

Informe final publicable de proyecto

Evaluación del potencial energético de Lutitas Pirobituminosas Uruguayas por combustión latente

Código de proyecto ANII: FCE_3_2020_1_161919

Fecha de cierre de proyecto: 01/12/2023

TORRES BRUNENGO, Martín Miguel (Responsable Técnico - Científico)

NOVO REAL, Rodrigo (Investigador)

CASTIGLIONI ALONSO, Jorge Raúl (Investigador)

CUÑA SUÁREZ, Andrés (Investigador)

FERNÁNDEZ DEJHIZIÁN, Mauro David (Investigador)

GRISTO SAVORNIN, Pablo Vladimir (Investigador)

TANCREDI MOGLIAZZA, Nestor Alcides (Investigador)

YERMÁN MARTÍNEZ, Luis (Investigador)

CARDOSO GONZÁLEZ, Mauricio Sebastian (Investigador)

THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND \\
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE QUÍMICA \\
ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE COMBUSTIBLES, ALCOHOL Y PÓRTLAND \\
FACULTAD DE QUÍMICA. FUNDACIÓN PARA EL PROGRESO DE LA QUÍMICA

Resumen del proyecto

Un grupo de científicos uruguayos ha trabajado con la tecnología de Combustión Latente Autosuficiente como una posible alternativa de obtención de energía en Uruguay. Su enfoque se centró en la evaluación de las Lutitas Pirobituminosas, un recurso energético nacional poco explorado. Estas rocas ricas en materia orgánica se encuentran en los departamentos de Cerro Largo, Rivera y Tacuarembó, con un potencial de extracción de hasta 270 millones de barriles equivalentes de petróleo. Estas lutitas son la única fuente contingente de hidrocarburos en Uruguay, lo que las hace cruciales para la soberanía energética.

Las Lutitas Pirobituminosas uruguayas no son adecuadas para la explotación convencional debido a sus características químicas. Por lo tanto, este proyecto pionero se enfocó en la combustión latente para producir gas combustible. Se investigó cómo obtener gases, las condiciones óptimas para hacerlo y la cantidad de energía que se podría obtener.

Los análisis de gases liberados en la combustión latente, revelaron la presencia de metano, hidrógeno en cantidades menores, y cantidades significativas de propano y monóxido de carbono. Además, se comprobó que la adición de un 5 % de chips de eucaliptus grandis, duplica el poder calorífico de los gases. También se confirmó que el tamaño de partícula de la lutita influye en la autosostenibilidad del proceso.

En resumen, este proyecto contribuye al conocimiento global sobre la combustión latente de lutitas pirobituminosas y su potencial como fuente de energía. Uruguay puede aprovechar sus recursos de manera más eficiente, lo que podría tener un impacto transformador en la producción de energía y la independencia energética del país.

Ingeniería y Tecnología / Ingeniería Química / Ingeniería de Procesos Químicos / procesamiento térmico de materiales para la obtención de energía

Palabras clave: combustión latente / lutitas pirobituminosas / energía /

Introducción

1. Energía y combustibles fósiles en Uruguay

Los estudios de exploración y prospección realizados en el Uruguay hasta el momento, no han probado la existencia de yacimientos de combustibles fósiles tradicionales (petróleo, carbón mineral y gas natural) económicamente viables para su explotación. Uruguay ha tenido que importar petróleo y gas natural para satisfacer gran parte de su demanda energética en el sector de combustibles, producción de energía para la industria, etc. Esto le ha implicado un alto costo económico y ha determinado una fuerte dependencia del exterior. Además, sin considerar la reposición de reservas de petróleo que ocurre continuamente, existen reservas para un consumo mundial de tan sólo 50 años [1]. Si bien las energías renovables son importantes, también es reconocido que la diversificación de las fuentes de energía es el camino a seguir, para evitar dependencia de cualquier tipo. Asimismo, la disponibilidad de nuevas tecnologías a propiciado la exploración y estudio de posibles aplicaciones de combustibles fósiles no convencionales tales como las Lutitas Pirobituminosas (LP) [2, 3].

