



# Proyecto de Pasantía

## Muografía en la Industria Petroquímica

Rafael Martínez (USB),  
Tutores: Christian Sarmiento (UIS), Luis Nuñez (UIS)

30 de agosto de 2022

### Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Muografía</b>	<b>3</b>
2.1. Aplicaciones de la muografía en la industria petroquímica . . . . .	4
<b>3. Objetivos</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivo General . . . . .	5
3.2. Objetivos Específicos . . . . .	5
<b>4. Metodología</b>	<b>5</b>
<b>Referencias</b>	<b>6</b>

### Resumen

Se presenta una breve revisión sobre los rayos cósmicos, la muografía y su estado del arte. Se propone estudiar la implementación de la muografía en la industria Petroquímica, simular una torre de craqueo catalítica en el entorno ARTI, realizar las mediciones de la variación del flujo de muones en una torre de centelladores y contrastar los resultados de las simulaciones con las mediciones realizadas.

## 1. Introducción

En los albores del siglo XX uno de los principales objetivos de la física era explorar experimentalmente todos los tipos de radiación posibles. En esa época, génesis de la teoría cuántica, estaba aún en el proceso de recopilar información sobre como estos "rayos" interactuaban con campos electromagnéticos y con la materia.

La existencia de radiación cósmica no fue evidente, ya en experimentos realizados por Rutherford se evidenciaba alguna radiación de fondo en la superficie terrestre. Discernir si esta provenía de la tierra o del espacio exterior no fue trivial, en 1910 Wulf encontró que esta radiación disminuía en el rango de 330 m, lo permitido por la longitud de la torre Eiffel, mas dicho resultado no daba certeza de la verdadera naturaleza del fenómeno, estas observaciones parecían indicar que el origen de esta radiación era terrestre.

En 1912 el físico austriaco Victor Hess[1] por medio de globos aerostáticos de gran altitud logra llegar hasta los 5000 m de altura, las mediciones mostraban que la radiación efectivamente disminuía hasta el rango de 1500 m, posterior a este rango la radiación aumentaba hasta alcanzar una proporción de 16 veces a la de la superficie. Esta observación indicaba concluyentemente que existía radiación proveniente del espacio exterior.

Mas tarde, se descubrió que la gran parte de esta radiación era un flujo secundario generado por la interacción de la atmósfera con un flujo primario de partículas muy energéticas. Estos llamados rayos primarios consisten principalmente en protones y núcleos atómicos, mientras que los rayos o radiación secundaria se encuentra dominada por la presencia de muones, electrones y fotones.

Las partículas secundarias, son conocidas como Extensive Air Shower (EAS, por sus siglas en ingles), se producen en la atmósfera dando lugar a una cascada de partículas que se caracterizan en la componente hadronica (bariones y mesones), la componente electromagnética ( $e^-$ ,  $e^+$  y  $\gamma$ ) y la componente muonica ( $\mu^-$  y  $\mu^+$ ). Esta ultima es de nuestro especial interés ya que los muones poseen la energía suficiente para atravesar cientos de metros de roca. De este importante hecho, nace la muografía, una técnica usada para reproducir imágenes de cuerpos de grandes dimensiones.

Los muones son partículas de la familia de los leptones descubiertos en 1936 por Carl Anderson y S. Neddermeyer mientras estudiaban los rayos cósmicos. Estas partículas se encuentran en las EAS mediante el decaimiento del mesón  $K^+$ , el cual su modo principal de decaimiento es  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  (Branching Ratio 63%). El muón posee una carga eléctrica igual a la del electrón y su masa es aproximadamente 200 veces mayor, en la tabla 1 se encuentra listado los valores de su masa, vida media, espín y carga.

Tabla 1: Características del Muón, datos tomados de [2].

Propiedad	Símbolo	Valor
Masa	$m_\mu$	$(105,6583745 \pm 0,0000024)MeV$
Vida media	$\tau_\mu$	$(2,1969811 \pm 0,0000022)\mu s$
Spin	$s_\mu$	1/2
Carga	$q_\mu$	$e^*$

\* Carga del electrón.

