



GEOPHYSICAL METHODS APPLIED TO THE ACTIVE CELLS AND CLOSED OF THE SANITARY FILLING "LA CORTADA" (NORTH OF SANTANDER)

METODOS GEOFISICOS APLICADOS A LA DE CELDAS ACTIVAS Y CLAUSURADAS DEL RELLENO SANITARIO "LA CORTADA" (NORTE DE SANTANDER)

Torres, J. A.* , Cantillo, J. R. , Contreras, M. A***.**

***Jairo Alberto Torres Peña**, físico consultor en Geofísica y director del Grupo de Investigación e Innovación en Geociencias e Ingeniería, Hydroingeniería S.A.S - Geología y Servicios LTDA. (GYS LTDA.). e-mail: jatorresp@gmail.com.

****Janer Rafael Cantillo Romero**, geólogo consultor en Geofísica e investigador del Grupo de Investigación e Innovación en Geociencias e Ingeniería, Hydroingeniería S.A.S - Geología y Servicios LTDA. (GYS LTDA.). e-mail: jrcantillo93@gmail.com.

*** **Manuel Antonio Contreras**, Docente del Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona. Grupo de Investigación en Ingeniería Civil (ETENOHA). e-mail: macontreras7@hotmail.com.

Universidad de Pamplona

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 140

E-mail: {jacipt, amunozm}@unipamplona.edu.co

Abstract This paper presents an application of some non-invasive geophysical techniques for the characterization of the regional sanitary landfill "La Cortada", which is located 5 km from the Municipality of Pamplona, in the sidewalk La Chichira district (Norte de Santander). The geophysical methods applied in this study were; Seismic Refraction Tomography (SRT) and Electrical Resistivity Tomography (ERT). From these techniques can be determined some properties such as electrical resistivity and seismic velocity type P. The objective of this study was to identify or delimit the geometry of the landfill specifically of the contact zone between the waste materials and the fresh rock. Data were acquired for 5 lines of SRT and 5 lines of ERT in active and closed areas of the sanitary landfill. This work covered stages of design, acquisition, processing and interpretation of these geophysical data. Through the analysis of the results in this work, electrical resistivity anomalies were obtained in sectors of the active and closed zones that may be associated with the accumulation of pollutants. A range of P wave seismic velocities for the solid waste and fresh rock. Finally, it was proved that these techniques are useful in the characterization of this type of deposits, evidencing contrasts between the physical properties

Keywords: seismic, electrical resistivity, seismic velocity, solid waste.





Resumen: En este trabajo se presenta una aplicación de algunas técnicas geofísicas no invasivas para la caracterización del relleno sanitario regional “La Cortada”, el cual se encuentra ubicado a 5 km del Municipio de Pamplona, en la Vereda la Chichira (Norte de Santander). Los métodos geofísicos aplicados en este estudio fueron; la Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) y la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). A partir de estas técnicas se pueden determinar algunas propiedades como la resistividad eléctrica y la velocidad sísmica tipo P. El objetivo de este estudio fue identificar o delimitar la geometría del relleno sanitario específicamente de la zona de contacto entre los materiales de desecho y la roca fresca. Se adquirieron datos para 5 líneas de TRS, y 5 líneas de TRE en zonas activas y clausuradas del relleno sanitario. Este trabajo abarcó etapas de diseño, adquisición, procesamiento e interpretación de estos datos geofísicos. A través del análisis de los resultados en este trabajo, se obtuvieron anomalías de la resistividad eléctrica en sectores de las zonas activas y clausuradas que pueden estar asociadas a acumulación de contaminantes, también se obtuvo un rango de velocidades sísmicas de ondas P para los residuos sólidos y de la roca fresca. Finalmente, se comprobó que estas técnicas son útiles en la caracterización de este tipo de depósitos logrando evidenciar contrastes entre las propiedades físicas..

1. INTRODUCCIÓN

Los impactos negativos desde el punto de vista ambiental que pueden causar algunos depósitos, botaderos o rellenos sanitarios pueden ser altos si no se tiene un control e inspección de estos. Estos tipos de depósitos producen fluidos contaminantes que se generan por la descomposición de la materia orgánica y estos pueden infiltrarse y alcanzar fuentes hídricas como ríos o aguas subterráneas y de esta manera contaminarlas.