2. Lutitas Pirobituminosas: único recurso energético autóctono probado.

Las LP son rocas sedimentarias que contienen cantidades variables de materia orgánica bituminosa denominada Querógeno [4]. El alto contenido de materia orgánica compleja de alto peso molecular las posiciona para ser utilizadas como combustibles. Las LP tienen diversas aplicaciones energéticas tales como su uso en centrales térmicas de producción eléctrica o la producción de aceite industrial, hidrocarburos y azufre [5], dependiendo del contenido en Querógeno. En las décadas de 1970 y 1980, la empresa pública Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP), realizó estudios exploratorios, determinando la existencia de recursos contingentes de LP en Uruguay, la mayor parte ubicadas en la Formación Mangrullo, en los departamentos de Cerro Largo, Rivera y Tacuarembó. Estimándose en 277 millones de barriles de petróleo [6-9] por pirolisis industrial. De acuerdo con el actual consumo energético del Uruguay, esto equivale a 50 años de su consumo. El empleo con fines energéticos tendría impactos positivos para el Uruguay, contribuyendo a la soberanía energética y a la generación de conocimiento y desarrollo local. Mundialmente hay importantes yacimientos de LP, los cuales son explotados para diversos usos. Se encuentran en EEUU, Brasil, Australia, China, Estonia entre otros [10]. Cabe destacar que el empleo actual de las LP está en la generación de energía por combustión directa (Estonia), o pirólisis in-situ para la obtención de un aceite de lutita (China). Sin embargo, no todas son aptas para estos procesos, condicionándose el uso a las características de la formación. A nivel de

investigación fundamental, internacionalmente y nacionalmente se han reportado numerosos trabajos de investigación relacionados con LP [11-19]. Recientemente, en el marco FSE-ANII, se desarrolló un proyecto de investigación (FSE_1_2016_1_131635) donde se abordó la LP de manera integral con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica de su co-combustión con residuos de biomasa. Se demostró que es posible obtener la energía almacenada en la LP quemándola junto con *Eucalyptus Grandis* en cantidad no mayores a 50 % de LP y temperaturas menores a 580 °C [3]. Con el objetivo de encontrar un aprovechamiento aún mejor a las LP uruguayas es que se piensa incursionar en otras alternativas tecnológicas para su valorización.

3. La combustión latente

Hasta el momento, son conocidas 3 formas de explotación de las LP las cuales son: pirólisis, combustión y gasificación. La más común es la combustión convencional para obtener energía. Sin embargo, dado que no todas las LP por sus características son adecuadas para quemarlas directamente, una alternativa es su descomposición térmica por gasificación. La gasificación se produce bajo una cantidad de aire menor a la estequiométricamente necesaria para que ocurra la combustión completa. El producto principal de la gasificación es un gas combustible (GC), el cual está compuesto por una mezcla de CO, H₂, hidrocarburos, H₂O y CO₂. La principal aplicación del GC es la generación de energía mediante su quema o la síntesis de otros productos [19-22]. La principal limitación de la gasificación clásica tiene que ver con los altos costos de producción debido a la complejidad del proceso y los estrictos requisitos para el tamaño de las partículas del material a gasificar, su humedad y el contenido de cenizas [23]. Estas limitaciones, evitan el desarrollo de soluciones rentables para el empleo de la gasificación, debido a las grandes cantidades de combustible suplementario requerido para el secado del material a gasificar. Recientes investigaciones realizadas por Yermán et al. [24-38], han demostrado que la combustión latente autosuficiente (CLA) puede superar las limitaciones antes mencionadas para la gasificación. Por lo tanto, la CLA representa una interesante vía para ser evaluada como alternativa para la valorización de LP. La CLA es una forma de combustión lenta, de baja temperatura y sin llama [26, 27]. Puede ser autosustentable debido a que el calor que se desprende cuando el O₂ reacciona directamente con la superficie del combustible, es suficiente para desencadenar las reacciones de descomposición (pirólisis). Posee una eficiencia energética muy alta y es capaz de operar de manera autosostenible incluso a partir de combustibles sólidos con alto contenido de humedad (75 % en peso), sin necesidad de un aporte de energía externa [28, 39]. La CLA requiere nulo o mínimo pretratamiento previo del material y presenta menores emisiones de compuestos nocivos para el medio ambiente en comparación con la incineración o la gasificación clásica. Esto reduce la complejidad y la infraestructura necesaria para la producción de GC a partir de LP debido a su contenido de azufre (4%) [2]. A pesar de este prometedor escenario, la producción de GC mediante CLA de LP nunca ha sido estudiada en forma rigurosa y sistemática. En Uruguay, hasta el momento no se ha realizado ningún tipo de investigación relacionada con la combustión latente. Este proyecto hará un aporte importante en la materia a nivel internacional y nacional, mediante el estudio fundamental y riguroso de la CLA de LP para la producción de GC. Permitirá dilucidar las principales características energéticas y químicas del gas y cómo influyen las diferentes variables operacionales. De esta forma, el proyecto significará un valioso aporte al conocimiento fundamental en la materia.

