamiento hidráulico y de calidad del agua.

En el presente estudio, se dividió a los ríos R1, R5 y R6 (Figura Nº 4) en tramos definidos por los puntos denominados "puntos de control", que son sitios donde se realizaron las mediciones geométricas e hidráulicas y la toma de muestras para determinar la calidad ambiental de las aguas.

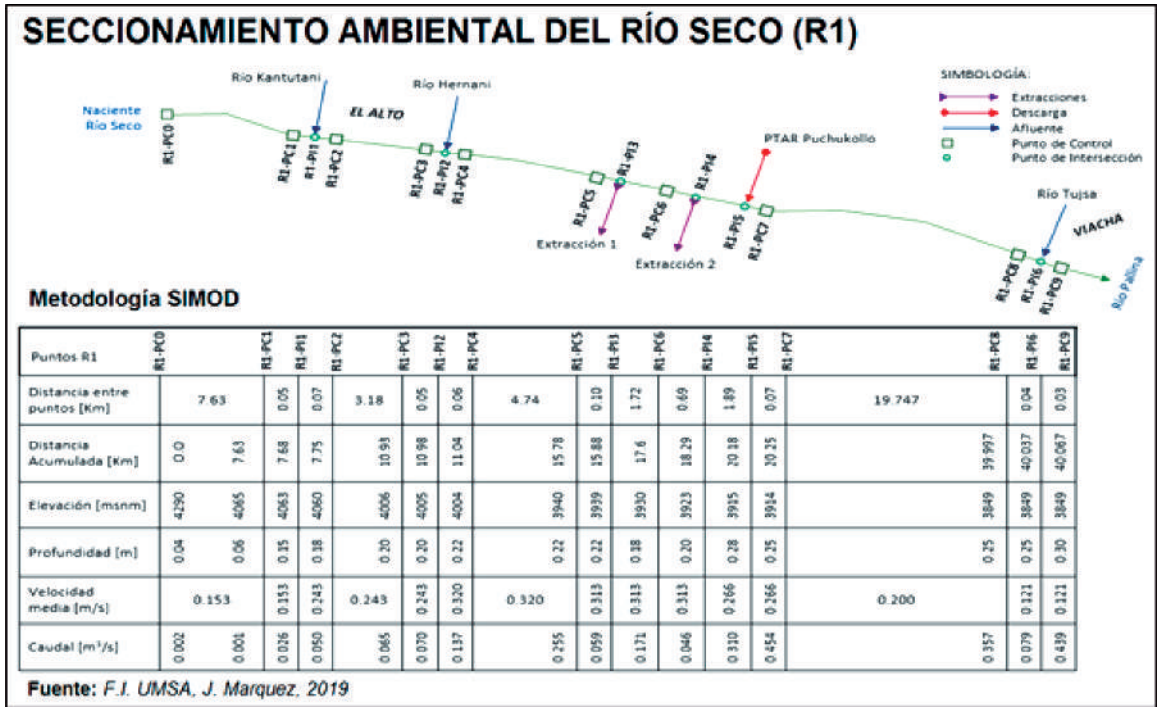
Posteriormente, considerando características hidráulicas, biológicas y fisicoquímicas similares, se dividió a los tramos del R1, R5 y R6 en: 15 segmentos al R1, 16 segmentos al R5 y 4 segmentos al R6; definidos por los puntos de intersección, que son lugares de confluencia de afluentes, descargas o extracciones. Finalmente, el modelo internamente al ser ejecutado, realiza una subdivisión a cada uno de los tramos, en elementos de igual longitud, donde se estima que existen condiciones de mezcla completa y por supuesto, características hidráulicas uniformes. El número de elementos varía según la longitud de cada tramo.

Figura Nº 5: Categoría Ambiental de los Ríos de la CRK. Su transición de A a la D



Los croquis de los seccionamientos de los ríos R1, R5 y R6, se los presenta en las Figuras 6, 7 y 8 respectivamente; en cada una de ellas, están consignadas las variaciones de caudal, profundidad y velocidad media, en cada segmento de cada río integrante del sistema CRK descrito.

Figura Nº 6:



Puntos R1	R1-PC0		R1-PC1	R1-PI1	R1-PC2		R1-PC3	R1-PI2	R1-PC4		R1-PC5	R1-PI3	R1-PC6	R1-PI4	R1-PI5	R1-PC7		R1-PC8	R1-PI6	R1-PC9
Distancia entre puntos [Km]		7.63		0.05	0.07	3.18	0.05	0.06	4.74		0.10	1.72	0.69	1.89	0.07		19.747		0.04	0.03
Distancia Acumulada [Km]	0.0	7.63	7.68	7.75		10.93	10.98	11.04	15.78		15.88	17.6	18.29	20.18	20.25			39.997	40.037	40.067
Elevación [msnm]	4290	4065	4063	4060		4006	4005	4004	3940		3939	3930	3923	3915	3914			3849	3849	3849
Profundidad [m]	0.04	0.06	0.15	0.38		0.20	0.20	0.22	0.22		0.22	0.38	0.20	0.28	0.25			0.25	0.25	0.30
Velocidad media [m/s]		0.153	0.153	0.243		0.243	0.243	0.320	0.320		0.313	0.313	0.313	0.266	0.266		0.200		0.121	0.121
Caudal [m³/s]	0.002	0.001	0.026	0.050		0.065	0.070	0.157	0.255		0.059	0.171	0.046	0.310	0.454			0.357	0.079	0.439

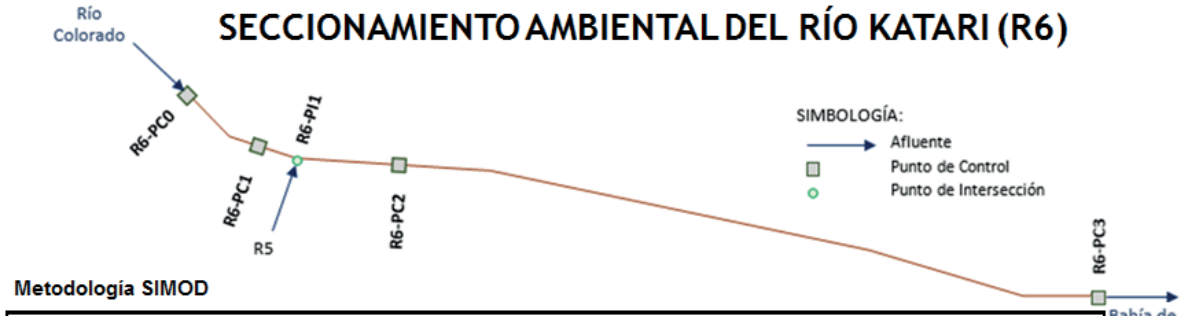
Fuente: *F.I. UMSA, J. Marquez, 2019*

Figura Nº 7:



Puntos R5	R5-PC0		R5-PC1	R5-PI1	R5-PC2		R5-PC3	R5-PI2	R5-PC4		R5-PC5	R5-PI3	R5-PC6		R5-PC7	R5-PI4	R5-PI5	R5-PC8		R5-PC9
Distancia entre puntos [Km]		7.52		0.04	0.4	10.83		0.07	0.05	5.41		0.04	0.04	4.21		0.05	1.2	0.05	7.29	
Distancia acumulada [Km]	0.0	7.52	7.56	7.96		18.79	18.86	18.91	24.32		24.36	24.4		28.61	28.66		29.86	29.91		37.2
Elevación [msnm]	3854	3848	3848	3848		3844	3844	3843	3841		3841	3841		3840	3840		3839	3838		3835
Profundidad [m]	0.10	0.30	0.30	0.35		0.25	0.25	0.25	0.25		0.25	0.25		0.30	0.35		0.35	0.35		0.45
Velocidad media [m/s]		0.149	0.149	0.234		0.234	0.234	0.079	0.079		0.079	0.080		0.080	0.080		0.080	0.075	0.075	
Caudal [m³/s]	0.029	0.067	0.439	0.516		0.504	0.004	0.517	0.518		0.002	0.502		1.20	0.075		0.132	1.438		1.398

Figura Nº 8:



Metodología SIMOD

	R6-PC0		R6-PC1	R6-PI1	R6-PC2		R6-PC3
Distancia entre puntos [Km]	0.30		0.05	1.5	26.91		
Distancia acumulada [Km]		0.30	0.35	1.85			28.76
Elevación [msnm]	3836	3835	3835	3834			3824
Profundidad [m]	0.17	0.20	0.40	0.45			0.50
Velocidad media [m/s]	0.17		0.17	0.143	0.175		
Caudal [m^3/s]	0.073	0.073	1.398	1.525			1.519

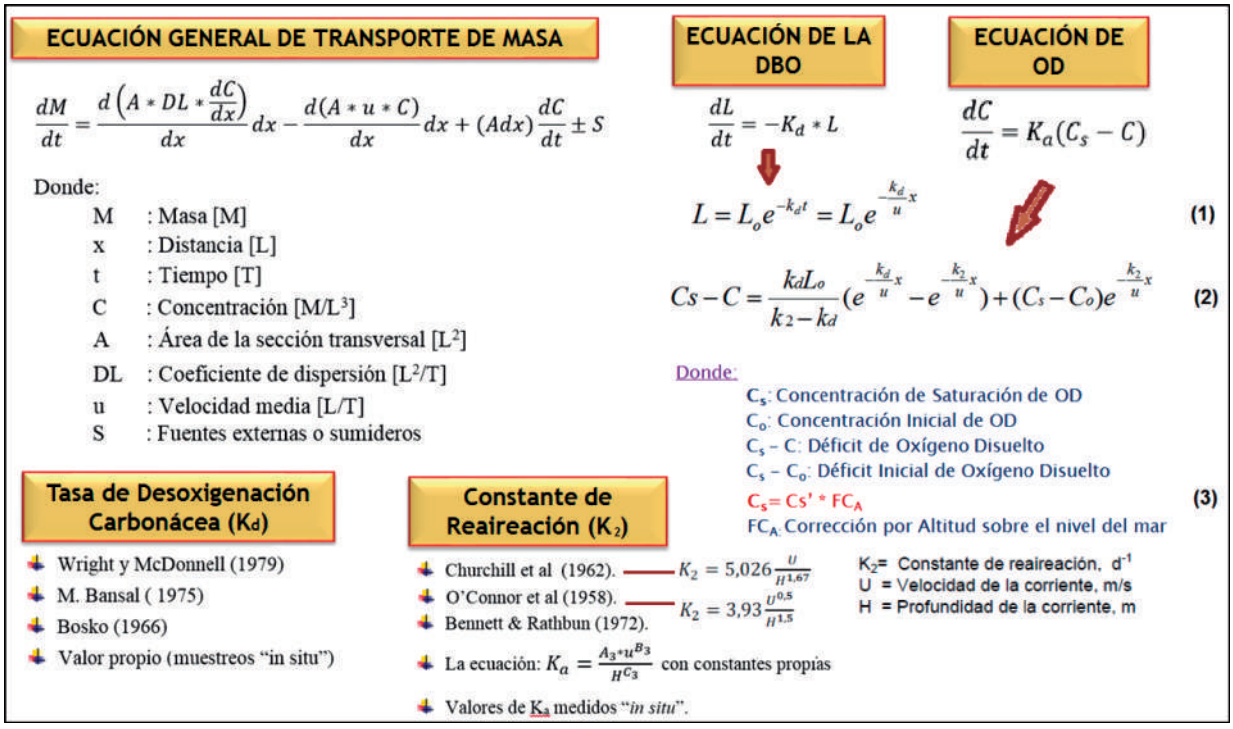
Fuente: *F.I. UMSA, J. Marquez, 2019*

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ecuación General de Balance de Materia

El modelo SIMOD se basa en la ecuación general de balance de materia para simular el comportamiento de los contaminantes en los cuerpos de agua. Considerando un balance unidimensional de flujo y masa, la ecuación general para un sistema de volumen control de transporte de la materia orgánica que incluye los efectos de transporte por advección, dispersión (difusión efectiva), reacción del constituyente o los procesos de transformación de los contaminantes en el agua, tales como la degradación biológica (DBO) y las interacciones de las fuentes y sumideros, está dada por las ecuaciones y relaciones que se describen en la Figura Nº 9, a continuación:

Figura Nº 9: Ecuaciones y otras relaciones que utiliza el modelo SIMOD



Fuente: *Vargas-Ballester, W.P., 2019*

2.2. Datos de Entrada y Calibración del Modelo

El programa SIMOD requiere dos tipos de información de entrada para ser utilizado. Archivos con Datos del Río y de sus Segmentos. Para el efecto, existen dos archivos denominados Forma 1 y Forma 2, que se describen en las Tablas Nº 1 y Nº 2 de la Figura Nº 10, en las que debe ser almacenada la información correspondiente a datos del río y a sus segmentos, respectivamente, de acuerdo a como sigue:

Figura Nª 10: Información que requiere la aplicación del Modelo SIMOD

DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO SIMOD

Tabla Nº 1

Estación Nº	Caudal m^3/seg	Oxígeno Disuelto (mg/L)	DBO_5 (mg/L)	Temperatura del agua ºC	Altitud SNM (m)	Profundidad media (m)