La acumulación de gases al interior de las celdas en estos tipos de depósitos puede generar explosiones que pueden generar colapso o deslizamiento. Además, la integridad de la geomembrana es de mucho interés ya que un deterioro de esta puede causar problemas graves en estos tipos de lugares. Algunas técnicas geofísicas pueden ayudar a encontrar zonas de acumulación de contaminantes como los métodos geoeléctricos tales como los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) y la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), además métodos como la Refracción

Sísmica puede ayudar a delimitar la zona de contacto entre los residuos sólidos y la roca que se encuentra por debajo de los mismos. Autores como Pomposiello, C. Favetto, A. y Ostera, H. (2004) aplicaron técnicas de resistividad y GPR en donde evidenciaron plumas de contaminación en un basurero municipal de la ciudad de Gualagaychu en Argentina, posteriormente en ese mismo botadero se aplicaron Tomografías de Resistividad Eléctrica según Pomposiello, C. Dapeña, C. Boujon, P. y Favetto, A. (2009). Así mismo en Mexicaltzingo, México tuvo lugar un estudio a un relleno sanitario con el objetivo determinar el movimiento de los lixiviados al igual que el flujo de aguas subterráneas, el relleno sanitario “Río Azul” (Reyes, L. Vázquez, M. Pedroza, S. Gómez, G. y Macedo, M., 2013). También en Costa Rica fue objeto de estudio geofísico nuevamente aplicando métodos geoeléctricos y evidenciando la efectividad de este tipo de estudios en la ubicación de líquidos en estos casos lixiviados con el fin de controlar la contaminación generada por los rellenos (Suarez y Zuñiga, 2013). En Colombia Herrera y Avendaño (2017) realizaron un estudio geoeléctrico en el relleno sanitario “Carapacho” en





Chiquinquirá, Boyacá; con el objetivo de detectar las infiltraciones de lixiviados con ayuda de sondeos eléctricos verticales. También empresas privadas de ingeniería y geofísica han realizado estudios de Tomografías de Resistividad Eléctrica y Sondeos Electromagnéticos en el Relleno Sanitario “ El Carrasco” en Bucaramanga (Hydroingeniería S.A.S., 2016: Geología y Servicios Ltda, 2017) y en el Relleno Sanitario “La Don Juana” (Alicon Ingeniería S.A.S., 2017). Además de estos estudios en el caso local del Relleno Sanitario “La Cortada” Hinojosa (2017) y Mancilla (2017) aplicaron métodos eléctricos y métodos de refracción sísmica como TRS y MASW.

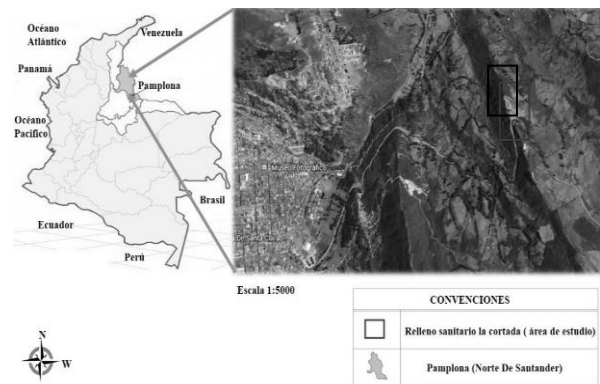
2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en esta investigación comprendió varias etapas desde una visita de verificación de los sitios donde se realizarían las líneas, toma de datos de elevaciones (topografía) pasando por la adquisición de los datos geofísicos, el procesamiento y la interpretación de los resultados.

Localización Geográfica y Geología del Área.

La zona de estudio se llevó a cabo en el relleno sanitario regional “La Cortada” ubicado en la vereda Chichira, al costado Nororiental de la vía Pamplona-Chitagá a la altura del kilómetro 3,5 como se señala en la Imagen 1. Las coordenadas de su ubicación son 1.166.400 E y 1.306.600 N (sistemas de coordenadas MAGNA, origen central), a una altura promedio de 2370 m.s.n.m. La zona de estudio abarca un área de aproximadamente 132.000 m².

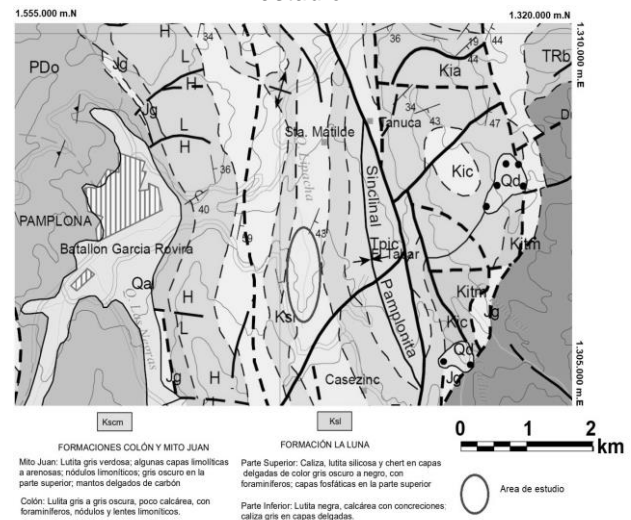
Imagen 1. Localización geográfica del área de estudio, El relleno sanitario regional “La Cortada”.