Metodología/diseño del estudio

El proyecto está dividido en seis etapas, las cuales se distribuyen en el tiempo como se muestra en el plan de trabajo. El proyecto incluye una etapa de caracterización y muestreo, cuya justificación y metodología está basada en nuestras publicaciones recientes, una etapa de puesta a punto del reactor para el caso específico de las LPU, y cuatro etapas de ensayos en el reactor de CLA y análisis de gases. Las primeras tres etapas de ensayos (III, IV y V) están diseñadas específicamente para estudiar el impacto de los diferentes parámetros de operación en el desempeño (considerado como temperatura y concentración de los gases de salida) de las LPU en ensayos de CLA con la finalidad de obtener provecho desde el punto de vista energético. La etapa VI también plantea la realización de ensayos, apuntando a encontrar y optimizar las condiciones en las cuales la calidad y cantidad de gases combustibles (y/o el calor generado) puede ser maximizado. Por lo tanto, el diseño de los experimentos de esta etapa queda supeditado a los resultados encontrados en las etapas II a V. Los detalles de las etapas necesarios para la realización del proyecto, son los siguientes:

I) Muestreo y caracterización de las LP – definición del material a ensayar

El muestreo ya ha sido realizado y justificado en base a diferentes características en trabajos anteriores, que han sido publicados en revistas de renombre internacional por nuestro grupo de trabajo [2,3]. Sin embargo, las muestras que se utilizaran en este proyecto provienen de un pozo cuya caracterización fue realizada en la década de 1970, y por lo tanto se plantea aquí realizar una caracterización térmica mediante las siguientes técnicas:

- Análisis Próximo (contenido de humedad, cenizas, volátiles y carbono fijo)
- Análisis elemental C, H, O, S, N y otros 10 metales característicos (por ejemplo, Na, K, Ca)
- Análisis por bomba calorimétrica del poder calorífico
- Análisis termo gravimétrico
- Calorimetría diferencial de barrido

Estos dos últimos ensayos permiten determinar las temperaturas de las principales reacciones químicas que ocurren durante la CLA, pirolisis y combustión. Estos datos son importantes para luego correlacionar las temperaturas de la CLA con la emisión de gases y poder proponer mecanismos capaces de alterar los rendimientos gaseosos en base a cambios de temperatura en la CLA. Como la CLA es un proceso autosuficiente, la temperatura es controlada mediante los parámetros de operación, y cuyo estudio está planteado para las etapas III a V. De esta manera, lo único que resta aquí es definir el tamaño de la partícula de las LP, pero esto se desarrollara en el punto III.

II) Acondicionamiento del reactor y ensayo de pruebas piloto

El reactor de combustión latente ha sido ensamblado con el Proyecto "Diseño y puesta en marcha de un reactor de combustión latente" (PAIE-CSIC-2018, Proyecto N° 149) durante el año 2019. Actualmente se encuentra instalado en los laboratorios del Área de Energías Renovables del Instituto Polo Tecnológico de Pando. Ha sido testeado con residuos lignocelulósicos. También se ha testeado con LP uruguaya para demostrar su factibilidad.

Sin embargo, estos ensayos apuntaron solamente a testear el reactor y no a realizar un estudio sistemático y completo. Es necesario realizar una serie de acondicionamientos en el reactor para poder cumplir con los objetivos de este Proyecto.

- Medir la temperatura y caudal de los gases producidos
- Toma de muestra de gases producidos para su análisis por cromatografía gaseosa

Por lo tanto, los diagnósticos que se utilizaran para evaluar el desempeño de las LPU en ensayos de CLA son:

- Temperatura dentro del reactor, en diferentes posiciones (10 posiciones en total) y en función del tiempo (medido cada 5 segundos)
- Temperatura de los gases de salida en función del tiempo (medido cada 5 segundos)
- Flujo volumétrico de los gases de salida en función del tiempo (medido cada 5 segundos)
- concentración de CO, CO₂, O₂, N₂, H₂ y CH₄ (otros) en los gases de salida (medido cada 10-15 minutos, aproximadamente 10 muestras por ensayo)
- Masa en función del tiempo.
- Análisis elemental y TGA de las cenizas (o solidos) obtenido al final de los ensayos de CLA.

