

TRABAJO ESPECIAL DE MAESTRÍA

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS POR MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS – UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

Trabajo Especial de Maestría
Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela por el Ing.
González Díaz, Jesús Alberto
Para optar al Título de Magister Scientiarum en Geofísica

Caracas, julio de 2011

TRABAJO ESPECIAL DE MAESTRÍA

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS POR MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS – UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

Tutor Académico: Profa. Nurís Orihuela

Trabajo Especial de Maestría

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela por el Br.

González Díaz, Jesús Alberto

Para optar al Título de Magister Scientiarum en Geofísica

Caracas, julio de 2011

Caracas, julio 2011

ACTA DE APROBACIÓN

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza para continuar en los momentos difíciles, a mi esposa por su amor y apoyo incondicional en todo momento (gracias cielo), a mi madre y a mis hermanos por confiar en mí, a mis sobrinos por existir, y en general a todos los que creyeron en mí.....

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi gloriosa casa de estudio la Universidad Central de Venezuela por adoptarme en su recinto e inspirarme a ser cada día mejor, al Departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería por apoyarme en todo momento, a todos mis profesores de pregrado y postgrado por darme las herramientas para poder llegar hasta aquí, a mi tutora Prof. Nurís Orihuela por creer en mí y apoyarme en todo momento, al Prof. José Cavada por su apoyo incondicional desinteresado y a las personas que me apoyaron en la adquisición de los datos.

RESUMEN

González D. Jesús A.

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS POR MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS – UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

Tutor Académico: Profa. Nuris Orihuela. Tesis de Maestría. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geofísica. Maestría en Geofísica, 2011.

Palabras Claves: Geotecnia, refracción, resistividades, ondas superficiales, Vs30, SPT.

La Universidad Central de Venezuela (UCV) ubicada en la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC) fue diseñada por el arquitecto Carlos Raúl Villanueva e inaugurada en el año 1953, y declarada Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de la Humanidad por la UNESCO en el año 2000, la misma se encuentra ubicada en el Valle de Caracas, la zona se ubica en una cuenca de sedimentos cuaternarios de litología variable, constituida principalmente por aluviones, siendo la Formación Las Mercedes el basamento geotécnico sobre el cual se encuentran depositados los sedimentos.

En este trabajo se estimaron los parámetros geomecánicos del suelo aplicando métodos de geofísica somera y la correlación con los datos geológicos y geotécnicos preexistentes en la zona. Para la evaluación geofísica se realizaron un total de 30 perfiles de sísmica de refracción, 33 perfiles de ondas superficiales, 29 sondeos eléctricos verticales tipo Schlumberger y 18 calicatas eléctricas tipo Wenner. Los datos obtenidos fueron presentados en mapas y al correlacionar los datos geofísicos y geológicos se obtuvieron los siguientes resultados:

Los espesores de sedimentos varían desde 0 m al norte, donde aflora la Formación Las Mercedes, hasta 65 m de espesor sedimentario al sur. Los valores V_p para la zona en estudio varían entre 400 m/s y 1500 m/s, evidenciando una alta variabilidad litológica; mientras que los valores de V_s se encuentran en el rango de 220 m/s a 720 m/s, lo que indica que la zona posee una velocidad de corte en promedio alta. De forma general, se puede interpretar que tanto la onda P y S se presentan una distribución de los mayores valores de velocidades hacia la zona donde están presentes los menores espesores sedimentarios. Los valores de V_{s30} se encuentran en un rango de 250 m/s a 450 m/s, destacándose los más altos hacia la zona oeste y los más bajos hacia la zona este, permitiendo dividir el campo de la Universidad Central de Venezuela en 2 zonas: la zona oeste que presenta suelos con valores de V_{s30} mayores a 360 m/s los cuales pueden clasificarse en **suelo denso o roca suave** y la zona este que presenta suelos con valores de V_{s30} menores a 360 m/s los cuales pueden clasificarse en **suelo suave**.

Los datos geoelectrónicos obtenidos muestran una gran variabilidad, presentándose valores de resistividades que van desde 5 Ω m a 400 Ω m, por lo que podemos asociar los valores más altos en la zona oeste y este, y los valores más bajos en la zona central, en la misma posición de la región de bajas velocidades de ondas sísmicas.

Otro aspecto importante de resaltar es la presencia de una zona de bajas velocidades y resistividades que se destaca en la zona central del área en estudio asociada a la presencia de un posible paleocanal principal donde vertían sus aguas los pequeños afluentes provenientes del sector de Sierra Maestra; este afluente principal contribuyó a la variada y compleja depositación sedimentaria del *Campus* de la Ciudad Universitaria de Caracas. .

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
ACTA DE APROBACIÓN	III
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VII
INDICE DE CONTENIDO	VIII
INDICE DE FIGURAS	XI
INDICE DE TABLAS	XIII
CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 General	2
1.2.2 Específicos	2
1.3 Ubicación	2
1.4 Antecedentes	3
CAPÍTULO II	4
2.1 Marco geológico	4
2.2 Marco teórico	6
2.2.1 Método de sísmica de refracción	6
2.2.2 Ondas sísmicas	7
2.2.3 Ondas P	7
2.2.4 Ondas S	8
2.2.5 Ondas Love.	8
2.2.6 Ondas Rayleigh	9
2.2.7 Características de las ondas elásticas	9
2.2.8 Ventajas	12
2.2.9 Desventajas	12
2.2.10 Principios de la teoría de elasticidad	13
2.2.10.1 Esfuerzo	13
2.2.10.2 Deformación	14
2.2.10.3 Ley de Hooke	14
2.2.10.4 Constantes elásticas en medios isotrópicos	14
2.2.10.5 Módulo de rigidez	15
2.2.10.6 Parámetro de Lamé	15
2.2.10.7 Módulo de elasticidad o de Young (E)	15

2.2.10.8	Módulo de volumen o módulo de incompresibilidad (K)	15
2.2.10.9	Cociente de Poisson (σ).....	16
2.2.11	Velocidad de ondas S hasta los 30 metros	17
2.2.11.1	Clasificación de los suelos	17
2.2.11.2	Determinación del promedio de las velocidades de las ondas de corte en perfiles geotécnicos	19
2.2.11.3	Casos especiales	19
2.2.12	Método de ondas superficiales	20
2.3.1	Métodos eléctricos con corriente continua.....	21
CAPÍTULO III		27
3.1	Etapa de Adquisición	27
3.2	Datos geológicos	29
3.3	Metodología de adquisición	29
3.3.1	Métodos sísmicos	29
3.3.1.1	Adquisición de sísmica de refracción	29
3.3.1.2	Trabajo en campo	30
3.3.1.3	Adquisición de ondas superficiales	34
3.3.1.4	Trabajo en campo	35
3.3.2	Métodos eléctricos	36
3.3.2.1	Adquisición de sondeos eléctricos verticales (SEV) – Dispositivo Schlumberger	37
3.3.2.2	Sondeo eléctrico vertical	37
3.3.2.3	Trabajo en campo	37
3.3.2.4	Adquisición de calicatas eléctricas.....	39
3.3.2.5	Trabajo de campo	40
CAPÍTULO IV		47
4.1	Metodología de procesamiento de datos	47
4.2	Métodos sísmicos	47
4.2.1	Procesamiento de datos de sísmica de refracción	47
4.3	Ondas superficiales	54
4.3.1	Procesamiento de datos de ondas superficiales.....	54
4.4	Métodos eléctricos	58
4.4.1	Procesamiento de datos de los sondeos eléctricos verticales (SEV) – Dispositivo Schlumberger.....	58
4.5	Calicatas eléctricas	62
4.5.1	Procesamiento de datos de las calicatas eléctricas	62
CAPÍTULO V		66
5.1	Resultados	66
5.2	Métodos sísmicos	66
5.2.1	Correlación de datos.....	66

5.2.2	Sísmica de refracción	72
5.2.3	Mapas de velocidad de onda P.	73
5.2.4	Mapas de velocidad de onda S.	76
5.2.5	Mapas de módulos elásticos.....	79
5.2.5.1	Mapas de módulos de rigidez.....	79
5.2.5.2	Mapas de módulos de Poisson.	81
5.3	Ondas superficiales	83
5.3.1	Mapa de Vs30	83
5.3.2	Mapa de Vs en superficie.....	84
5.3.3	Mapa de Vs a 2.5 m de profundidad	85
5.3.4	Mapa de Vs a 7.5 m de profundidad	86
5.4	Métodos eléctricos	86
5.4.1	Mapas de resistividades.....	87
5.4.1.1	Mapa de resistividades a 2 m de profundidad	87
5.4.1.2	Mapa de resistividades a 4 m de profundidad	87
5.4.1.3	Mapa de resistividades a 6 m de profundidad	88
5.4.1.4	Mapa de resistividades a 8 m de profundidad	89
5.5	Calicatas eléctricas	90
5.6	Mapa de profundidad de basamento geotécnico	91
5.7	Integración de resultados geofísicos y geológicos	91
5.7.1	Región oeste	92
5.7.1.1	Zona sur.....	92
5.7.1.2	Zona norte	93
5.7.2	Región central	94
5.7.2.1	Zona sur.....	94
5.7.2.2	Zona norte	96
5.7.3	Región este	97
5.7.3.1	Zona sur.....	97
5.7.3.2	Zona norte	98
CONCLUSIONES		100
BIBLIOGRAFÍA		103
ANEXOS		106

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de la Ciudad Universitaria de Caracas. Modificado de Google Maps en fecha 26 de mayo de 2010.	3
Figura 2. Plano topográfico de El Rincón de El Valle con la ubicación de las haciendas cañaleras. Extracto del plano topográfico de Caracas del año 1936, Colección de la Biblioteca Nacional.	6
Figura 3. Técnica de sísmica de refracción en modelo de dos capas	11
Figura 4. Dispositivo eléctrico de corriente continua tipo Wenner	22
Figura 5. Dispositivo eléctrico de corriente continua tipo Schlumberger	22
Figura 6. Medidas con dispositivo simétrico.	26
Figura 7. Mapa de distribución de zonas de trabajo para la adquisición de datos geofísicos. Modificado de Google Maps en fecha 26 de mayo de 2010.	28
Figura 8. Esquema de adquisición - Posición 1 de geófonos	32
Figura 9. Esquema de adquisición - Posición 2 de geófonos	33
Figura 10. Esquema de adquisición - Posición 3 de geófonos	34
Figura 11. Metodología de adquisición de ondas superficiales.	36
Figura 12. Esquema de colocación de los equipos en campo.	37
Figura 13. Configuración general del dispositivo de resistividad modalidad Schlumberger.	38
Figura 14. Planilla de registro de datos SEV.	39
Figura 15. Configuración general para las calicatas tipo Wenner.	40
Figura 16. Planilla de registro de datos calicatas eléctricas.	41
Figura 17. Configuración de calitata tipo Wenner (Nivel 1)	42
Figura 18. Configuración de calitata tipo Wenner (Nivel 2)	43
Figura 19. Configuración de calitata tipo Wenner (Nivel 3)	44
Figura 20. Configuración de calitata tipo Wenner (Nivel 6)	44
Figura 21. Fase 2 (laterización)	45
Figura 22. Fase 2 (laterización 2)	46
Figura 23. Modelo de registro sísmico agrupado por trazas común.	48
Figura 24. Reporte del observador	48
Figura 25. Iconos para cambiarse de registro sísmico agrupado por fuente común.	49
Figura 26. Registros sísmicos agrupados por fuente común.	50
Figura 27. Selección de primeras llegadas.	51
Figura 28. Dromocrónicas	51
Figura 29. Dromocrónicas seleccionadas.	52
Figura 30. Modelo del subsuelo.	53
Figura 31. Tomografía sísmica.	53
Figura 32. Datos de ondas superficiales.	54
Figura 33. Selección de velocidad y frecuencia máxima.	55
Figura 34. Selección de velocidad de fase.	55
Figura 35. Curva de velocidad de fase.	56
Figura 36. Parámetros del modelo inicial.	56
Figura 37. Modelo inicial.	57
Figura 38. Parámetros de inversión.	57
Figura 39. Modelo 1D del subsuelo.	58
Figura 40. Modelo de datos obtenidos en formato .txt.	58

Figura 41. Pantalla inicial de carga de datos.	59
Figura 42. Curva de resistividad aparente (ρ_a) vs. distancia AB/2	60
Figura 43. Modelado geoelectrico.	60
Figura 44. Función para añadir SEV.	61
Figura 45. Menú de pseudosección.	62
Figura 46. Pseudosección de resistividad.	62
Figura 47. Matriz datos modelo con el formato requerido por el RES2DINV.	63
Figura 48. Resumen de la lectura de datos.	64
Figura 49. Modelo geoelectrico del subsuelo 2D.	65
Figura 50. Mapa de ubicación de perfiles de sísmica de refracción (SR) y perforaciones (P).	67
Figura 51. Gráfico de $V_p - V_s$ capa 1	70
Figura 52. Gráfico de $V_p - V_s$ capa 2	70
Figura 53. Gráfico de $V_s - NG$ capa 1	71
Figura 54. Gráfico de $V_s - NG$ capa 2	71
Figura 55. Mapa de velocidad de onda P para la capa 1.	73
Figura 56. Mapa de velocidad de onda P regional para la capa 1.	74
Figura 57. Mapa de espesores para la capa 1.	75
Figura 58. Mapa de velocidad de onda P para la capa 2.	76
Figura 59. Mapa de velocidad de onda P regional para la capa 2.	76
Figura 60. Mapa de velocidad de onda S para la capa 1.	77
Figura 61. Mapa de velocidad de onda S regional para la capa 1	77
Figura 62. Mapa de velocidad de onda S para la capa 2.	78
Figura 63. Mapa de velocidad de onda S regional para la capa 2.	79
Figura 64. Mapa de módulo de rigidez para la capa 1.....	80
Figura 65. Mapa de módulo de rigidez para la capa 2.....	81
Figura 66. Mapa de módulo de Poisson para la capa 1.	82
Figura 67. Mapa de módulo de Poisson para la capa 2.	82
Figura 68. Mapa de ubicación de perfiles de ondas superficiales.	83
Figura 69. Mapa de V_{s30}	84
Figura 70. Mapa de V_s en superficie.	85
Figura 71. Mapa de V_s a 2.5 m de profundidad.	85
Figura 72. Mapa de V_s a 7.5 m de profundidad.	86
Figura 73. Mapa de resistividades a 2 m de profundidad.	87
Figura 74. Mapa de resistividades a 4 m de profundidad.	88
Figura 75. Mapa de resistividades a 6 m de profundidad.	89
Figura 76. Mapa de resistividades a 8 m de profundidad.	90
Figura 77. Mapa de profundidad de basamento geotécnico o de espesor de sedimentos.....	91
Figura 78. Mapa de ubicación de las regiones de interpretación por zonas de trabajo	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de rangos de velocidades de onda P.....	8
Tabla 2. Módulo de Poisson asociado a diferentes tipos de material.	16
Tabla 3. Relaciones de cocientes de Poisson.....	17
Tabla 4. Rango promedios de las constantes elásticas	17
Tabla 5. Clasificación de suelo de la Norma Venezolana COVENIN (2001)	18
Tabla 6. Clasificación de suelos basada en Vs30 según las recomendaciones de NEHRP (2003).....	18
Tabla 7. Correlación aproximada entre las velocidades de ondas de corte, Vs, con la compacidad, la resistencia a la penetración del ensayo SPT y la resistencia al corte no drenado de arcillas.	19
Tabla 8. Ubicación de las zonas de trabajo	28
Tabla 9. Correlación de datos geofísicos y perforaciones geotécnicas	68
Tabla 10. Ubicación de las regiones de interpretación por zonas de trabajo.....	92

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

La Universidad Central de Venezuela (UCV) ubicada en la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC) fue diseñada por el arquitecto Carlos Raúl Villanueva e inaugurada en el año 1953, asimismo fue declarada Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de la Humanidad por la UNESCO en el año 2000. En la actualidad ciertas edificaciones de la CUC presentan problemas de tipo estructural entre los que destacan: agrietamiento de paredes, pisos y techos, provocados posiblemente por asentamiento diferencial del terreno; razón por la cual resulta de gran importancia realizar un estudio geotécnico que permita caracterizar y conocer las propiedades físicas del suelo en el *campus* universitario de la UCV. Adicionalmente, la presencia de estratos saturados de agua en el subsuelo (acuíferos) son empleados para riego y servicio de agua, lo cual podría ser una de las posibles causas del problema geotécnico que se manifiesta en la superficie, ya que su explotación produce una reducción en el tope la mesa de agua y compactación del estrato saturado, que a su vez, contribuye en el asentamiento diferencial del terreno. Debido a la gran importancia histórica y cultural que constituye la UCV, resulta necesario identificar de forma detallada y expedita las posibles causas geológicas de los problemas estructurales antes mencionados, para poder orientar a los expertos en las aplicaciones de los correctivos necesarios. Es por esta razón que la geofísica constituye una herramienta de gran importancia que permitirá junto a la información geológica, obtener una óptima caracterización del subsuelo somero del CUC, complementando la información existente de la zona.

En este trabajo de investigación se realizó un estudio integrado de detalle empleando métodos de geofísica somera y correlacionando la información obtenida con la información geológica; finalmente se generaron mapas y perfiles de las distintas propiedades físicas del medio para obtener un análisis más detallado del problema y apoyar en la toma de decisiones para los correctivos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

Realizar la estimación de parámetros geomecánicos del suelo de la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC) aplicando métodos de geofísica somera y correlacionarlos con los datos geológicos y geotécnicos preexistentes en la zona.

1.2.2 Específicos

- ✓ Calcular los módulos elásticos, a través del uso de sismica de refracción y ondas superficiales, que serán empleados para la caracterización del subsuelo somero de la CUC.
- ✓ Calcular las principales propiedades eléctricas del subsuelo somero de la CUC mediante el uso de sondeos eléctricos verticales (SEV) y calicatas eléctricas.
- ✓ Correlacionar los parámetros obtenidos mediante métodos de geofísica somera con los datos geológicos y geotécnicos preexistentes de la zona.
- ✓ Elaborar mapas y perfiles que muestren la distribución de las propiedades físicas y eléctricas estudiadas del subsuelo somero de la CUC.
- ✓ Proporcionar información de parámetros geotécnicos que puedan ser empleados para corregir los daños estructurales de las edificaciones presentes en la CUC.

1.3 UBICACIÓN

El área en estudio se encuentra ubicada en Venezuela en la ciudad de Caracas, Distrito Capital, entre las siguientes coordenadas:

Latitud: 1160270N – 1160200N

Longitud: 731000E – 730400E

En la figura 1 se muestra una vista aérea y un plano de la zona en estudio y se destaca con un recuadro amarillo la zona específica dentro de la cual fueron adquiridos los datos:



Figura 1. Plano de la Ciudad Universitaria de Caracas. Modificado de Google Maps en fecha 26 de mayo de 2010.

1.4 ANTECEDENTES

En la CUC se han realizado numerosos trabajos de tipo geológico y geotécnico, principalmente al momento de la construcción de las edificaciones, por lo que se cuenta con un número importante de datos de perforación de pozos y perfiles geológicos que fueron recopilados por Acero y Domínguez (2005); estos datos serán utilizados para correlacionar y calibrar la información geofísica obtenida. Igualmente se cuenta con un conjunto de datos geofísicos adquiridos por el Departamento de Geofísica de la UCV en la asignatura Geofísica de Campo 2010.

Ambas compilaciones de datos complementarán el conjunto de datos adquiridos durante el desarrollo de este proyecto.

CAPÍTULO II

2.1 MARCO GEOLÓGICO

El área en estudio se encuentra ubicada en el Valle de Caracas en el tramo central de la Cordillera de la Costa, Sistema Montañoso del Caribe. Esta cordillera es geomorfológicamente compleja, debido en parte a que las secuencias volcánicas y metamórficas se asocian con unidades sedimentarias, cuya combinación influye sobre la complejidad topográfica del sistema. Debido a esto, la zona cuenta con diferentes tipos litológicos, los cuales han sufrido diferentes procesos de deformación y metamorfismo (Kantak, 2001).

El Valle de Caracas se extiende en dirección este-oeste, con una topografía relativamente plana, al norte se encuentra la Cordillera de la Costa y al sur elevaciones montañosas más bajas. La longitud del valle es de 25 km y está comprendido desde Petare al este hasta Antímano al oeste; con una elevación promedio de 900 m.s.n.m. Debido a la presencia de altas pendientes de la montaña del Avila al norte se observan en el valle la presencia de abanicos aluviales que hacen de esta una zona geológicamente variable y compleja. A lo largo del Valle de Caracas se encuentra el Río Guaire que constituyó otra fuente de aporte de sedimentos importante (Kantak, 2001).

Específicamente en el área en estudio aflora la Formación Las Mercedes, aunque para la escala de la investigación la zona se ubica en una cuenca de sedimentos cuaternarios, constituida principalmente por aluviones, siendo la Formación Las Mercedes el basamento geotécnico sobre el cual se encuentran depositados los sedimentos.

La Formación Las Mercedes ha sido descrita como una asociación metamórfica de edad jurásica a cretácica y de origen calcáreo, con contenido de grafito y micas observables localmente (Aguerreverre y Zuloaga, 1938; Acero y Domínguez, 2005). Salcedo y Ortas (2004) en estudio a detalle realizado sobre la fila de la Sierra Maestra encontraron que la zona puede ser dividida en dos secuencias: el tope se encuentra a un intervalo de suelo de origen residual de 1 a 4,5 m de espesor constituido por arena limosa y limo areno – arcilloso, característico por su color rojizo, y hacia la base la roca *in situ* constituida por esquistos cuarzo micáceos interfoliados con esquistos cuarzo calcáreos micáceos, que

presentan mayor índice de meteorización hacia las mayores elevaciones del terreno, estos esquistos conforman la litología predominante de la Ciudad Universitaria de Caracas y sirven de basamento geotécnico para toda la secuencia sedimentaria depositada por la acción del Río Guaire al norte y el Río Valle al sur de la CUC.

La cobertura sedimentaria de la cuenca es característica de un ambiente fluvial continental (Galavís, 1983) que han formado secuencias constituidas por acumulaciones de arena fina con espesores de entre 1 y 10 m aproximadamente, intercaladas con estratos de arcilla o arcilla limosa, en forma de láminas o cuñas, con espesores de varios metros. Entre los estratos se encuentran estructuras en forma de lentes constituidos por arena fina, arenas limosas y arenas con gravas que suelen ser idóneos para la acumulación de aguas subterráneas, sobre todo si el lente está rodeado por otro estrato de sedimentos más finos, como por ejemplo, una arcilla fina. Este tipo de estructuras se encuentran descritas en los trabajos de Galavís (1983) y Acero y Domínguez (2005). Las estructuras lenticulares tienen algunos metros de longitud, mientras que las láminas de arena o arcilla limosa pueden tener hasta 150 metros de largo y poseen la peculiaridad que pueden mostrar variación lateral en el tamaño de grano, pasando desde arena en un extremo hasta arcilla o arcilla limosa en el otro (Galavís, 1983), haciendo de esta una zona litológicamente variable y compleja. Otros autores describen que la zona en estudio está constituida por depósitos lacustres caracterizados por sedimentos limo-arcillosos provenientes de la obturación de los ríos Guaire y Valle, y por una planicie aluvial de descarga y de inundación de los mismos ríos en el sector de Plaza Venezuela (Singer et al., 2007).

En la aerofotografía del año 1936 (figura 2) se puede destacar el carácter rural de la zona en estudio para la época, observándose de forma clara los cultivos pertenecientes a la Hacienda Ibarra, lugar actual donde se encuentre la Ciudad Universitaria de Caracas, lo que evidencia la presencia de afluentes que atravesaban la hacienda y eran empleados para el riego de los cultivos y a sus vez constituían fuente importante de sedimentos para la zona.



Figura 2. Plano topográfico de El Rincón de El Valle con la ubicación de las haciendas cañaleras. Extracto del plano topográfico de Caracas del año 1936, Colección de la Biblioteca Nacional.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Método de sísmica de refracción

La prospección con métodos sísmicos consiste en explorar el subsuelo mediante ondas sísmicas. La generación de ondas sísmicas se realiza por medio de una explosión o por un impacto mecánico denominado fuente, la onda transita a través de un medio de propagación (rocas, aire, agua) y es recibida en un elemento detector-registrador de las ondas denominado receptor, que permite una vez analizadas las ondas registradas, obtener información de las propiedades elásticas y morfológicas del medio de propagación (Dobrin, 1960).

Las ondas sísmicas son ondas mecánicas y elásticas, debido a que las deformaciones causadas al medio en que se propagan no son permanentes. La deformación está constituida por una alternancia de compresión y dilatación de tal manera que las partículas del medio se acercan y se alejan respondiendo a las fuerzas asociadas con las ondas. Su propagación

se describe por la ecuación de ondas y la velocidad de la onda sísmica depende de los parámetros elásticos del medio en que se propaga (Dobrin, 1960).

2.2.2 Ondas sísmicas

Estas ondas se dividen en: ondas internas y ondas superficiales.

Las ondas internas o corpóreas son:

- Ondas P también llamadas ondas longitudinales u ondas de compresión
- Ondas S también llamadas ondas transversales u ondas de cizalla

Las principales ondas superficiales son:

- Ondas Love
- Ondas Rayleigh

2.2.3 Ondas P

Las partículas de una onda P o de compresión oscilan en la dirección de la propagación de la onda; estas ondas son parecidas a las ondas sonoras ordinarias. Las ondas P son más rápidas que las ondas S, es decir, después de un sismo en un registro se pueden observar primero las llegadas de las ondas P y posteriormente las ondas S y superficiales (Dobrin, 1960). La velocidad de las ondas P se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde: k = módulo de incompresibilidad

μ = módulo de rigidez

ρ = densidad del medio, en que se propaga la onda P.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde: λ y μ = constantes de Lamé

ρ = densidad del medio, en que se propaga la onda P.

A continuación se muestran una tabla con rangos de velocidades de onda P de algunos materiales:

Tabla 1. Valores de rangos de velocidades de onda P

Material	Velocidad (m/s)
Agua	1475
Aire	350
Arena	1400-2500
Arcilla	900-2500
Carbón	1500-2500
Lutita	2000-3900
Arenisca	1800-4200
Caliza	3000-5000
Gneis	3500-5000
Esquisto	3000-4500
Granito	4000-6000

2.2.4 Ondas S

Las partículas de una onda S o de cizalla oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. Se distinguen las ondas s_h , cuyas partículas oscilan en el plano horizontal y perpendicular a la dirección de propagación, y las ondas s_v , cuyas partículas oscilan en el plano vertical y perpendicular a la dirección de propagación. En las ondas S polarizadas, sus partículas oscilan en un único plano perpendicular a su dirección de propagación (Dobrin, 1960). La velocidad de la onda S se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde: μ = módulo de rigidez

ρ = densidad del medio, en que se propaga la onda s.

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\sigma)\rho}} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde: E = módulo de elasticidad

ρ = densidad del medio, en que se propaga la onda s.

σ = constante de Poisson.

2.2.5 Ondas Love.

Las ondas Love son ondas de cizalla que oscilan sólo en el plano horizontal, es decir, son ondas de cizalla horizontalmente polarizadas (Dobrin, 1960). Para su propagación requieren

la existencia de una capa superficial de menor velocidad en comparación a las formaciones subyacentes, es decir, un gradiente de velocidad positivo (la velocidad se incrementa con la profundidad).

2.2.6 Ondas Rayleigh

Son ondas superficiales con un movimiento descrito matemáticamente como ondas planas en un espacio semi-infinito elástico. Las ondas Rayleigh causan un movimiento rodante parecido a las olas del mar y sus partículas se mueven en forma elipsoidal en el plano vertical, que pasa por la dirección de propagación. En la superficie el movimiento de las partículas es retrógrado con respecto al avance de las ondas. La velocidad de las ondas Rayleigh (v_{Rayleigh}) es menor que la velocidad de las ondas S (transversales) y es aproximadamente $v_{\text{Rayleigh}} = 0,9 v_s$ (Dobrin, 1960)

2.2.7 Características de las ondas elásticas

Las ondas internas se extienden en tres dimensiones, mientras que las ondas superficiales se extienden sólo en dos dimensiones. Las velocidades de las ondas internas y superficiales están relacionadas de la siguiente forma: $V_p > V_s > v_{\text{Love}} > v_{\text{Rayleigh}}$. Generalmente para las amplitudes (A) de las ondas vale el orden inverso: $A_{\text{Rayleigh}} > A_{\text{Love}} > A_s > A_p$ (Dobrin, 1960).

Las ondas superficiales se caracterizan por la dispersión, es decir, la velocidad de las ondas superficiales depende de su frecuencia y de su longitud de onda. En una onda afectada por dispersión, distintas longitudes de onda se propagan con diferentes velocidades, apareciendo como un tren de eventos, cuyos ciclos sucesivos son de períodos que se incrementan o disminuyen (Dobrin, 1960).

Los parámetros característicos de las rocas que se determinan con los métodos sísmicos son la velocidad de las ondas P y S, el coeficiente de reflexión, la densidad, entre otros. Las principales propiedades de las rocas que influyen en estos parámetros son:

- Petrografía, porcentaje de minerales.
- Estado de compactación.
- Porosidad
- Fluido que rellena el espacio poroso

- Textura y estructura de la roca.
- Temperatura.
- Presión.

La variación en una de estas propiedades de las rocas puede ser relacionada, por ejemplo, con un límite entre dos estratos litológicos, con una falla o una zona de fallas, con un cambio en el relleno del espacio poroso de la roca.

El comportamiento y la trayectoria de las ondas sísmicas que se propagan en el subsuelo se pueden representar:

- Por un perfil, que incluye punto de disparo y varios detectores (geófonos) alineados en la superficie terrestre y que ilustra la penetración de los frentes de onda o de los rayos de ondas respectivamente en las formaciones geológicas del subsuelo (trazado de rayos).
- Por un gráfico del tiempo de la primera llegada de la onda sísmica en función de la distancia desde el punto de disparo hacia los geófonos, gráfico distancia-tiempo (dromocrónica o curva camino tiempo).

Los métodos de prospección sísmica se pueden clasificar según el tipo de ondas utilizadas para obtener información de subsuelo. De acuerdo a este criterio se tienen métodos basados en ondas reflejadas, ondas cónicas o refractadas críticamente, ondas directas y ondas superficiales.

Cuando se efectúa un registro sísmico, casi siempre es inevitable que se reciban y graben todos estos tipos de ondas; sin embargo, sólo uno de ellos es considerado útil, en función del objetivo del estudio. Las ondas consideradas útiles se denominan “señal”, mientras que las ondas de otro tipo se denominan “ruido”. Por ejemplo, en el método de reflexión, sólo se consideran útiles las ondas sísmicas reflejadas, mientras que las cónicas, directas y superficiales se consideran ruido. Por otro lado, cuando se utilizan métodos basados en ondas superficiales, éstas son consideradas “señal” y el resto de las ondas son consideradas “ruido”.