Fuente: Google Earth (2017).

En base al cuadrángulo H13 obtenido de Ingeominas (Ingeominas, 1977), el municipio de Pamplona, partiendo de un análisis geológico estructural, se encuentra ubicado en el flanco norte del macizo de Santander de la Cordillera Oriental en el sistema de falla Chitagá-Pamplona, (ver Imagen 2), además la zona de estudio está presente las formaciones geológicas Colón y Mito Juan (Kscm), y La Luna (Ksl).

Imagen 2. Descripción geológica del área de estudio.



Fuente: Ingeominas (1977)

El municipio de Pamplona se encuentra ubicado en el bloque occidental, donde



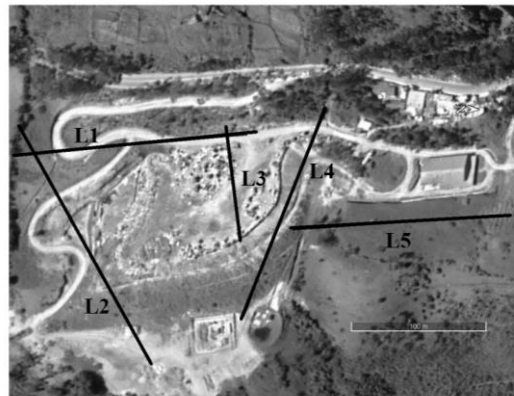


predominan las rocas sedimentarias de edad cretácica (Paris et al., 2000). A su vez el sistema de falla Chitagá-Pamplona, se extiende de forma paralela a la falla de Morronegro en cercanías a los municipios de Bochalema y Don Juana. Sitúa en contacto rocas Precámbricas y Jurásicas al este con rocas del Cretáceo y Terciario al oeste. Esta falla podría ser una extensión de la falla de Boconó en Venezuela. Su sentido de movimiento es sinistral (izquierda-lateral) y el trazo es marcado por escarpes prominentes continuos, cambios abruptos en la pendiente en ambos lados de la falla y alineación de cuchillas (Ingeominas, 1977). La Formación Colon y Mito Juan (Kscm), se encuentra constituida principalmente de limolitas y areniscas de grano muy fino (Notestein et al, 1944). La Formación La Luna (Ksl) en la parte superior predominan rocas calcáreas compuestas por calizas y lutitas silicatadas muy fracturadas y meteorizadas (Ingeominas, 1977).

Levantamiento Topográfico y Adquisición de datos Geofísicos.

Para el levantamiento topográfico de las líneas se usó un equipo de estación total marca GEOMAX modelo 30-2 A6 (Geomax, 2013), a partir de este equipo se obtuvo las elevaciones (cotas de elevación de las líneas). Se realizaron un total de 5 líneas, L1 localizada en la vía de acceso al Relleno Sanitario, L2 y L4 ubicadas en los límites del Relleno activo que involucra suelo natural y residuos, L3 ubicado en la zona activa y L5 en una de las zonas ya clausuradas (ver Imagen 3)

Imagen 3. Localización de las 5 líneas adquiridas, L1 en la vía de acceso, L2 y L4 comprenden suelo natural y relleno de las celdas activas, L3 en el área activa y L5 en la zona clausurada del Relleno Sanitario “La Cortada”.



Fuente: Google Earth (2018).

Para adquirir las líneas de TRS y MASW se usó un sismógrafo SeisMex 16 equipo hecho por la empresa colombiana Subsuelo 3D (Subsuelo3d, 2017), se usó geófonos de 10 Hz, la fuente sísmica usada es una almádana de 16 lb, la longitud de las líneas de TRS y la separación entre los geófonos se muestran en la Tabla 1. En el caso de los ensayos de MASW todas las líneas tuvieron una longitud en la horizontal de 30 metros con separación entre geófonos de 2 m. El número de puntos de disparo para los ensayos de Refracción fue de 5 distribuidos a lo largo de la línea y en el caso del método MASW se golpeó a tres distancias distintas, 10%, 20% y 40% de la longitud del tendido. En la Imagen 4 se puede observar los componentes básicos de un ensayo de refracción sísmica.

Tabla 1. Parámetros de Adquisición de los Datos mediante el método de TRS y MASW en la zona de estudio.

Número de la Línea	Longitud TRS	Separación entre Geófonos
L1	120 m	8 m
L2	180 m	6 m
L3	120	1.5 m
L4	120 m	8 m
L5	230 m	10 m

Fuente. Autores





Imagen 4. Ejemplo de un ensayo de Refracción Sísmica sobre la Línea L1.