Para poder realizar todo este acondicionamiento, se propone que el responsable científico de la propuesta realice una pasantía de investigación postdoctoral de 3 meses en The University of Queensland. En esta pasantía, el Dr. Torres trabajará en conjunto con el Dr. Yermán con la finalidad de capacitarse en el manejo del reactor de combustión latente. Posteriormente, el Dr. Torres poseerá el conocimiento necesario para poder continuar con las actividades experimentales en Uruguay y entrenar a los participantes de la propuesta en el manejo. Cabe aclarar que la experiencia del Dr. Yermán indica que el tiempo que lleva realizar una experiencia en un reactor de CLA, contemplando las etapas de armado, ensayo y limpieza, implica un total de 8-10 horas de trabajo.

III) Estudio de la influencia de la velocidad del aire (12 ensayos)

Una de las variables más importantes (sino la más) es el caudal de aire utilizado en la combustión latente, y por esta razón, se ensayará primero. Como se mencionó anteriormente, existe una cantidad mínima de aire por debajo de la cual la combustión latente autosuficiente (CLA) no es posible. Es necesario, y muy importante, definir este límite, ya que es importante evitar que la combustión se 'apague'. Por un lado, es deseable trabajar lejos de este límite para que no se apague, por otro lado, se ha demostrado que los gases combustibles son maximizados cerca de ese límite, ya que brinda una atmosfera pobre en oxígeno, lo cual es ideal para la producción de gas combustible [26]. Por lo tanto, se debe encontrar ese punto de operación que podría interpretarse como un equilibrio entre la combustión latente autosuficiente y la maximización de gas combustible producido. Además, el caudal de aire define la temperatura de reacción y la velocidad de propagación de la combustión [39], con lo cual la calidad y cantidad de gases es muy dependiente de esta variable. Se propone en esta etapa una serie de experimentos donde se variaría al caudal de aire para encontrar el límite y el rango donde la combustión autosuficiente es posible. Para esto se fijarán todas las demás variables, según la Tabla 2 (caso base). El tamaño de particular se eligió en base a [25], y se ha demostrado que no afecta el límite de aire de una manera

importante. Para la humedad, se utilizará la que contiene originalmente las LPU, ya que no representa una variable importante a esas bajas cantidades [25]. El proceso de CLA permite trabajar con humedades relativamente altas (75%, [31]), y por lo tanto la baja humedad de la LPU no representa un inconveniente [2]. En base a [31], se espera que el caudal limite se Encuentre entre 0.2 y 1 cm/s aproximadamente. también se pretende determinar la velocidad de propagación y la temperatura del proceso en función del caudal de aire, en el rango de CLA.

Se realizarán 2 repeticiones de cada ensayo (total 12 ensayos), empleando las velocidad de aire que se detallan en la Tabla 3

IV) Estudio de la influencia del tamaño de partícula (6 ensayos)

De la misma manera que se planteó el análisis de aire, en esta etapa se variara el tamaño de partícula, dejando constante (caso base) los demás parámetros (ver Tabla 4).

V) Estudio de la influencia de la adición de un combustible suplementario (9 ensayos)

De la misma manera que se planteó el análisis de aire, en esta etapa se incluirá un combustible suplementario. Como combustible se utilizará aserrín de Eucalyptus grandis (EG), el cual ya ha sido ensayado en la co-combustión con LP uruguaya por nuestro equipo de trabajo [2, 29]. El EG ha demostrado ser efectivo para asistir la combustión de LP uruguayas, habiendo presentado efectos sinérgicos en su empleo. Al igual que en los puntos II, III y IV, se mantendrán constantes los demás parámetros (caso base) y se variará la concentración de EG (Ver Tabla 5). Es importante destacar que este estudio no pretende ser un análisis exhaustivo de la influencia de EG en la mezcla a ensayar, sino estimar si tiene una influencia considerable en la composición de los gases, como para que merezca un estudio más profundo a posteriori. Por lo tanto, el tamaño de partícula y la humedad serán constantes durante todos los ensayos. El tamaño de partícula del EG será acotado entre 0.8 y 1.2 mm (igual al caso base de las LPU) mediante tamizado. La humedad de la muestra de EG será también constante (y medida) e igual a la humedad inicial. La manipulación del EG será la adecuada para contemplar posibles cambios de humedad con las condiciones ambientales.