Al generar ondas sísmicas artificialmente (vibraciones mecánicas) sobre o cerca de la superficie y observar su tiempo de llegada en las estaciones de observación (geófonos) alineadas a lo largo de un perfil, se puede reconstruir el recorrido de las ondas en el subsuelo y localizar discontinuidades como límites litológicos o fallas. Al producirse el disparo, las ondas se transmitirán a través del terreno, una onda (rayo directo) irá por la superficie y llegará a los geófonos con velocidad V_1 . Otras después de recorrer la capa 1 con velocidad V_2 se refractarán atravesando la capa inferior siguiendo la ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } i_c}{V_1} = \frac{\text{sen } i_r}{V_2} \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde: i_c = ángulo incidente

i_r = ángulo transmitido

Por último, ciertas ondas se refractarán en la superficie de separación de las dos capas; esto ocurre cuando se produce el fenómeno de refracción crítica o total, para lo cual es necesario que la velocidad de propagación aumente con la profundidad. En la figura 2 puede observarse que el ángulo para el que se producirá la refracción crítica es $i_c = \text{arcsen}(V_1/V_2)$. Ahora bien, como cada punto alcanzado por una onda se puede considerar como centro emisor de ondas secundarias, habrá una onda secundaria que llegará a un punto de la superficie y será registrada por uno de los geófonos.

En la figura 3 se observa la geometría general de los perfiles sísmicos:

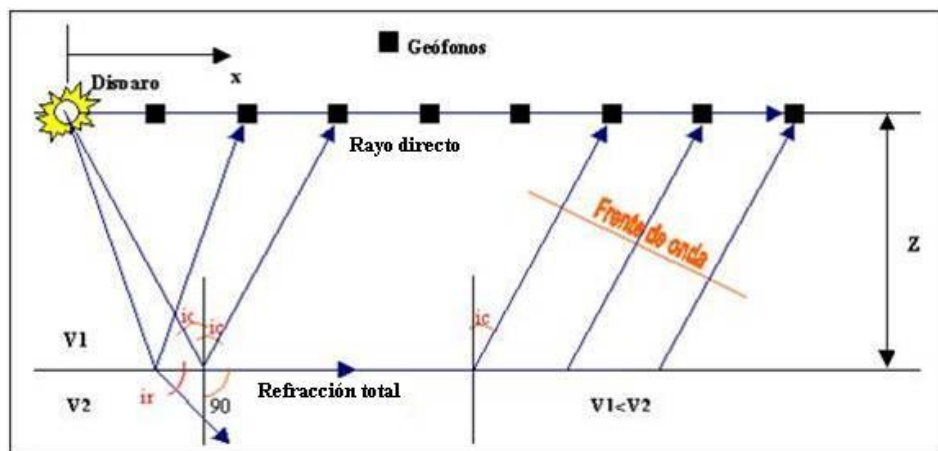


Figura 3. Técnica de sísmica de refracción en modelo de dos capas

Finalmente, se mide el tiempo transcurrido entre el momento del disparo y la llegada de la primera perturbación a cada geófono. Las primeras en llegar son las ondas directas; sin embargo, a partir de un punto (distancia crítica) llegan primero las ondas refractadas, es decir, las que viajan por los niveles inferiores del subsuelo. Estas ondas compensan la mayor distancia recorrida con la mayor velocidad a la cual realizan el recorrido.

Los métodos de exploración sísmica en muchos casos son utilizados porque permiten reducir costos y tiempo con relación a las perforaciones. Ellos no sustituyen a las perforaciones, simplemente hacen disminuir su número. A continuación se presenta una lista de ventajas y desventajas de la prospección por refracción con respecto a las perforaciones:

2.2.8 Ventajas

- Reducción de costos por metro de profundidad y por sondeo.
- Mayor rapidez de ejecución.
- Puede efectuarse aún en terrenos con grandes pendientes.
- No requiere maquinaria compleja ni pesada.
- La operación de los instrumentos es relativamente sencilla.
- Menor cantidad de mano de obra.
- No requiere apertura de vías de acceso ni acondicionamiento del terreno para operar la maquinaria. Sólo es necesaria la apertura de trochas para la colocación del cable y los receptores si la vegetación es muy densa.
- Los datos obtenidos reflejan las propiedades promedio de un volumen del subsuelo, es decir, no son puntuales.

2.2.9 Desventajas

- Resolución baja, es decir, no es capaz de diferenciar estratos muy delgados o de propiedades elásticas similares.
- No proporciona información unívoca de la litología.
- Su efectividad decrece al aumentar la profundidad a estudiar.

- En ocasiones es necesario el uso de explosivos para obtener registros sísmicos de mejor calidad.
- Si se usan explosivos es necesario abrir huecos de cierta profundidad, dependiendo del espesor de la capa meteorizada, para colocar la carga.
- El mantenimiento y reparación de los equipos electrónicos de medición resultan bastante complejos.
- Los estudios de este tipo resultan inútiles en zonas de litología lateralmente heterogénea o estructuralmente compleja, en masas rocosas ígneas y metamórficas, y en zonas de fuerte atenuación de onda sísmica.

2.2.10 Principios de la teoría de elasticidad

Una perturbación sobre un medio elástico, en función del tiempo (p. ej. un sismo, el impacto de un meteorito, una explosión nuclear, el golpe de un martillo sobre el suelo) genera ondas elásticas. Estas perturbaciones producen cambios locales en esfuerzo y deformación. Para entender la propagación de las ondas elásticas es necesario describir cinemáticamente la deformación del medio y las fuerzas resultantes – esfuerzos. La relación entre deformación y esfuerzo está gobernada por las constantes elásticas (Telford, 1976).

2.2.10.1 Esfuerzo

Se define como la fuerza por unidad de área. Así, cuando una fuerza es aplicada a la superficie exterior de un cuerpo, el esfuerzo es la relación de la fuerza en el área sobre la cual es aplicada:

$$Esfuerzo = \frac{fuerza}{\acute{a}rea} = \frac{F}{A} \quad [Ec. 6]$$

Si la fuerza es perpendicular al área se llama esfuerzo normal de compresión. Cuando la fuerza es tangencial al área el esfuerzo se conoce como esfuerzo cortante o de cizalla (Telford, 1976).

2.2.10.2 Deformación

Cuando un cuerpo elástico está sujeto a esfuerzos ocurren cambios en la forma y en las dimensiones. Estos cambios se conocen como deformaciones. Así, la deformación se define como un cambio relativo en la dimensión (volumen) o forma un cuerpo. La deformación primaria (o elemental) es la deformación normal y se produce en dirección del eje cartesiano. La deformación de cizalla se define como la combinación de deformaciones en los planos xy, xz o zy.

Los cambios en las dimensiones dadas por las deformaciones normales resultan de los cambios en el volumen, cuando el cuerpo es deformado. El cambio en volumen por unidad de volumen es llamado dilatación (Telford, 1976).

2.2.10.3 Ley de Hooke

Para calcular las deformaciones cuando los esfuerzos son conocidos, se debe establecer la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación. Cuando las deformaciones son pequeñas esta relación viene dada por la Ley de Hooke, la cual establece que, *“dada una deformación, ésta es directamente proporcional al esfuerzo producido. Cuando existen varios esfuerzos, cada uno produce deformaciones, independiente de los otros esfuerzos, entonces el total de las deformaciones es la suma de las deformaciones individuales producidas por cada esfuerzo”* (Telford, 1976).

2.2.10.4 Constantes elásticas en medios isotrópicos

En la litósfera las rocas se aproximan a medios isotrópicos, es decir, que no lo son completamente, principalmente las rocas sedimentarias y metamórficas presentan anisotropías. Por ejemplo, las rocas sedimentarias presentan diferencias en sus propiedades si son medidas en planos paralelos o perpendiculares al plano de estratificación (Cantos, 1974).

Las constantes que describen el comportamiento elástico en un medio isotrópico son: los módulos de Lamé y de rigidez. Existen tres módulos adicionales que permiten describir también el comportamiento elástico en términos de los dos primeros módulos, ellos son:

1. Módulo de rigidez.

2. Parámetro de Lamé.
3. Módulo de elasticidad o de Young (E).
4. Módulo de volumen o de incompresibilidad (K).
5. Cociente de Poisson (σ).

2.2.10.5 Módulo de rigidez

Es una medida a la deformación cortante. Los líquidos no oponen resistencia a la cizalla, por lo tanto $\mu = 0$.

$$\mu = V_s^2 \rho \quad [\text{Ec. 7}]$$

2.2.10.6 Parámetro de Lamé

Ecuación del parámetro de Lamé

$$\lambda = V_s^2 \rho - 2\mu \quad [\text{Ec. 8}]$$

2.2.10.7 Módulo de elasticidad o de Young (E)

Es la cantidad de esfuerzo por unidad de deformación (Telford, 1976).

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$E = \frac{\text{Fuerza por unidad de área}}{\text{Cambio de longitud por unidad de longitud}} \quad [\text{Ec. 10}]$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\mu+\lambda} \quad [\text{Ec. 11}]$$

2.2.10.8 Módulo de volumen o módulo de incompresibilidad (K)

Es una medida de la resistencia de los materiales elásticos a la compresión, es decir, al cambio de volumen sin que varíe su forma. Si un cuerpo está sometido a esfuerzo de compresión en todas las direcciones, su volumen disminuirá. Así, el módulo de incompresibilidad es la relación entre el esfuerzo y el cambio unitario de volumen.

$$K = \frac{\text{Presión}}{\text{Cambio de volumen por unidad de volumen}} \quad [\text{Ec. 12}]$$

$$K = \frac{3\lambda+2\mu}{3} \quad [\text{Ec. 13}]$$

[Ec. 14]

$$K = Vp^2\rho - \frac{4}{3}\mu$$

2.2.10.9 Cociente de Poisson (σ)

Es la relación entre las deformaciones unitarias transversal y longitudinal.

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$\sigma = \frac{0,5 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 + \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \quad [\text{Ec. 16}]$$

La relación de Poisson es una medida de la contracción lateral del material. En el caso de materiales elásticos varía entre 0 y 0,5. Como los líquidos no oponen resistencia a esfuerzo cortante, $\mu = 0$, entonces $\sigma = 1/2$. Valores en el rango $0 < \sigma < 0,05$ corresponden a rocas muy duras; y rocas alrededor de 0,45 son muy blandas. La mayoría de los sólidos elásticos tiene aproximadamente un valor σ de 0.25 a 0.35.

Para suelos los valores de σ cercanos a 0,5 en suelos superficiales pueden indicar presencia de humus, sedimentos o suelos arcillosos; valores alrededor de 0,1 en superficie pueden indicar saturación de aire o arenas de cuarzo puro; el cociente de Poisson disminuye con la profundidad, lo que puede deberse a que los suelos y sedimentos cerca de la superficie son más jóvenes y más compresibles que los suelos a mayores profundidades, menos compresibles y más plásticos. A continuación se presentan diferentes valores de cociente de Poisson generado mediante diferentes estudios teóricos y experimentales, de los cuales se extrajeron los siguientes resultados relacionados con suelos y depósitos sedimentarios mostrados en las siguientes tablas:

Tabla 2. Módulo de Poisson asociado a diferentes tipos de material.

Tipo de material	Módulo de Poisson
Arcilla	0.4 - 0.45
Arena	0.3 - 0.4
Roca	0.15 - 0.25

Tabla 3. Relaciones de cocientes de Poisson

Estudio	Resultados
Stokoe & Woods (1972)	$\sigma = 0,31$ para sedimentos no consolidados y no saturados
Davis & Schulteiss (1980)	Rango entre $0,4982 < \sigma < 0,4997$ para arcillas
Stuempel <i>et al.</i> (1984)	$\sigma = 0,49$ para sedimentos superficiales, arcillosos y saturados
Tiab & Donaldson (1996)	Rango $0,14 < \sigma < 0,41$ para diferentes litologías y grados de saturación

En las rocas que forman la Tierra, las constantes elásticas tienen valores del siguiente orden:

Tabla 4. Rango promedios de las constantes elásticas

Módulo de Rigidez (μ)	10^{10} a 10^{12} dinas/cm ²
Módulo de Young (E)	10^{11} a 10^{12} dinas/cm ²
Módulo de Incompresibilidad (K)	10^{10} a 10^{11} dinas/cm ²
Relación de Poisson (σ)	0.25 a 0.33

2.2.11 Velocidad de ondas S hasta los 30 metros

Este parámetro representa las velocidades promedio de la onda de corte en los primeros 30 metros del subsuelo. Este es usado en códigos recientes de construcción para evaluar los efectos de sitio. Este parámetro es utilizado en la mayoría de las fórmulas modernas de modelización lineal, de las respuestas sísmicas y de atenuación de las aceleraciones (Rojas, et al., 2010).

La velocidad de las ondas de corte resulta un parámetro de singular importancia para definir las características de la respuesta de un perfil de suelo. En tal sentido, se recomienda el uso de los ensayos sismoelásticos en sitio para determinar dicho parámetro por cuanto el mismo está íntimamente relacionado con la rigidez de los depósitos de suelos.

2.2.11.1 Clasificación de los suelos

Para la clasificación de los suelos se usa el valor de la velocidad de la onda de corte y otros parámetros como VsP (promedio de la velocidad de onda S hasta la profundidad de investigación alcanzada) y Vs30 que varían dependiendo de la clasificación sea utilizada (Rojas, et al., 2010). A continuación se presentan un conjunto de tablas donde se muestran las clasificaciones de suelos más comúnmente utilizadas en Venezuela enmarcadas en las Normas COVENIN de Estructuras Sísmoresistentes.

Tabla 5. Clasificación de suelo de la Norma Venezolana COVENIN (2001)

Material	VsP (m/s)	H (m)	Zonas sísmicas 1 a 4		Zonas sísmicas 5 a 7	
			Forma espectral	ϕ	Forma espectral	ϕ
Roca sana/fracturada	>500	***	S1	0,85	S1	1,00
Roca blanda o meteorizada y suelos muy duros o muy densos	>400	<30	S1	0,85	S1	1,00
		30 - 50	S2	0,80	S2	0,90
		> 50	S3	0,70	S2	0 90
Suelos duros o muy densos	250 - 400	<15	S1	0,80	1	1,00
		15 - 50	S2	0,80	S2	0,90
		> 50	S3	0,75	S2	0,90
Suelos firmes/medio densos	170 - 250	≤ 50	S3	0,70	S2	0,95
		>50	S3	0,70	S3	0,75
Suelos blandos/sueltos	<170	≤ 15	S3	0,70	S2	0,90
		>15	S3	0,	S3	0,80
Suelos blandos o sueltos intercalados con suelos más rígidos	**	H1	S3	0,65	S2	0,70

a) Si $Ao \leq 0.15$ úsese S4

b) El espesor de los estratos blandos o sueltos ($Vs < 170$ m/s) debe ser mayor que $0.1 H$

c) Si $H1 \geq 0.25 H$ y $Ao \leq 0.20$ úsese S4

La norma del NEHRP (Nacional Earthquake Hazards Reduction Program BSSC, 2003), define seis tipos distintos de suelos que van desde la categoría A hasta la F, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Clasificación de suelos basada en Vs30 según las recomendaciones de NEHRP (2003).

Clase	Descripción	Vs30 (m/s)
A	Roca dura	> 1500
B	Roca	760-1500
C	Suelo denso - Roca suave	360-760
D	Suelo suave	180-360
E	Perfil del suelo	<180
F	Suelos que requieren evaluaciones específicas	

Tabla 7. Correlación aproximada entre las velocidades de ondas de corte, V_s , con la compacidad, la resistencia a la penetración del ensayo SPT y la resistencia al corte no drenado de arcillas.

Descripción del material	N1 (60)	Velocidad promedio de onda de corte V_s (m/s)	Resistencia al corte no drenada	
			(kgf/cm ²)	(kPa)
Roca dura	***	$V_s > 700$	***	***
Roca blanda	***	$V_s > 400$	***	***
Suelos muy duros o muy densos (rígidos)	$N(60) > 50$	$V_s > 400$	$> 1,00$	> 100
Suelos duros o densos (medianamente rígidos)	$20 \leq N(60) \leq 50$	$250 < V_s \leq 400$	0,70-1,00	70-100
Suelos firmes o medianamente densos (baja rigidez)	$10 \leq N(60) < 20$	$10 < V_s \leq 250$	0,40-0,70	40-70
Suelos blandos o sueltos (muy baja rigidez)	$N(60) < 10$	$V_s < 170$	$< 0,4$	< 40

2.2.11.2 Determinación del promedio de las velocidades de las ondas de corte en perfiles geotécnicos

En un perfil geotécnico, la presencia de estratos blandos intercalados con otros materiales más rígidos, limitan la propagación de las ondas sísmicas que viajan por la corteza terrestre hasta la superficie del terreno. Las investigaciones realizadas con relación a esta condición demuestran que dicho efecto de filtro comienza a tener más importancia cuando el espesor del estrato blando es igual o mayor que un décimo de la profundidad del depósito (COVENIN, 2001).

2.2.11.3 Casos especiales

En aquellos casos en los cuales el suelo pierde la resistencia al corte durante la carga cíclica generalmente ocurre también una degradación súbita de la rigidez. Por lo tanto, la respuesta difiere sensiblemente de las tipificadas en la Norma, debido principalmente a que se limita la propagación de las ondas hacia la superficie y aumentan los períodos del perfil del suelo. En consecuencia, es necesario realizar estudios especiales que consideren adecuadamente estos aspectos, así como los cambios en la respuesta si se decide mejorar las propiedades del suelo por medios químicos o mecánicos (COVENIN, 2001).

De particular interés resultan los suelos muy blandos (normalmente consolidados o subconsolidados), los suelos con alto contenido de materia orgánica (tanto de restos

vegetales o diatomeas, como calcáreos), los suelos colapsibles o metaestables y los suelos muy sensibles. La misma consideración merecen los perfiles geotécnicos cuando se confirmen presiones de poros con regímenes no compatibles con las condiciones geológicas locales evidentes o cualquier otra situación que sugiera un comportamiento dinámico distinto al tipificado en esta Norma (COVENIN, 2001).

2.2.12 Método de ondas superficiales

Prácticamente todas las señales que perjudican y limitan la adquisición de la sísmica de refracción representan la fuente de la señal útil en las técnicas de ondas superficiales. En sus formas activa, pasiva y mixta estos métodos, con el procesamiento de la señal espectral (la evaluación del espectro Longitud-Frecuencia de ondas Rayleigh a través el análisis de su modo fundamental), permiten la extracción de una curva de dispersión cuya inversión permite calcular un modelo 1D de ondas de corte. Entre estas técnicas se mencionan el Spectral Analysis of Surface Wave (SASW), su versión multicanal MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) y el método de Refracción por Microtremores (ReMi) (Rojas, et al., 2010). Las principales ventajas de estos métodos son:

- Permiten la reconstrucción tanto de perfiles como de secciones de velocidad de ondas de corte; elemento fundamental para la caracterización geotécnica del sitio.
- No son invasivas, es decir, no es necesario realizar perforaciones ni usar fuentes potencialmente peligrosas y de difícil manejo permisológico (explosivos).
- No implican ningún daño a las condiciones del lugar y ni en las estructuras cercanas.
- Facilitan el perfil de velocidad de las ondas de corte V_s hasta profundidades mayores de las alcanzables con refracción tradicional.
- Permite determinar el tipo de suelo sísmico.
- A diferencia de la sísmica de refracción convencional, se utiliza en cualquier situación estratigráfica pseudohorizontal. No son limitados por inversiones de velocidad asociadas a capas blandas intercaladas a medios más compactos y con velocidad mayor.
- Son métodos prácticos, fáciles y rápidos en ejecutar. Económicamente más ventajosos que los métodos invasivos, como las perforaciones.
- Permiten optimizar la ubicación y el número de las pruebas invasivas y geotécnicas.

2.3.1 Métodos eléctricos con corriente continua

Los métodos eléctricos, también llamados métodos geoelectrónicos, estudian por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad de algunas propiedades de magnitud electromagnética. Entre las principales magnitudes electromagnéticas o constantes materiales que en principio podrían utilizarse para identificar los cuerpos situados en el subsuelo, destacan: la resistividad, la permeabilidad magnética y la constante dieléctrica o permitividad (Orellana, 1982).

Los métodos se basan en el hecho de que los suelos, dependiendo de su naturaleza, presentan una mayor o menor resistividad eléctrica cuando una corriente es inducida a través de ellos. Las mayores resistividades generalmente corresponden a rocas duras, siguiendo rocas suaves, gravas compactas, etc., y teniendo los menores valores los suelos suaves saturados.

La elección del método o los métodos de prospección que debe aplicarse a cada caso determinado, se hace teniendo en cuenta los datos adquiridos previamente dando referencias al procedimiento que sea capaz de localizar con máxima certeza el cuerpo o estructura que se está caracterizando. Entre los parámetros que han de ser tomados en cuenta destacan: el tamaño y la forma que se espera del objetivo, la profundidad, el contraste de las propiedades físicas de éste con respecto al medio circundante, poder resolutivo, costo, rapidez de aplicación del método, sensibilidad del método a los accidentes topográficos y otras causas de perturbación (Orellana, 1982).

La aplicación de métodos eléctricos exige la diferenciación marcada entre las resistividades del objetivo y las resistividades del medio encajante. Dentro de los métodos eléctricos el Sondeo Eléctrico Vertical (S.E.V.) es aplicable cuando el objetivo tiene posición más o menos horizontal, y su extensión no es pequeña con respecto a su profundidad; además, es necesario que la topografía del terreno sea suave, en especial para trabajo de poca profundidad y que las formaciones geológicas sobre las cuales se aplique el sondeo, presenten una razonable homogeneidad lateral (Parasnis, 1970).

Se define sondeo eléctrico a una serie de determinaciones de resistividades aparentes, efectuadas con un mismo dispositivo y con separaciones crecientes entre los electrodos de

emisión y recepción. Cuando el dispositivo empleado es simétrico, o asimétrico con un electrodo en el “infinito” y durante la medición permanece fijo el azimut del dispositivo y el centro del dispositivo empleado, este proceso se denomina sondeo eléctrico vertical (Orellana, 1982).

Los datos de resistividades obtenidos en cada sondeo son representados en una curva, en función de las distancias entre los electrodos. Para que esto sea posible, es necesario que estas distancias puedan expresarse por una sola variable, de lo contrario habría que recurrir a una superficie y no a una curva. Esta condición puede cumplirse de dos modos: bien por el empleo de un dispositivo en el que la configuración de los electrodos permanezca siempre geoméricamente semejante, que es el caso del dispositivo Wenner (figura 4), o bien por la utilización de dispositivos en los que sólo influya una distancia, como ocurre en el caso del dispositivo Schlumberger (figura 5), en el que la distancia MN se considera nula respecto a AB. Cuando se utiliza este dispositivo, las resistividades aparentes se llevan en las ordenadas, y en las abscisas las distancias $0A=AB/2$, donde la escala debe ser logarítmica. La curva obtenida se denomina curva de S.E.V., curva de campo o de resistividades aparente (Orellana, 1982).

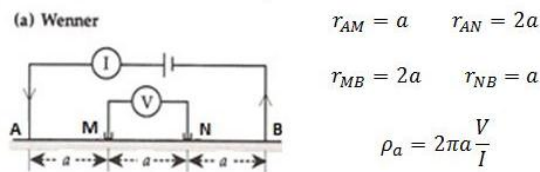


Figura 4. Dispositivo eléctrico de corriente continua tipo Wenner

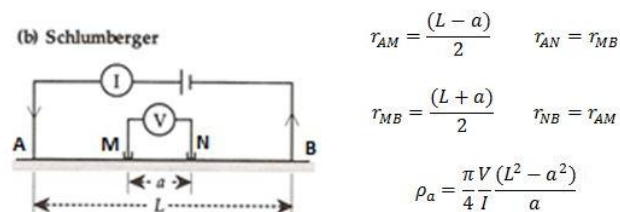


Figura 5. Dispositivo eléctrico de corriente continua tipo Schlumberger

La finalidad de los S.E.V. consiste principalmente en determinar la distribución vertical de las resistividades bajo el punto sondeado. La mayor eficacia del método corresponde en los casos que los sondeos de resistividades se realizan en terrenos de capas lateralmente homogéneas en cuanto a las resistividades y limitadas por planos paralelos a la superficie

del terreno. Entre las principales aplicaciones y de uso más frecuente de los S.E.V., encontramos el estudio hidrogeológico, mediante la determinación de espesores y profundidades de los materiales permeables e impermeables (Smith, 1978).

En un medio homogéneo la densidad de corriente disminuye gradualmente con la profundidad. Naturalmente, las zonas más profundas influirán menos en el potencial observado en superficie, al ser menor en ella la densidad de corriente. Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el S.E.V., puesto que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca. Al aumentar la separación AB aumenta en la misma proporción que la profundidad a la cual corresponde una determinada densidad de corriente por lo que podría suponerse que la “penetración” es proporcional a AB. Esto sin embargo, no es del todo cierto, puesto que las fórmulas son sólo válidas para un subsuelo homogéneo. En un medio heterogéneo la densidad de corriente variará, por lo que la penetración dependerá de la distribución de resistividades (pues de conocerse, no sería preciso S.E.V. alguno) por lo que no es posible conocer de antemano que penetración se logrará (Orellana, 1982).

La especificación de espesores y resistividades de cada medio estratificado descrito, recibe el nombre de corte geoelectrico. Estos cortes se clasifican atendiendo a la cantidad de capas que los componen. Dado un tipo de corte geoelectrico de $n - 1$ capas, pueden deducirse de él dos tipos distintos de cortes de n capas, según sea el caso (por debajo de la última capa, dando a ésta espesor infinito) ésta será más o menos resistiva que la anterior. La expresión:

$$\rho = \frac{2\pi r^2 \Delta V(r+a)}{Ia} \quad [\text{Ec. 17}]$$

puede utilizarse para calcular la resistividad de un subsuelo homogéneo, si se miden las magnitudes que aparecen en el segundo miembro. Ésta es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en la mayor parte de los métodos geoelectricos y es la que se toma como base para la interpretación.

Las dimensiones de la resistividad aparente, en virtud de su definición, son exactamente las mismas que para la resistividad, y su unidad será también el ohmio-metro (Ωm).

Otra variante de los métodos eléctricos son las calicatas, las cuales constituyen un método de investigación horizontal, a profundidad más o menos constante, muy adecuada para detectar contactos geológicos verticales o inclinados, cambios laterales de facies, metalizaciones, diques y cualquier otra estructura que presente heterogeneidades laterales o de resistividad. Experimentalmente, las calicatas eléctricas consisten en trasladar los cuatro electrodos del dispositivo a lo largo de un recorrido, manteniendo su separación, obteniéndose un perfil de resistividades aparentes a lo largo de aquél. Las investigaciones horizontales suelen realizarse a lo largo de perfiles previamente similares señalados en el terreno, generalmente paralelos, y los resultados obtenidos se relacionan entre sí, con lo que resulta una verdadera cartografía eléctrica. En las zonas exploradas con calicatas eléctricas la información obtenida se tiene desde la superficie hasta una profundidad aproximadamente constante (Orellana, 1982).

Hay una variedad de tipos de calicata eléctrica, pero todas ellas se clasifican en dos grandes grupos:

En el primero de éstos, los electrodos de corriente permanecen fijos durante la medición y se crea en el terreno un campo estacionario, el cual es explorado colocando los electrodos MN en diversas posiciones. El segundo grupo está formado por aquellos métodos en los que los cuatro electrodos se desplazan conjuntamente, conservando sus distancias y posiciones, con esto podemos decir que el dispositivo se traslada sobre el perfil como un todo, rígido. Estos métodos pueden considerarse como los de calicata eléctrica. En ellos el campo eléctrico en el terreno es distinto para cada posición del dispositivo.

Se considera un subsuelo homogéneo de resistividad, en cuya superficie se coloca un dispositivo lineal AMN. Por medio del electrodo A se obliga a circular una corriente de intensidad I, encontrándose el electrodo B a una distancia muy grande del trío de los electrodos AMN (B en el infinito).

El potencial ΔV que aparece entre los electrodos M y N, se mide por medio de un voltímetro que está unido a ellos.

Sí $AM = r$ y $MN = a$; se tiene la siguiente ecuación:

[Ec. 18]

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r(r+a)} \right] = \frac{I\rho}{2\pi r(r+a)}$$

Donde ΔV es igual a la diferencia de potencial entre los puntos M y N.

Despejando ρ de la ecuación se obtiene:

$$\rho = \frac{2\pi r(r+a)\Delta V}{aI} \quad [\text{Ec. 19}]$$

Por medio de esta ecuación se puede calcular la resistividad de un subsuelo homogéneo y si se generaliza puede también utilizarse la misma ecuación para un subsuelo heterogéneo sustituyendo resistividad (ρ) por resistividad aparente (ρ_a). El término $(2\pi r(r+a))/a$ es una constante que varía para cada dispositivo, a la cual se le denomina factor geométrico (K) (Orellana, 1982).

La ecuación anterior puede ser escrita entonces de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{k\Delta V}{I} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Si el electrodo B es traído desde el infinito y se sitúa simétricamente al electrodo A respecto al centro del dispositivo, se tiene entonces un dispositivo llamado Schlumberger. En este dispositivo los electrodos de medida se sitúan simétricamente respecto al centro del dispositivo (figura 5). Para el cálculo de la resistividad aparente (ρ_a) de este dispositivo se emplea la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{\pi V (L^2 - a^2)}{4 I a} \quad [\text{Ec. 21}]$$

Si la separación entre los 4 electrodos es igual, se tiene un dispositivo llamado Wenner (figura 4), y la resistividad aparente (ρ_a) de este dispositivo se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\rho_a = 2\pi \frac{V}{I} a \quad [\text{Ec. 22}]$$

Una variante con mayor información que las calicatas eléctricas convencionales son las tomografías eléctricas (TE), en las cuales se investiga a lo largo de una calicata con varias profundidades de interés a fin de generar una sección en la que se observan tanto los cambios laterales como verticales hasta cierta profundidad definida.

La tomografía eléctrica consiste en medir la resistividad aparente con un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos e ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado, de tal forma que el resultado final será una sección de resistividad aparente a varios niveles de profundidad (figura 6); datos que posteriormente son tratados por medio de algoritmos matemáticos de inversión. En la siguiente figura se muestra como se realiza el sondeo del subsuelo en la tomografía eléctrica en los diferentes niveles.