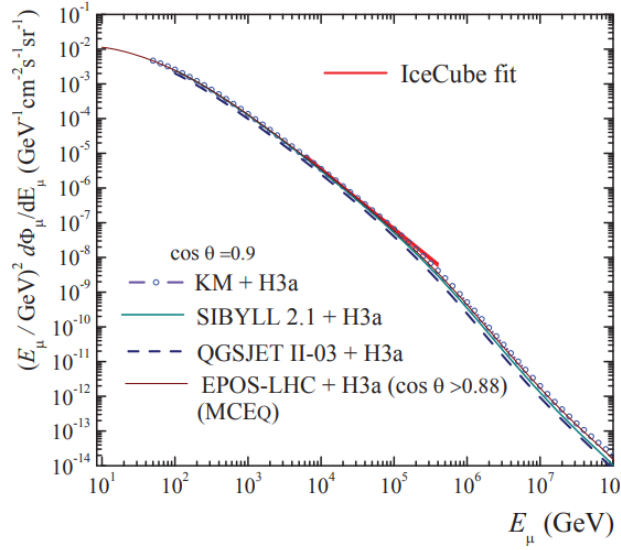


Figura 1: Espectro de muones y fit hecho por la colaboración IceCube [3]

En la figura 1 se muestra el espectro del flujo de muones, donde se observa un comportamiento similar al comportamiento conocido de los rayos cósmicos.

En virtud de la estadística y buscando la mayor homogeneidad posible en nuestro trabajo se debe considerar una cota inferior para el rango de energías a considerar, este rango dependerá de la estructura de interés.

## 2. Muografía

Desde el descubrimiento de los muones se han buscado formas de involucrarlos en diversas aplicaciones tecnológicas[4].

El primer estudio con estas intenciones fue desarrollado en 1955 [5], donde con un contador Geiger logró medir las variaciones de la densidad de la roca por encima del tunnel Guthega-Munyang, parte del complejo hidroelectrico Guthega. En dicho estudio se logró contrastar las mediciones obtenidas con muestras física tomadas directamente de la montaña, sin embargo por la escasa resolución angular de las medidas no se podía reconstruir una imagen.

El siguiente paso fue dado en 1970, Alvarez et al. [6], donde se instalaron detectores centelladores en la cámara de Belzoni en la Piramide de Chephren con la finalidad de buscar cámaras ocultas. Las mediciones tenían mayor resolución angular debido al proceso de rastreo "tracking" involucrado, además dichas mediciones se compararon con una simulación computacional. De este trabajo resultó la primera imagen creada por medio de muografía; la misma era un arreglo matricial con la cantidad de eventos registrados por el detector, esto junto a las simulaciones permitió indicar que no existían

cámaras ocultas en dicha pirámide.

En la actualidad la muografía se describe como la creación de imágenes por medio de muones cósmicos, los mismos en su devenir interactúan con un medio o estructura física de interés. Según la densidad del objeto se modula el flujo de muones que posteriormente será medido por uno o varios detectores, los cuales indicarán el flujo angular, el cual permitirá la reconstrucción de la imagen.

Hoy en día las aplicaciones de la muografía se han desarrollado y diversificado, experiencias como las señaladas anteriormente se extendieron a otras disciplinas y se mejoró la resolución.

Uno de los campos más enriquecido con la muografía fue el de los estudios geofísicos, llegando a ser usado para estudiar volcanes [7] [8] [9], a su vez la muografía se ha empleado para la exploración de superficies en la minería [10] para el estudio de propiedades geofísicas del subsuelo, como reservorios de gas y formación de depósitos minerales [11]. En el contexto de la ingeniería civil y arqueología se ha utilizado esta técnica para estudiar las estructuras subterráneas [12].

Otra vertiente de la aplicación industrial de la muografía fue su empleo en la caracterización de desperdicios nucleares [13], además se han hecho simulaciones donde se evidencia la posibilidad de la implementación de la muografía en el estudio de la distribución espacial del núcleo de reactores nucleares [14].

## 2.1. Aplicaciones de la muografía en la industria petroquímica

El Craqueo se describe como el proceso químico de la ruptura de una molécula pesada en componentes más ligeros. Este proceso es la columna vertebral de la industria petroquímica permitiendo el refinamiento del petróleo en productos de necesidad central en nuestra sociedad actual.

Originalmente las temperaturas necesarias para llevar a cabo este proceso estaban por encima de los 800°C, sin embargo con la implementación de catalizadores se pueden descender dichas temperaturas a unos 450 – 500°C.

La mayor parte de todo el proceso de Craqueo se realiza en las llamadas Torres de Craqueo, estas generalmente presentan una estructura vertical con tuberías y filtros internos. Con el uso y el tiempo estas tuberías y filtros aumentan su densidad, esto producto de la acumulación de sedimentos del proceso. Estas obstrucciones disminuyen la eficiencia del proceso logrando que eventualmente deba detenerse la producción para remover estos sedimentos.