VI) Ensayos de mapeo (18 ensayos)

El desempeño del proceso de CLA (entendido como temperatura, calor y emisión de gases) depende de los parámetros operativos antes mencionados y que se proponen estudiar. Sin embargo, la dependencia de estos parámetros es, como ya ha sido demostrado en varias ocasiones [25, 33, 34], interdependiente. Por lo tanto, es necesario realizar un mapeo más extenso a fin de encontrar las condiciones óptimas de operación. Como se explicó anteriormente, en esta etapa se proponen ensayos fuera de los casos base. La finalidad es encontrar el punto óptimo de operación donde maximizar el calor producido y la concentración y cantidad de gases combustibles generados. Se proponen ensayos por triplicado, como en todas las etapas, con un total de 18 (6x3) ensayos (ver Tabla 6).

VII) Tratamiento de datos y artículos científicos

Se plantea un mínimo de dos (2) artículos científicos en revistas de renombre internacional como ejemplos aquí. Un artículo estará basado en los resultados de las etapas III y IV, y el segundo en base a las etapas V y VI. También se pretende publicar los resultados en conferencias (ENAQUI, Encuentro Regional de ingeniería Química, Congreso Mundial de Ingeniería Química), una por año.

Resultados, análisis y discusión

La presente propuesta de investigación representa un esfuerzo significativo y crucial para evaluar la viabilidad técnica de utilizar las Lutitas Pirobituminosas uruguayas a través de la combustión latente. A pesar de los desafíos y retrasos experimentados debido a la pandemia de COVID-19, esta investigación ha avanzado con determinación y ha logrado cumplir con sus actividades experimentales planificadas, lo que es un logro destacable en sí mismo.

Durante la pandemia, las restricciones y limitaciones en las actividades presenciales en la universidad afectaron el cronograma original del proyecto, lo que resultó en una pérdida de tiempo de seis meses que no pudo ser recuperada a pesar de la prórroga otorgada por la ANII. Sin embargo, el compromiso y la dedicación del equipo de investigación han permitido superar estos desafíos y completar con éxito las etapas experimentales.

El esfuerzo por comunicar los resultados de esta investigación también se refleja en la presentación de un e-poster en el 8vo Encuentro Nacional de Química (ENAQUI) en octubre de 2023. Este e-poster, titulado "Combustión latente: explorando el

potencial uso de un recurso energético uruguayo", proporciona una visión general de los principales resultados obtenidos en las etapas de Evaluación del caudal de aire e Influencia del tamaño de partícula. Actualmente, el equipo se encuentra en el proceso de redacción de un artículo científico que integrará los resultados de todas las etapas de investigación.

Uno de los hallazgos más destacados es el impacto positivo de la adición de un 5 % de *Eucalyptus grandis* al proceso de combustión latente, que duplica la cantidad de energía que se puede obtener de los gases mediante esta tecnología. Estos resultados representan un avance importante en la investigación y serán divulgados a través de una publicación científica en una revista indexada, lo que contribuirá al conocimiento científico global y al potencial de Uruguay en el campo de la energía renovable.

A pesar de los desafíos, esta investigación continúa demostrando su relevancia y su contribución a la exploración de fuentes de energía sostenibles y el avance del conocimiento en este campo, destacando el esfuerzo y la determinación del equipo de investigación para superar obstáculos y lograr resultados significativos.

Formación de RRHH

En un importante avance para nuestra investigación, el responsable científico de la propuesta llevó a cabo una pasantía de investigación posdoctoral en The University of Queensland durante los meses de junio a agosto de 2022. Durante este período, el Dr. Torres se benefició de una capacitación especializada en el campo de la combustión latente autosuficiente a través de la colaboración con destacados expertos en esta área.

Los conocimientos adquiridos en esta capacitación dieron lugar a la presentación de un trabajo titulado "Effect of operational parameters on the gas composition from self-sustaining smoldering of biomass" en el 11th World Congress of Chemical Engineering, en formato de presentación oral en inglés.

Además, destacamos el generoso gesto de The University of Queensland al donar dos reactores de combustión latente junto con sus piezas y repuestos, con un valor total de 12.000 dólares estadounidenses. Estos reactores se instalaron en el Instituto Polo Tecnológico de Pando-Facultad de Química y representan una contribución valiosa que permitirá continuar el desarrollo de esta línea de investigación en Uruguay. Es relevante subrayar que estos mismos reactores fueron utilizados por el Dr. Torres durante su formación en combustión latente en Australia.

En paralelo, el Ing. Mauro Fernández se unió al proyecto como investigador y estudiante de posgrado. Recibió capacitación en las técnicas de combustión latente de parte del Dr. Torres una vez que regresó de su capacitación en Australia. Actualmente, el Ing. Fernández continúa avanzando en su posgrado, lo que demuestra un impacto concreto en la formación de recursos humanos altamente especializados en esta área.