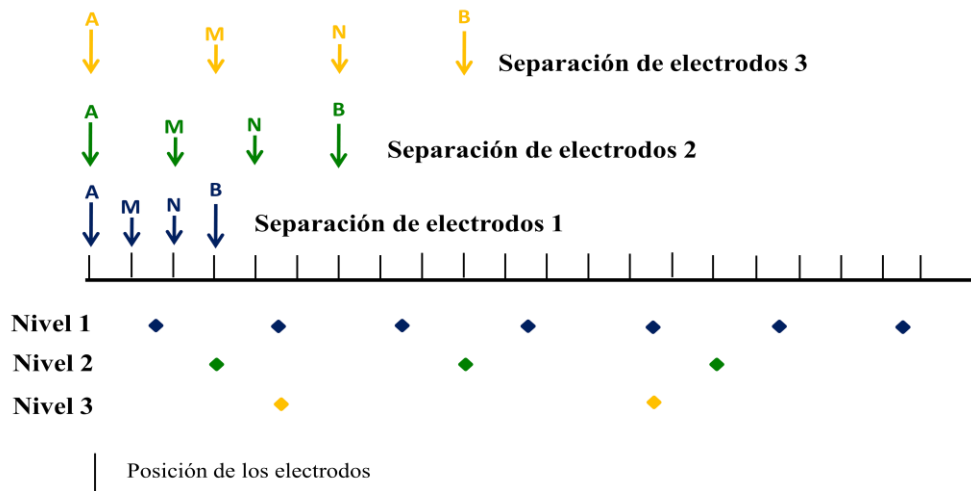


Figura 6. Medidas con dispositivo simétrico.

CAPÍTULO III

3.1 ETAPA DE ADQUISICIÓN

La etapa de adquisición fue dividida en varias partes, en la primera de ellas se calcularon los parámetros que se utilizaron para la adquisición de los datos de sísmica de refracción, ondas superficiales, sondeos eléctricos verticales y calicatas eléctricas; los parámetros fueron calculados basándose en las experiencias de trabajos previos realizados en la zona y en pruebas de campos. El objetivo del cálculo de los parámetros de adquisición fue garantizar una mejor calidad de los datos obtenidos. Luego de la obtención de los parámetros de adquisición se inició la etapa de adquisición en campo de los datos geofísicos, garantizando una buena cobertura y distribución de la información en toda la Universidad. Durante la etapa de adquisición de los datos se realizaron perfiles de métodos sísmicos y métodos eléctricos en cada una de las áreas a estudiar, en el caso de los métodos sísmicos se empleó sísmica de refracción y ondas superficiales, y para los métodos eléctricos fueron empleados sondeos eléctricos verticales (SEV) dispositivo Schlumberger y calicatas eléctricas tipo Wenner; con el objetivo de poder correlacionar los datos geofísicos con los datos geológicos de la zona, obtenidos en el trabajo de Acero y Domínguez (2005), tales como: mapas de isópacos, perforaciones geotécnicas, mapa de periodos de vibraciones naturales del suelo, mapas de drenajes y perfiles geológicos obtenidos a partir de las perforaciones; y de esta manera finalmente generar una caracterización integrada geofísica – geológica.

Para la caracterización geofísica de la Universidad se dividió el área en estudio en 8 zonas de trabajo donde se realizaron los perfiles sísmicos y geoeléctricos (figura 7), estas zonas de trabajo fueron seleccionadas tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- a) zonas donde fuese logísticamente factible la colocación de los equipos para realizar los perfiles sísmicos y eléctricos.
- b) zonas en las cuales se poseía mayor cantidad de datos geológicos provenientes de las perforaciones geotécnicas para garantizar que fuera posible la correlación geofísica –geológica.

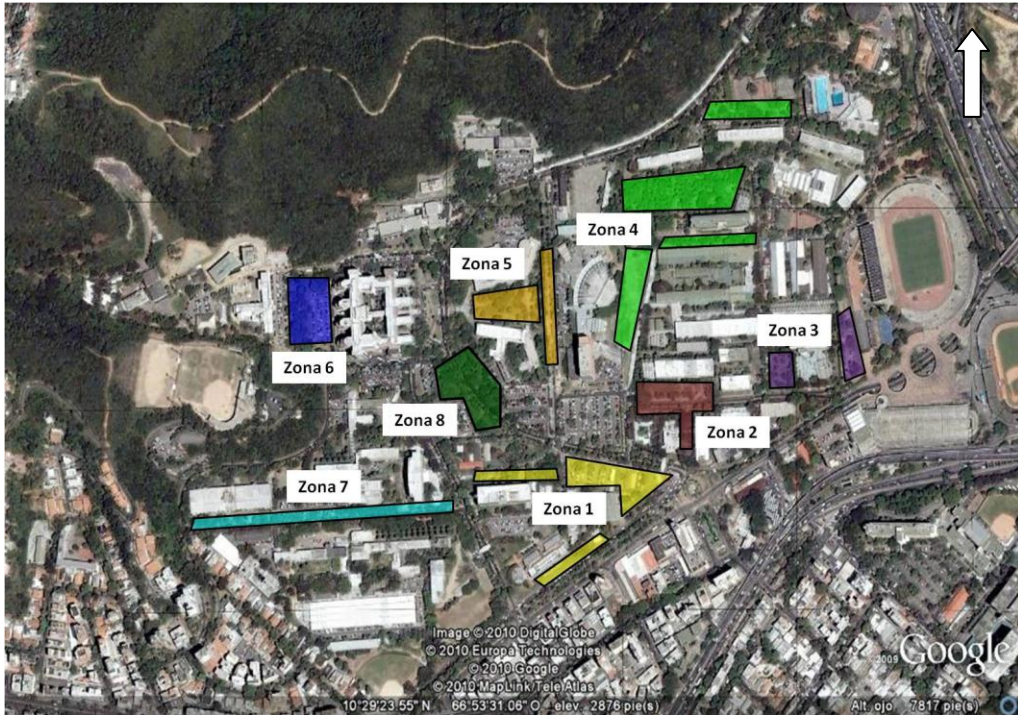


Figura 7. Mapa de distribución de zonas de trabajo para la adquisición de datos geofísicos. Modificado de Google Maps en fecha 26 de mayo de 2010.

Las zonas de trabajo empleadas se describen en la tabla 2 en función de su ubicación en el *Campus* de la Ciudad Universitaria de Caracas.

Tabla 8. Ubicación de las zonas de trabajo

Zona	Ubicación
1	Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica – Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Facultad de Farmacia
2	Facultad de Ingeniería. Alrededores del edificio de las Escuelas de Geología Minas y Geofísica, Química y Petróleo. Escuela de Ingeniería Civil
3	Facultad de Arquitectura – Estadio Olímpico Universitario
4	Facultad de Ciencias Económicas y Sociales (FACES) – Comedor - Tierra de Nadie
5	Facultad de Medicina – Biblioteca Central
6	Hospital Clínico Universitario (HCU)
7	Facultad de Ciencias – Facultad de Odontología
8	Estacionamiento y jardines posteriores de la Facultad de Medicina

En cada una de las áreas señaladas en el mapa de distribución de zonas de trabajo se realizó una distribución regular con la mayor cobertura posible, donde se efectuaron los perfiles sísmicos y eléctricos, los mismos tuvieron una longitud promedio de 48 m.

3.2 DATOS GEOLÓGICOS

Para la correlación geofísica – geológica de los datos se dispone de 44 perforaciones y 4 pozos de agua, con profundidades variables, donde se detalla la información geológica obtenida y el número de golpes obtenidos para cada litología en el ensayo SPT (Acero y Domínguez, 2005).

3.3 METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN

A continuación se describe de forma detallada la metodología de adquisición empleada en cada método:

3.3.1 Métodos sísmicos

Para la adquisición de los datos sísmicos fueron empleados los siguientes equipos:

- Sismógrafo de 12 canales marca Geometrics.
- Cable para geófonos.
- 12 Geófonos marca Geospace de componente vertical.
- Mandarria de 9 kg (fuente sísmica).
- Cable para señal de sincronismo (cable para trigger).
- Batería de 12 voltios.
- Cable de corriente del sismógrafo.
- Placa metálica.
- Teclado de computadora.
- Cinta métrica.
- Sistema de posicionamiento global (GPS) marca Magellan modelo Explorist 210.

3.3.1.1 Adquisición de sísmica de refracción

La adquisición de sísmica de refracción se realizó con un total de 30 perfiles. Los tendidos de refracción realizados fueron de longitud variable, dependía de la disponibilidad de espacio del área a prospectar, con una longitud promedio de 48 m. Para la adquisición se utilizó el método de “geófonos virtuales” para simular una adquisición con más de 12 canales, es decir, una vez determinada la longitud del tendido se calculaba cuántos

geófonos se necesitaban para cubrir todo el tendido con un espaciamiento entre geófonos de 1 m y la distancia fuente receptor mínima de 0,5 m, esta distancia debía ser múltiplo de 12 (número de canales disponibles para la adquisición), por ejemplo: 12, 24, 36, 48, 60 ó 72 m; esta distancia se dividía entre 12 para determinar el intervalo de grupo real. Luego de determinar las distancias manteniendo la fuente fija se realizaba la grabación para una posición y posteriormente se desplazaban los geófonos a la siguiente posición y se volvía a grabar, y así sucesivamente hasta ocupar todas las posiciones. La finalidad de la aplicación de esta técnica consiste en poder obtener en el procesamiento registros sísmicos con más de 12 canales para cada perfil.

Para cada línea, se anotaron los parámetros de adquisición, así como también observaciones de importancia con el fin de llevar un control del tendido.

3.3.1.2 Trabajo en campo

1. Una vez determinada la longitud y la posición de los geófonos, la fuente de ondas sísmicas se colocó al principio del tendido en la posición 0 m.
2. Posteriormente se conectó el cable de tiempo cero (trigger) para sincronizar los disparos con el inicio de la grabación de la señal. Luego se configuraron los parámetros de adquisición en el sismógrafo, tales como: geometría del tendido, distancia de la fuente al primer geófono, distancia entre geófonos, longitud de grabación, intervalo de muestreo, filtros de adquisición, directorio y nombre del archivo con el que se guardarán los resultados.
3. Luego de la configuración de los parámetros de adquisición se realizó la prueba de ruido para comprobar si no existía ruido ambiental producto de algún agente externo que pudiera afectar los resultados, y adicionalmente determinar si todos los geófonos estaban operando de forma óptima. Para ello se activó en el sismógrafo la opción de prueba de ruido (noise display) y se procedió a realizar pequeños golpes en la región cercana a cada geófono, a la vez que se verificaba en pantalla la correspondiente respuesta óptima de cada canal. Si algún canal presentaba problemas se realizaba la respectiva corrección.

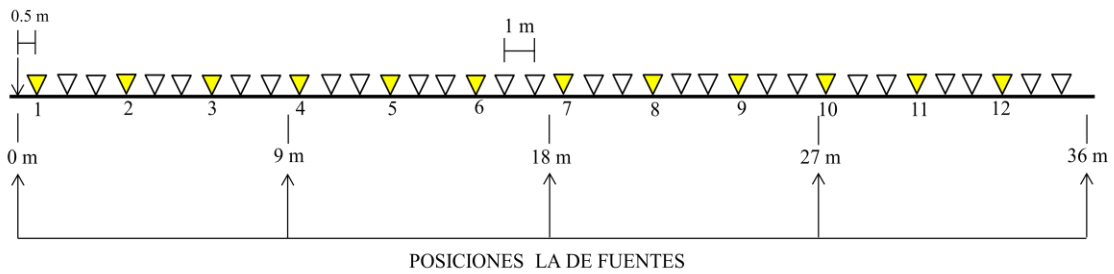
4. Finalizada la prueba de ruido, se procedió a realizar las pruebas de apilamiento para determinar el número de golpes necesario para obtener la mejor relación señal/ruido, dando como resultado que para la zona en estudio el número de golpes óptimo es de 9.
5. Luego de realizar la grabación del registro con la fuente en posición 0, se cambió la posición de la fuente a las posiciones: 1/4, 2/4, 3/4 y 4/4 de la longitud total del tendido con el objetivo de optimizar el proceso de adquisición. Una vez finalizados estos movimientos de la fuente se procedió a desplazar todos los geófonos 1 m a la siguiente posición, y se repitió nuevamente el proceso hasta que se ocuparan todas las posiciones calculadas en la etapa 1 del proceso correspondiente a la longitud total del tendido.

En las figuras 8, 9 y 10 se presenta un esquema detallado de las diferentes configuraciones de los geófonos y la fuente en la modalidad de adquisición empleada de geófonos “virtuales” para un tendido ejemplo de 36 m.

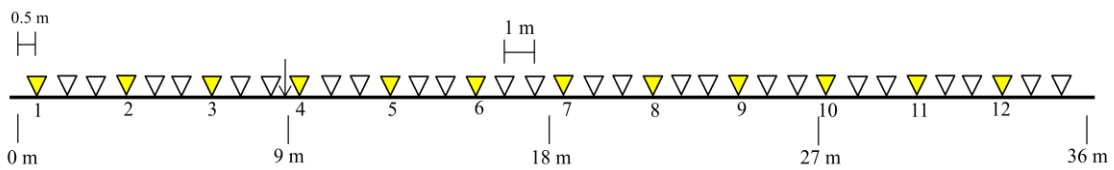
▼ Geófono real (activo)

▽ Geófono virtual (posición no activa)

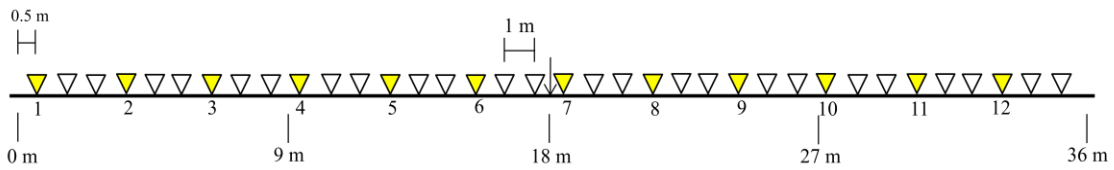
↓ Fuente



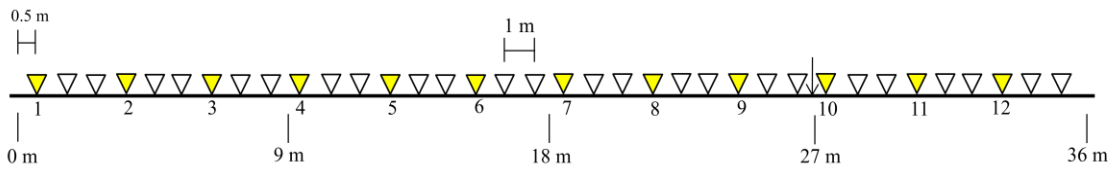
Configuración inicial



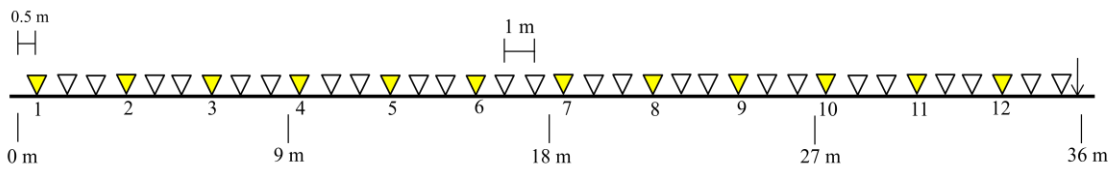
Configuración 2 (Desplazamiento de fuente)



Configuración 3 (Desplazamiento de fuente)

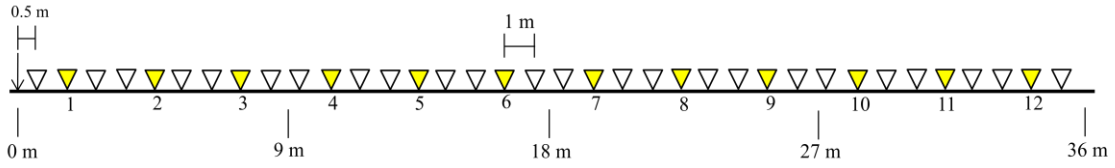


Configuración 4 (Desplazamiento de fuente)

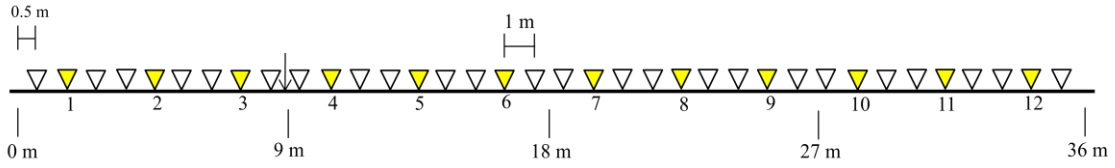


Configuración 5 (Desplazamiento de fuente)

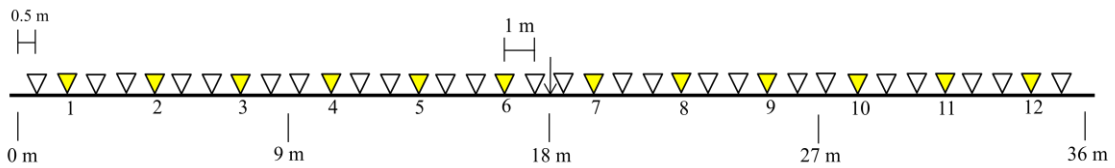
Figura 8. Esquema de adquisición - Posición 1 de geófonos



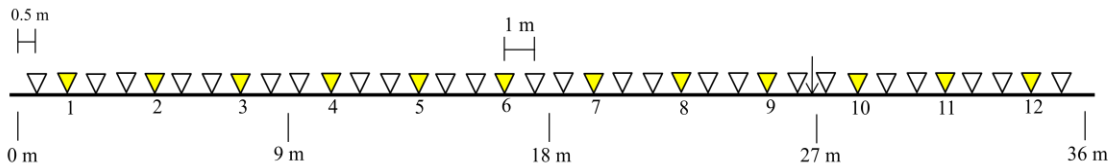
Configuración 6 (Desplazamiento de fuente y geófonos)



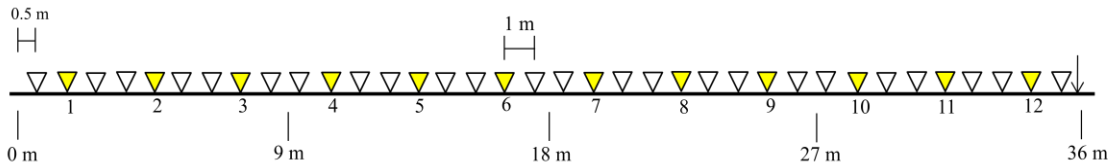
Configuración 7 (Desplazamiento de fuente)



Configuración 8 (Desplazamiento de fuente)

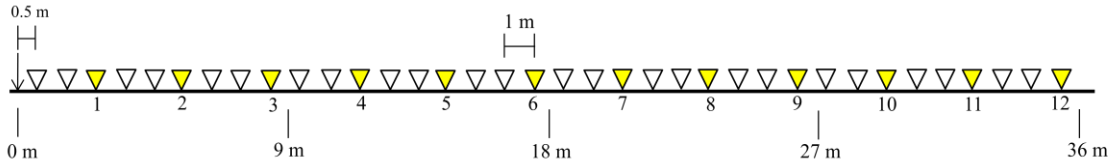


Configuración 9 (Desplazamiento de fuente)

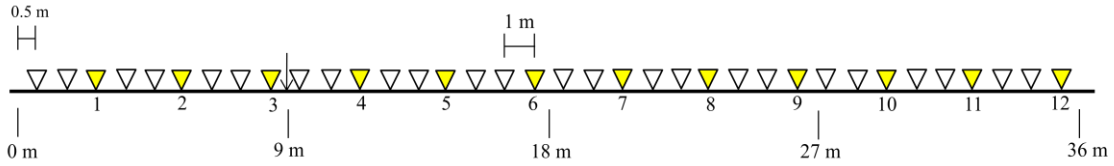


Configuración 10 (Desplazamiento de fuente)

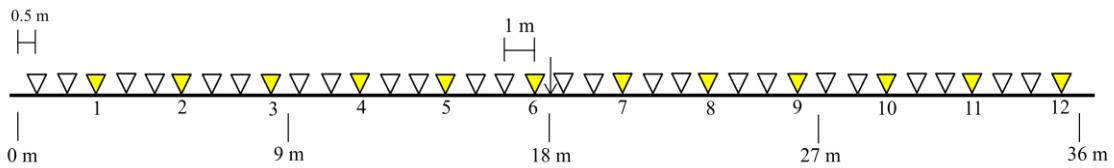
Figura 9. Esquema de adquisición - Posición 2 de geófonos



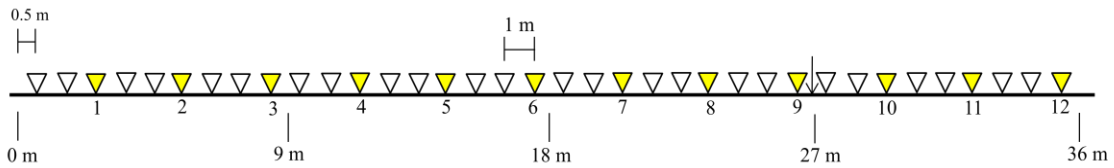
Configuración 11 (Desplazamiento de fuente y geófonos)



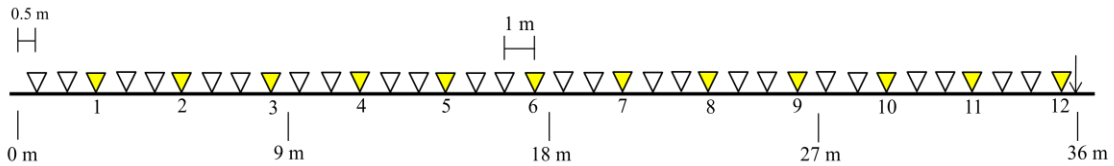
Configuración 12 (Desplazamiento de fuente)



Configuración 13 (Desplazamiento de fuente)



Configuración 14 (Desplazamiento de fuente)



Configuración final

Figura 10. Esquema de adquisición - Posición 3 de geófonos

3.3.1.3 Adquisición de ondas superficiales

La adquisición de ondas superficiales se realizó con un total de 33 perfiles. Los tendidos de ondas superficiales fueron de longitud variable, que dependía de la disponibilidad de espacio del área a prospectar, con una longitud promedio de 48 m. Para la adquisición se utilizó un intervalo entre geófono de 0,5m, desplazamiento de geófonos de 0,5 m y fuente fija con un offset inicial de 0,5 m .

3.3.1.4 Trabajo en campo

1. Se procedió a determinar la longitud del tendido. La fuente de ondas sísmicas se colocó al principio del tendido, es decir, en la posición 0 m .
2. Posteriormente se conectó el cable de tiempo cero (trigger) para sincronizar los disparos con el inicio de la grabación de la señal. Luego se configuraron los parámetros de adquisición, tales como: geometría del tendido, distancia de la fuente al primer geófono, distancia entre geófonos, longitud de grabación, intervalo de muestreo, filtros de adquisición, directorio y nombre del archivo con el que se guardarán los resultados.
3. Luego de la configuración de los parámetros de adquisición se realizó la prueba de ruido para comprobar si no existía ruido ambiental producto de algún agente externo que pudiera afectar los resultados, y adicionalmente determinar si todos los geófonos estaban operando de forma óptima. Para ello se colocó la pantalla del sismógrafo en la opción *noise display* y se procedió a realizar pequeños golpes en la región cercana a cada geófono, a la vez que se verificaba en pantalla la correspondiente respuesta en cada canal. Si algún canal presentaba problemas se realizaba la respectiva corrección.
4. Finalizada la prueba de ruido, se procedió a realizar la grabación del primer registro golpeando la placa metálica con la mandarina un total de 2 veces.
5. Posteriormente los 12 geófonos fueron movidos 0,5 m y se volvió a grabar, así sucesivamente hasta llegar al final del perfil. En la figura 11 se muestra un esquema detallado de las diferentes configuraciones de la fuente y los geófonos empleadas durante la adquisición.

Es importante mencionar que con el objetivo de mejorar la relación señal/ruido. El número de apilado fue variando a medida que aumentaba la distancia fuente primer receptor, de 0,5 m a 5,5 m el número de golpes fue de 2, de 6 m a 11 m fue de 4, a partir de 11,5 m fue de 9.

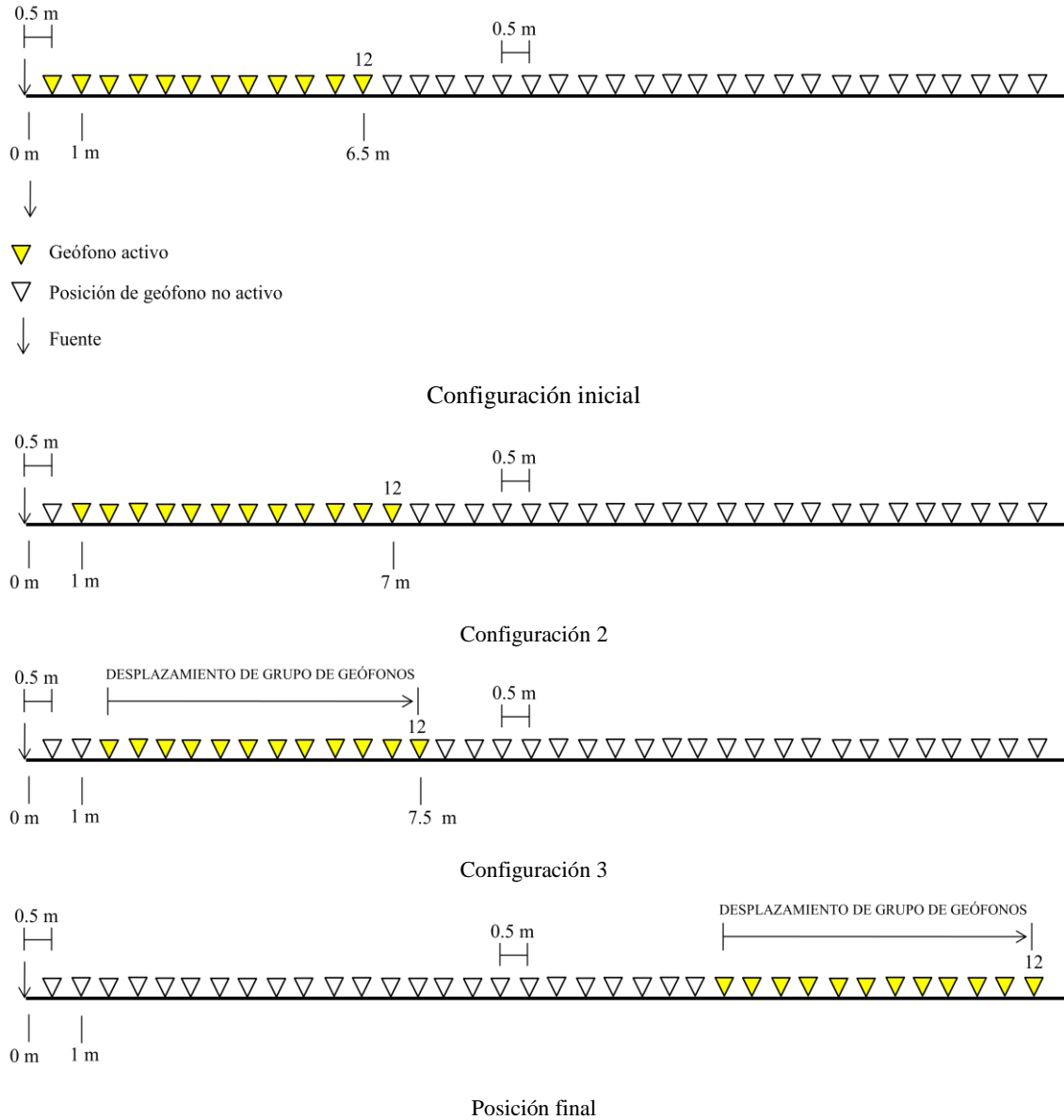


Figura 11. Metodología de adquisición de ondas superficiales

3.3.2 Métodos eléctricos

Para la adquisición de los datos eléctricos fueron empleados los siguientes equipos:

- Fuente eléctrica modelo 270 Sistema Digan C.A.
- Planta generadora de corriente continua (115 v).
- Multímetro digital marca Uni-T modelo UT39 Series (2).
- Electrodo.
- Carretes de cables AB.

- Carretes de cables MN
- Mandarria.
- Cinta métrica.
- Sistema de posicionamiento global (GPS) marca Magellan modelo Explorist 210.

En la figura 12 se muestra un esquema general de la configuración de los equipos en campo para la adquisición de los datos geoelectricos.

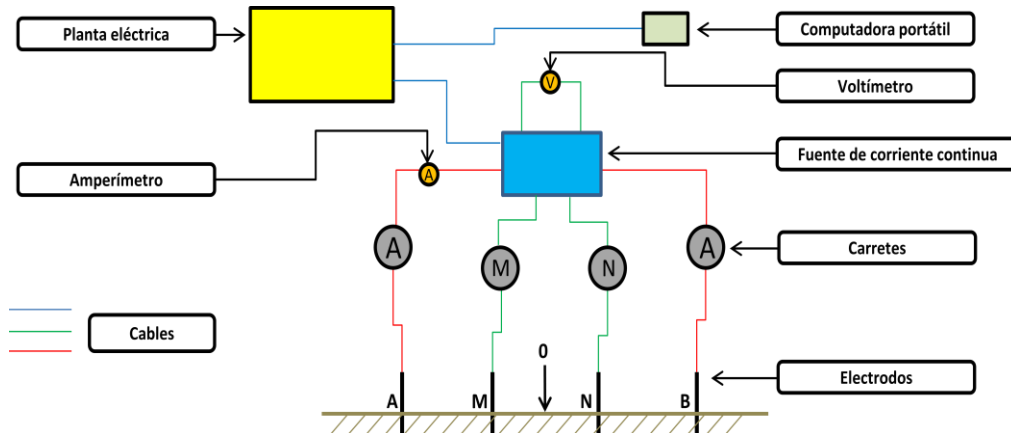


Figura 12. Esquema de colocación de los equipos en campo

3.3.2.1 Adquisición de sondeos eléctricos verticales (SEV) – Dispositivo Schlumberger

3.3.2.2 Sondeo eléctrico vertical

La adquisición de los sondeos eléctricos verticales (SEV) se realizó con un total de 29 sondeos, utilizando la configuración Schlumberger. Los sondeos tuvieron una longitud variable, que dependía de la disponibilidad de espacio del área a prospectar y de la profundidad del subsuelo a la que se quería sondear.

3.3.2.3 Trabajo en campo

1. Se procedió a determinar la longitud y la dirección del tendido. Posteriormente se eligió el punto medio del tendido el cuál representaba también el centro de operaciones y localización de los equipos. En dicho punto se colocó una marca a partir de la cual se medirían las diferentes separaciones de los electrodos (AB y MN).
2. A continuación se clavaron los electrodos de potencial y de corriente, en la posición correspondiente a la geometría predeterminada para los dispositivos de resistividades

tipo Schlumberger. Se comenzó con la geometría de AB menor y luego de cada medición se aumentó el valor de AB.