Fuente: Autores

Para la toma de los datos mediante el método TRE se utilizó un Terrameter LS (Abem, 2017), los parámetros de adquisición usados para todas las líneas de exploración Geoeléctrica están descritos en la Tabla 2, el tipo de arreglo usado en este ensayo fue tipo Gradiente, el número de mediciones realizadas fue de 512 para cada línea, se usaron electrodos de acero inoxidable los cuales se enterraron en el terreno aproximadamente un 40% de su longitud.

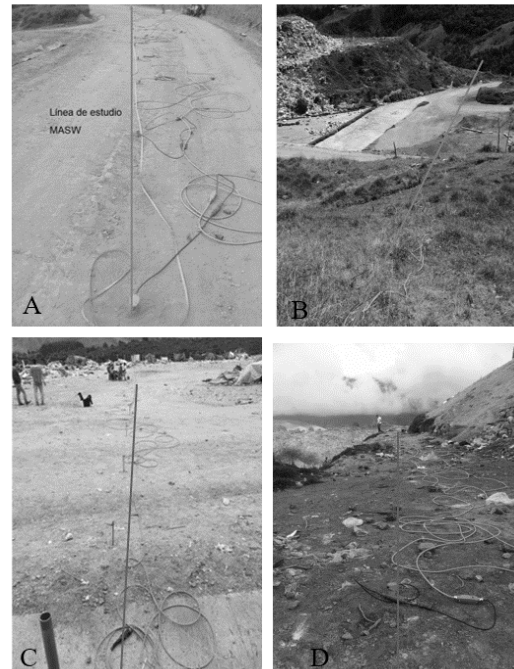
Tabla 2. Parámetros de Adquisición de los Datos mediante el método de TRE en la zona de estudio.

Número de la Línea	Longitud	Separación entre Electroodos
L1	160 m	4m
L2	180 m	4.5 m
L3	70 m	1.5 m
L4	160 m	4 m
L5	240 m	6 m

La puesta en marcha de los levantamientos geofísicos se puede observar para la línea L1 (Vía de Acceso al Relleno) en la imagen 5A. Para la línea L2 se muestra en la Imagen 5B. Para la línea L3 ver Imagen 5C y la Línea L4 se observa en la Imagen 5D (ver Imagen 5). La línea L5 fue realizada en la zona clausurada del Relleno Sanitario (ver Imagen 6)

Imagen 5. A) Línea L1 sobre la vía de acceso al Relleno Sanitario, B) Línea 2 que cubre Suelo

Natural y Relleno, C) Línea 3 en la celda activa del Relleno y D) Línea 4 ubicada también en zona activa.



Fuente: Autores

Imagen 6. Ejemplo de un ensayo de MASW sobre la Línea L5 (zona clausurada).



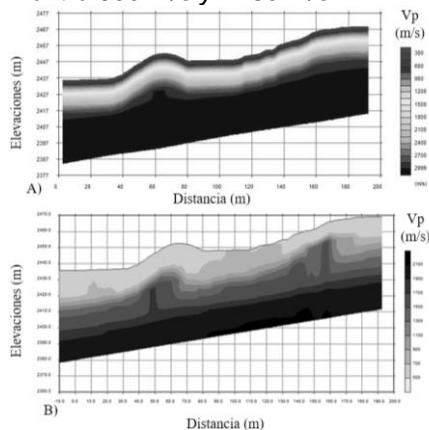
Fuente: Autores

Procesamiento de los Datos Geofísicos



Después de adquirir los datos geofísicos se procedió a procesar la información, en cuanto al software usado para procesar TRS y MASW se usó el software SeisImager /2D Versión 3.0 (SeisImager, 2009), y en el tratamiento de los datos de TRES la licencia fue del software Res2div (Geotomo, 2015). El análisis de los datos para el caso del método de TRS es basado en cuatro pasos: 1) se procede a picar los primeros arribos asociados a las refracciones críticas de las ondas que registran los geófonos, 2) se obtiene una curva de tiempo vs distancia de todos los puntos de disparo y 3) se aplica la inversión de mínimos cuadrados para obtener un modelo preliminar del subsuelo y 4) se aplica una inversión tomográfica para obtener un modelo más aproximado. Según lo anterior se muestra el modelo inicial de 10 capas propuesto para la línea L2 cuyas velocidades sísmicas iniciales entran se encuentran entre 300 m/s a 3000 m/s (ver Figura 1A) y mediante la inversión por tomografía se obtuvo el modelo final encontrando velocidades sísmicas de onda P entre 500 m/s hasta 2150 m/s. El error en el procesamiento para esta línea se encontró menor a 1.82 ms (valor aceptable según la técnica usada).