Por último, el proyecto también tuvo el beneficio de contar con la participación de un Químico recientemente graduado, Quím. Mauricio Cardoso. A través de su participación en el proyecto, el Quím. Cardoso pudo consolidar su formación académica y adquirir la experiencia necesaria para seguir avanzando en estudios de posgrado. Esto resalta la contribución del proyecto no solo en la investigación, sino también en la formación y desarrollo académico de jóvenes científicos en Uruguay.

Conclusiones y recomendaciones

La investigación realizada a través de esta propuesta marca un hito significativo en el ámbito de la combustión latente de las lutitas pirobituminosas uruguayas, tanto a nivel nacional como internacional. Este trabajo ha sido el resultado de una colaboración continua con ANCAP desde 2018, con la participación del Dr. Martin Torres Brunengo en su posgrado, lo que resalta la importancia y la duración de esta colaboración.

Este proyecto ha generado valiosa información que destaca el potencial de las lutitas pirobituminosas uruguayas en el contexto de la combustión latente. Esta tecnología, que se encuentra en crecimiento a nivel mundial para la valorización de residuos y combustibles de bajo poder calorífico, ha demostrado ser prometedora y técnicamente viable para su aplicación en Uruguay. Se han identificado las condiciones que garantizan la autosostenibilidad del proceso una vez iniciado, y se ha comprobado que factores como el tamaño de partícula y la adición de biomasa tienen un impacto positivo en la cantidad de energía generada.

Además, esta investigación ha fortalecido la colaboración con la Universidad de Queensland a través de la pasantía y posdoctorado del Dr. Martin Torres como profesor visitante. Como resultado de esta colaboración, la Universidad de Queensland ha donado dos reactores de combustión latente, junto con sus partes y repuestos, a la Universidad de la República. Esto representa un logro significativo en la consolidación de la línea de investigación de la combustión latente en Uruguay y abre oportunidades para explorar el uso de esta tecnología en otros combustibles, como residuos de biomasa y lodos de plantas de tratamiento de efluentes. De hecho, gracias a esto, una estudiante de posgrado en ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería (Ing. Quím. Agustina Amilivia) puede realizar las actividades experimentales de su maestría en ingeniería química. Esta prevista su defensa para Febrero-Marzo 2024. La Ing. Amilivia trabaja como ingeniería de procesos en CONAPROLE.SA, y evaluó el empleo de la combustión latente como una alternativa para la valorización de lodos de industria láctea. Gracias a esta tesis, el responsable científico (Dr. Torres) postuló un nuevo proyecto al Fondo Vaz Ferreira 2023, el cual aun se encuentra en etapa de evaluación.

Además de los avances científicos, la capacitación del Dr. Torres ha aportado un valioso know-how que permitirá interpretar los resultados de las investigaciones y abordar los desafíos operativos de manera efectiva.

Esta investigación no solo beneficia a nivel académico y científico, sino que también tiene un impacto práctico, ya que ofrece a ANCAP un antecedente importante sobre el uso de este recurso energético, lo que podría contribuir significativamente a la soberanía energética de Uruguay. Este logro demuestra que la investigación en combustión latente es una vía prometedora para abordar desafíos energéticos en el país y ofrece oportunidades de colaboración tanto a nivel nacional como internacional.