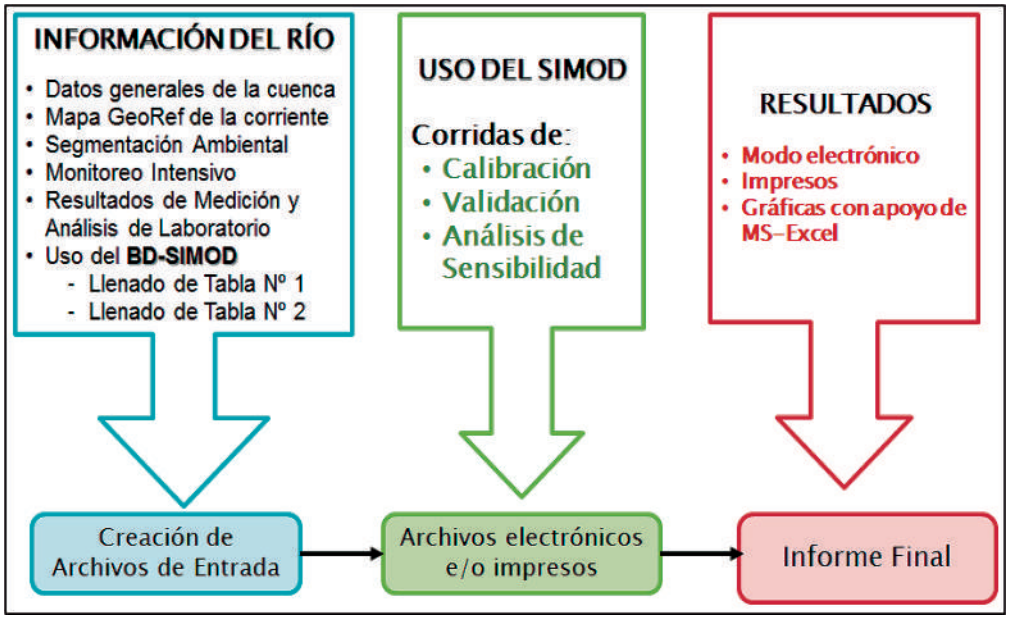
Tabla Nº 2

Tramo Nº	Velocidad media (m/s)	Distancia entre puntos (Km)	Coeficiente de desoxigención K1 a 20 ºC (1/día)	O.D. mínimo permitido (mg/L)	Es Punto de Control? Si = 1 No = 0
				4	

Fuente: *Vargas-Ballester, W.P., 2019*

El uso del modelo SIMOD requiere la aplicación de tres etapas, tal como se detalla en la Figura Nº 11, a continuación:

Figura Nª 11: Estructura computacional del Modelo SIMOD



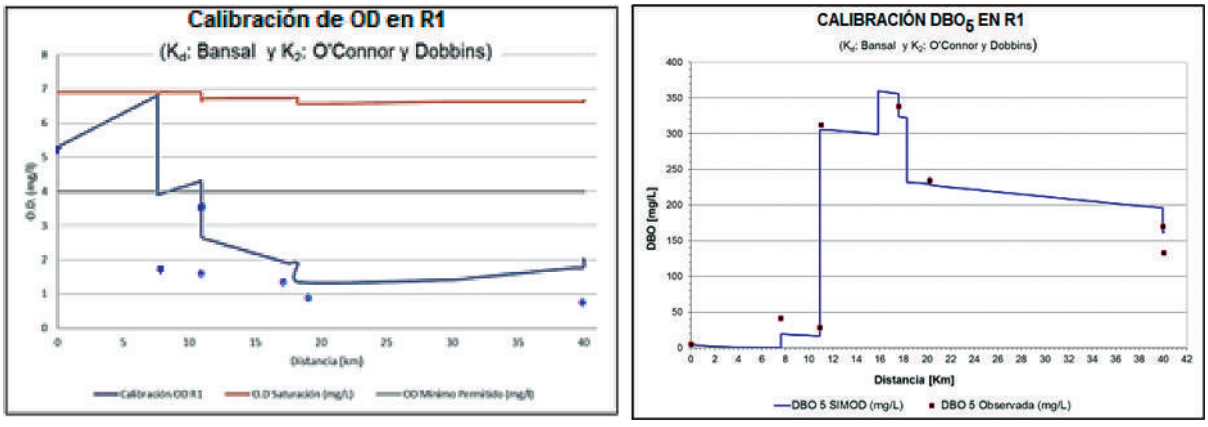
Fuente: *Vargas-Ballester, W.P., 2019*

La información del río es preparada, introducida, almacenada y utilizada mediante el Módulo independiente de la Base de Datos denominada BD-SIMOD.

El modelo SIMOD fue calibrado realizando varias corridas o simulaciones, utilizando datos obtenidos en las Campañas de Muestreo Intensivo (CMI) realizadas en la Cuenca del Río Katari, que incluyeron los parámetros consignados en la Figura Nº 10.:

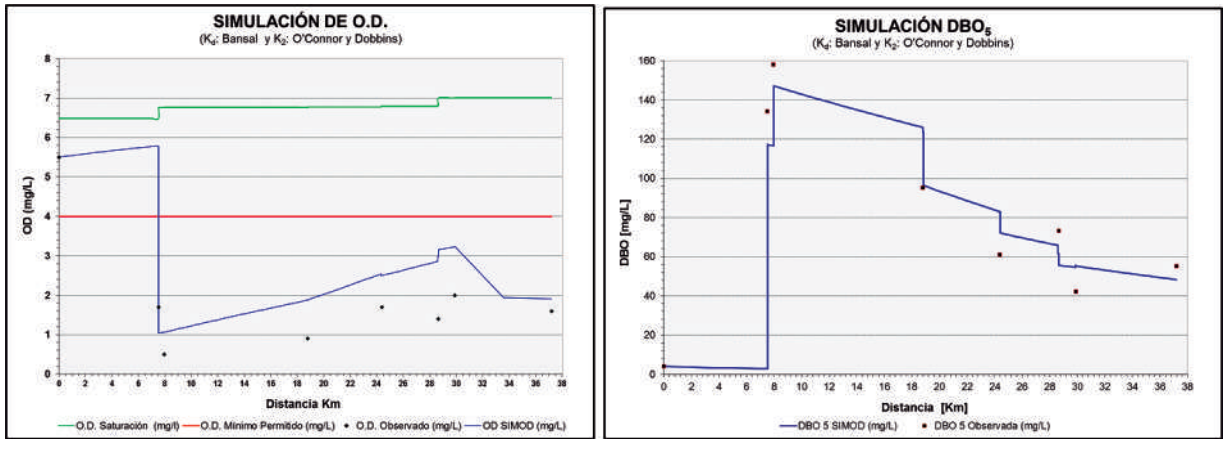
La calibración del modelo consistió en simular los parámetros OD y DBO considerando la influencia de la temperatura del agua y la altitud sobre el nivel del mar, alcanzando su calibración cuando las simulaciones coincidieran o se aproximaran con mayor precisión a los valores de los datos obtenidos en las CMI. A continuación, se presentan las gráficas con los resultados que permitieron la calibración del modelo.