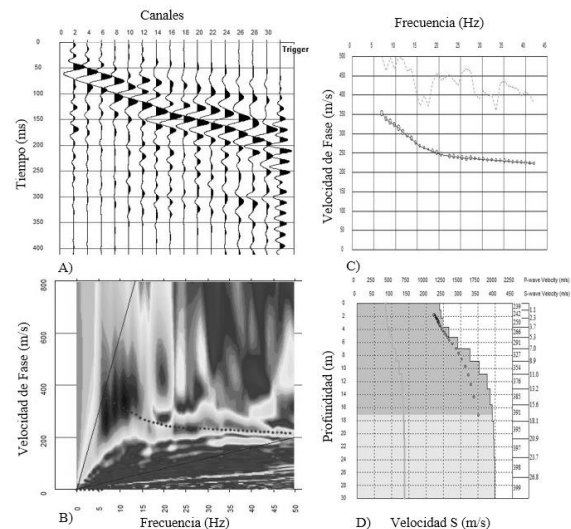
Figura 1 A) Modelo inicial propuesto para la línea L2 de TRS velocidades de onda P entre 300 y 3000 m/s y B) Modelo Final producto de la Tomografía resultando valores de velocidad de onda P entre 500 m/s y 2250 m/s.



En el caso del ensayo MASW el objetivo es obtener un perfil de velocidad de onda S

(Vs) a partir de la inversión de una curva de dispersión del modo fundamental de la onda de Rayleigh. Las etapas en este análisis después de obtener los datos en el dominio del disparo (x, t) se usa la transformada rápida de Fourier para convertirlos al dominio de la frecuencia y la velocidad de fase (v_f, w). Cuando se tiene el dato en este nuevo dominio se realiza el picado del modo fundamental (en donde la amplitud sea la mayor) y se determina la curva de dispersión. Posterior a esto se propone un modelo inicial y se genera un dato calculado o dato sintético, se procede a realizar una inversión tomográfica y se compara el dato observado y calculado hasta obtener un error mínimo (alrededor de 5%) y de esta manera se obtiene un modelo final (un perfil 1D) de la variación de la velocidad de onda S en profundidad. El análisis mencionado anteriormente se puede ver en la Figura 2 para la línea L2. Las velocidades sísmicas de onda S obtenidas se encontraron en el rango de 240 m/s a 400 m/s, cabe aclarar que este ensayo se realizó en el centro de la línea de TRS y alcanzó una profundidad cercana a los 16 metros.

Figura 2. Flujo de Procesamiento de MASW en la línea L2 A) Datos en el Dominio (x, t) B) Dato en el dominio de Fourier C) Curva de Dispersión del modo Fundamental y D) Perfil de Onda S.



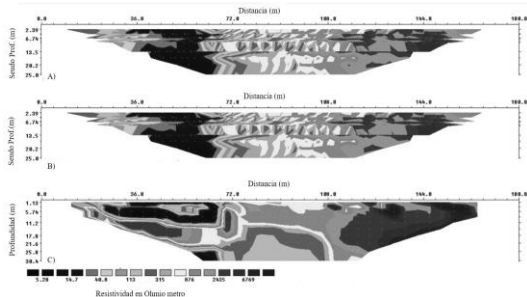
Fuente: Autores





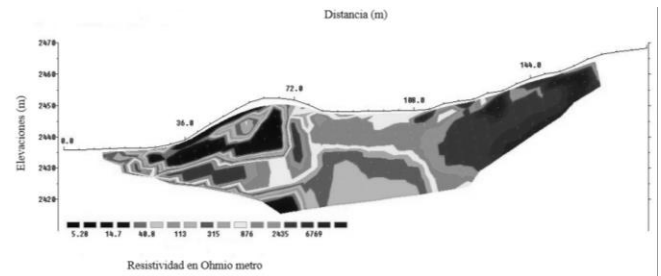
Finalmente, en el tratamiento para los datos de Tomografía de Resistividad se procede de la siguiente forma: 1) Se realiza un cálculo de las resistividades aparentes proponiendo también un modelo, 2) realizamos una primera inversión de las resistividades aparentes medidas en campo, 3) se comparan los datos observados con los calculados hasta que error sea mínimo (esto hace que el modelo sea aceptable), y finalmente obtener un modelo 2D de la variación de la resistividad eléctrica en profundidad y en la horizontal. Podemos ver este análisis para la línea L2 en la Figura 3. La pseudo sección de resistividades aparentes medidas (tomadas en campo) se observan en un modelo con una pseudo-profundidad (0-25 m) (Ver Figura 3A), una pseudo-sección de resistividades aparentes calculadas (Ver Figura 3B) y finalmente un modelo de resistividades reales invertidas (Ver Figura 3C) obteniéndose un rango entre 5.28 Ωm a 6769 Ωm . y una profundidad máxima de 30.4 metros (que se logra en el centro del tendido). En este caso la línea L2 tenía una extensión de 180 m con separación de electrodos de 4.5 m (Ver Tabla 2). En este caso el método alcanza una profundidad equivalente a 17% del tendido en superficie y el error en la inversión fue de 3.7% (un error óptimo). En esta etapa del análisis de los resultados para el caso de la línea L2 se observa la imagen final con topografía (Ver Figura 4)