Referencias bibliográficas

- [1]-BP(2017).Statistical Review of World Energy.
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.
- [2]-Torres,M. et al(2018)."Assessment of Uruguayan Oil Shales: physicochemical, thermal and morphological characterization".Fuel 234: 347-357.
- [3]-Torres,M., et al(2020)."Co-combustion behaviours of a low calorific Uruguayan Oil Shale with biomass wastes".Fuel 266:117118.
- [4]-J.G.Speight.Shale Oil Production Process.Chapter 1-Origin and Properties of Oil Shale. Elsevier,UK,2012.
- [5]- Colin Snape.Composition, Geochemistry and Conversion of Oil Shales. NATO ASI Series. Serie C.Springer-Science+Business Media, B.V. Turkia, 1993.
- [6]- De Santa Ana,H. et al(2010)."Pirólisis natural in-situ del miembro oleígeno de la Fm. Mangrullo, Cerro Largo y Tacuarembó,Uruguay. ¿Dónde están los hidrocarburos generados?"IV Congreso Uruguayo de Geología.
- [7]- De Santa Ana,H. et al(2009)."Lutitas pirobituminosas del Uruguay: geología, evaluación de reservas y perspectivas de Desarrollo".Resúmenes:Taller de Recursos Energéticos del Uruguay.
- [8]- ANCAP.Evaluación de yacimientos de lutitas pirobituminosas del Uruguay,1981.
- [9]-<http://www.rondauruguay.gub.uy/rondauruguay2/en/VerticalMenu/OTHERRESOURCES/OILSHALES.aspx>
- [10]-J.G.Speight.Shale Oil Production Process.Chapter 2-Oil Shale Resources.Elsevier,UK,2012.
- [11]-J.G.Speight.Shale Oil Production Process.Chapter 4-Mining and Retorting.Elsevier,UK,2012.
- [12]-J.G.Speight.Shale Oil Production Process.Chapter 5-In-situ Retorting.Elsevier,UK,2012.
- [13]-J.G.Speight.Shale Oil Production Process.Chapter 6-Refining Shale Oil.Elsevier,UK,2012.
- [14]-Williams,Paul FV."Oil shales and their analysis".Fuel 62, no.7(1983):756-771.
- [15]- Niu,Mengting et al(2013)."Yield and characteristics of shale oil from the retorting of oil shale and fine oil-shale ash mixtures".Appl.Energy111: 234-239.
- [16]- Yang,Qingchun, et al(2016)."Advanced exergy analysis of an oil shale retorting process".Appl.Energy165:405-415.
- [17]- Luik, Hans, et al(2007)."Parallels between slow pyrolysis of Estonian oil shale and forest biomass residues".J ANAL APPL PYROL 79,no.1-2:205-209.
- [18]- Sun, Youhong, et al(2015)."Kinetic study of Huadian oil shale combustion using a multi-stage parallel reaction model".Energy 82:705-713.
- [19]- Flechsenhar, M. et al(1995)."Solar gasification of biomass using oil shale and coal as candidate materials."Energy 20,no.8:803-810.
- [20]- Kann, J., et al(2013)."ABOUT THE GASIFICATION OF KUKERSITE OIL SHALE".Oil Shale, 30.
- [21] A. Corujo, et al(2010),"Improved yield parameters in catalytic steam gasification of forestry residue; optimizing

biomass feed rate and catalyst type",BIOMASS BIOENERG,34 1695-1702.

[22] L. Wang, C.L. et al(2008),"Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production",BIOMASS BIOENERG,32 573-581.

[23] A. Anukam,S. et al(2016),"Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review",RENEW SUST ENERG REV,66 775-801.

[24]- L. Yermán, et al(2015),"Smouldering combustion as a treatment technology for faeces: Exploring the parameter space".Fuel,147 108-116.

[25]- Wyn, H. K., et al(2020). Self-sustaining smouldering combustion of waste: A review on applications, key parameters and potential resource recovery. Fuel.Process.Technol.,205, 106425.

[26] Chapter 9; Section 2; NFPA HFPE-02; SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition, 2/200-210 p., 2002.

[27] L. Yermán et al(2017), Potential Bio-oil Production from Smouldering Combustion of Faeces, WASTE BIOMASS VALORI, 8 329-338.

[28] L. Yermán,"Self-sustaining Smouldering Combustion as a Waste Treatment Process", Developments in Combustion Technology,DOI: 10.5772/644512016.

[29]-Torres, M., et.al (2019). Pollutant gas emissions during the co-combustion of Oil Shales from Uruguay with biomass wastes. Proceedings.4th MHMT'19.

[30]-Yermán L, et al(2018)."Integration of Time Domain Reflectometry in a smouldering reactor". Chem.Eng.Res.Des.139:34–38.

[31]-Cheng Y-L, et al(2015)."A Household Sanitation Process Based on Integrated Diversion/Dewatering, Drying/Smoldering of Solid Waste, and Pasteurization of Liquid Waste". Third Int. Fecal Sludge Manag. Conf.

[32]-Bore T, et al(2016)."Dielectric spectroscopy of artificial faeces for smouldering applications". In: SAS 2016 - Sensors Applications Symposium, Proceedings

[33]-Yermán L, et al(2016)."Smouldering: a revolutionary approach a sludge dewatering". World Water Congr. Exhib.