Figura Nº 12: Calibración de OD y DBO en el río Seco



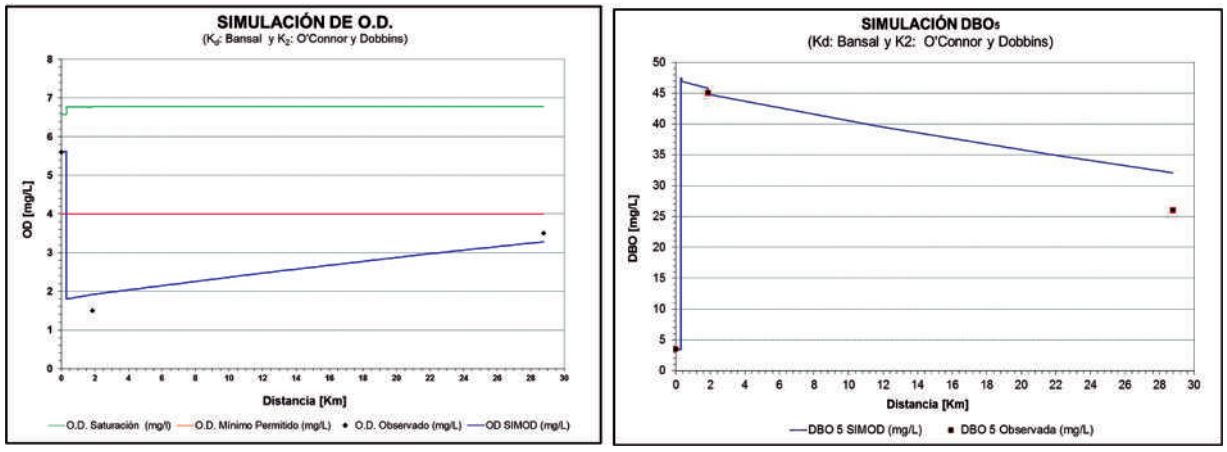
Fuente: *Modelo SIMOD 1.01*

Figura Nº 13: Calibración de OD y DBO en el río Pallina



Fuente: *Modelo SIMOD 1.01*

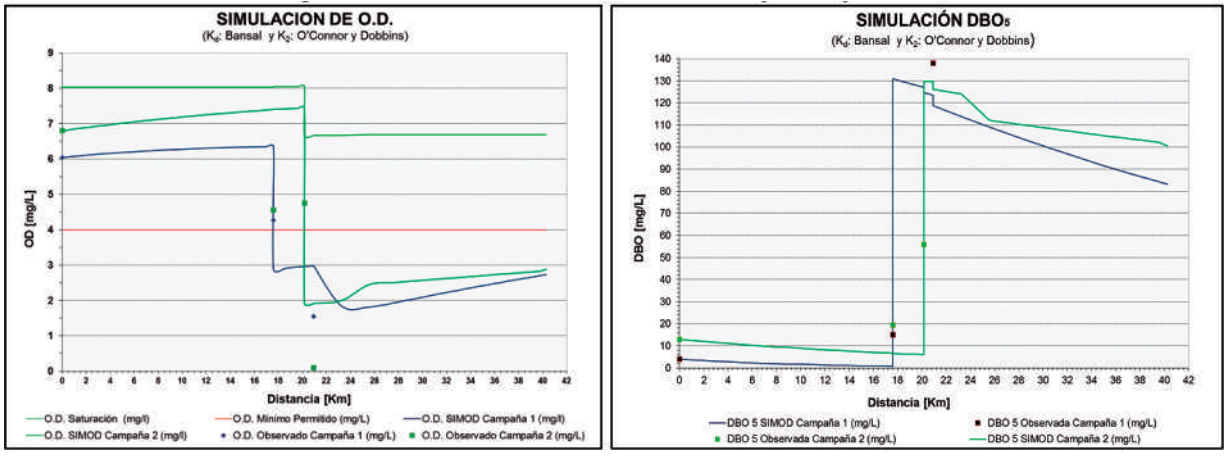
Figura Nº 14: Calibración de OD y DBO en el río Katari



Fuente: *Modelo SIMOD 1.01*

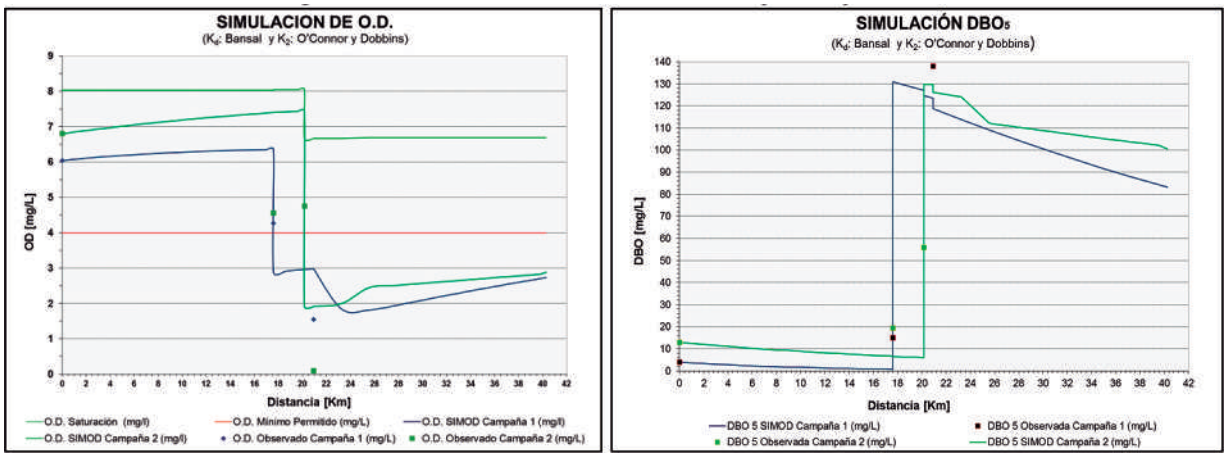
Posteriormente, se validó el modelo realizando simulaciones con los datos de campañas anteriores, proporcionados por el entonces Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN) ahora Agencia Boliviana de Energía Nuclear, cuyas gráficas se presentan a continuación

Figura Nº 15: Curvas de validación de OD y DBO para R1



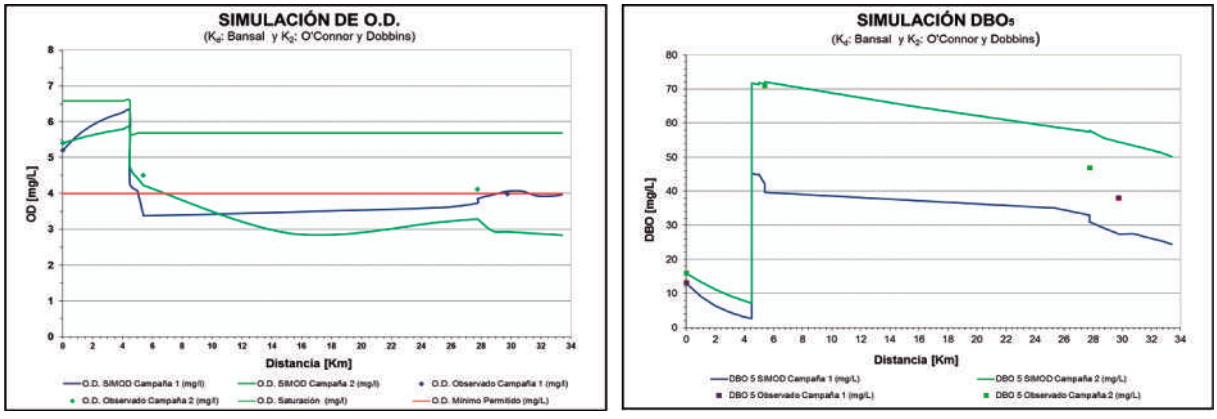
Fuente: *Modelo SIMOD 1.01*

Figura Nº 16: Curvas de validación de OD y DBO para R5



Fuente: Modelo SIMOD 1.01

Figura Nº 16: Curvas de validación de OD y DBO para R6



Fuente: Modelo SIMOD 1.01

2.3. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo para evaluar la respuesta del sistema en diferentes escenarios futuros, con el fin de identificar las mejores prácticas para la gestión de los contaminantes. Se realizaron simulaciones para nueve escenarios distintos, que incluyeron variaciones en el caudal, la carga contaminante y la implementación de tratamientos de aguas residuales.