Figura 3. Procesamiento de la TRE para la línea L2 A) Pseudo-sección de resistividad aparente medida B) Pseudo-sección de resistividad aparente calculada y C) sección de resistividades reales final.



Fuente: Autores

Figura 4. Sección de resistividades reales obtenida para la L2 incluyendo topografía.



Fuente: Autores.

Resultados

Después de procesar toda la información adquirida mediante las técnicas geofísicas (TRS, MASW y TRE) los valores obtenidos de los parámetros para todas las líneas de velocidad sísmica P (V_P), velocidad S (V_S) y resistividad eléctrica (ρ) se muestran en la Tabla 3. En relación a la profundidad de investigación alcanzada en cada ensayo, esta se muestra en la Tabla 4. Cabe aclarar que esta profundidad es medida en el centro de cada línea. La máxima profundidad obtenida para la TRS fue para la línea L2 (39.67 m), en el caso del ensayo MASW esta se obtuvo para la línea L5 (18 m) y en el caso del método TRE también fue en la línea L5 en donde se alcanzó una profundidad de 40.5 metros.

Tabla 3. Rango de valores obtenidos para todas las líneas en la zona de estudio.

Línea	V_P (m/s)	V_S (m/s)	ρ (Ωm)
L1	804-3000	200-650	119-8548
L2	518-2062	239-39	5.28-6769
L3	200-384	60-75	10.1-1114
L4	793-1608	177-266	6.9-7310
L5	407-711	177-300	10.2-3613

Fuente: Autores.





Tabla 4. Profundidad alcanzada para cada ensayo en todas las líneas en la zona de estudio.

Línea	Z _{MAX} TRS	Z _{MAX} MASW	Z _{MAX} TRE
L1	32.57 m	15 m	26.2 m
L2	39.67 m	17 m	30.4 m
L3	22.0 m	12.5 m	11.8 m
L4	23.5 m	14.5 m	27 m
L5	27 m	18 m	40.5 m

Fuente: Autores.

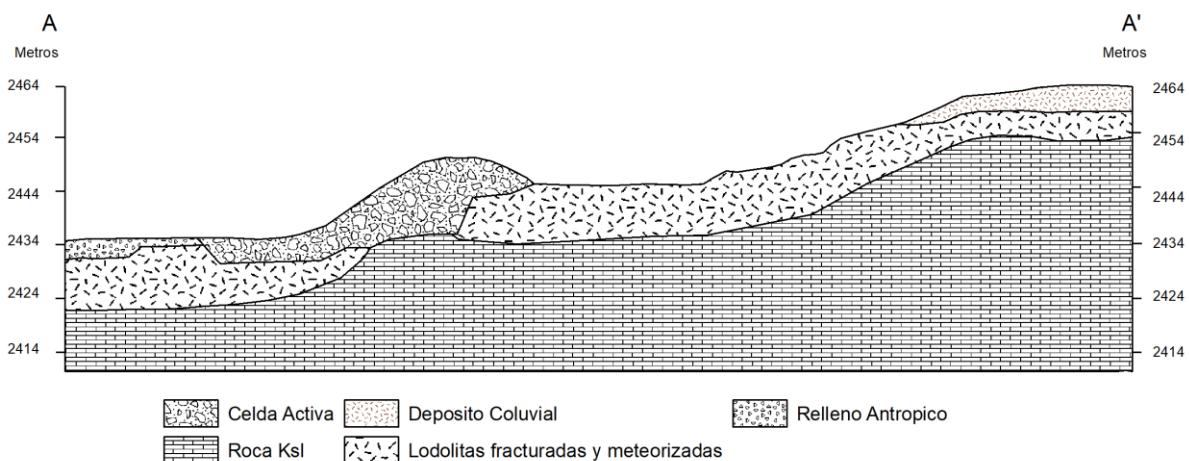
Integración de Datos y Generación de Modelos Finales.

A continuación, se muestran los modelos finales mediante la integración y correlación de los tres ensayos ejecutados. Para la línea L1 no se entregará modelo debido a que esta línea fue ejecutada en la vía de acceso a la vía y de esta manera no atraviesa el relleno sanitario ni en la zona activa ni en la zona clausurada.