[34]-Yermán L, et al(2017)."Experimental investigation on the destruction rates of organic waste with high moisture content by means of self-sustained smoldering combustion". Proc Combust Inst 36

[35]-Zarate S, et al(2017)."Treatment of leafy green waste fibre by means of self-sustaining smouldering combustion". In: Chemeca 2017

[36]-Yermán L, et al(2014)."Smouldering combustion as a treatment for human waste". 5th Int. Symp. Energy from Biomass Waste

[37]-Wyn HK,(2019)."A Novel Approach to the Production of Biochar with Improved Fuel Characteristics from Biomass Waste". Waste and Biomass Valorization. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00909-1>

[38]-Wall H, et al(2015)."Investigation of self-sustaining smouldering of faeces: Key parameters and scaling effects". Dyn equilibrium Sustain Eng Soc Conf (SENG 2015) 113

[39]-T.L. Rashwan, et al(2016), Application of self-sustaining smouldering combustion for the destruction of wastewater biosolids, J.WasteManag.

- [40]-Arizaga, B., et al(2004). "Catalytic gasification applied to Latin American forest debris as an energy source". Ing. Quím, 25 7-14.
- [41]-Arizaga, B., et al(2002). "Use of forest waste in catalytic gasification as source of energy or synthetic gas production". Ing. Quím, 22 (2002): 3-12.
- [42]-Bussi, J. et al. "Catalytic Pyrolysis of Biomass. Eucalyptus Sawdust Gasification". *Chimica e l' Industria*, Vol. 84, págs 1-4.
- [43]-Diano, W., et al(1998). "Dolomita como catalizador para la gasificación de biomasa". *Inform. Tecn*, 9 81-86.
- [44]-Vivó, G., et al(1998). "Diseño Estadístico de Experimentos aplicado a la producción de gases combustibles por Gasificación Catalítica de Cascara de Arroz". *Ing. Quím*, 14 55-61.
- [45]-Terra, S., et al(1997). "Tratamiento de Alquitrán resultante de la Pirólisis Térmica de Madera para producir un gas combustible". *Ing. Quím*, 12 39-44.
- [46]-Torres, M., et al(2019). "Evaluation of the potential utilization of conventional and unconventional biomass wastes resources for energy production." *REPQJL* 17: 511-515.
- [47]-Amaya, A., et al(2015). "Preparation of charcoal pellets from Eucalyptus wood with different binders". *JENR* 4, no. 2: 34.
- [48]-Suárez, A., et al(2010). "Thermal analysis of the combustion of charcoals from Eucalyptus dunnii obtained at different pyrolysis temperatures". *JTAC* 100, no. 3: 1051-1054.
- [49]-Tancredi, N., et al(2010). "Wood Pyrolysis: Influence of Pyrolysis Temperature and Heating Rate on charcoal Properties and Pyrolysis Process". *Chem. Phys.*, 3 2/3 105-116.
- [50]-Ohlemiller TJ(1985). "Modeling of smoldering combustion propagation". *Prog Energy Combust Sci* 11:277-310. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285\(85\)90004-8](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285(85)90004-8)
- [51]-Torero JL, et al(2018). "Using fire to remediate contaminated soils. Undergr Coal Gasif Combust" 601-625. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100313-8.00019-0>
- [52]-Switzer C, et al(2014). "Volumetric scale-up of smoldering remediation of contaminated materials". *J Hazard Mater* 268:51-60. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.053>
- [53]-Switzer C, et al(2009). "Self-sustaining smoldering combustion: A novel remediation process for non-aqueous phase liquids in porous media". *Environ Sci Technol* 43:5871-5877. <https://doi.org/10.1021/es803483s>
- [54]-Pironi P, et al(2009). "Small-scale forward smoldering experiments for remediation of coal tar in inert media." *Proc Combust Inst* 32 II:1957-1964. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.184>
- [55]-MacPhee SL, et al(2012). "A novel method for simulating smoldering propagation and its application to STAR (Self-sustaining Treatment for Active Remediation)". *Environ Model Softw* 31:84-98. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.004>
- [56]-Salman M, et al(2015). "Remediation of trichloroethylene-contaminated soils by star technology using vegetable oil smoldering." *J Hazard Mater* 285:346-355. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.11.042>
- [57]-Scholes GC, et al(2015). "Smoldering Remediation of Coal-Tar-Contaminated Soil: Pilot Field Tests of STAR". *Environ Sci Technol*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03177>
- [58]-Grant GP, et al(2010) Self-Sustaining TREATMENT for ACTIVE REMEDIATION. *Pollut Eng* 42:23-28

[59]-Fabris I, et al(2017)."Continuous, self-sustaining smouldering destruction of simulated faeces". Fuel 190:58–66.

Licenciamiento

Reconocimiento-SinObraDerivada 4.0 Internacional. (CC BY-ND)