3. Con un voltímetro conectado entre los electrodos de potencial se determinó si existía un valor de potencial espontáneo (SP) y de ser así se anulaba con el anulador de potencial existente en la fuente eléctrica.
4. Luego se conectaron los electrodos AB a la fuente de corriente y un amperímetro digital en serie para determinar la intensidad de corriente generada por el equipo.
5. La fuente de corriente continua fue conectada a una planta eléctrica de 110 v. Antes de encender el equipo se verificó que la perilla de la fuente se encontrara en cero. Posteriormente se procedió a la introducción de corriente en el terreno de manera gradual hasta que se obtuviera un buen valor de voltaje entre los electrodos de potencial MN (figura 13). Los valores de ∇V disminuyen a medida que se aumenta la distancia AB, cuando ésta es muy pequeña se debe realizar un empalme, para esto es necesario incrementar la distancia MN y se debe cumplir que $MN \leq AB/5$.

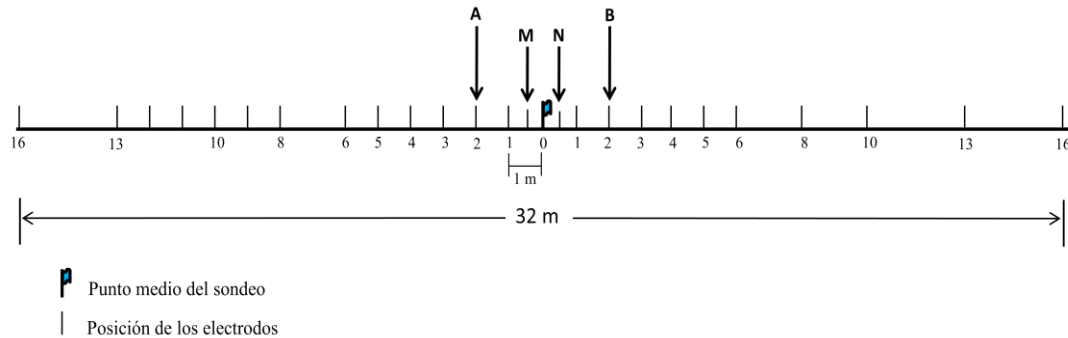


Figura 13. Configuración general del dispositivo de resistividad modalidad Schlumberger.

6. En cada medida se anotaron los valores obtenidos en una tabla con la siguiente información: número de medición, AB, MN, V, I, K, resistividad aparente, observaciones y resistividad promedio (figura 14). Para cada posición de los electrodos se realizaron 3 medidas con el objetivo de verificar el valor obtenido y posteriormente estos valores eran promediados. Simultáneamente se iban graficando los valores obtenidos para realizar un control de calidad de la curva obtenida en campo.

PLANILLA SEV

AB	MN	ΔV	I	R	ρ	ρ Promedio
320	64	0.01	0.9	0.011111	13.40413	
320	64	0.01	1.01	0.009901	11.94427	
320	64	0.01	0.96	0.010417	12.56637	12.63825743
260	50	0.01	0.65	0.015385	15.73213	
260	50	0.02	1.03	0.019417	19.85609	
260	50	0.02	1.02	0.019608	20.05075	18.54632267
200	40	0.003	0.58	0.005172	3.899908	
200	40	0.003	0.68	0.004412	3.326392	
200	40	0.002	0.66	0.00303	2.284795	3.170364996
160	32	0.001	0.68	0.001471	0.887038	
160	32	0.001	0.5	0.002	1.206372	
160	32	0.001	0.5	0.002	1.206372	1.099927027
130	26	0.008	0.6	0.013333	6.534513	
130	26	0.01	0.67	0.014925	7.314753	
130	26	0.01	0.75	0.013333	6.534513	6.79459282
100	20	0.019	0.56	0.033929	12.79077	
100	20	0.028	0.74	0.037838	14.26453	
100	20	0.028	0.75	0.037333	14.07434	13.70987798
80	16	0.049	0.74	0.066216	19.97034	
80	16	0.049	0.73	0.067123	20.24391	
80	16	0.048	0.76	0.063158	19.04797	19.75407306
64	12	0.024	0.63	0.038095	9.85363	
64	12	0.021	0.7	0.03	7.759734	
64	12	0.021	0.68	0.030882	7.987961	8.533775146
50	10	0.037	0.56	0.066071	12.45417	
50	10	0.027	0.51	0.052941	9.979177	
50	10	0.027	0.54	0.05	9.424778	10.61937516

Figura 14. Planilla de registro de datos SEV.

7. Luego de cada medición se colocaba la perilla a cero y se realizaban las otras medidas en la próxima posición AB hasta llegar al final del sondeo.

3.3.2.4 Adquisición de calicatas eléctricas

Se realizó con un total de 18 calicatas. Las calicatas eléctricas se realizaron por el método de dispositivo simétrico de cuatro electrodos de separación constante (Wenner). Las mismas tuvieron una longitud variable, que dependía de la disponibilidad del área y profundidad a prospectar.

La etapa de adquisición de las calicatas se lleva a cabo en dos fases: la primera fase consiste en cubrir una distancia que constituirá la cobertura base y la segunda fase consiste en realizar mediciones de lateralización con el objetivo de extender la cobertura más allá de la base inicial, es decir, alcanzando mayor distancia de tendido.

3.3.2.5 Trabajo de campo

- 1 Inicialmente se determinó la longitud y la dirección de la calicata. Posteriormente se procedió a marcar las posiciones de ubicación de los electrodos y a colocarlos a una distancia constante entre ellos (figura 15).

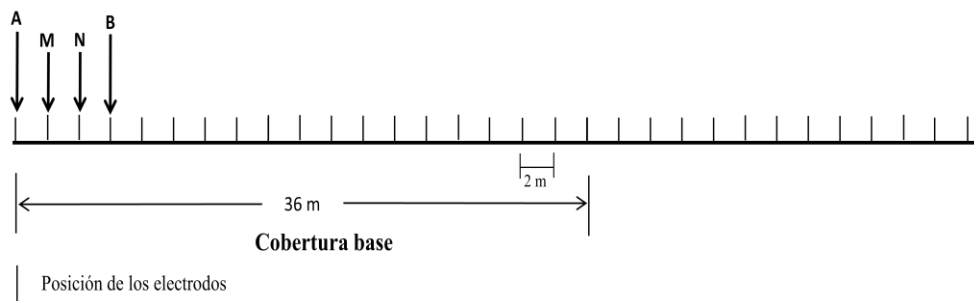


Figura 15. Configuración general para las calicatas tipo Wenner.

- 2 Con un voltímetro conectado entre los electrodos de potencial (MN) se determinó si existía un valor de potencial espontáneo (SP) y de ser así se anulaba con el anulador de potencial incorporado en la fuente eléctrica.
- 3 Luego se conectaron los electrodos AB a la fuente de corriente y un amperímetro digital en serie para determinar la intensidad de corriente exacta generada por el equipo.
- 4 La fuente de corriente continua fue conectada a una planta eléctrica de 110 v. Antes de encender el equipo se verificó que la perilla de la fuente se encontrara en cero. Posteriormente se procedió a la introducción de corriente en el terreno de manera gradual hasta que se obtuviera un buen valor de voltaje entre los electrodos de potencial MN.
- 5 En cada una de las posiciones de los electrodos se anotaron los valores obtenidos en una tabla con la siguiente información: medición, separación interelectródicas, A, M, N, B, V, I, R, resistividad aparente, resistividad promedio y observaciones (figura 16). Para cada posición de los electrodos se realizaron 3 medidas con el objetivo de verificar el valor obtenido y posteriormente estos valores eran promediados.

PLANILLA CALICATA ELÉCTRICA

Sondeo Nº	1									
Ubicación	Fachada oeste de la Facultad de Arquitectura									
Operador	Carlos Pérez									
Configuración	Mediciones	I	ΔV	A	M	N	B	a	ρ	ρ Promedio
1	1	0.29	9.5					2	411.66	
	2	0.36	11.6	1	2	3	4	2	404.92	
	3	0.2	6.3					2	395.84	404.14
2	1	0.87	27.4					2	395.77	
	2	0.48	15.1	2	3	4	5	2	395.32	
	3	0.92	29					2	396.11	395.73
3	1	1.36	33.5					2	309.54	
	2	1.15	28.3	3	4	5	6	2	309.24	
	3	1.2	29.2					2	305.78	308.19
4	1	0.32	5.9					2	231.69	
	2	0.36	6.4	4	5	6	7	2	223.40	
	3	0.4	7					2	219.91	225.00
5	1	1.21	18.2					2	189.01	
	2	1.22	18.6	5	6	7	8	2	191.59	
	3	1.23	18.6					2	190.03	190.21
6	1	1.73	22.6					2	164.16	
	2	1.63	21.1	6	7	8	9	2	162.67	
	3	1.47	19.1					2	163.28	163.37
7	1	1.91	23.6					2	155.27	
	2	1.1	13.7	7	8	9	10	2	156.51	
	3	1.27	15.9					2	157.33	156.37
8	1	1.58	22.8					2	161.34	
	2	0.98	14.3	8	9	10	11	2	163.37	
	3	0.88	12.9					2	164.21	162.97
9	1	0.85	13.4					2	198.11	
	2	0.82	13	9	10	11	12	2	199.22	
	3	0.86	13.6					2	198.72	198.68
10	1	0.63	19.6					2	390.95	
	2	0.75	23.4	10	11	12	13	2	392.07	
	3	0.67	20.8					2	390.12	391.05
11	1	0.87	21.5					2	310.55	
	2	0.92	22.9	11	12	13	14	2	312.79	
	3	1.16	28.6					2	309.83	311.06

Figura 16. Planilla de registro de datos calicatas eléctricas.

6 Luego de cada medición se coloca la perilla a cero y se realizan las medidas en las distintas posiciones y con las diferentes distancias interelectrónicas hasta llegar al final de la calicata y completar cada uno de los niveles. A lo largo de cada calicata se desplazan los cuatro electrodos AMNB simultáneamente manteniendo la distancia interelectrónicas a lo largo del recorrido, comenzando con una separación de 2 m, la cual se aumentando gradualmente en 2 m al finalizar cada recorrido del perfil hasta llegar a la distancia total de la calicata.

A continuación se describen de manera detallada las diferentes configuraciones de los electrodos para una calicata de cobertura base 36 m y con lateralización hasta 60 m.

En la figura 17 se muestran las configuraciones de los electrodos con separación 2 m para prospectar el nivel 1.

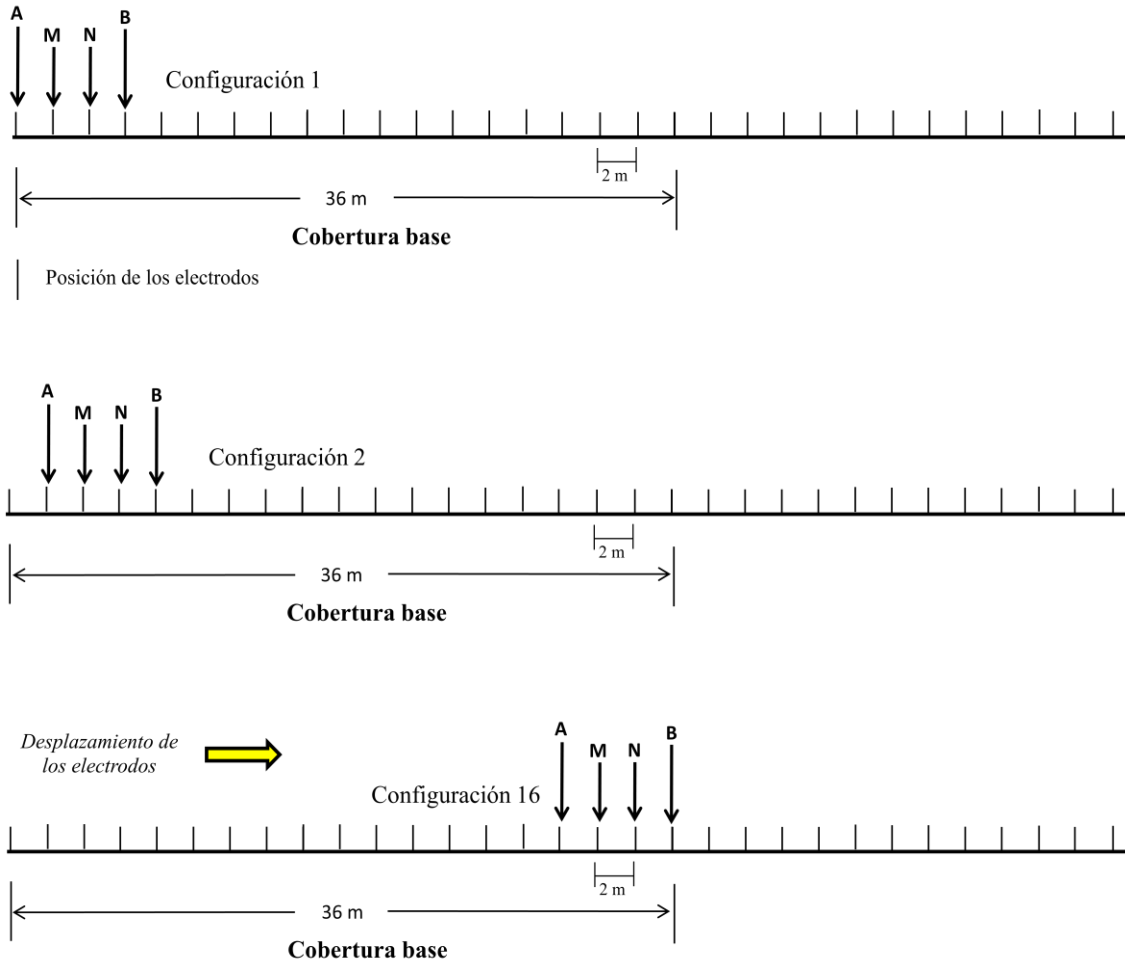


Figura 17. Configuración de calitata tipo Wenner (Nivel 1)

Una vez finalizada la prospección del primer nivel se procede a separar los electrodos una posición y nuevamente se realizan las medidas en cada una de las posiciones efectuando el desplazamiento de los electrodos hasta completar el próximo nivel (figura 18).

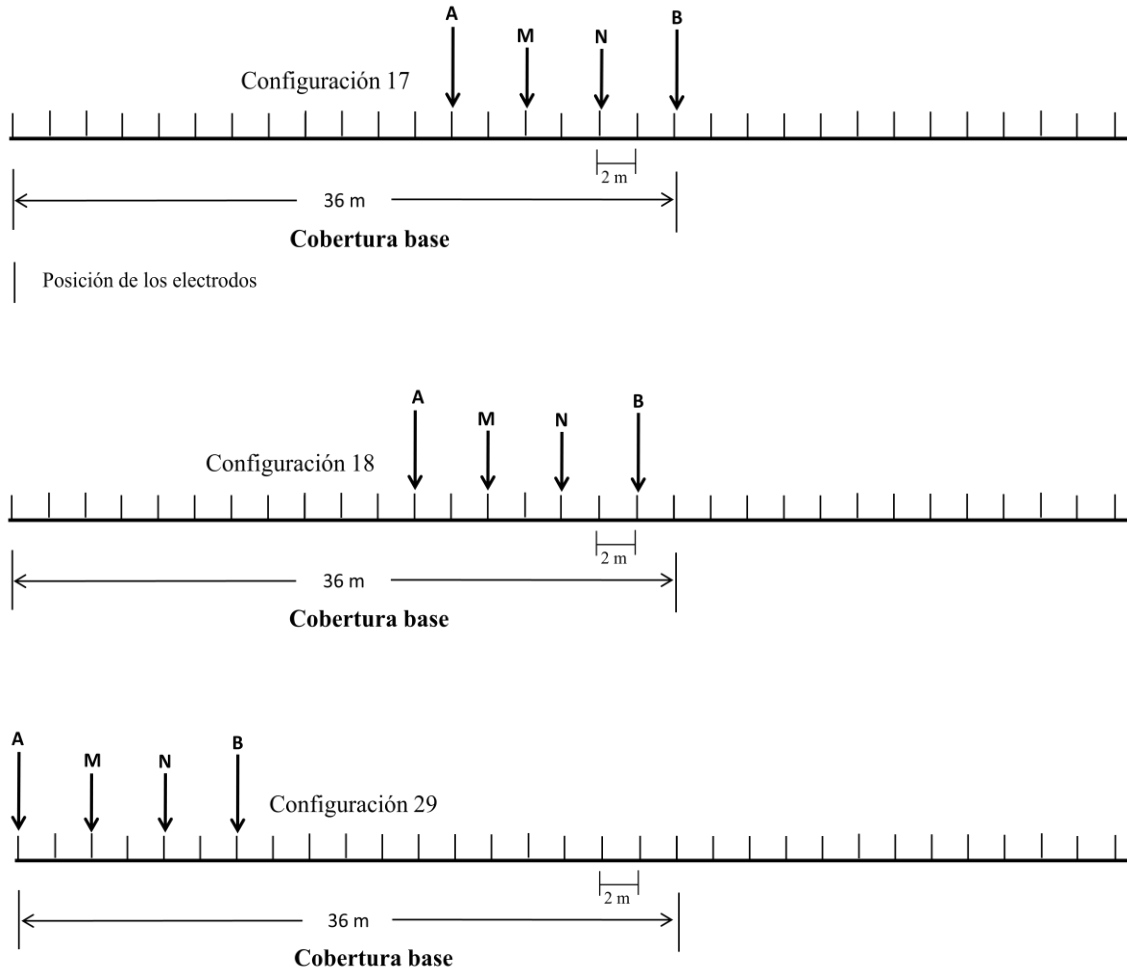


Figura 18. Configuración de calitata tipo Wenner (Nivel 2)

Al completar el nivel 2 nuevamente se separan los electros una posición y se realizan las diferentes medidas correspondientes al nivel 3 (figura 19).

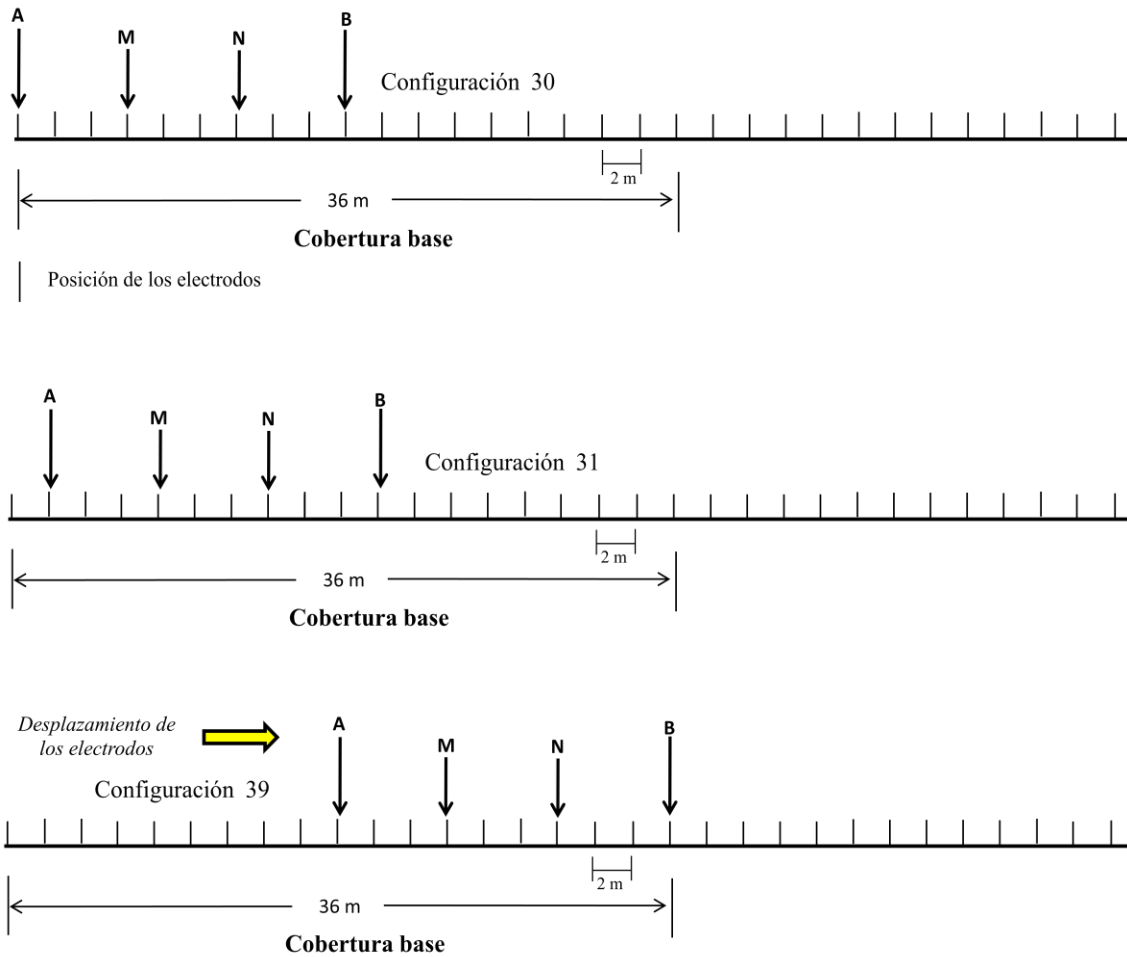


Figura 19. Configuración de calata tipo Wenner (Nivel 3)

El procedimiento de separación de los electrodos se repite sucesivamente hasta que se alcance el último nivel de profundización (figura 20).

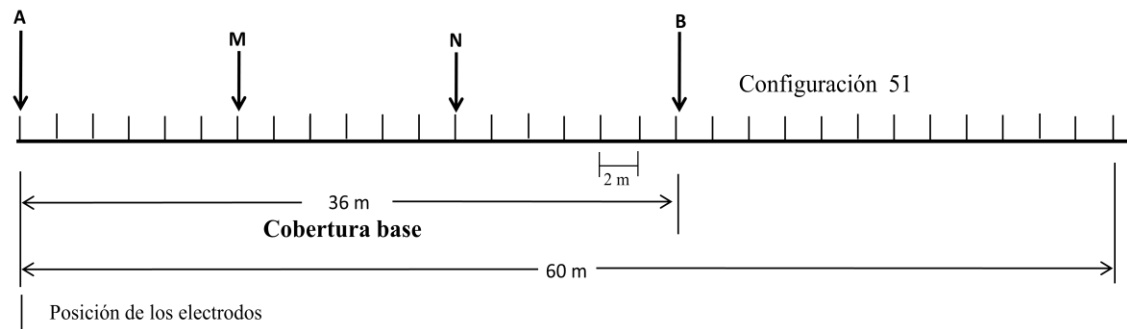


Figura 20. Configuración de calata tipo Wenner (Nivel 6)

Posteriormente comienza la fase 2 de lateralización de la calicata, que consiste en desplazar todos los electrodos una posición fuera de la cobertura base, dejar el electrodo B fijo y realizar medidas sucesivas en cada punto cerrando simultáneamente los otros 3 electrodos restantes (A, M y N) hasta llegar a la posición en donde exista separación de 2 m entre los electrodos (figura 21).

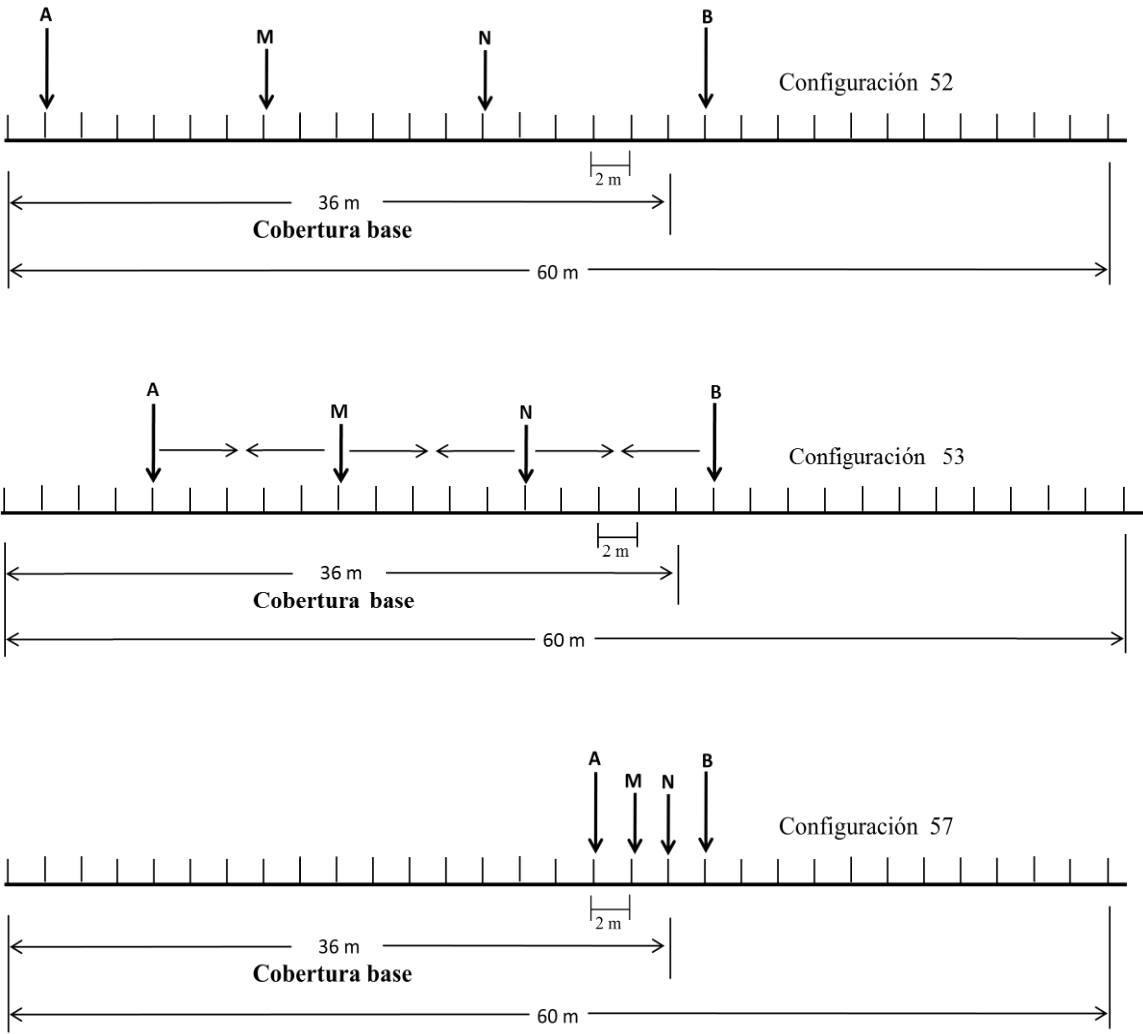


Figura 21. Fase 2 (lateralización)

Una vez los electrodos se encuentren en posición de separación mínima se desplazan todos los electrodos una posición más y se repite nuevamente el procedimiento descrito anteriormente dejando el electrodo B fijo y separando simétricamente los electrodos restantes (figura 22).

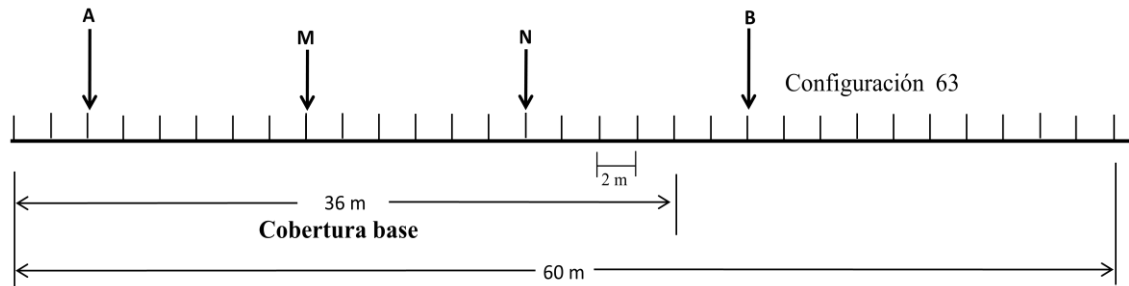
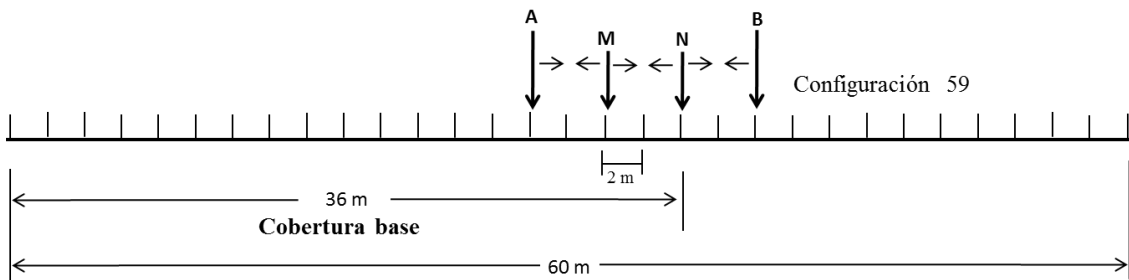
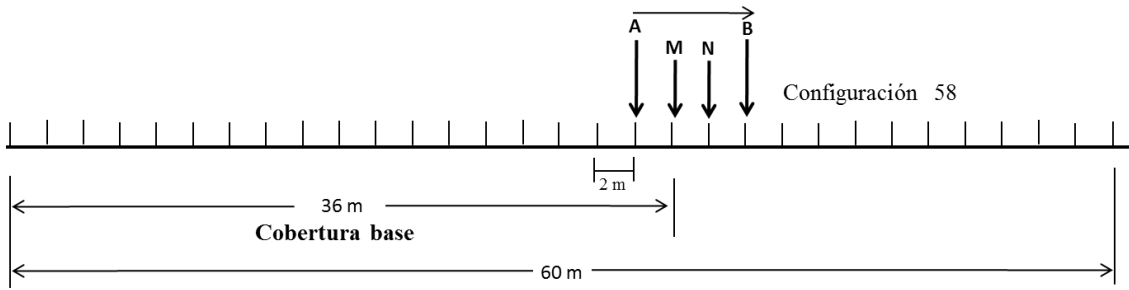


Figura 22. Fase 2 (laterización 2)

En este punto se han realizado dos lateralizaciones y se vuelve a repetir el procedimiento de la fase 2 hasta alcanzar la distancia de tendido que se desee.

CAPÍTULO IV

4.1 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

A continuación se describe de manera detallada todas las etapas y procedimientos empleados en el procesamiento de los datos sísmicos y eléctricos adquiridos en la Ciudad Universitaria de Caracas.