Para la línea L2 se construyó un modelo que se muestra en la Figura 11. En donde

se logró identificar e interpretar 5 zonas, la primera, una capa superficial que fue identificada como un depósito coluvial con un espesor entre 1.5 y 6 m, una segunda zona que se encuentra debajo del depósito coluvial en la parte superior de la línea y ocupa gran parte del modelo son lutitas fracturadas y con alta meteorización con un espesor entre 6 a 14 metros, una zona asociada a la celda activa que pertenece a residuos compactados con un espesor entre 6 a 20 metros, hacia la parte final de la línea una zona donde se evidencio un relleno antrópico compacto con un espesor entre 0.5 a 2.5 metros. Y finalmente una última zona que corresponde a la roca base que se encuentra mas profunda y debajo de los materiales ya mencionados y que se asocio a rocas de la Formación la Luna (Ksl). Los parámetros geofísicos para cada uno de los materiales en el modelo de la línea L2 se describen en la Tabla 5.

Figura 5. Modelo final resultado de la integración de los datos geofísicos para la línea L2 incluyendo la topografía, en donde se evidencio 5 zonas, una zona de un depósito coluvial, los residuos sólidos (celda), la presencia de un relleno antrópico, una capa de las rocas lodolitas fracturadas y meteorizadas y finalmente la base del relleno rocas que pertenecen a la formación la Luna (Ksl).

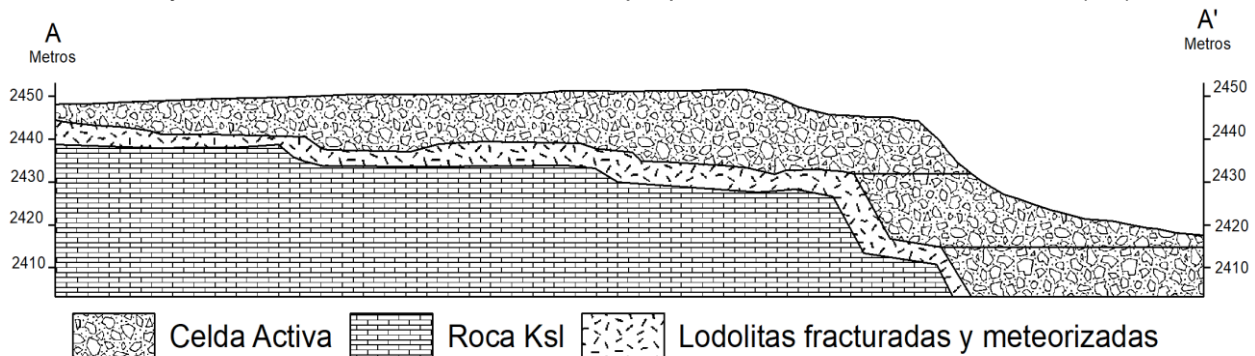


Fuente: Autores.





Figura 6. Modelo final obtenido a partir de la TRS y la TRE para la línea L1 incluyendo la topografía, en donde se evidencia, los residuos sólidos (celda), una capa de las rocas lodolitas fracturadas y meteorizadas y finalmente la base del relleno rocas que pertenecen a la formación la Luna (Ksl).



Fuente: Autores.

3. CONCLUSIONES

Los métodos geofísicos aplicados para la caracterización de rellenos sanitarios resultaron exitosos debido al contraste entre las propiedades geofísicas como la velocidad sísmica y la resistividad. El rango de valores de la resistividad eléctrica obtenida para los residuos sólidos encontrada fue de 12 a 50 Ωm y para los residuos sólidos con mayor saturación de lixiviados fue de 4 a 11 Ωm que pueden interpretarse como anomalías de baja resistividad. Las velocidades sísmicas tipo P para los residuos sólidos se encontró entre 233-890 m/s.

En la zona clausurada el espesor de la capa de material de relleno fue de 14 hasta 32 metros de profundidad y en la zona activa se encontró entre 7,40 hasta 20,90 metros de profundidad.

La presencia de lixiviados en los residuos sólidos generó una disminución de la resistividad eléctrica.