Tabla Nº 1: Condiciones supuestas para plantear escenarios de predicción

DESCARGA	SUPUESTO	DESCRIPCION DEL SUPUESTO
Río Hernani	A1	No se toman acciones sobre las descargas que contaminan el Río Hernani y no se tiene ninguna mejora de la calidad de la descarga de sus aguas al R1.
	A2	Se toman acciones sobre las descargas que contaminan al Río Hernani (las industrias implementan mínimamente un tratamiento primario) y en consecuencia se tiene una mejora de la calidad de la descarga de sus aguas al R1, suponiendo una remoción en su carga contaminante del 40%.
	A3	Se toman acciones sobre las descargas que contaminan el Río Hernani (las industrias implementan un tratamiento primario y secundario) y en consecuencia se tiene una mejora de la calidad de la descarga de sus aguas al R1, suponiendo una remoción en su carga contaminante del 65%.
	A4	Se asume un caso muy particular, en donde se realizan acciones sobre las descargas que contaminan el Río Hernani (las industrias descargan sus aguas al río Hernani cumpliendo las normas) y en consecuencia se tiene una gran mejora de la calidad del agua del río Hernani, de manera tal que descarga sus aguas al R1 cumpliendo la normativa vigente de límites permisibles para descargas liquidas del Anexo A–2 del RMCH de la Ley 1333.
	B1	La actual PTAR Puchukollo descarga su efluente a 80 mg/L
PTAR Puchukollo	B2	La actual PTAR Puchukollo es ampliada y cumple con las especificaciones de su nuevo diseño y descarga su efluente con una calidad de agua de CLASE D.
PTAR Viacha	C1	La nueva PTAR de Viacha entre en funcionamiento y descargue su efluente a 80 mg/L
	C2	La nueva PTAR de Viacha no entra en funcionamiento.
PTAR Laja	D1	PTAR de Laja es reacondicionada y vuelve a entrar en operación y descargue su efluente a 80 mg/L.
	D2	La PTAR de Laja no es reacondicionada y no entra en operación.

Fuente: J. Marquez, F.I. UMSA, 2019.

Nota.- ☐ *A1-B2-C2-D2 Escenarios y condiciones elegidas en 2019 y que corresponden a la realidad de hoy 2024*

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Calidad del Agua en la Cuenca del Río Katari

Los resultados del modelo SIMOD indicaron que los ríos Seco, Pallina y Katari tienen una buena calidad de agua en sus nacientes, pero la calidad se deteriora a medida que estos ríos reciben contribuciones de contaminantes a lo largo de su recorrido. En particular, la carga de DBO y la reducción del oxígeno disuelto aumentan significativamente cerca de las áreas urbanas de El Alto, Viacha y Laja, lo que provoca una disminución de la calidad del agua.

El análisis de los parámetros físicos y químicos reveló una alta concentración de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, contribuyendo a la eutrofización de la Bahía de Cohana. La falta de tratamiento adecuado de las aguas residuales y el vertido de residuos sólidos en los cauces de los ríos agravan esta situación.

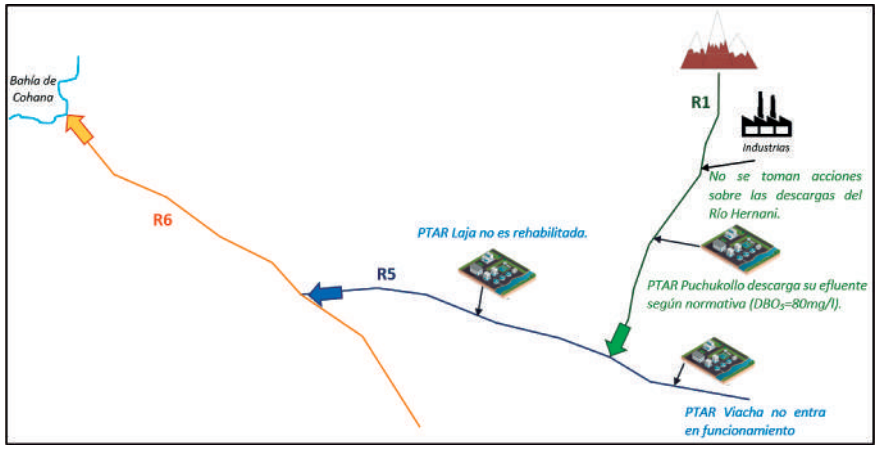
3.2. Análisis de Sensibilidad

Los escenarios simulados mostraron que la implementación de sistemas de tratamiento primario y secundario de aguas residuales en las ciudades de El Alto y Viacha tendría un impacto positivo en la reducción de la carga contaminante. Sin embargo, en algunos tramos del río, se identificó que se requerirían tratamientos terciarios para cumplir con los estándares de calidad del agua establecidos por las normativas ambientales.

El análisis también sugirió que una mejora en la gestión de residuos sólidos en las zonas urbanas y rurales contribuiría significativamente a reducir la carga de contaminantes, como el fósforo y los metales pesados, que son clave en la eutrofización del sistema acuático.

Con base en el esquema de la Figura Nº 17 se presentan los componentes del sistema que configura el denominado escenario 5 del sobre el cual se realizará el análisis de sensibilidad, y tomando en cuenta las estas consideraciones: inicio de operaciones de la nueva PTAR Puchukollo, el cierre por fallas operacionales de la nueva PTAR de Viacha, la no rehabilitación de la PTAR de Laja y las acciones que no se realizaron para la mejora de la calidad del agua del río Hernani como resultado del pretratamiento y control de las descargas industriales.

Figura Nº 17: Escenario 5 de predicción



Fuente: J. Márquez, F.I. UMSA, 2019

En la corriente R1 se consideran dos descargas que tienen una mayor incidencia en el aporte de carga orgánica: el río Hernani que transporta las descargas de aguas industriales, domésticas y del Matadero Municipal Los Andes y la descarga de las aguas de la PTAR Puchukollo. Sobre la corriente R5 se consideran las descargas de las aguas residuales de la ciudad de Viacha, la descarga de las aguas de la corriente R1 y la descarga de las aguas residuales de la PTAR de Laja. Finalmente, sobre la corriente R6 se considera la descarga de las aguas de la corriente R5 como principal aportante de carga orgánica.