4.2 MÉTODOS SÍSMICOS

4.2.1 Procesamiento de datos de sismica de refracción

Para realizar el procesamiento de las ondas refractadas fueron utilizados los programas de procesamiento PICKWIN versión 3.14 y PLOTREFA versión 2.73 del paquete de procesamiento Seisimager, fabricado por OYO Corporation; con el objetivo de obtener diferentes parámetros físicos tales como: velocidades de las ondas P y S en el primer y segundo estrato, y la profundidad (h) de la interface entre la primera y segunda capa, así como también obtener una tomografía del subsuelo a lo largo del perfil, para ello es necesario realizar la siguiente secuencia de procesamiento:

- Inicialmente se debe verificar que el programa PICKWIN se encuentre en modo avanzado para lo cual se debe ir a la barra de herramientas y seleccionar **Option(O)** → **menu type** → **modo Avanzado**. Cerrar el programa y volverlo a ejecutar para que se apliquen los cambios.
- Para poder realizar el procesamiento de los datos primero deben agruparse por fuente común, es decir, todos los registros de refracción con fuente en 0, 1/4, 1/2, 3/4 y 1 de la longitud total del tendido, accediendo al menú **File(F)** → **Option(O)** → **Appened File (select file<50)** → seleccione los archivos que formarán el grupo correspondientes a fuente común, posteriormente se selecciona la función **Open** y se despliega el grupo de trazas agrupadas (figura 23). Para poder realizar este procedimiento de forma correcta es necesario hacer uso de la información contenida en el reporte del observador (figura 24), el cual es un documento que tiene la finalidad de ordenar los datos por archivos, fuentes, distancias (en metros), información referente a la ubicación del perfil y parámetros de adquisición, con la

finalidad de facilitar la selección de las trazas y el ordenamiento de los archivos durante la etapa de procesamiento.

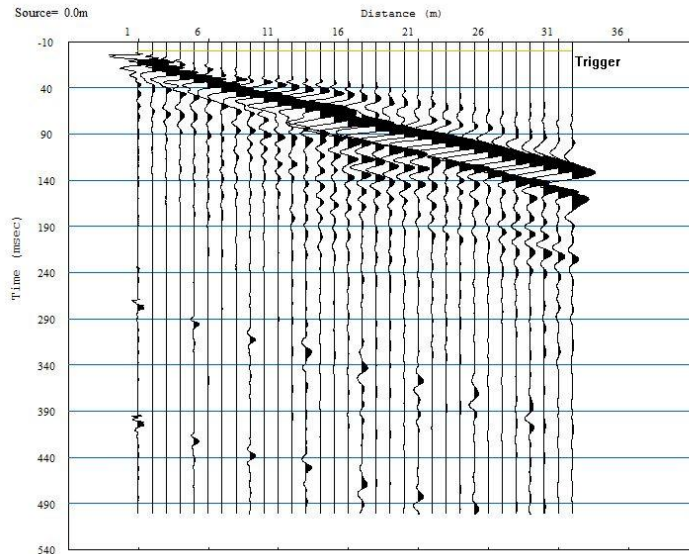


Figura 23. Modelo de registro sísmico agrupado por trazas común

Proyecto	Geofísico de Campo 2010
Línea sísmica	R-5
Lugar	Flanco sur de Metalurgia UCV
Descripción	Línea sísmica se encuentra paralela al edificio de metalurgia, en esta zona se encuentra un semaforo por lo que el ruido vehicular es alto.
Referencias	
Fecha de grabación	20.28/12/2010
Tipo de levantamiento sísmico	Refracción 2D
Instrumento de grabación	Sismógrafo Geometrics SmartSeis de 12 canales
Formato de grabación	SEG2, punto flotante 20 bits, agrupación de 10 bytes para 4 muestras
Filtros instrumentales	Ninguno
Distancia fuente-canal mas cercano	variable: desde 0,5 m hasta 5,5 m a intervalos de 1m
Intervalo entre canales	6 m
Avance de teadido	1m
Intervalo de muestreo	256 microsegundos
Duración de registro	512 milisegundos
Número de muestras por traza	2048
Número de trazas por registro	8
Número de puntos de grabación en el teadido	48
Sensores	Geófonos de velocidad, 15 Hz, componente vertical
Componente vectorial	Vertical
Cantidad de sensores por canal	1
Fuente sísmica	Impacto de martillar de 8 kg sobre placa metálica
Gatillado de tiempo cero	Por señal de geófono colocado a menos de 10 cm del punto fuente
Origen de distancias en la línea	Fuente en A
Coordenadas fuente extrema en A=0 m (E-N-Z)	*****
Coordenadas fuente extrema en B=60 m (E-N-Z)	*****
Tipo de coordenadas	UTM, huso 19, meridiano central 69, Datum REGVEN
Azimet desde A	****
Procedimiento de adquisición	Se calcula la geometría como si existieran 48 canales de grabación. Primero se disponen los 8 geófonos a intervalos de 6 m, con el primer geófono a 0,5 m de la fuente A. Se efectuaron registros con la fuente en 0, 12,24, 36 y 48 m sin cambiar la posición.

Archivo	Fuente en (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	Apilado vertical	Nombre original
R-286.DAT	0.0	0.5	6.5	12.5	18.5	24.5	30.5	36.5	42.5	3	R-286.DAT
R-287.DAT	12.0	0.5	6.5	12.5	18.5	24.5	30.5	36.5	42.5	3	R-287.DAT
R-288.DAT	24.0	0.5	6.5	12.5	18.5	24.5	30.5	36.5	42.5	3	R-288.DAT
R-289.DAT	36.0	0.5	6.5	12.5	18.5	24.5	30.5	36.5	42.5	3	R-289.DAT
R-290.DAT	48.0	0.5	6.5	12.5	18.5	24.5	30.5	36.5	42.5	3	R-290.DAT
R-291.DAT	0.0	1.5	7.5	13.5	19.5	25.5	31.5	37.5	43.5	3	R-291.DAT
R-292.DAT	12.0	1.5	7.5	13.5	19.5	25.5	31.5	37.5	43.5	3	R-292.DAT
R-293.DAT	24.0	1.5	7.5	13.5	19.5	25.5	31.5	37.5	43.5	3	R-293.DAT
R-294.DAT	36.0	1.5	7.5	13.5	19.5	25.5	31.5	37.5	43.5	3	R-294.DAT
R-295.DAT	48.0	1.5	7.5	13.5	19.5	25.5	31.5	37.5	43.5	3	R-295.DAT
R-296.DAT	0.0	2.5	8.5	14.5	20.5	26.5	32.5	38.5	44.5	3	R-296.DAT
R-297.DAT	12.0	2.5	8.5	14.5	20.5	26.5	32.5	38.5	44.5	3	R-297.DAT
R-298.DAT	24.0	2.5	8.5	14.5	20.5	26.5	32.5	38.5	44.5	3	R-298.DAT
R-299.DAT	36.0	2.5	8.5	14.5	20.5	26.5	32.5	38.5	44.5	3	R-299.DAT
R-300.DAT	48.0	2.5	8.5	14.5	20.5	26.5	32.5	38.5	44.5	3	R-300.DAT
R-301.DAT	0.0	3.5	9.5	15.5	21.5	27.5	33.5	39.5	45.5	3	R-301.DAT
R-302.DAT	12.0	3.5	9.5	15.5	21.5	27.5	33.5	39.5	45.5	3	R-302.DAT
R-303.DAT	24.0	3.5	9.5	15.5	21.5	27.5	33.5	39.5	45.5	3	R-303.DAT
R-304.DAT	36.0	3.5	9.5	15.5	21.5	27.5	33.5	39.5	45.5	3	R-304.DAT
R-305.DAT	48.0	3.5	9.5	15.5	21.5	27.5	33.5	39.5	45.5	3	R-305.DAT
R-306.DAT	0.0	4.5	10.5	16.5	22.5	28.5	34.5	40.5	46.5	3	R-306.DAT
R-307.DAT	12.0	4.5	10.5	16.5	22.5	28.5	34.5	40.5	46.5	3	R-307.DAT
R-308.DAT	24.0	4.5	10.5	16.5	22.5	28.5	34.5	40.5	46.5	3	R-308.DAT
R-309.DAT	36.0	4.5	10.5	16.5	22.5	28.5	34.5	40.5	46.5	3	R-309.DAT
R-310.DAT	48.0	4.5	10.5	16.5	22.5	28.5	34.5	40.5	46.5	3	R-310.DAT
R-311.DAT	0.0	5.5	11.5	17.5	23.5	29.5	35.5	41.5	47.5	3	R-311.DAT
R-312.DAT	12.0	5.5	11.5	17.5	23.5	29.5	35.5	41.5	47.5	3	R-312.DAT
R-313.DAT	24.0	5.5	11.5	17.5	23.5	29.5	35.5	41.5	47.5	3	R-313.DAT
R-314.DAT	36.0	5.5	11.5	17.5	23.5	29.5	35.5	41.5	47.5	3	R-314.DAT
R-315.DAT	48.0	5.5	11.5	17.5	23.5	29.5	35.5	41.5	47.5	3	R-315.DAT

Figura 24. Reporte del observador

- Una vez agrupada las trazas por fuente común se debe guardar el archivo, para luego agrupar los otros registros que comparten geometría, en el menú **File(F) → Save waveform file as(A) → nombre del archivo**, la extensión del archivo debe ser .dat.
- Con los archivos guardados anteriormente procedemos a agrupar los registros, en este caso, para la metodología empleada en este trabajo, corresponden a un total de cinco registros, para la fuente en 0, 1/4, 1/2, 3/4 y 1 de la longitud total del tendido, para ser procesados como un registro de 48 canales. Para lo cual debemos ir al menú **Group (File list)(G) → Make file list → seleccionamos los archivos guardados anteriormente** y de esta manera tendremos agrupados los registros. Una vez realizado esta etapa del procesamiento se pueden utilizar los iconos señalados en la figura 25 que permitirá observar los distintos registros agrupados por fuente común (figura 26). Es conveniente guardar los registros agrupados para poder recuperarla en una próxima sesión. Para ello debemos ir al menú **Group (File list)(G) → Save file list(XML) → nombre del archivo de grupo → Guardar**.

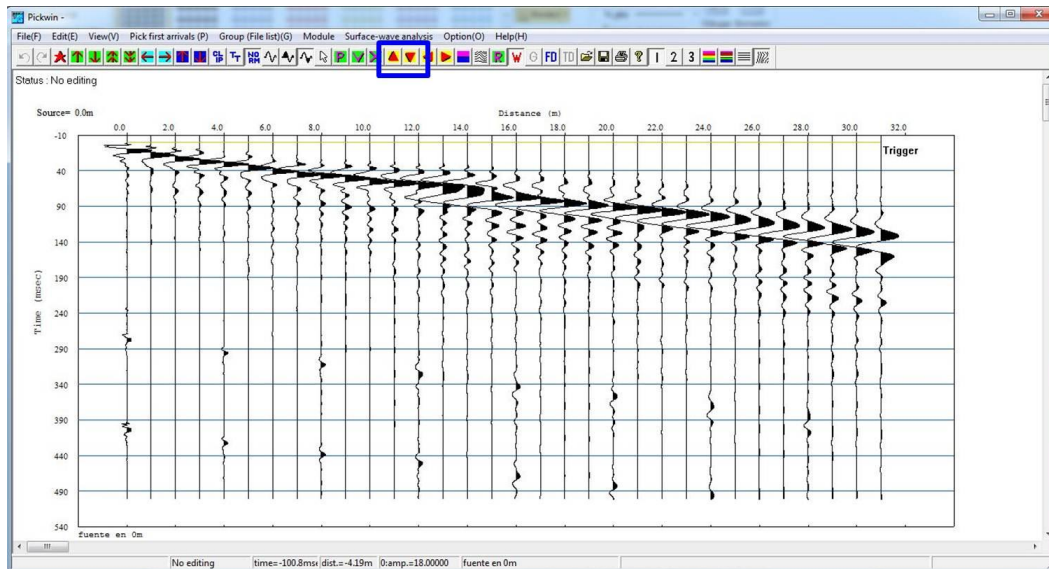


Figura 25. Iconos para cambiarse de registro sísmico agrupado por fuente común.

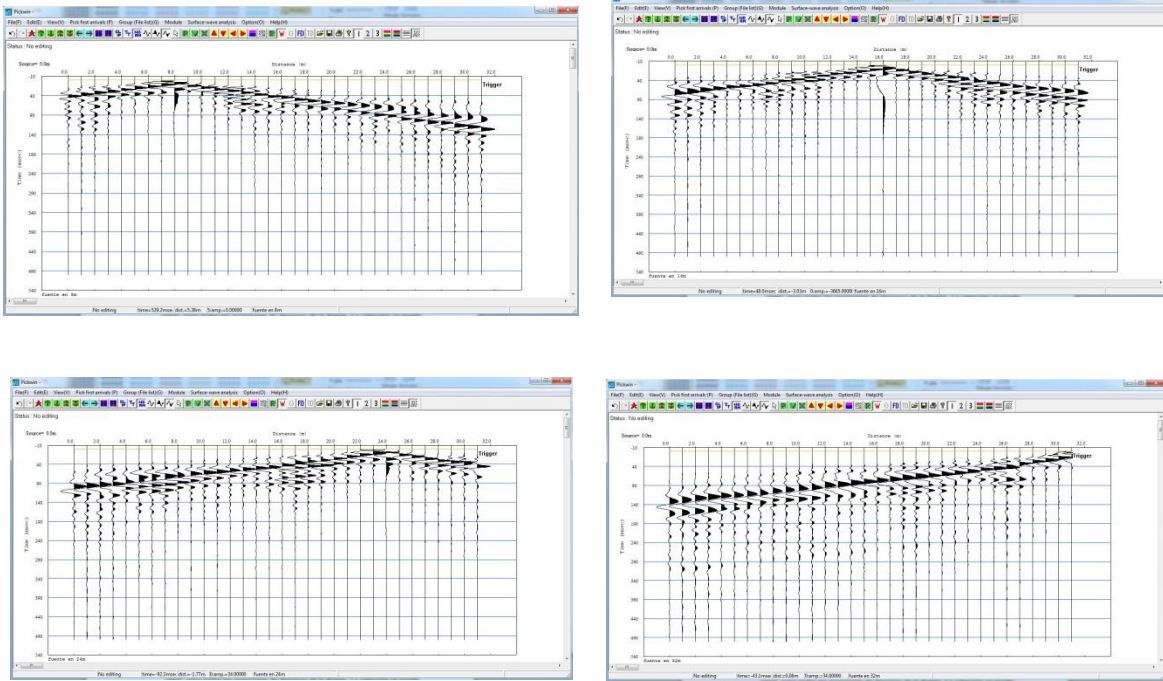


Figura 26. Registros sísmicos agrupados por fuente común.

- Se selecciona la primera llegada de la onda sísmica para cada uno de los registros correspondiente para todas las posiciones de la fuente (figura 27). La selección se puede realizar de manera manual o automática, si el registro es de muy buena calidad y no presenta ruido se puede hacer la selección de las primeras llegadas de manera automática, pero en la mayoría de los casos resulta necesario realizar la selección manera manual teniendo mucho cuidado de no confundir las primeras llegadas con ruido asociado a la adquisición. Para realizar la selección de las primeras llegadas debemos acceder al menú *Pick first arrivals (P) → Pick first arrival time manually* luego de realizar la selección de las primeras llegadas en todos los registros del perfil agrupado por fuente común, debe guardarse el archivo para ser usado posteriormente en Plotrefa, en el menú *File (F) → Save first arrival data as a Plotrefa file*.

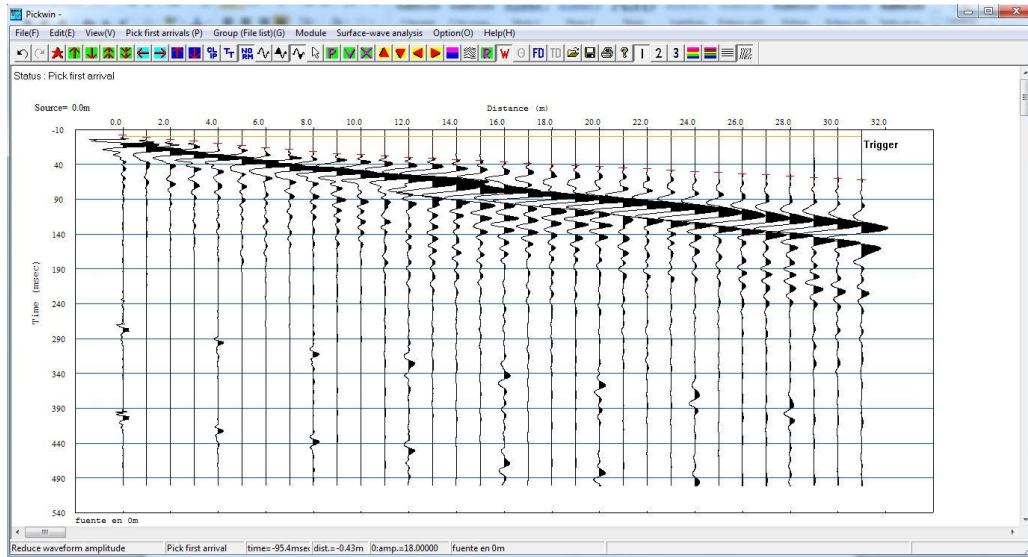


Figura 27. Selección de primeras llegadas.

- En PLOTREFA, se abre el archivo correspondiente a la selección de primeras llegadas a través del menú *File* → *Open Plotrefa File (traveltime data and velocity model)*. Estos datos generan las curvas distancia-tiempo (dromocrónicas), como la que se muestra en la figura 28, este gráfico es empleado posteriormente por el programa para generar el modelo del subsuelo.

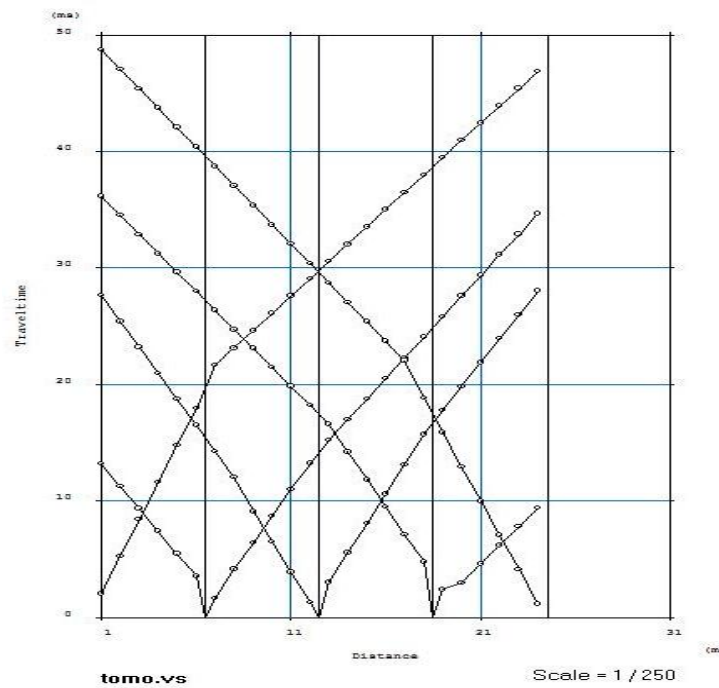


Figura 28. Dromocrónicas

- Luego de visualizar la dromocrónica, se realiza la asignación de capas (para nuestro caso de investigación debido a las características geológicas de la zona se asignaron 2 capas a los modelos iniciales), con el fin de generar un modelo inicial mediante el menú *Time-term inversión* → *Assing 2 layer*; posteriormente se deben seleccionar en cada uno de los registros la refracción de la onda como se muestra en la figura 29.

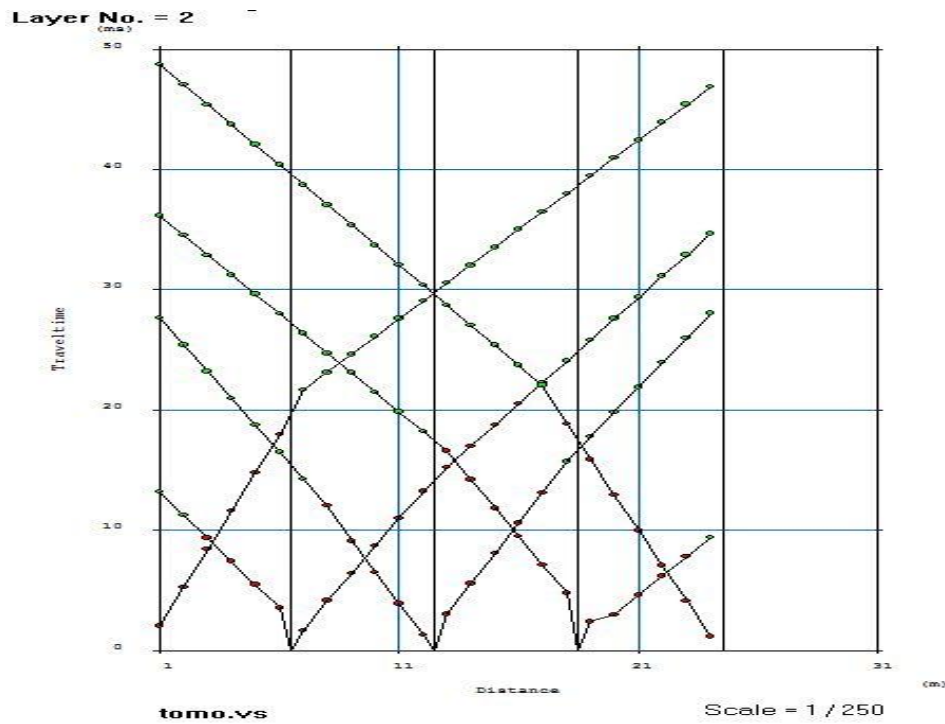


Figura 29. Dromocrónicas seleccionadas.

- Una vez realizada esta selección se genera un modelo del subsuelo mediante la inversión matemática de los datos en el menú *Time-term inversión* → *Do time-term inversión*, dando como resultado un modelo del subsuelo como el que se muestra en la figura 30, donde se puede observar la distribución de los estratos en el subsuelo, las velocidades y los espesores de cada una las capas.

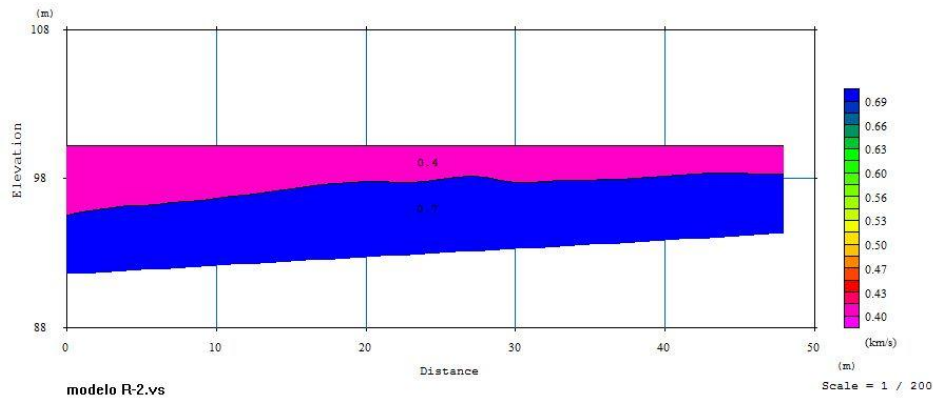


Figura 30. Modelo del subsuelo.

- Posteriormente para elaborar el modelo tomográfico se debe introducir un modelo inicial del subsuelo a través del menú *Tomography* → *Generate initial*.
- Finalmente generar la tomografía se debe ir al menú *Tomography* → *Inversion (with default parameters)*, si se desea modificar el número de iteraciones y no utilizar los parámetros por defecto, debemos dirigirnos al menú *Tomography* → *Inversion (set parameters manually)*, y de esta manera obtenemos el modelo tomográfico del subsuelo en el cual se muestran las distribuciones de la velocidades a las diferentes profundidades (figura 31).

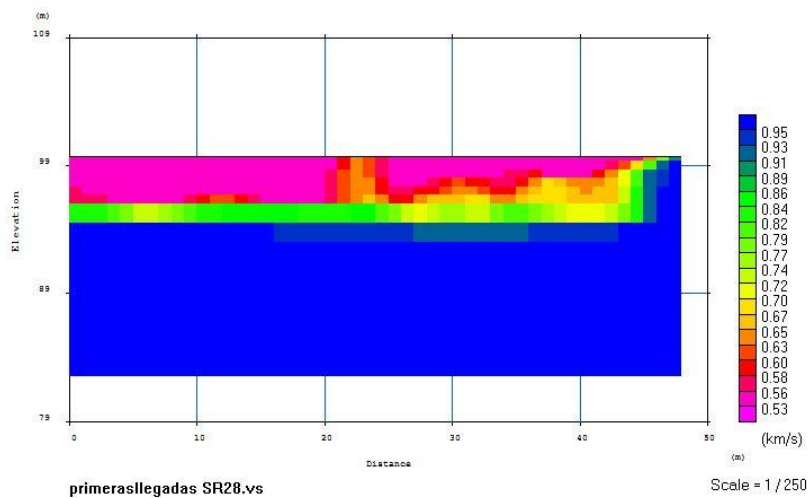


Figura 31. Tomografía sísmica.

4.3 ONDAS SUPERFICIALES

4.3.1 Procesamiento de datos de ondas superficiales

- Para el procesamiento de los datos de ondas superficiales igualmente se emplea el programa PICKWIN, para lo cual se cargan el conjunto trazas del tendido abriendo el total de los archivos adquiridos para cada perfil, mediante las siguientes funciones: *Files* → *Options* → *Append files (select files < 50 files)* (figura 32).

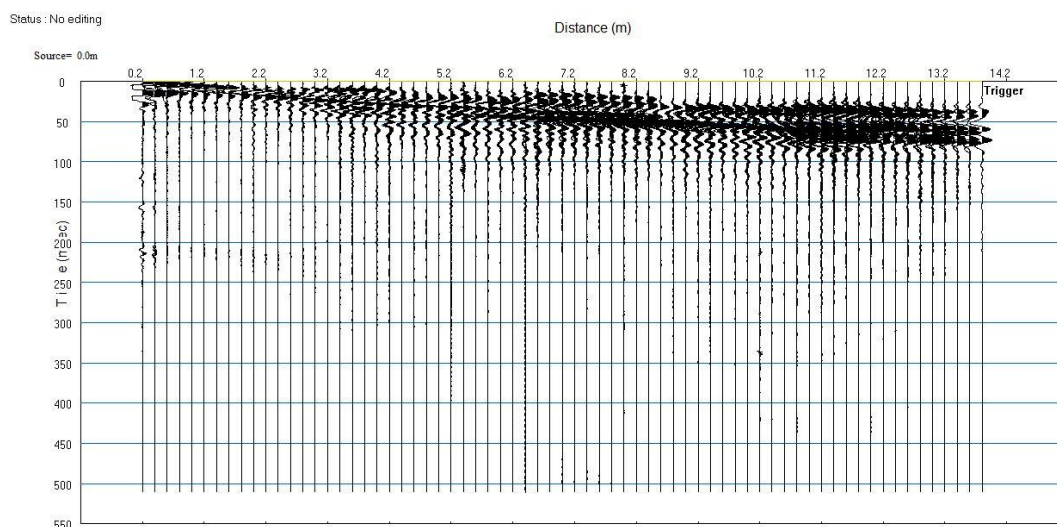


Figura 32. Datos de ondas superficiales.

- Luego de haber cargado las trazas y realizar la edición de aquellas que así lo requieran, se procede a transformarlas al espectro de frecuencia activando la función *Surface - wave analysis* → *Phase velocity - Frequency transformation (D)*.
- Posteriormente se procede a elegir la velocidad y la frecuencia máxima de las ondas superficiales a analizar. Para el caso de nuestra investigación se seleccionó 500 m/s y 35 Hz como se muestra en la figura 33.

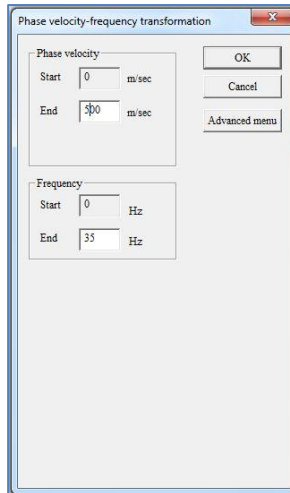


Figura 33. Selección de velocidad y frecuencia máxima.

- Se procede a escoger la velocidad de fase, ejecutando la siguiente funciones (figura 34): *Surface-wave analysis* → *Pick phase velocity (1D)*.

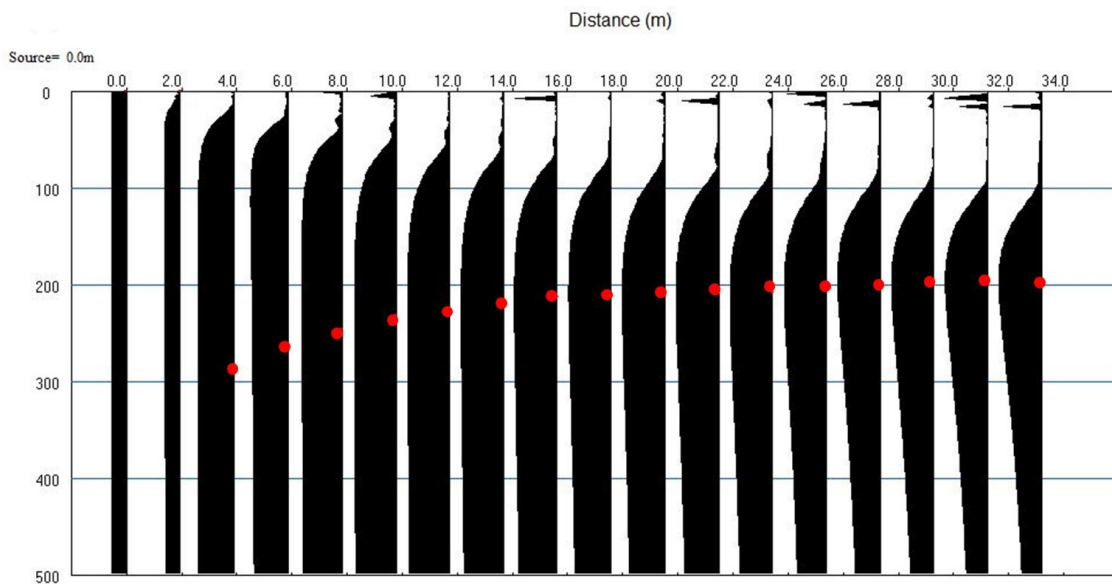


Figura 34. Selección de velocidad de fase.

- En esta etapa del procesamiento se corrigen los puntos desviados o los que estén en velocidad 0 m/s, para que haya sólo una tendencia de puntos.
- Posteriormente se halla la curva de velocidad de fase y se abre otra aplicación llamada **WaveEq** que muestra la curva de velocidad de fase, a través de la siguiente secuencia: *Surface-wave analysis* → *Show phase velocity curve (1D)* (figura 35).