La disminución de velocidad de onda S en zonas intermedias, permitió establecer posibles zonas de material saturado por lixiviados o infiltración de aguas superficiales.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los estudiantes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Pamplona que participaron en el II y III Diplomado de Geofísica y Geotecnia Aplicada a la Ingeniería Civil durante el año 2017, por su apoyo en la adquisición y procesamiento de las líneas adquiridas. A la profesora Ana Ramírez, directora del Grupo de Investigación en Conectividad y Procesado (CPS) por facilitar el sismógrafo SEISMEX 16 de propiedad de la Universidad Industrial de Santander. Al profesor Diego Alberto Gutiérrez del Grupo de Geofísica y Ciencias de la Computación (GGC3) del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (ITM) por proporcionar el equipo de adquisición Geoeléctrica TERRAMETER LS. Al Programa RC. 0266 de 2013 cofinanciado por COLCIENCIAS y ECOPETROL por su apoyo financiero. Finalmente agradecemos a Ingenieros Civiles Hernán Ramiro Mancilla y Yarnier Hinojosa por el desarrollo de su Trabajo de Investigación en el Relleno Sanitario. Al PhD. Diego Iván Capacho por sus aportes en la realización de esta investigación.





5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pomposiello, C. Favetto, A. y Osters, H. (2004). Resistivity imaging and ground penetrating radar survey at Gualaguaychú landfill, Ríos province, Argentina: Evidences of contamination plume. *Revista Latino-Americana de Hidrología Subterránea (ALHSUD)*.
- Pomposiello, C. Dapeña, C. Boujon, P. y Favetto, A. (2009). Tomografías en el basurero municipal ciudad de Gualaguaychú, Provincia de Entre Ríos: Evidencias de contaminación. *Revista de la asociación Geológica Argentina*.
- Reyes, L. Vázquez, M. Pedroza, S. Gómez, G. y Macedo, M. (2013). Estudio geoelectrico y hidroquímico para mapear la pluma de lixiviados derivados de un basurero a cielo abierto en Mexicaltzingo, Estado de México. *Revista latinoamericana de recursos naturales*, 9(1):107-114
- Suarez, J. y Zúñiga, H. (2013). Detección de capas de desechos con métodos geoelectricos: caso relleno sanitario río azul, Costa Rica. *Revista geológica de américa central*, 49:129-139.
- Herrera y Avendaño (2017). Relleno Sanitario Carapacho en la ciudad de Chiquinquirá (Boyacá, Colombia) Trabajo de estudiantes de Pregrado Universidad Distrital Francisco José Caldas.
- Hydroingeniería S.A.S., 2016. Aplicación de tomografías de resistividad eléctrica y sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo en el Relleno Sanitario El Carrasco, Informe de consultoría.
- Geología y Servicios LTDA., 2017. Exploración geofísica mediante el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en el Relleno Sanitario El Carrasco, Informe de consultoría.
- Alicon Ingeniería S.A.S., 2017. Aplicación del método geofísico de tomografía de resistividad eléctrica en el Centro de Gerenciamiento de Residuos Sólidos Doña Juana, Informe de consultoría.
- Hinojosa, Y.D., (2017) Aplicación de Métodos Eléctricos en zonas clausuradas y activas del Relleno Sanitario Regional "La Cortada", Municipio de Pamplona (Norte de Santander, Colombia) Trabajo de Investigación, Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona (Pamplona, Norte de Santander).
- Mancilla, H.R. (2017). Caracterización geofísica de las zonas clausuradas y en operación, en las instalaciones del relleno sanitario regional "la cortada" municipio de pamplona, norte de Santander, a partir de la aplicación de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (Masw) Trabajo de Investigación, Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona (Pamplona, Norte de Santander).
- Ingeominas, (1977). Geología del cuadrangulo H13, Municipio de Pamplona, Mapa Geologico del Departamento de Santander, Servicio Geologico Colombiano.
- Paris, G.; Machette, M.N.; Dart, R.L.; Haller, K.M. (2000). Map and Database of Quaternary Faults in Colombia and its Offshore Regions: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-018, 61 p., 1 plate (1:2.000.000 scale).
- Notestein, F., Hubman, C., & Bowler, J. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia. *South America. Bulletin Geological Society of America*, Volumen 55, 1165-1216.
- Geomax, (2013). Manual de empleo Geomax Zoom 20/30/35 Pro Series.
- Abem Instruments (2017), Terrameter Abem LS, consultado el 3 de abril de 2017.
<http://www.guidelinegeo.com/support/resource>.
- Subsuelo3D (2107) Geofísica de Alta Resolución consultado el 5 de Junio de 2017 <http://www.subsuelo3d.com>.
- SeisImager/SWT M, Manual, 2009, Versión 3.0, PickwinT M v. 4.0.1.5 WaveEqT M v. 2.3.0.8 GeoPlotT M v. 8.4.1.3.





Geotomo. (2015). RES2DINVx64 ver. 4.05
Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using
the least-squares method Wenner, dipole-
dipole, inline pole-pole, pole-dipole,
equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole,

Wenner-Schlumberger, gradient and non-
conventional arrays On land, aquatic,
cross-borehole and time-lapse surveys
Goelectrical Imaging 2D & 3D