La actual PTAR Puchukollo, opera desde 1988, y contaba con un proceso de tratamiento basado en Lagunas de Estabilización, con un total de 13 Lagunas (anaerobias, facultativas y de maduración), distribuidas en 2 Series (II y III) y una

capacidad de tratamiento instalada de 430 l/s. Fue ampliada por primera vez el 2013, construyéndose tres filtros percoladores y cárcamos de bombeo, así de esta manera se incrementó la capacidad de tratamiento de aguas residuales, de 430 l/s a 542 l/s.

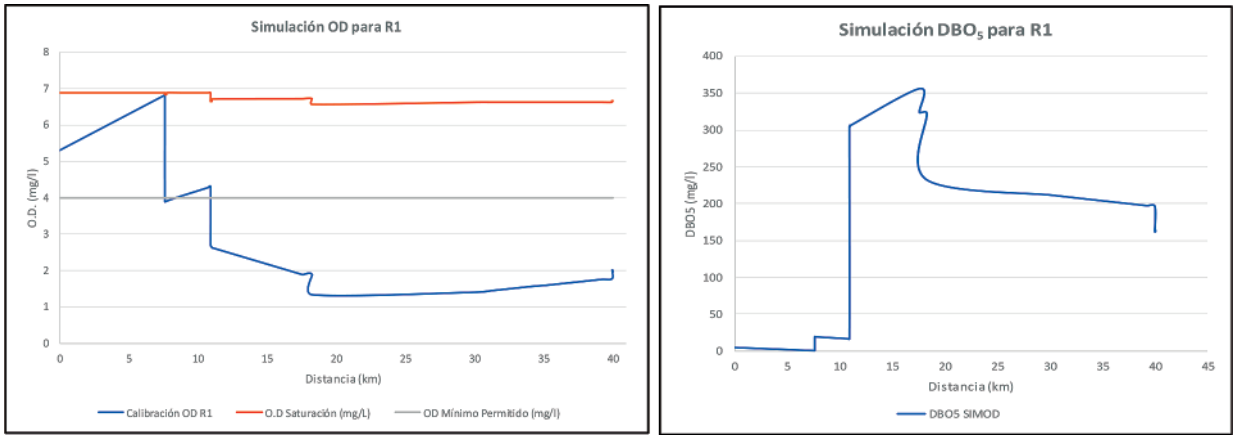
El Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) como parte de los proyectos que se implementan a través del "Programa de Saneamiento del Lago Titicaca (Cuenca Katari – Bahía de Cohana)" con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), concluyó la segunda ampliación de la PTAR Puchukollo y hoy ya está operando con sus nuevas instalaciones.

Por otra parte, la estatal Entidad Ejecutora de Medio Ambiente y Agua – EMAGUA bajo la tuición del MMAyA, realizó la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales y Emisarios (PTAR) – Viacha que entró en operación en 2023. Lastimosamente a la fecha no está en operación y descarga al río Pallina su emisario a través del "By Pass" que posee.

Como parte de los trabajos realizados en campo, se pudo observar que la PTAR de Laja actualmente se encuentra fuera de operación, según testimonios de los lugareños, la PTAR estuvo en funcionamiento aproximadamente 3 años, no se llevaron a cabo una serie de medidas para garantizar su adecuado funcionamiento, razón por la cual la PTAR dejó de funcionar.

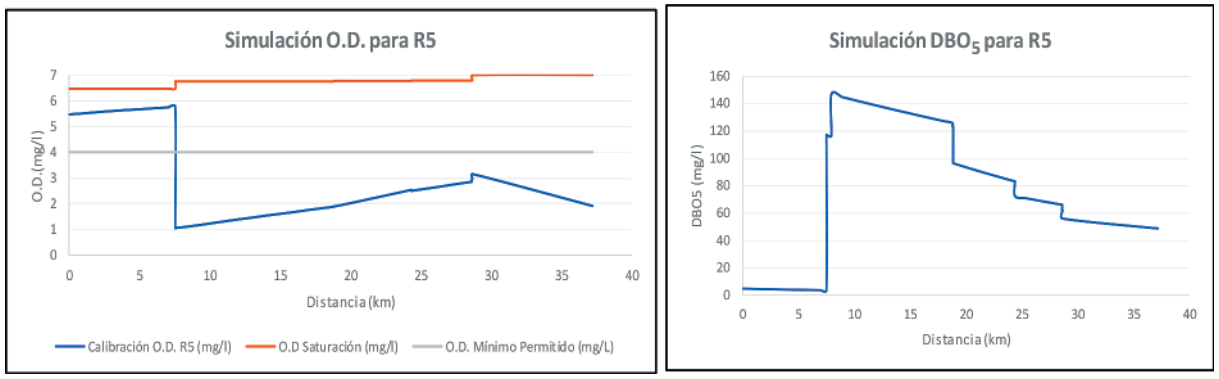
Curvas de simulación de OD y DBO para Escenario A1-B2-C2-D2 en los Ríos R**1, R5 y R6**

Figura Nº 18: Curvas de simulación de OD y DBO en R1



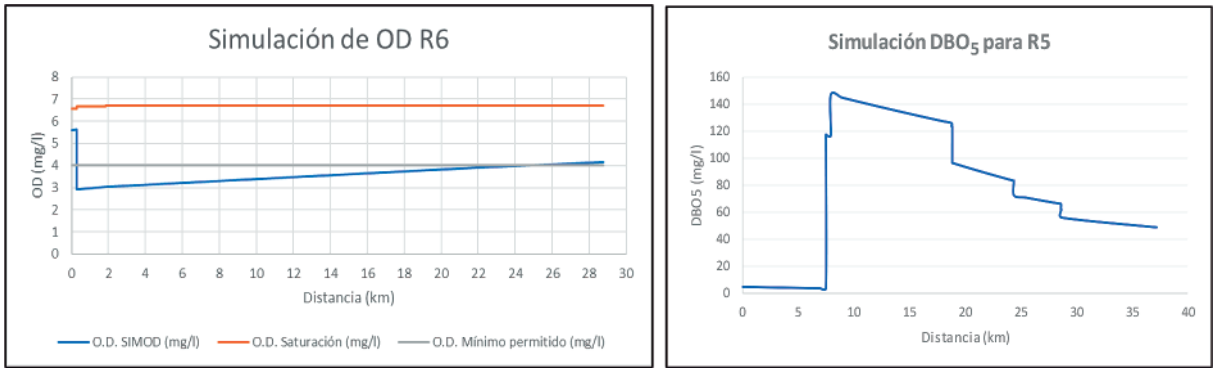
Fuente: *Modelo SIMOD 1.01*

Figura Nº 19: Curvas de simulación de OD y DBO en R5



Fuente: Modelo SIMOD 1.01

Figura Nº 20: Curvas de simulación de OD y DBO en R6



Fuente: Modelo SIMOD 1.01

Claramente, se aprecia del análisis de resultados de simulación de sensibilidad de estas seis gráficas de OD y DBO que la descarga de agua tratada de la PTAR Puchukollo, no incide en absoluto para mejorar la calidad de las aguas del río Pallina, después del río Katari y de la propia Bahía de Kohana y esto, sólo hablando en términos de la DBO y del OD, que utilizamos para realizar una evaluación rápida y de bajo costo, de la calidad del agua en una cuenca.