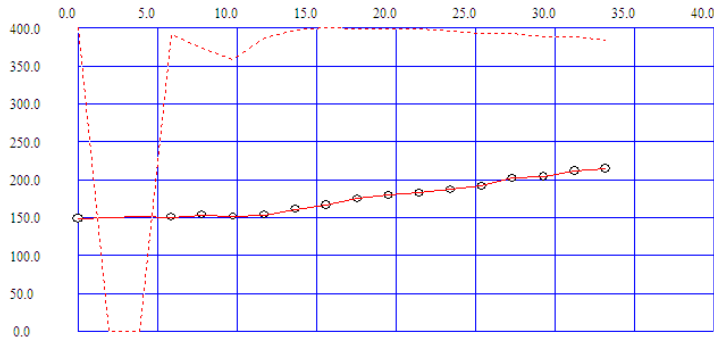


Figura 35. Curva de velocidad de fase.

- La curva roja corresponde a la curva de dispersión formada con los puntos seleccionados.
 - La curva punteada corresponde a la curva que indica la calidad de la dispersión, lo ideal es que dicha curva sea horizontal.
- Luego se procede a generar un modelo inicial, mediante la aplicación de las funciones $MASWID(O) \rightarrow Initial\ model$. En esta etapa se deben indicar el número de capas para el modelo inicial, para nuestro estudio en función de la litología de la zona fue utilizado 4 capas (figura 36).

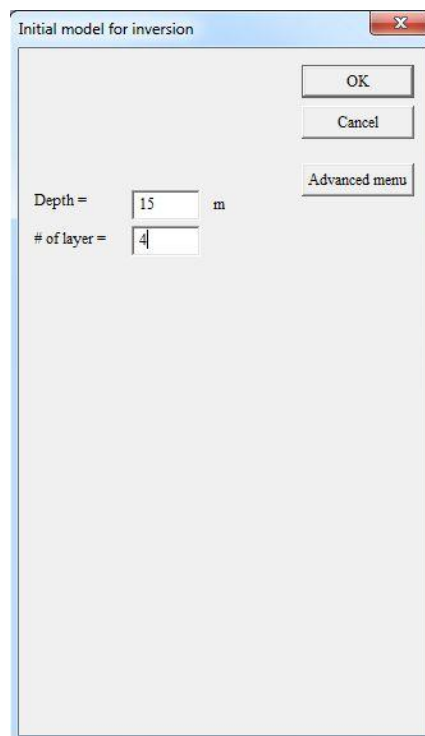


Figura 36. Parámetros del modelo inicial.

- Se genera el modelo inicial (figura 37).

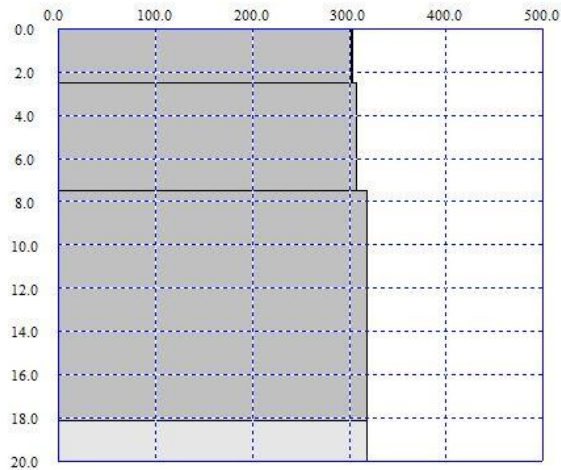


Figura 37. Modelo inicial.

- Posteriormente se realiza la inversión matemática mediante la aplicación de los siguientes comandos *MASW(1D)* → *Inversion* → *Advance menu* → *Robust estimation* como se muestra en la figura 38. Se colocaron 50 iteraciones para mejorar el ajuste del modelo. De esta forma se obtiene un modelo del subsuelo 1D donde se muestra la velocidad de onda S para cada capa y la velocidad V_{s30} (figura 39).

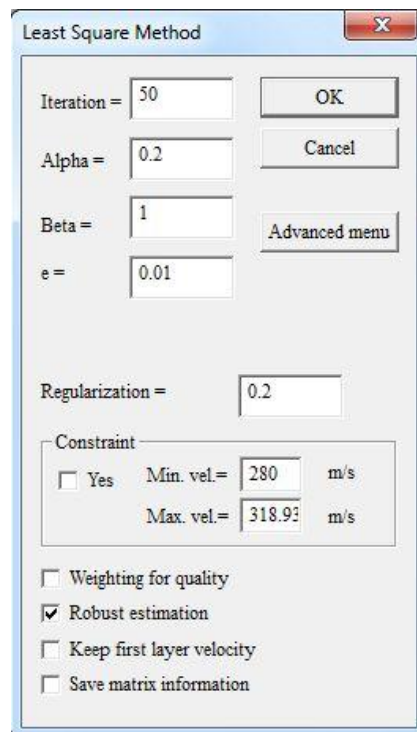


Figura 38. Parámetros de inversión.

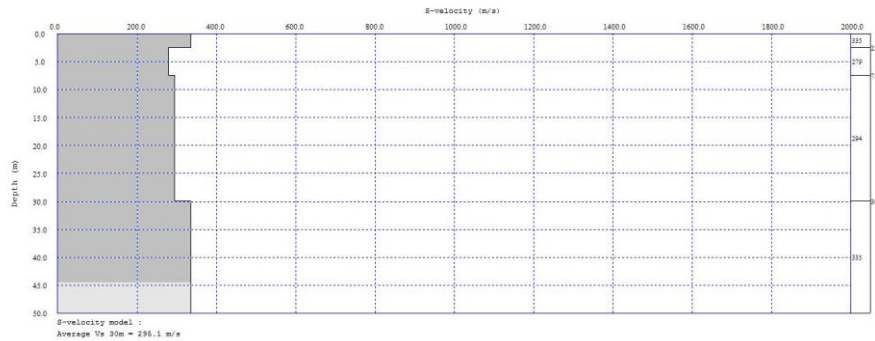


Figura 39. Modelo 1D del subsuelo.

- Finalmente se puede salvar los resultados obtenidos del modelo en forma numérica en un archivo ASCII mediante la aplicación de la función **File(F) → Save analysis result in tabular form (*.txt)** → En el menú emergente que se despliega se escribe el nombre para el archivo con el que se guardaran los resultados. En el archivo se presentan los datos de profundidad, Vp, Vs, densidad y el parámetro de número de golpes (N) (figura 40).

Depth(m)	S-velocity(m/s)	P-velocity(m/s)	Density(g/cm ³)	N
0.000000	335.139523	1606.349962	1.821666	51.858658
2.500000	279.846722	1606.349962	1.821666	29.203913
7.500000	294.774316	1606.349962	1.821666	34.460229
30.000000	335.139513	1606.349962	1.821666	51.858658

Figura 40. Modelo de datos obtenidos en formato .txt.

4.4 MÉTODOS ELÉCTRICOS

4.4.1 Procesamiento de datos de los sondeos eléctricos verticales (SEV) – Dispositivo Schlumberger

Para el procesamiento de los datos eléctricos de los sondeos eléctricos verticales (SEV) se utiliza el programa computacional IPI2WIN, desarrollado por la Moscow State University, el cual permite graficar la curva de resistividad aparente, generar un modelo del subsuelo mediante inversión matemática y modelar pseudosecciones a partir del agrupamiento de una serie de perfiles. A continuación se describe detalladamente la metodología empleada en el procesamiento de los datos.

- Inicialmente los datos adquiridos fueron organizados en el orden requerido por la pantalla inicial de carga de datos (figura 41). Se debe indicar el tipo de dispositivo con el cual se realizó la adquisición, en el caso de nuestro estudio tipo Schlumberger; posteriormente al seleccionar el la función **Input** se deben cargar los valores de voltaje, corriente y potencial espontáneo.

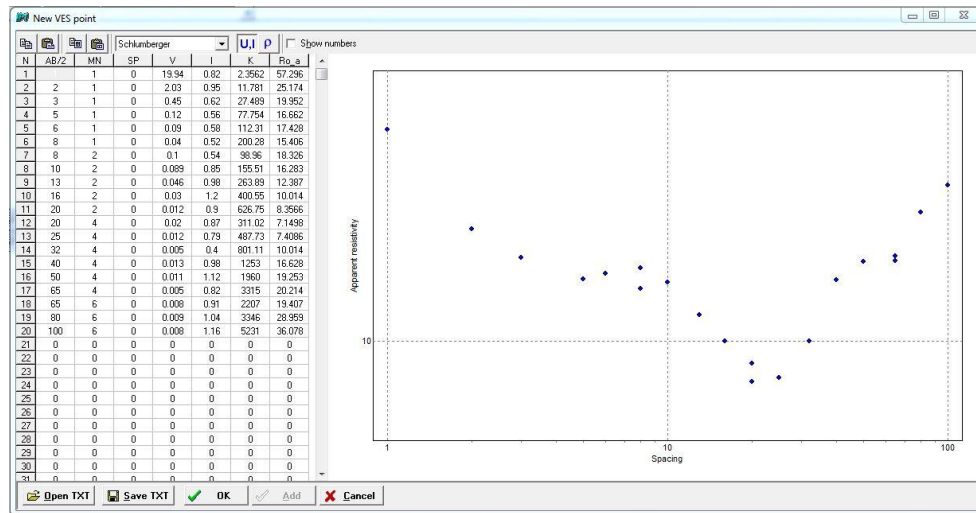


Figura 41. Pantalla inicial de carga de datos.

- Una vez cargados los datos y seleccionando la función **OK** se muestra la curva de resistividad aparente (ρ_a) vs. distancia AB/2. En este gráfico se observan los empalmes realizados en el sondeo durante la adquisición, por lo que resulta necesario indicar al programa cual de las curvas propuestas representa de mejor forma la tendencia de la curva generada (figura 42); una vez realizada esta selección debe activarse la función **OK** y de esta manera generar la curva práctica promedio a la cual se le efectuarán el ajuste para generar el modelo del subsuelo mediante inversión matemática.

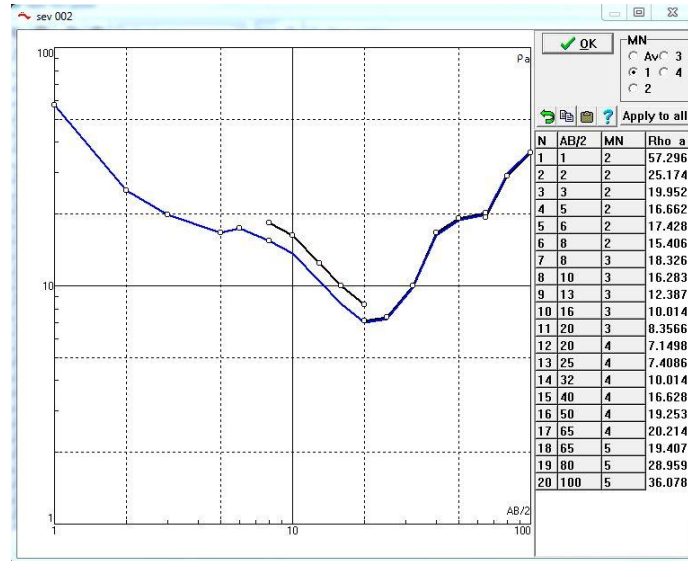


Figura 42. Curva de resistividad aparente (ρ_a) vs. distancia AB/2

- La versión inicial que se genera de la curva está conformada por dos curvas, una negra que representa la curva práctica y otra curva roja que corresponde a la teórica que debe ser ajustada hasta coincidir ambas curvas. Esta interpretación o ajuste puede realizarse de forma manual o automática, para el ajuste o modelado automático debe aplicarse la función *Inversion*, la cual realiza una primera aproximación utilizando los parámetros del modelo inicial y para luego efectuar un mejor ajuste de forma manual modificando la posición de las capas representadas en el gráfico por líneas horizontales azules. Para mejorar el ajuste se pueden añadir o eliminar capas al corte geoelectrico con el objetivo de minimizar el error de correlación entre ambas curvas. Al momento de realizar los ajustes del modelado observamos en la pantalla una tabla donde se muestran los valores de resistividades calculadas y espesores para cada capa del modelo geoelectrico (figura 43).

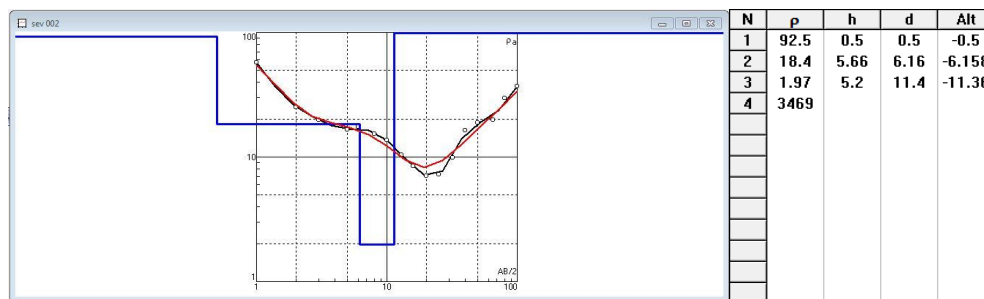


Figura 43. Modelado geoelectrico.

- Al finalizar el ajuste debe guardarse el modelo geoelectrico del sondeo para posteriormente generar la pseudosecciones eléctricas de la zona.
- Para generar la pseudosección se debe abrir simultáneamente varios SEV procesado y correlacionables entre sí, seleccionando la función para abrir varios archivos que se muestra en la figura 44.

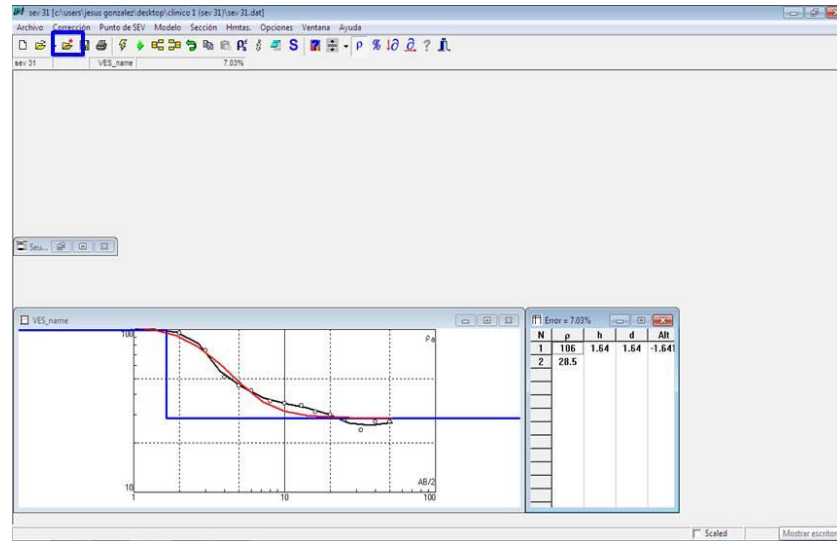


Figura 44. Función para añadir SEV.

- Una vez son abiertos los archivos se debe indicar el nombre de la pseudosección y posteriormente se despliega una ventana donde debe indicarse el tipo de arreglo utilizado y adicionalmente se muestran los nombres de los perfiles y las coordenadas de los puntos de los sondeos a lo largo del perfil (columna X). Por defecto la coordenada del primer punto se asume como 0 y los restantes puntos son ubicados con una variación de 10 metros entre puntos vecinos. Estos valores son las coordenadas un plano matemático, no son distancias medidas sobre la superficie del terreno. Las coordenadas pueden ser editadas en la tabla indicando los nuevos valores de coordenadas (figura 45).

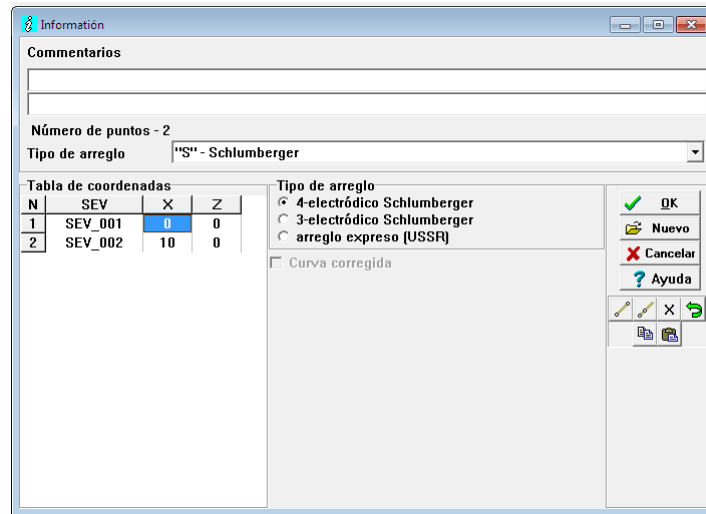


Figura 45. Menú de pseudosección.

- Finalmente al seleccionar **OK** se visualiza una ventana que corresponde a la pseudosección geoelectrica de la zona (figura 46). La pseudosección de resistividad aparente (gráfico superior) y de resistividad interpretada (gráfico superior) son representadas ambas con igual escala horizontal.

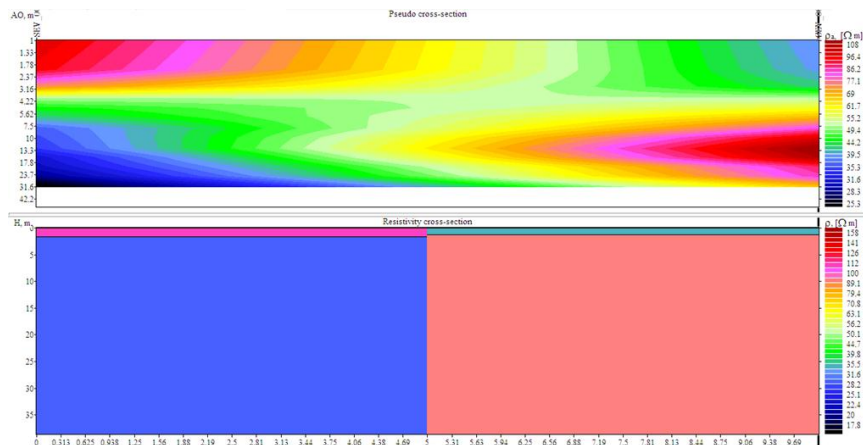


Figura 46. Pseudosección de resistividad.

4.5 CALICATAS ELÉCTRICAS

4.5.1 Procesamiento de datos de las calicatas eléctricas

Para procesar los datos obtenidos del estudio eléctrico de calicatas se utiliza el programa RES2DINV versión 3.53 de la empresa Geotomo Software, el cual permite hacer modelado geoelectrico 2D y 3D mediante la inversión matemática de datos de resistividades. A continuación se explica detalladamente la secuencia de procesamiento empleada:

- Inicialmente los datos obtenidos en el estudio se deben ordenar de forma estándar en una matriz de datos en formato .dat; en este formato cada registro de información es colocado en una línea, adicionalmente se debe indicar el nombre del sondeo, espaciamiento más pequeño entre electrodos, tipo de dispositivo empleado (Wenner, Polo – Polo, Dipolo –Dipolo, Polo – Dipolo, Schlumberger o Dipolo – Dipolo ecuatorial), número total de datos, localización del primer electrodo, datos de resistividad aparente con el espaciamiento y la localización. En la siguiente figura se muestra una matriz modelos de datos en el formato requerido por el programa.

```

Flanco Oeste del edificio de Ingeniería Hidráulica
2
1
63
1
0
3      2      76.17
5      2      70.96
7      2      75.53
9      2      77.29
11     2      83.63
13     2      93.63
15     2      106.45
17     2      97.95
19     2      112.39
21     2      74.54
23     2      68.76
25     2      46.65
27     2      47.19
29     2      49.66
31     2      57.90
33     2      53.18
35     2      55.56
37     2      53.09
6      4      41.81
8      4      35.98
10     4      33.28
12     4      34.73
14     4      31.75
16     4      34.07
18     4      40.37
20     4      44.80
22     4      37.51
24     4      43.87
26     4      49.04
28     4      52.96
30     4      48.84
32     4      47.05
34     4      48.54
9      6      31.05
11     6      28.03
13     6      27.63
15     6      23.13
17     6      25.87
19     6      27.98
21     6      26.25
23     6      25.24
25     6      24.86
27     6      20.54
29     6      21.31
31     6      24.43
12     8      16.93
14     8      16.20
16     8      17.17
18     8      19.31
20     8      19.30
22     8      20.41
24     8      17.67
26     8      16.31
28     8      16.91
15     10     12.67
17     10     14.07
19     10     14.76
21     10     14.94
23     10     15.78
25     10     15.25
18     12     14.08
20     12     12.26
22     12     11.26
0,0,0,0,0

```

Figura 47. Matriz datos modelo con el formato requerido por el RES2DINV.

Especificaciones de cada una de las líneas:

Línea 1: nombre del sondeo.

Línea 2: espaciamiento más pequeño entre electrodos.

Línea 3: tipo de sondeo empleado

1 = Wenner

2= Polo – Polo

3= Dipolo –Dipolo

6= Polo – Dipolo

7= Schlumberger

8= Dipolo – Dipolo ecuatorial

Línea 4: número total de datos.

Línea 5: localización del primer electrodo.

Línea 6: tipo de datos

0 = solo datos de resistividades.

Línea 7: Localización del punto medio, espaciamiento entre electrodos y valor de resistividad aparente. El formato de esta línea se repite para el total de los datos y finalmente debe colocarse el comando **0, 0, 0, 0, 0** para indicar el final al programa de la matriz.

Luego de que los datos son organizados de forma matricial en el formato correcto, se debe abrir el programa RES2DINV y hacer la lectura de los datos mediante la aplicación de la función **File(F) → Read data file**. Una vez que los datos son leídos correctamente aparece en pantalla un resumen de la lectura (figura 48).

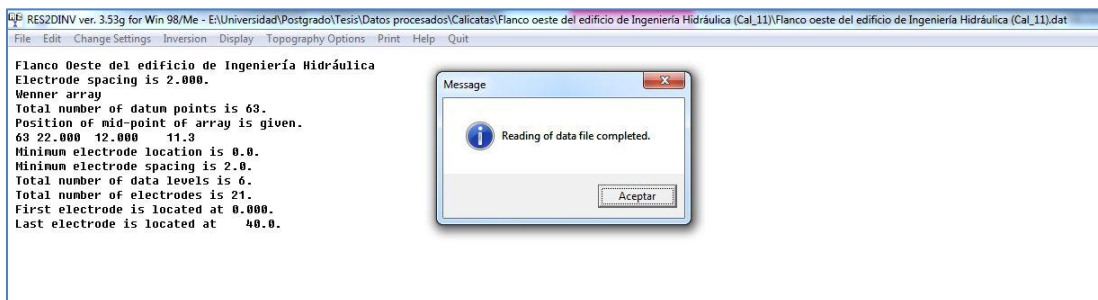


Figura 48. Resumen de la lectura de datos.

Posterior a la lectura de los datos se procede a realizar la inversión matemática para generar el modelo geoelectrico del subsuelo, aplicando las funciones **Inversion → Least- squares**

inversion, generando un modelo 2D (figura 49) del subsuelo donde se muestran las variaciones de la resistividades calculadas en profundidad.

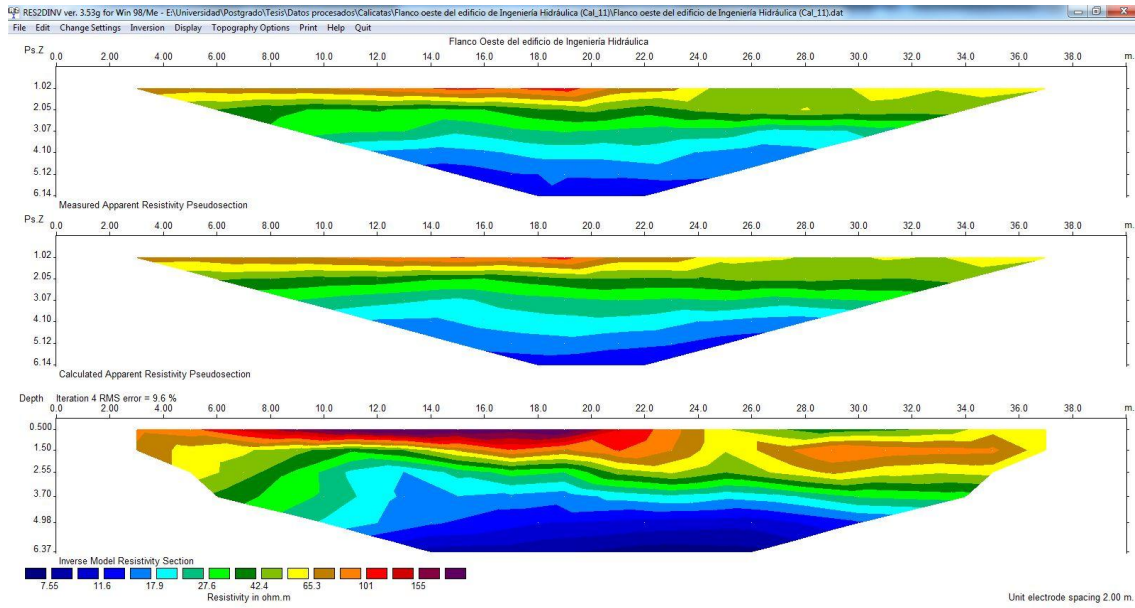


Figura 49. Modelo geoelectrico del subsuelo 2D.

El modelo puede ajustarse variando el número de iteraciones y el error mínimo.

CAPÍTULO V

5.1 RESULTADOS

En este capítulo se describe los resultados obtenidos luego de realizar el procesamiento de los datos eléctricos y sísmicos en la zona de estudio. La descripción se realiza inicialmente por cada método empleado y posteriormente se integran los resultados con los datos geológicos disponibles de la zona.

A partir de los resultados obtenidos en el procesamiento de los datos sísmicos y eléctricos se generaron mapas de los principales parámetros geofísicos, con la finalidad de mostrar la distribución areal de los parámetros en la zona en estudio y de esta manera poder asociar los valores a los diferentes tipos de litología y a la presencia o no de fluidos.

5.2 MÉTODOS SÍSMICOS

Antes de proceder con el análisis de los resultados se realizó una validación de los datos con el fin de garantizar la calidad de los mismos.

5.2.1 Correlación de datos

Con el fin de realizar la correlación de los datos sísmicos obtenidos y los datos de las perforaciones geotécnicas se graficaron las ubicaciones donde se realizaron los 30 perfiles sísmicos de refracción y las 44 perforaciones de las cuales disponía información geológica detallada dentro del campo universitario. Para denotar los perfiles de sísmicos de refracción se utilizó las letras SR y el número del perfil y para las perforaciones la letra P y el número de la perforación (figura 50).

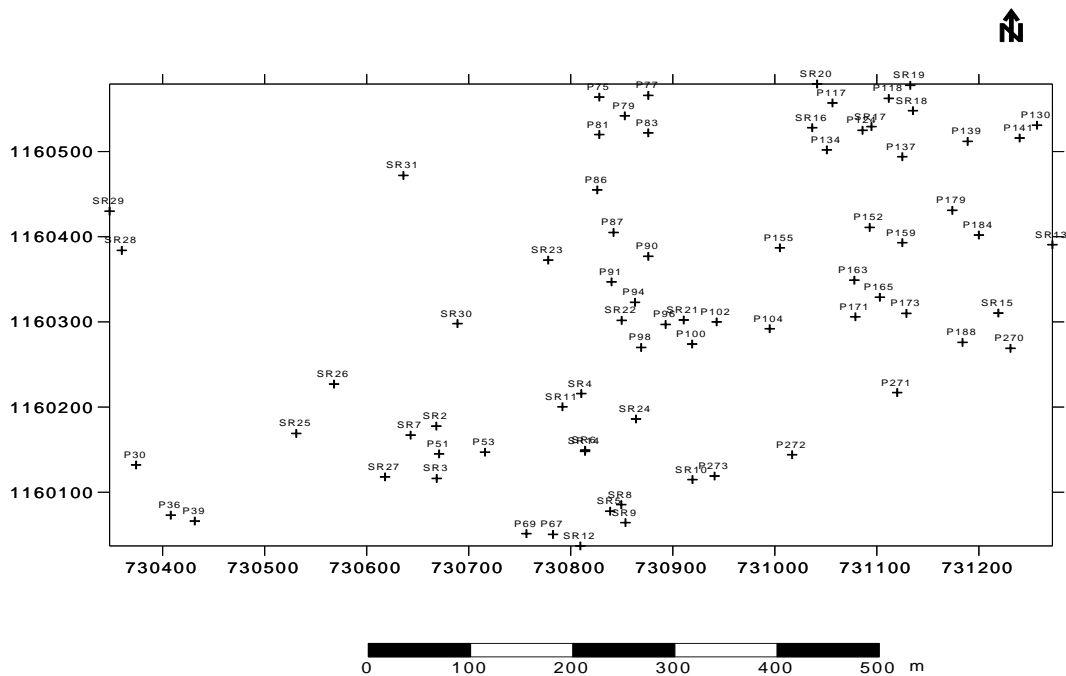


Figura 50. Mapa de ubicación de perfiles de sísmica de refracción (SR) y perforaciones (P).