En la actualidad la industria petroquímica carece de herramientas que le permitan monitorear continuamente esta acumulación de sedimento. Por ende en este proyecto proponemos estudiar la viabilidad y resolución de la aplicación de la muografía en una torre de craqueo catalítico para monitorear variaciones de densidades.

### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo General

- Determinar la resolución de la imagen muográfica de una torre de craqueo catalítico para la detección de variación de densidad.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Simular la variación del flujo de Muones que pasan por una torre de craqueo catalítico para diferentes densidades en los filtros y diferentes áreas de detectores.
- Medir la variación del flujo de Muones en una torre de centelladores con los detectores de la Universidad Industrial de Santander.
- Contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones y las mediciones realizadas.

### 4. Metodología

En primer lugar se realizará la simulación de centelladores, su interacción con los rayos cósmicos y la respuestas de los detectores. Esta simulación se realizará en el entorno de ARTI, el cual es un conjunto de códigos y scripts en diferentes lenguajes de programación. ARTI es un recurso elaborado por la colaboración LAGO[15].

En la simulaciones se reproducirá las respuestas de los detectores para diferentes densidades en los filtros de la torre, a su vez este proceso se repetirá para detectores de distintas áreas, de forma que se pueda estudiar la relación óptima entre el área y la resolución.

Posteriormente procederá a realizarse las mediciones con los detectores de la Universidad Industrial de Santander. Los mismos se dispondrán en una torre de craqueo catalítico para realizar las mediciones de flujo de muones.

Por último se contrastarán las simulaciones junto a las medidas para estudiar y evaluar la resolución de la señal y la vialidad de dicha experiencia como método de estudio de densidades en una torre de craqueo catalítico.

## Referencias

- [1] H. VF., “ber den ursprung der durchdringenden strahlung.” 1913. [Online]. Available: [Phys.Z14,610](#)
- [2] P. Zyla *et al.*, “Review of Particle Physics,” *PTEP*, vol. 2020, no. 8, p. 083C01, 2020, and 2021 update.
- [3] A. Kochanov *et al.*, “J. phys.: Conf. ser. 1181 012054,” 2019.
- [4] R. Kaiser, “Muography: overview and future directions.phil. trans. r. soc. a 377: 20180049.” 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0049>
- [5] A. C. Neddermeyer SH, “Note on the nature of cosmic ray particles. phys. rev. 51, 884.” 1937. [Online]. Available: [doi:10.1103/PhysRev.51.884](https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.884)
- [6] L. . Alvarez *et al.*, “Search for hidden chambers in the pyramids. sci. new series. 167, 832–839.” 1970.
- [7] R. D’Alessandro *et al.*, “Volcanoes in italy and the role of muon radiography. phil. trans. r. soc. a 377, 20180050.” 2019. [Online]. Available: [doi:10.1098/rsta.2018.0050](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0050)
- [8] T. Olah *et al.*, “Investigation of the limits of high definition muography for observation of mt sakurajima. phil. trans. r. soc. a 377, 20180135.” 2019. [Online]. Available: [doi:10.1098/rsta.2018.0135](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0135)
- [9] H. Tanaka *et al.*, “Japanese volcanoes visualized with muography. phil. trans. r. soc. a 377, 20180142.” 2019. [Online]. Available: [doi:10.1098/rsta.2018.0142](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0142)
- [10] D. Schouten *et al.*, “Muon geotomography: selected case studies. phil. trans. r. soc. a 377, 20180061.” 2019. [Online]. Available: [doi:10.1098/rsta.2018.0061](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0061)
- [11] A. Bonneville *et al.*, “Borehole muography of subsurface reservoirs. phil. trans. r. soc. a 377, 20180060.” 2019. [Online]. Available: [doi:10.1098/rsta.2018.0060](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0060)
- [12] G. Saracino *et al.*, “Applications of muon absorption radiography to the fields of archaeology and civil engineering. phil. trans. r. soc. a 377, 20180057.” 2019. [Online]. Available: [doi:10.1098/rsta.2018.0057](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0057)
- [13] D. Mahon *et al.*, “First-of-a-kindmuography for nuclear waste characterization.phil.trans.r.soc.a377: 20180048.” 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0048>
- [14] H. Miyadera *et al.*, “imaging fukushima daiichi reactors with muons”, aip advances 3, 052133,” 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4808210>
- [15] C. Sarmiento-Cano *et al.*, “The arti framework: Cosmic rays atmospheric background simulations,” 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.14591>