4. CONCLUSIONES

El modelo SIMOD ha sido una herramienta útil para evaluar la calidad del agua en la Cuenca del Río Katari. Los resultados indicaron que los ríos de la cuenca presentan altos niveles de contaminación debido principalmente al vertido de aguas residuales domésticas e industriales y residuos sólidos. Sin embargo, las simulaciones también mostraron que existen soluciones viables para mejorar la calidad del agua, como la implementación de sistemas eficientes de tratamiento de aguas residuales y gestión de residuos sólidos, principalmente en las ciudades de El Alto y Viacha y la pequeña ciudad de Laja.

La inacción del GAMEA en regular y controlar el tratamiento primario de las aguas residuales industriales y domésticas que descargan al río Hernani, incide en la continuación de efectos adversos y perjuicios que se ocasiona a la Bahía de Cohana del lago Titicaca.

El análisis de sensibilidad que se presenta en este artículo, refleja la situación real imperante hoy y demuestra que aunque se invirtió en la construcción de la PTAR Puchukollo y al no contar con las otras medidas, como las PTAR's de Viacha y Laja, funcionando eficientemente, resultan vanos el esfuerzo y la inversión, puesto que la Bahía de Cohana no recibe al presente, ninguna mejora de calidad ambiental.

Los resultados del estudio subrayan la importancia de establecer una red de monitoreo constante en la Cuenca del Río Katari. Se recomienda la instalación de 25 estaciones de monitoreo en puntos clave de la cuenca, con el fin de obtener datos continuos sobre la calidad del agua. Esta red de monitoreo debe estar integrada con el modelo SIMOD para proporcionar información actualizada y precisa sobre los cambios en la calidad del agua y la efectividad de las intervenciones de gestión.

Es fundamental que las autoridades locales y regionales adopten políticas que promuevan el tratamiento adecuado de las aguas residuales y el control de la contaminación en la cuenca. Además, es esencial la participación activa de la comunidad y de las instituciones responsables en la gestión del agua para recuperar la calidad de los cuerpos receptores y la Bahía de Cohana.

5. RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a la ALT por el apoyo logístico brindado en todo momento para hacer posible todas las actividades de campo, al Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear (IBTEN) por los datos proporcionados para la validación del modelo y también a las autoridades municipales de El Alto, Viacha y Laja por su colaboración en la recolección de datos y su compromiso con la mejora de la calidad del agua en la Cuenca del Río Katari.

6. REFERENCIAS

Marquez M. Jhony (2019) Modelación y Evaluación de la Calidad del Agua en la Cuenca del Río Katari. Convenio Facultad de Ingeniería UMSA-ALT.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua MMAyA. (2010) Plan Director de la Cuenca Katari La Paz, Bolivia.

Standard Methods for the Examination of water and Wastewater (2000). 20th ed, American Public Health Association/American Water Works Association/ Water Environment Federation, Washington D.C. USA.

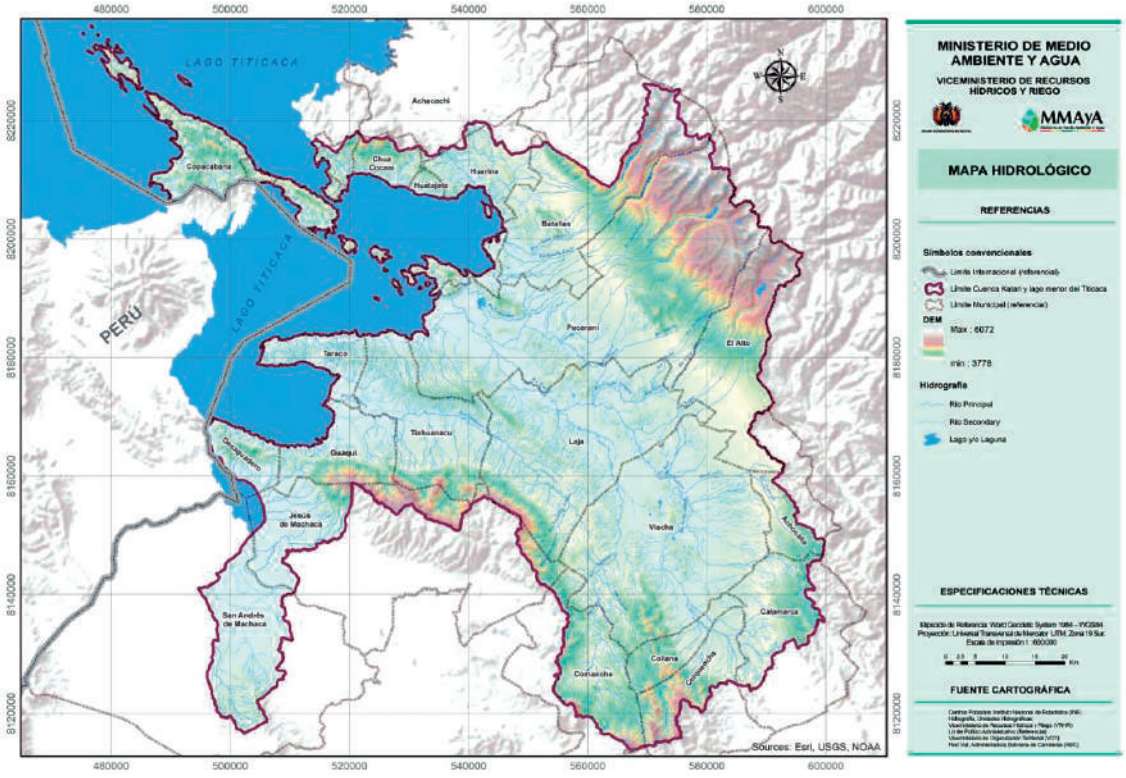
Vargas Ballester W. P. (1988) Manual del Usuario Modelo Computacional SIMOD (Simulador de Oxígeno Disuelto) Versión 1.01. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Vargas Ballester W. P. (2019) Modelo SIMOD aplicado para evaluar calidad del agua en el río Katari. Editorial Académica Española.