Luego del conjunto total de datos se escogieron los perfiles que se encontraban a menos de 20 m de alguna perforación para correlacionar y poder validar los datos adquiridos; obteniéndose un total de 14 pares de datos SR-P que cumplían la condición, estos pares fueron comparados y clasificados en función de las litologías como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9. Correlación de datos geofísicos y perforaciones geotécnicas

Nº	Pozo	Perfil	Cota (m)	Vp1 (m/s)	Vs1 (m/s)	NG1	E1 (m)	Vp2 (m/s)	Vs2 (m/s)	NG2	EP1 (m)	Litología1	EP2 (m)	Litología2
1	P273	SR10	867	450	270	30	3.8	500	300	15	2	Relleno	12	Arcilla de baja plasticidad
2	P188	SR15	866	500	290	10	3.62	600	350	10	1.5	Relleno	1.75	Arcilla de baja plasticidad arenosa
3	P270	SR15	866	500	290	18	3.62	600	350	20	8	Arcilla de baja plasticidad	2	Arena limosa
4	P51	SR3	891	400	210	11	2.82	700	380	10	5	Arena limosa	6	Arcilla de alta plasticidad con arena
5	P51	SR2	874	300	180	11	1.94	500	300	10	5	Arena limosa	6	Arcilla de alta plasticidad con arena
6	P51	SR7	874	500	330	11	2.4	700	400	10	5	Arena limosa	6	Arcilla de alta plasticidad con arena
7	P96	SR21	876	400	250	12	5.5	600	295	12	3.8	Arena limosa	9	Arcilla de baja plasticidad
8	P94	SR22	864	700	320	13	5.58	900	450	12	13	Arcilla de baja plasticidad		
9	P118	SR19	868	500	268	15	1.37	800	328	11	4.8	Arcilla limosa	4.7	Arcilla de baja plasticidad
10	P118	SR18	867	300	180	15	1	400	230	11	4.8	Arcilla limosa	4.7	Arcilla de baja plasticidad
11	P117	SR20	871	400	200	12	2.13	1100	650	34	6.8	Arena limosa	1.7	Grava bien gradada con arena
12	P134	SR16	869	400	220	6	2.2	700	400	15	6	Arcilla de baja plasticidad con arena	2	Arena arcillosa con grava
13	P124	SR17	868	400	230	13	1.84	700	400	14	11	Arcilla de baja plasticidad con arena		
14	P67	SR12	870	500	230	16	3.18	900	360	24	9	Arena limosa	6	Arcilla de baja plasticidad con arena

Vp1: Velocidad de la onda P capa 1

Vp2: Velocidad de la onda P capa 2

Vs1: Velocidad de la onda S capa 1

Vs2: Velocidad de la onda S capa 2

NG1: Número de golpes ensayo SPT capa 1

NG2: Número de golpes ensayo SPT capa 2

E1: Espesor de la capa 1 calculado con sísmica

EP1: Espesor de la capa 1 medido en la perforación

EP2: Espesor de la capa 2 medido en la perforación

Litología
Arena limosa
Relleno
Arcilla
Arcilla limosa
Arcilla de baja plasticidad con arena
Grava bien gradada con arena
Arena arcillosa con grava

De la tabla anterior se observan varios aspectos importantes entre los que destacan:

- Existencia de alta correlación entre las litologías descritas en las perforaciones y las velocidades obtenidas.
- Alta correlación entre las velocidades y en número de golpes obtenidos en el ensayo SPT.
- Buena relación entre la V_p y la V_s para cada una de las litologías presentes.
- Baja correlación entre los espesores calculados por sísmica de refracción y los obtenidos por las perforaciones, esto debido posiblemente a 3 aspectos: alta variabilidad lateral de la litología, diferencia gradual de los niveles de compactación y efecto de la capa meteorizada.

Los valores obtenidos fueron clasificados en 5 grupos litológicos como se observa en la tabla 9, esta clasificación fue realizada tomando en cuenta que los métodos sísmicos no son capaces de discriminar con tanto detalle la litología. Los grupos litológicos de clasificación fueron: arenas, arcillas, gravas, arcillas con diferentes contenidos de arena y rellenos. Posteriormente fueron graficados los pares V_p - V_s y V_s -NG para la capa 1 y la capa 2, con el fin de validar la correlación entre los datos geofísicos y geológicos, y observar las distribuciones de las litologías en función de las velocidades y el número de golpe de los ensayos SPT, obteniéndose los siguientes resultados:

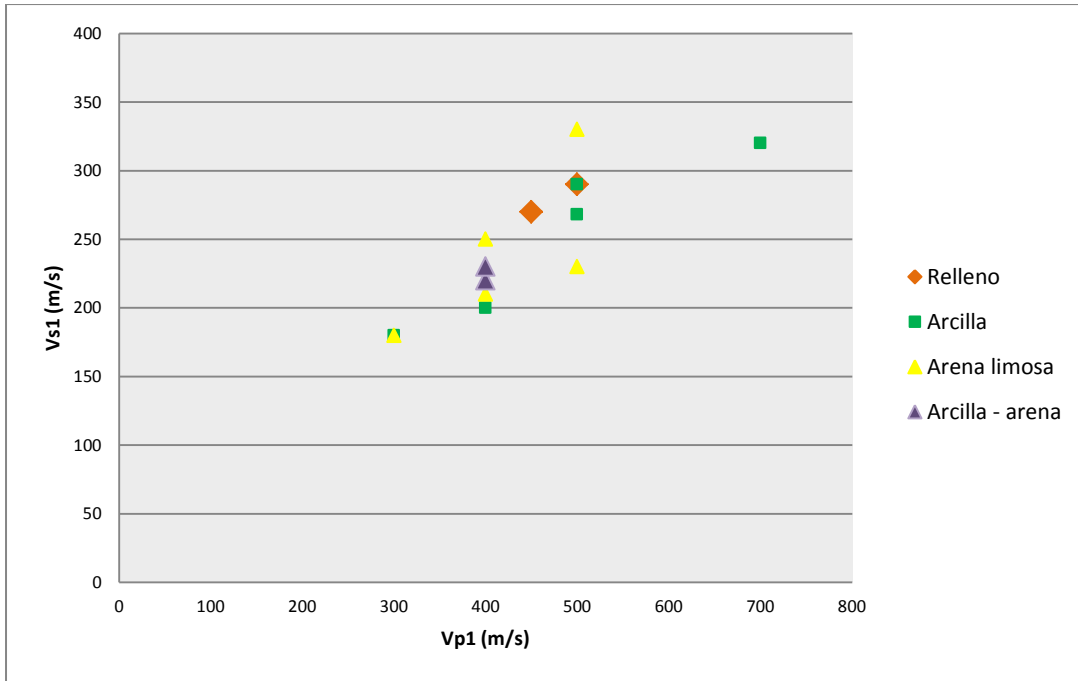


Figura 51. Gráfico de Vp – Vs capa 1

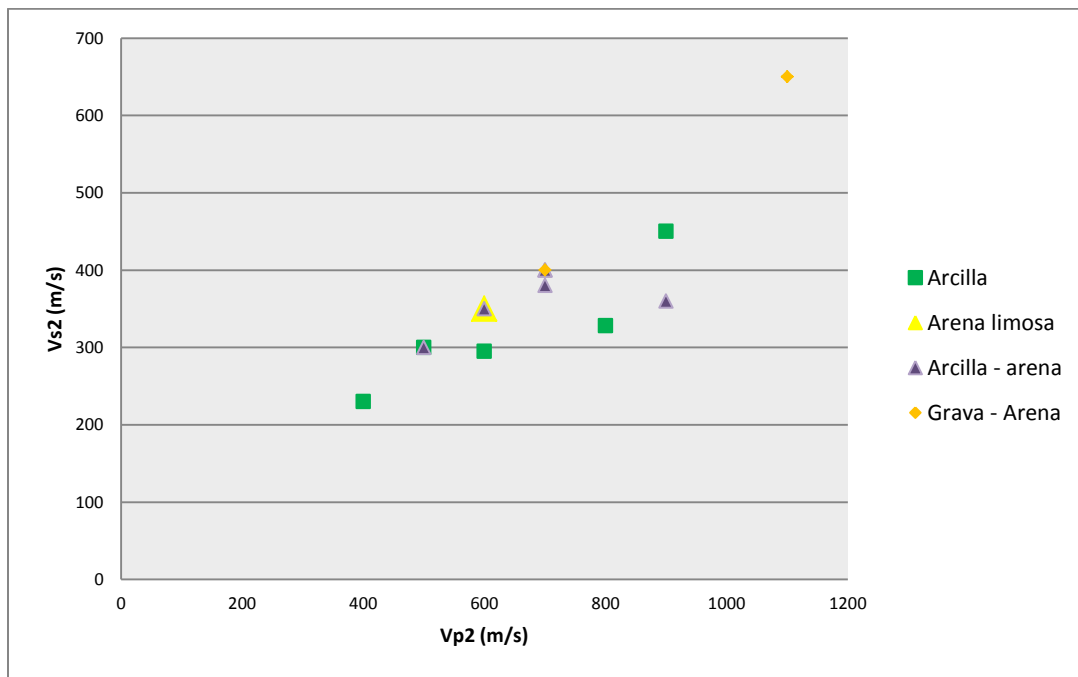


Figura 52. Gráfico de Vp – Vs capa 2

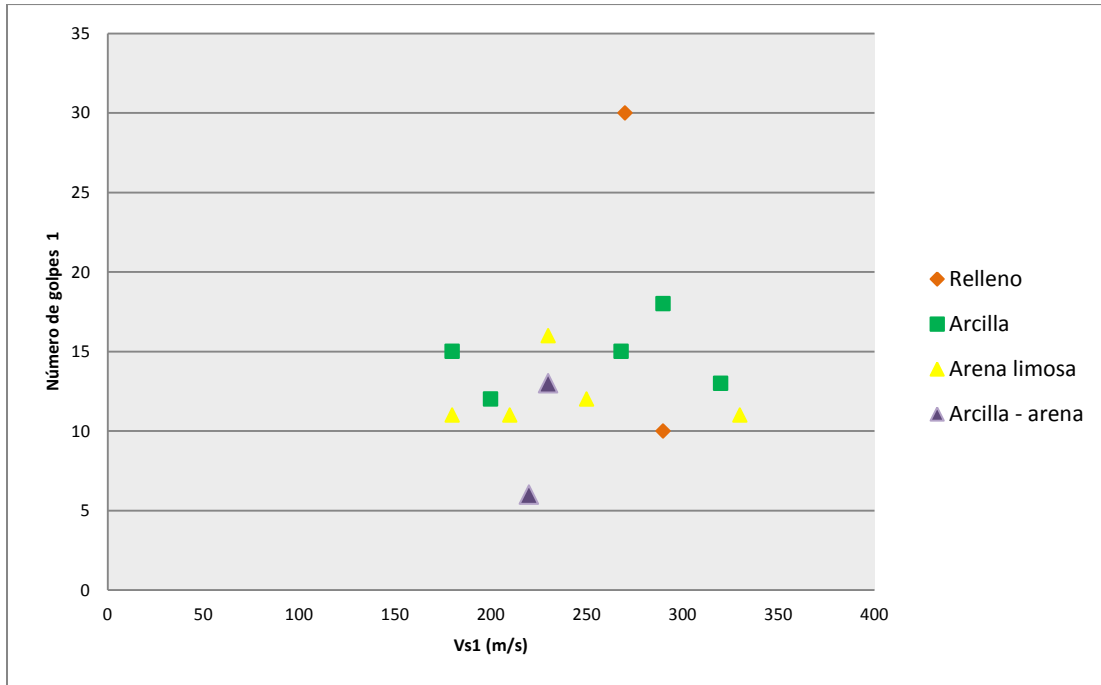


Figura 53. Gráfico de Vs – NG capa 1

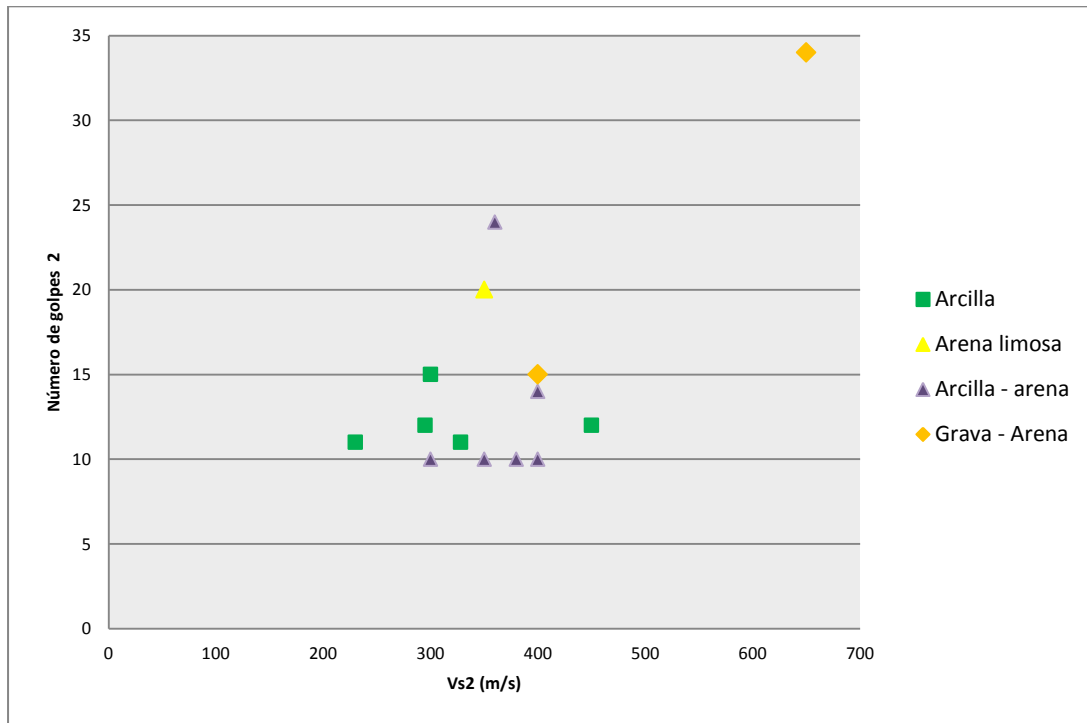


Figura 54. Gráfico de Vs – NG capa 2

De los gráficos de Vp-Vs para ambas capas se observa una alineación de los diferentes grupos litológicos y un no tan evidente agrupamiento de los mismos en rangos de

velocidades que se correlacionan con los rangos de valores teóricos para suelos de estas litologías.

Para los gráficos $V_s - NG$ se observa un agrupamiento de las litologías en función del número de golpes tanto para la capa 1 como para la 2, con excepción de litologías tipo grava y rellenos donde si se observa una mayor dispersión de los datos, posiblemente asociada a los diferentes niveles de compactación y al número bajo de pares de estas litologías con el que se contaba para la correlación.

5.2.2 Sísmica de refracción

Se procesaron un total de 30 perfiles de refracción con separación entre geófonos y separación fuente primer receptor (*offset*) variable; esta variabilidad estaba condicionada por el espacio disponible para realizar el perfil. De los datos sísmicos de refracción obtenidos se generaron un total de 9 mapas que muestran la distribución en el campo de la universidad para las 2 primeras capas de los siguientes parámetros:

- Velocidad de onda P de la capa 1.
- Velocidad de onda S de la capa 1.
- Velocidad de onda P de la capa 2.
- Velocidad de onda S de la capa 2.
- Espesor de la capa 1.
- Módulo de rigidez de la capa 1.
- Módulo de Poisson de la capa 1.
- Módulo de rigidez de la capa 2.
- Módulo de Poisson de la capa 2.

Los mapas fueron generados mediante el programa *Surfer 8.0, Golden Software, Inc.*, empleando el algoritmo interpolación de Kriging.

Adicionalmente con el fin de observar una división más regional de los valores velocidades obtenidos y poder observar una distribución por zona, los mapas de V_p y V_s para la capa 1 y capa 2 además fueron graficados con un intervalo entre líneas más grande, por lo que observaremos un total de 2 mapas para cada velocidad (V_p y V_s) y para las capas 1 y 2.

5.2.3 Mapas de velocidad de onda P.

En el mapa de velocidades de onda P para la capa 1 (figura 55) se observa que las velocidades sísmicas para estas ondas están entre 280 m/s y 880 m/s, ubicándose los mayores valores de V_p en la zona suroeste y central del área en estudio; dividiendo esta zona se encuentra una región de bajas velocidades en el orden de 330 m/s con una orientación aproximada norte-sur. Adicionalmente las otras zonas que presentan bajas velocidades de onda P se pueden observar al norte y al noreste del mapa. Los gradientes de velocidades más altos se presentan en el área central cercana a la zona divisoria de las altas de velocidades.

En este mapa, por tratarse de la capa más superficial del suelo, puede decirse que la principal variable que controla la velocidad no es la litología sino los niveles de compactación del suelo, por lo que se puede indicar que las zonas de mayores velocidades constituyen las zonas de mayor compactación y las zonas de menores velocidades las de menor compactación.

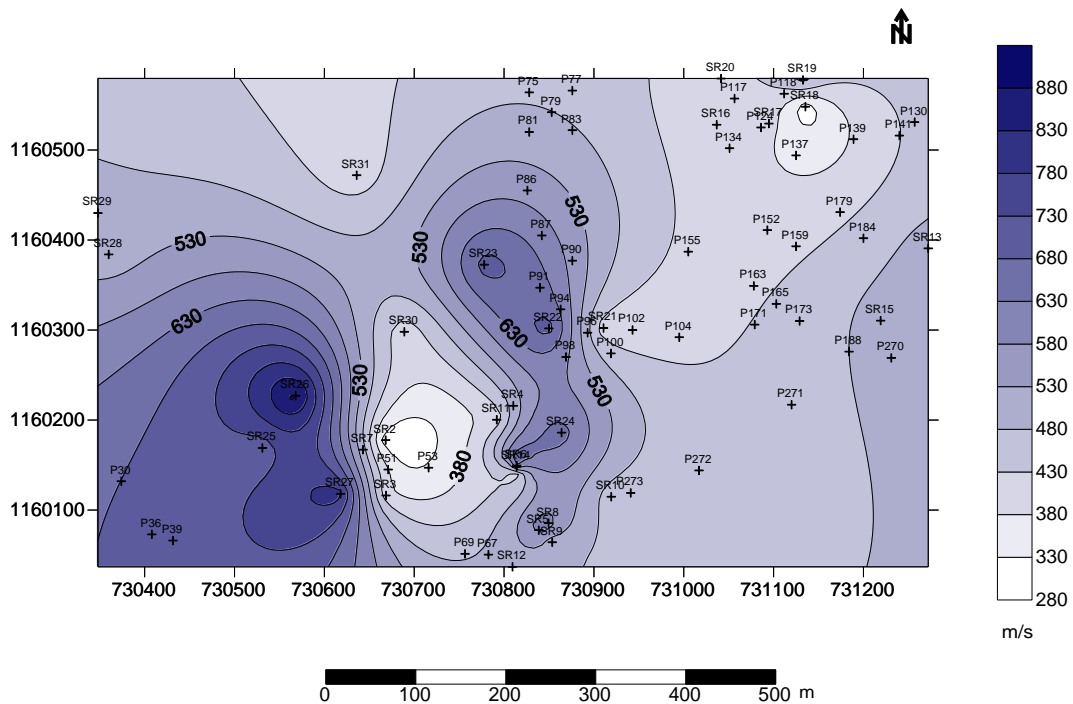


Figura 55. Mapa de velocidad de onda P para la capa 1.

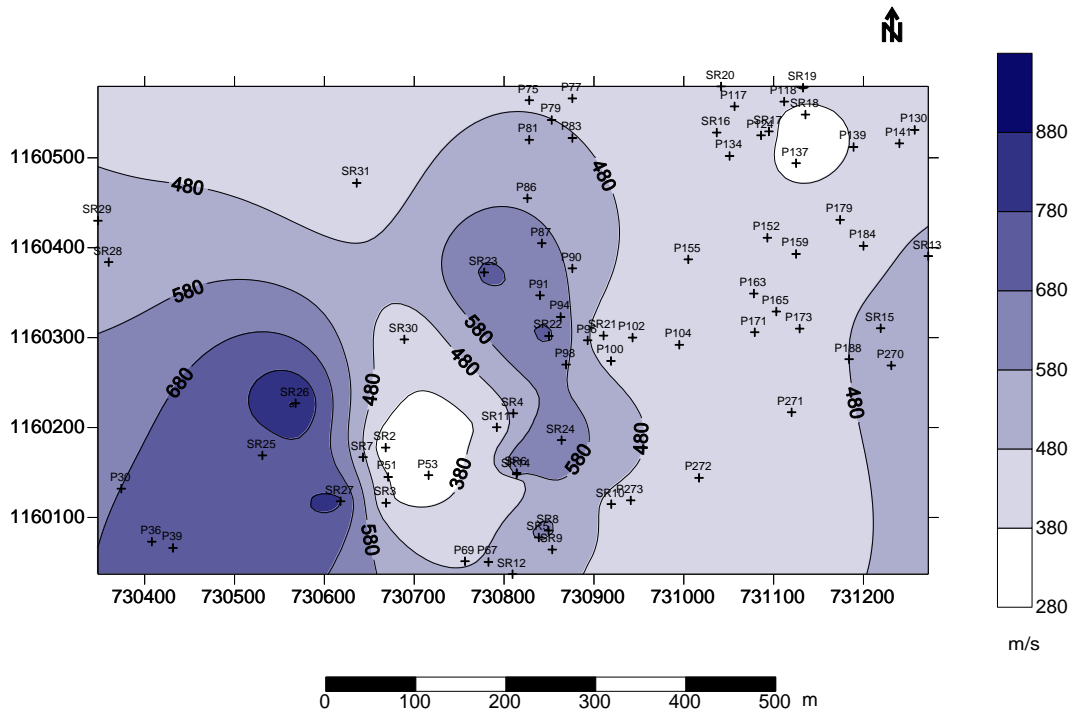


Figura 56. Mapa de velocidad de onda P regional para la capa 1.

En la figura 57 se muestra un mapa de espesores de la capa 1 calculado a partir de los datos sísmicos, con un rango de profundidades que va desde 0.8 m a 5.3 m, observándose los máximos espesores promedios en el orden de 3.8 m en las zonas noroeste, sureste y central del mapa, mientras que los espesores mínimos en el orden de 1.2 m se encuentran en la zona noreste y suroeste. En el noroeste de la zona en estudio aflora la Formación Las Mercedes que constituye el basamento rocoso del área; debido al alto buzamiento de la misma que se evidencian en los afloramientos cercanos es que se presentan elevados espesores sedimentarios para la capa 1 en esta zona.

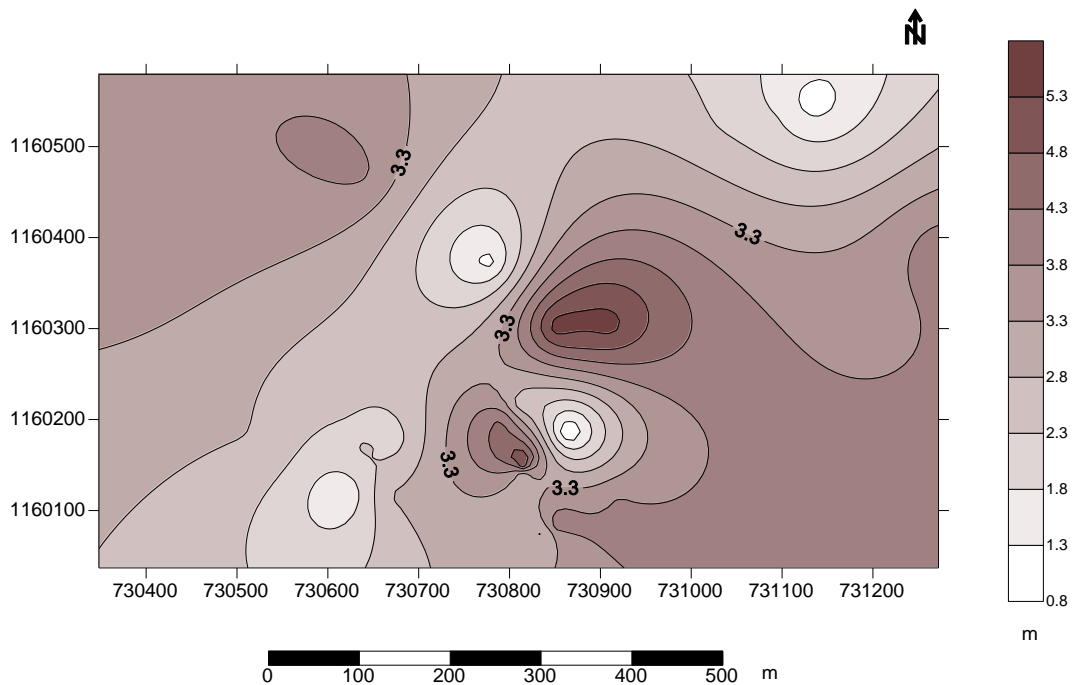


Figura 57. Mapa de espesores para la capa 1.

Las velocidades de onda P para la capa 2 (figura 58) están en el rango de 400 m/s a 1400 m/s, observándose los mayores valores de V_p hacia la zona oeste del mapa y los menores valores hacia el este, mostrándose de forma clara una disminución general de las velocidades en dirección oeste-este, lo que indica el amplio rango de velocidades la capa 2 la presencia de dos litologías distintas. Al igual que para el mapa de velocidades de onda P para la capa 1 se muestra de forma no tan destacada una región de baja velocidad en la zona central e igualmente asociada a esta se encuentran localizados los mayores gradientes de velocidades. Interpretando en el mapa de V_{p2} regional (figura 59) podemos distinguir 3 zonas: una de altas velocidades en la zona oeste, una de velocidades intermedias en la zona central y una de bajas velocidades en la zona este.

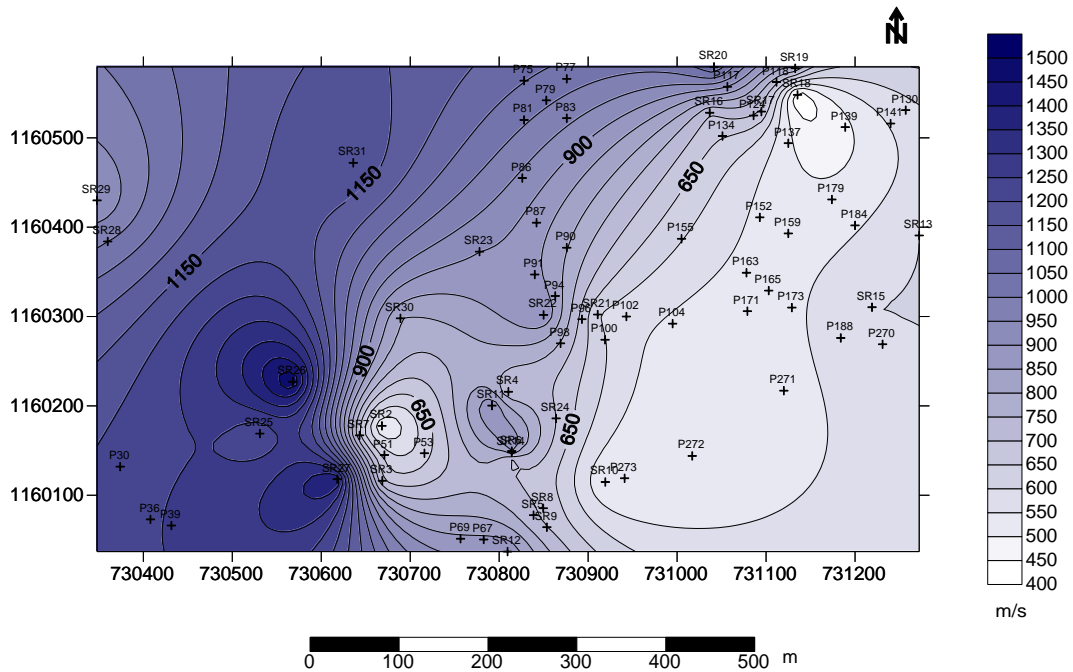


Figura 58. Mapa de velocidad de onda P para la capa 2.

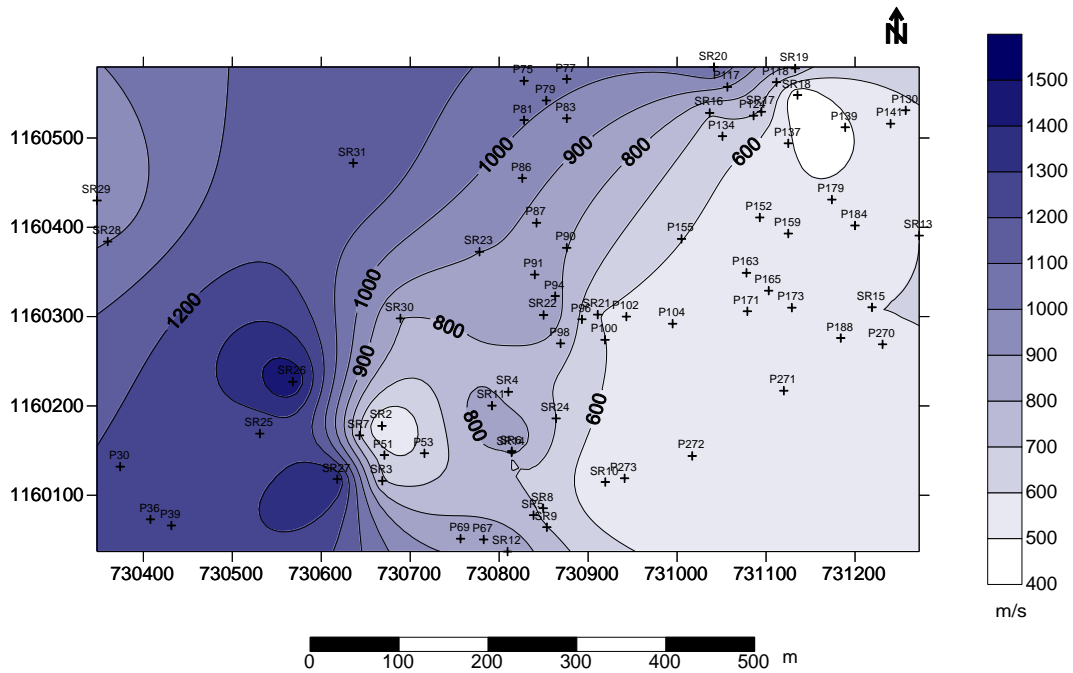


Figura 59. Mapa de velocidad de onda P regional para la capa 2.

5.2.4 Mapas de velocidad de onda S.

En el mapa de velocidades de onda S para la capa 1 (figura 60) se observa que las velocidades sísmicas para estas ondas están entre 170 m/s y 390 m/s, y al igual que en el mapa de velocidades de onda P para capa 1 se ubican los mayores valores de velocidad en la zona suroeste y central del área en estudio, destacándose nuevamente una disminución

importante en el rango de los 200 m/s que divide a la región, esto se evidencia claramente en el mapa Vs1 regional (figura 61); esta zona divisoria de baja velocidad tiene una orientación aproximada norte-sur. Adicionalmente las otras zonas que presentan bajas velocidades de onda S se pueden observar al norte y al noreste del mapa. El comportamiento de los gradientes mantiene la misma tendencia que en el mapa de onda P.