7. ANEXOS

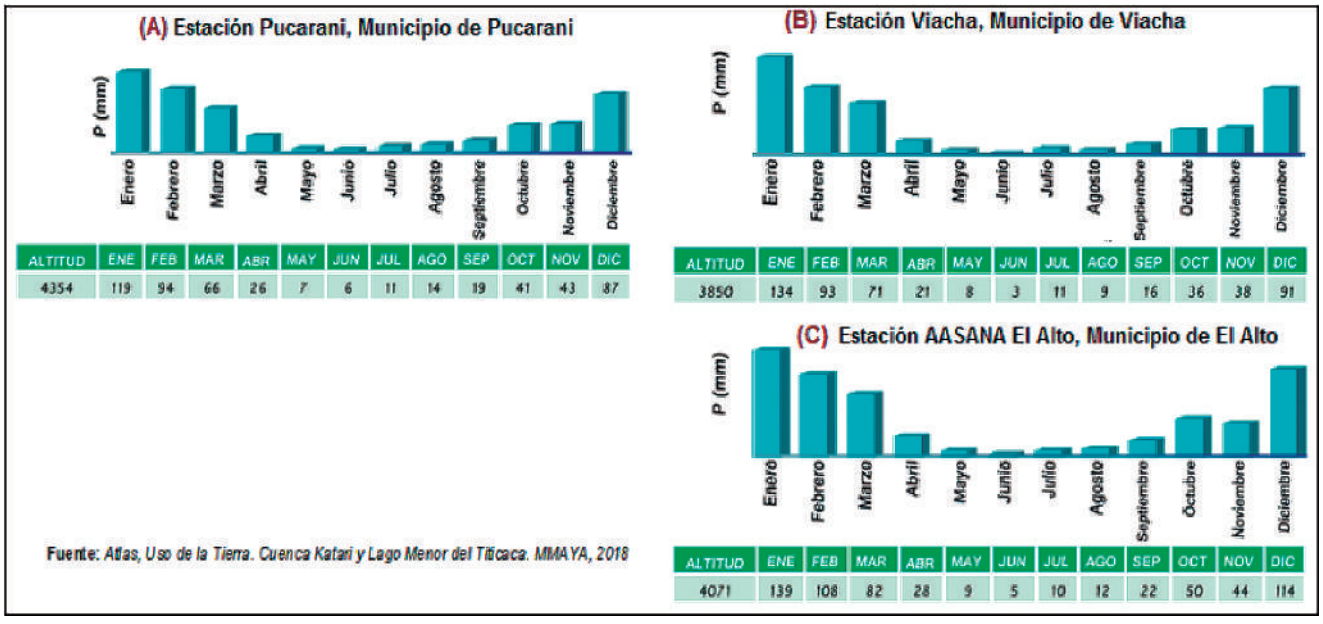
Los anexos incluyen un mapa, datos de lluvias y fotos de la campaña de muestreo.

Mapa Hidrológico Cuenca del Río Katari



Fuente: Atlas, Uso de la Tierra. Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca. MMAYA, 2018

Precipitación Pluvial Total Mensual



ALTITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
4354	119	94	66	26	7	6	11	14	19	41	43	87

ALTITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
3850	134	93	71	21	8	3	11	9	16	36	38	91

ALTITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
4071	139	108	82	28	9	5	10	12	22	50	44	114

Fuente: *Atlas, Uso de la Tierra. Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca. MMAYA, 2018*

Mosaico Fotográfico



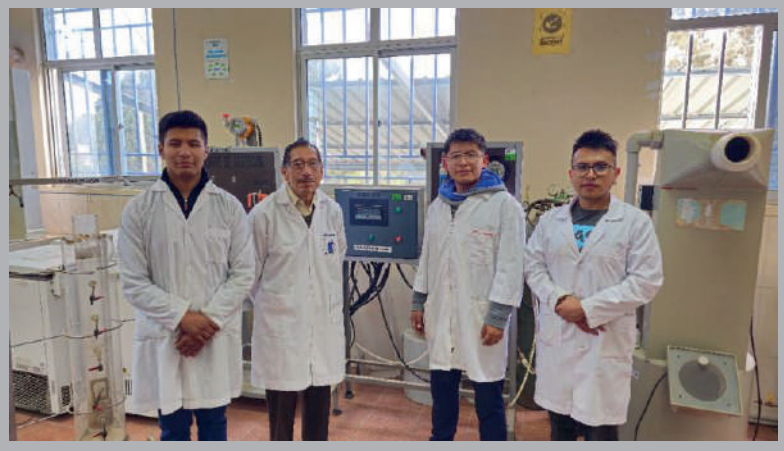
Fuente: J. Márquez, F.I. UMSA, 2019

AREAS DE INVESTIGACIÓN - IIDEPROQ

CLIMA Y MANEJO DE SUELOS



BIODIGESTORES





CALIDAD DEL AIRE



CATÁLISIS Y PETROQUÍMICA

RECURSOS EVAPORÍTICOS



PERSONAL ADMINISTRATIVO IIDEPROQ



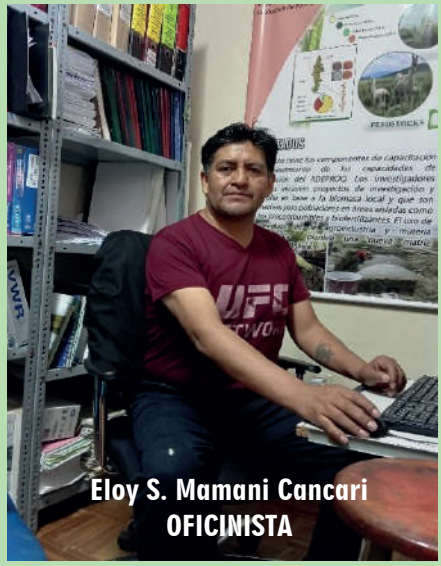
Jorge O. Mendez Benguria
ADMINISTRADOR IIDEPROQ



Lic. MSc. Carlos Díaz Mercado
TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I



Lic. Isabel Alejo Condori
AUXILIAR DE LABORATORIO



Eloy S. Mamani Cancari
OFICINISTA



Hugo Ticona Mendoza
AUXILIAR DE LABORATORIO



Micaela Sánchez Quisbert
SECRETARIA

IIDEPROQ

SERVICIOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

- Análisis de calidad de agua, suelos, aire y alimentos.
- Análisis físico-químicos de muestras en general con CG, CLAR, COT y AA. (*)
- Determinación de Poder Calorífico Superior e Inferior de muestras sólidas y líquidas.
- Monitoreo de calidad del aire, ambiente e intramuros.
- Medición de ruidos.
- Modelaje y simulación de contaminación hídrica y atmosférica.
- Investigación y desarrollo de procesos químicos, ambientales y de alimentos.
- Biorremediación ambiental.
- Capacitación y adiestramiento en ingeniería ambiental y biotecnología.

(*) *CG: Cromatografía de Gases*
CLAR: Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento
COT: Carbono Orgánico Total
AA: Absorción Atómica

LINEAS DE INVESTIGACIÓN

LINEAS DE INVESTIGACIÓN

CATÁLISIS Y PETROQUÍMICA

CALIDAD DEL AIRE

EFICIENCIA ENERGÉTICA

CALIDAD AMBIENTAL Y AGUAS

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN NUMÉRICA

CLIMA Y MANEJO DE SUELOS

DIGESTIÓN ANAEROBIA

BIOINGENIERÍA Y BIORREFINERÍA

RECURSOS EVAPORÍTICOS Y TECNOLOGÍA DE SALES

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

ECONOMÍA CIRCULAR

CAMPUS UNIVERSITARIO COTA COTA CALLE 30
COMPLEJO FACULTAD DE INGENIERÍA—UMSA
TELEFONO—FAX (591—2) 2774412
e mail: servicios.iideproq@gmailcom
web. www.iideproq.umsa.bo
La Paz—Bolivia