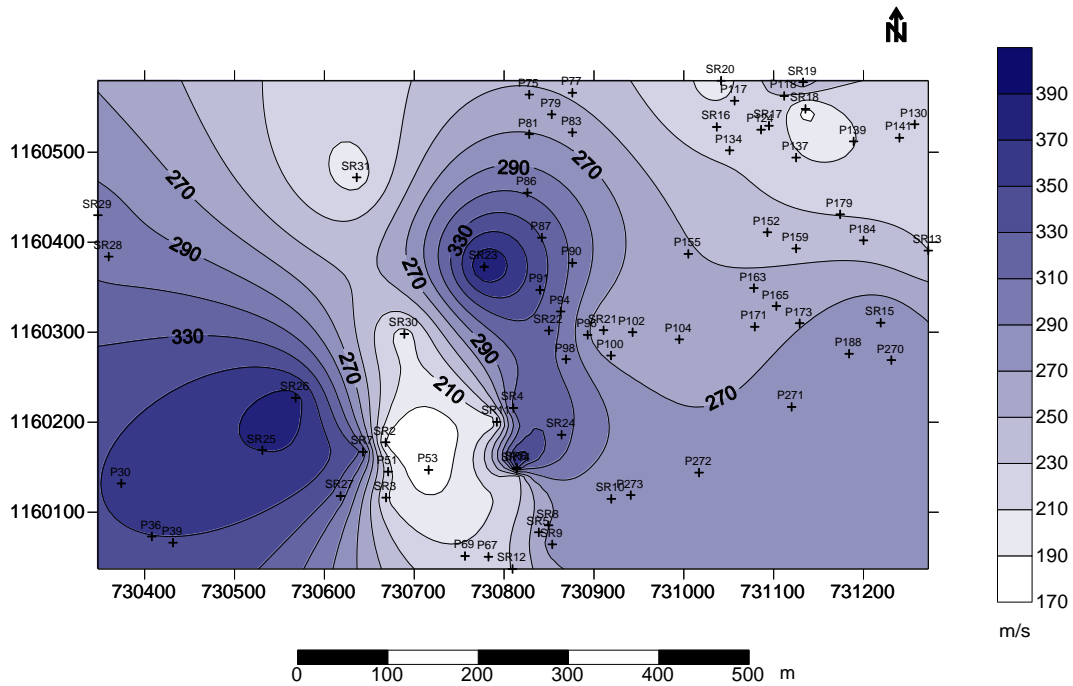


Figura 60. Mapa de velocidad de onda S para la capa 1.

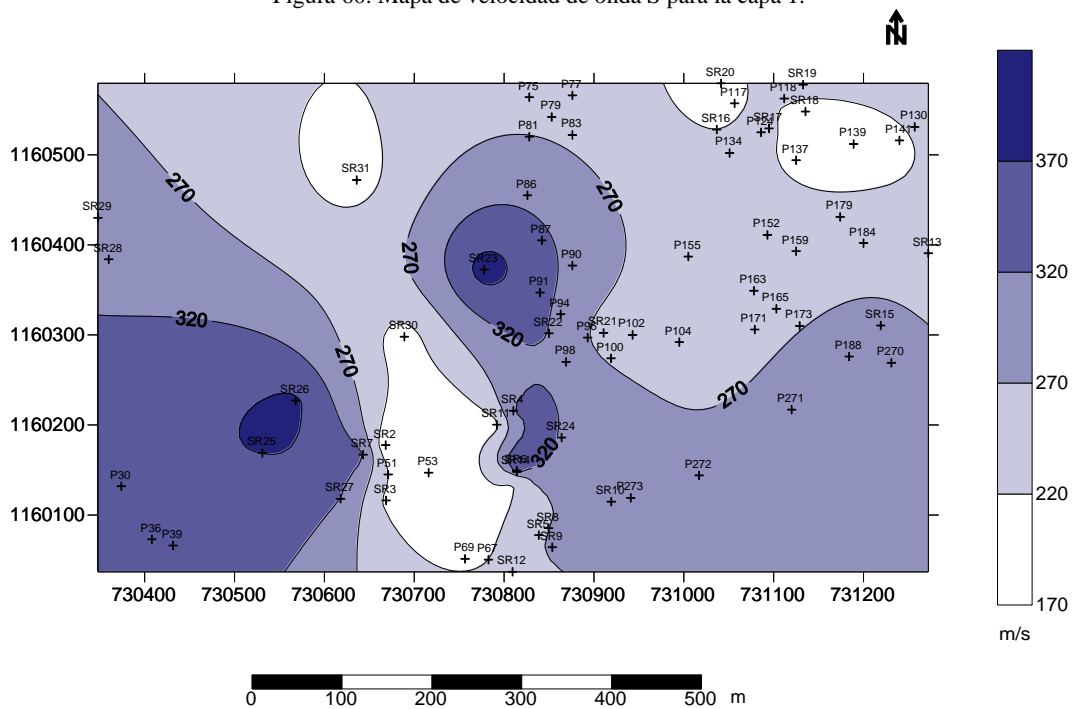


Figura 61. Mapa de velocidad de onda S regional para la capa 1

Para el mapa de las velocidades de onda S para la capa 2 (figura 62) los valores de velocidades se encuentran entre 220 m/s y 720 m/s, observándose los valores más altos en la zona noroeste y los valores más bajos en la zona sureste. La tendencia decreciente de los valores de velocidades de onda S se mantiene de forma regular en dirección noroeste-sureste. Los valores bajos de Vs de la zona sureste están asociados a la posible presencia de fluidos, información que se corrobora por la ubicación de pozos de aguas dentro del *Campus* universitario y los bajos valores de resistividades obtenidos para la zona en los SEV y en las calicatas eléctricas.

En el mapa de Vs2 regional (figura 63) podemos distinguir 2 zonas, una de velocidades altas a intermedias de onda S al oeste y una de bajas velocidades de onda S al este.

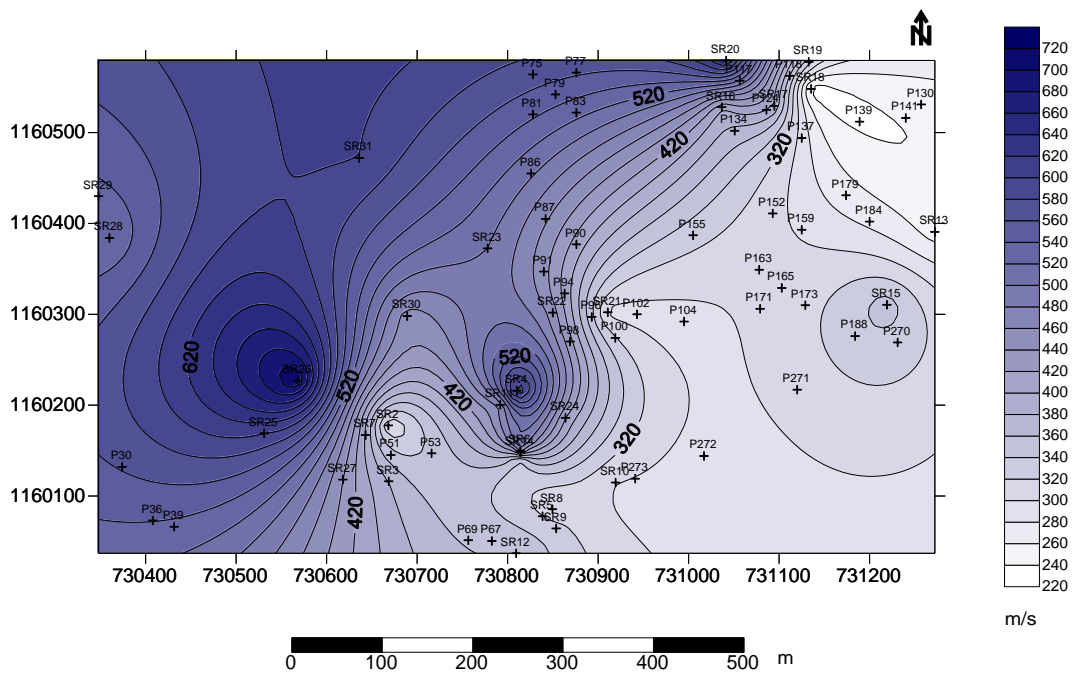


Figura 62. Mapa de velocidad de onda S para la capa 2.

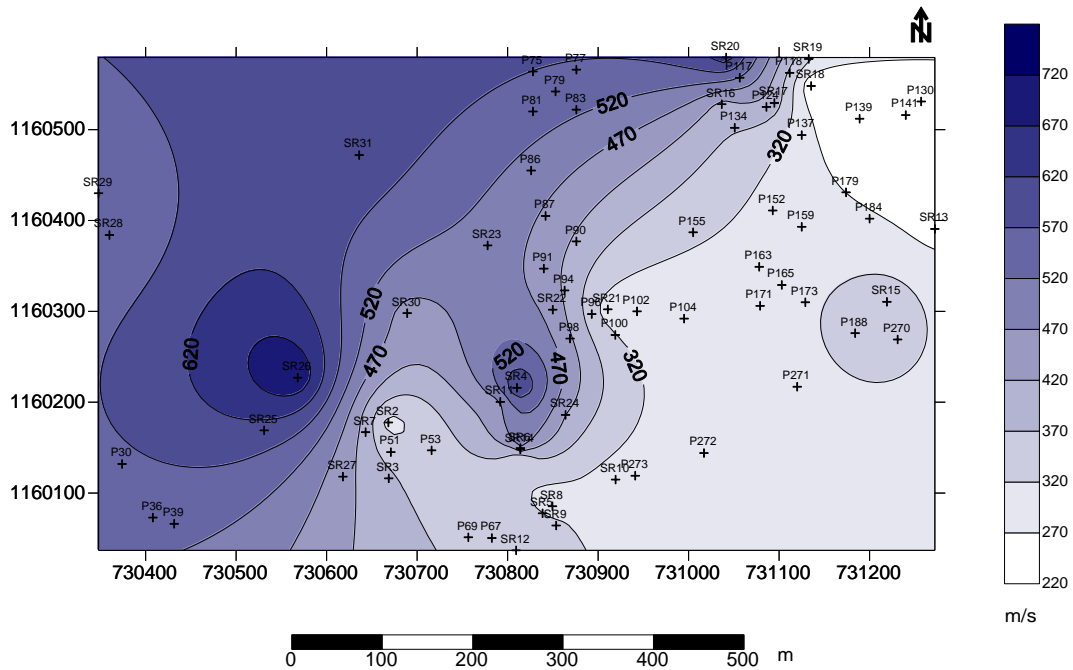


Figura 63. Mapa de velocidad de onda S regional para la capa 2.

5.2.5 Mapas de módulos elásticos.

Los mapas de los módulos elásticos fueron calculados en función de los valores de V_p y V_s obtenidos de los registros sísmicos de refracción y de una densidad estimada en función de las características litológicas del suelo de 1.9 g/cm^3 . Estos mapas al igual que los de velocidades fueron calculados para la capa 1 y 2.

5.2.5.1 Mapas de módulos de rigidez.

En el mapa de módulo de rigidez dinámico para la capa 1 (figura 64) los valores obtenidos se encuentran entre 50 MPa y 290 MPa, observándose los mayores valores en la zona central y suroeste del área en estudio y los valores más bajos en la zona divisoria de baja velocidad de orientación norte-sur y al norte del mapa.

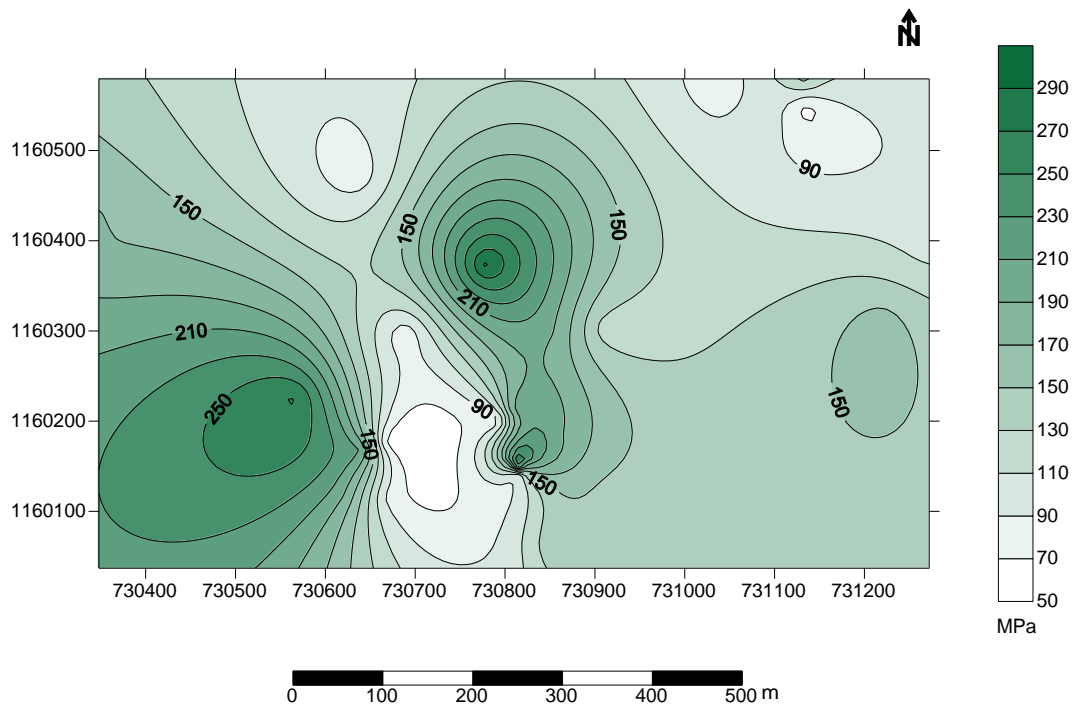


Figura 64. Mapa de módulo de rigidez para la capa 1.

Para el caso del mapa de rigidez dinámico para la capa 2 (figura 65) los valores se encuentran entre 50 MPa y 900 MPa, localizándose los valores más altos en la zona oeste y los valores más bajos en la zona este del área en estudio. Las mayores gradientes de módulo de rigidez para la capa 2 se observan en la zona oeste, mientras que en la zona este los gradientes son más suaves.

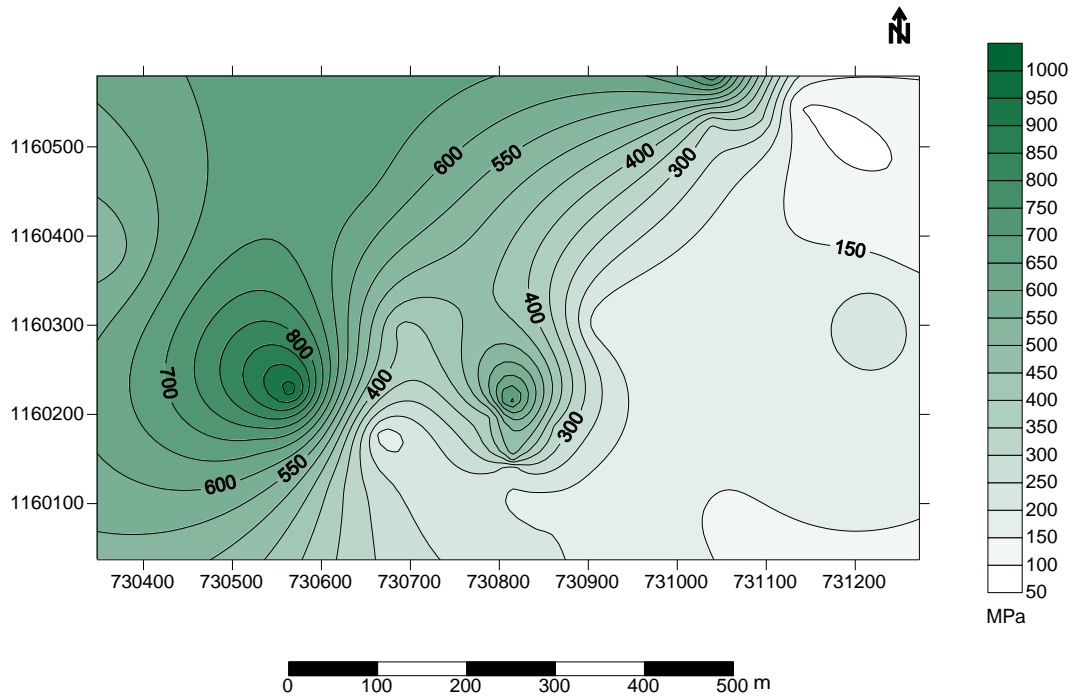


Figura 65. Mapa de módulo de rigidez para la capa 2.

5.2.5.2 Mapas de módulos de Poisson.

Con el fin de obtener otro parámetro para la caracterización del subsuelo del área en estudio se calculó el módulo de Poisson para ambas capas. En el mapa de módulo de Poisson para la capa 1 (figura 66) los valores se encuentran entre 0.06 y 0.38, observándose una distribución irregular de los mismos. En las zonas suroeste y central se distribuyen los valores más altos y en la zona sureste los valores más bajos.

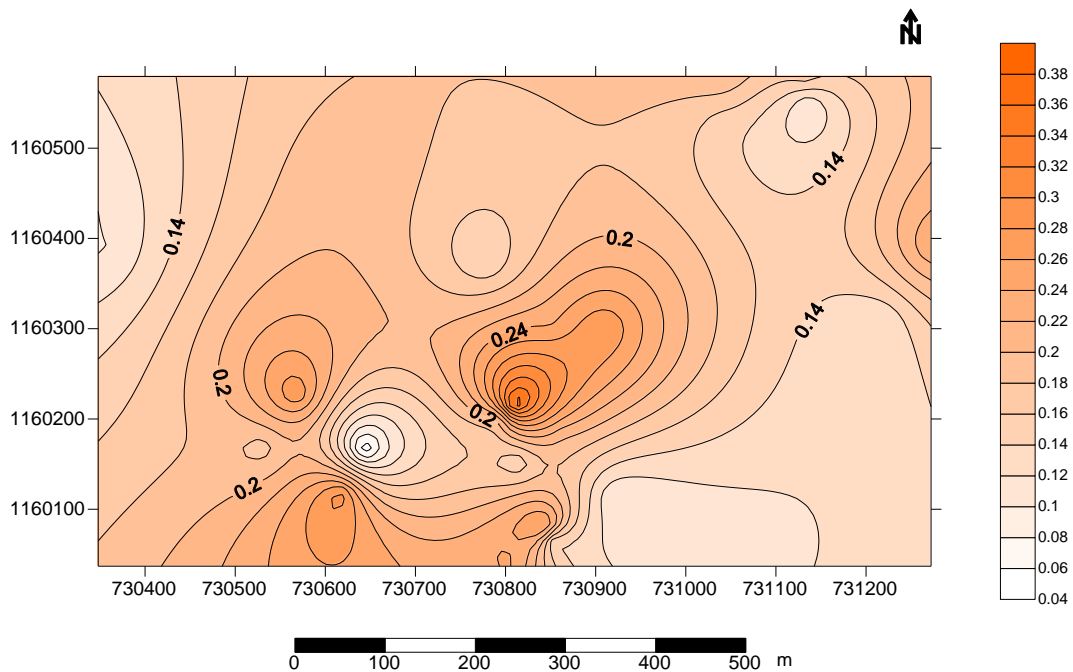


Figura 66. Mapa de módulo de Poisson para la capa 1.

Para el mapa de módulo de Poisson para la capa 2 (figura 67) los valores se encuentran en el rango de 0.1 a 0.38, con la presencia de los valores más altos hacia la región suroeste y los valores más bajos hacia la región central asociada a la zona de baja velocidades y en la zona sureste asociado a la presencia de fluidos, corroborado con la información geológica y de resistividades obtenidas.

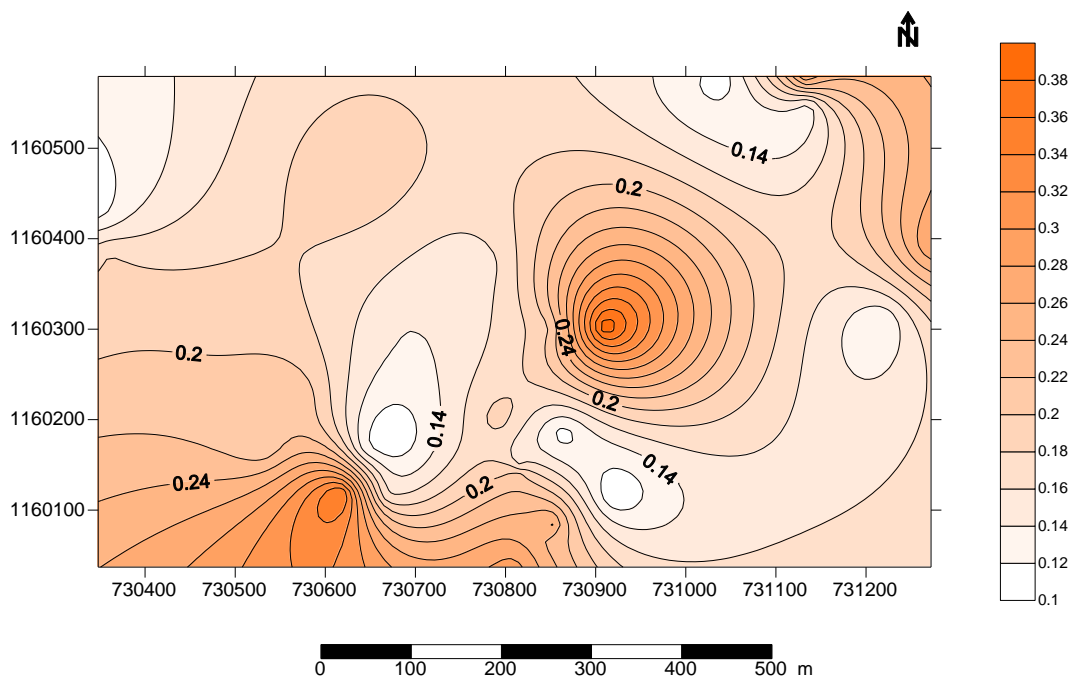


Figura 67. Mapa de módulo de Poisson para la capa 2.

5.3 ONDAS SUPERFICIALES

Se procesaron un total de 33 perfiles de ondas superficiales con una separación entre geófonos de 0.5 m y separación fuente primer receptor de 0.5 m. En la figura 68 se muestra la ubicación de los perfiles de ondas superficiales y para denotar los perfiles de ondas superficiales se utilizó las letras OS y el número del perfil.

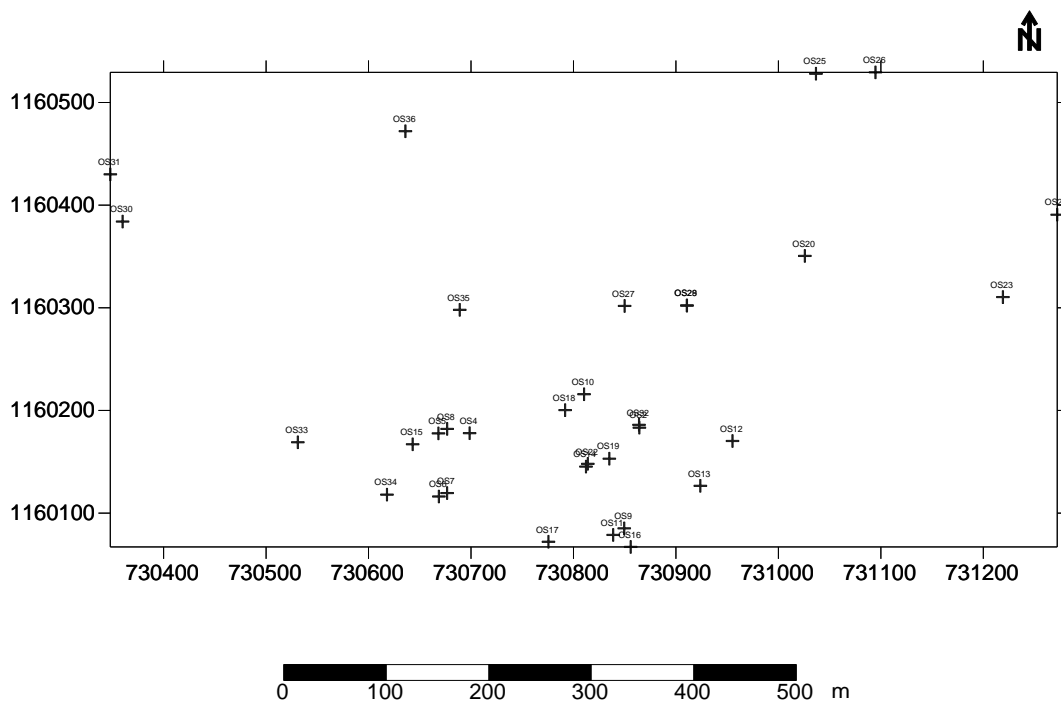


Figura 68. Mapa de ubicación de perfiles de ondas superficiales.

5.3.1 Mapa de Vs30

Las velocidades de Vs30 obtenidas para la zona en estudio se encuentran entre 250 m/s y 450 m/s (figura 69), donde los valores más altos se encuentran en la zona oeste y los valores más bajos hacia la zona este.

En función del rango de valores obtenidos y basado en la tabla de clasificación de suelos para Vs30 realizada según las recomendaciones de NEHRP (2003) (tabla 6), los suelos de la zona en estudio pueden clasificarse en tipo C y tipo D, siendo los de **tipo C Suelos densos a Rocas suaves** cuyo rango de velocidades se encuentra entre 360 m/s y 760 m/s, valores que se correlacionan con los obtenidos en la zona oeste del área en estudio (360 m/s y 450 m/s). Mientras que para la zona este, según la tabla de clasificación, tenemos suelos **tipo D Suelos suaves** cuyo rango de velocidades se encuentra entre 180 m/s y 360 m/s,

valores que igualmente se correlacionan con los obtenidos para la zona que se encuentran entre 250 m/s y 360 m/s. Basados en la evaluación de este parámetro, se puede decir que el Campo de la Ciudad Universitaria de Caracas posee suelos competentes para la construcción de obras civiles, pero sin embargo, los suelos más aptos para la construcción de grandes estructuras se encuentran en la zona oeste.

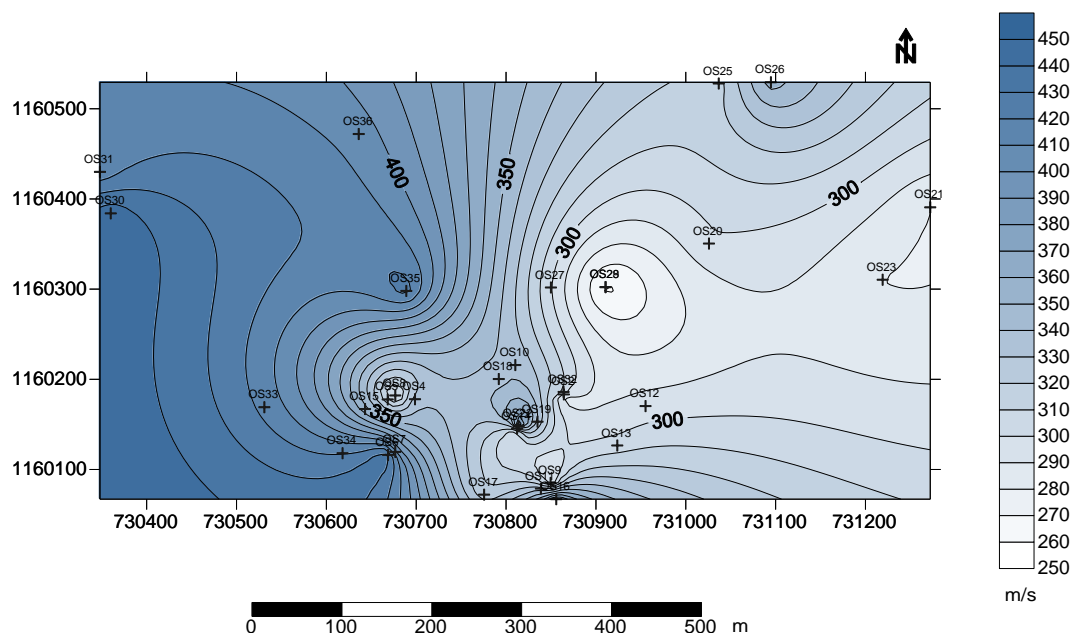


Figura 69. Mapa de Vs30.

A continuación se presentan los mapas de Vs calculados para los niveles de: superficie, 2.5 m y 7.5 m de profundidad, donde se muestran las variaciones de la onda de corte a medida que profundizamos en el suelo.

5.3.2 Mapa de Vs en superficie

El mapa de onda de corte en superficie (figura 70) muestra valores de velocidades en el rango de 150 m/s y 420 m/s. Los valores más altos de velocidad se observan en la zona oeste y suroeste; en esta región también se presentan los gradientes de velocidad más elevados. Los valores más bajos de Vs en superficie se presentan hacia la zona este y en la zona central donde nuevamente se muestra una región de baja velocidad con orientación aproximada a la que presenta la zona de bajas velocidades que se distingue en los mapas de Vp y Vs para la capa 1 y 2.

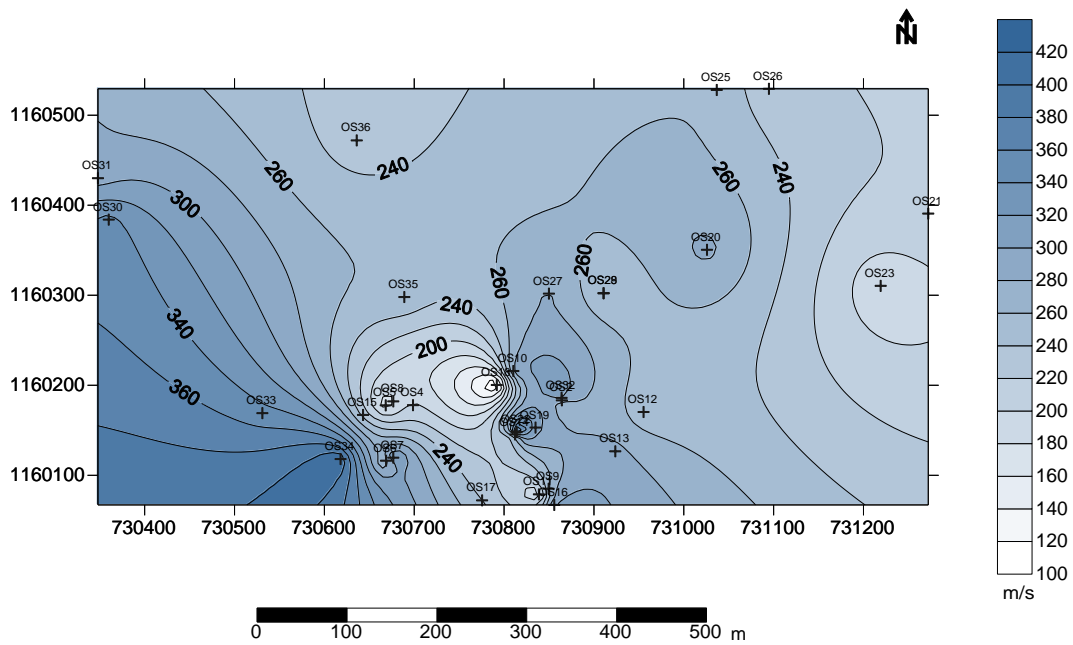


Figura 70. Mapa de V_s en superficie.

5.3.3 Mapa de V_s a 2.5 m de profundidad

El rango de velocidades de onda de corte calculado para 2.5 m de profundidad (figura 71) se encuentra entre 160 m/s y 400 m/s, ubicándose los valores más altos al oeste y los más bajos nuevamente en la zona central y al este del área en estudio.

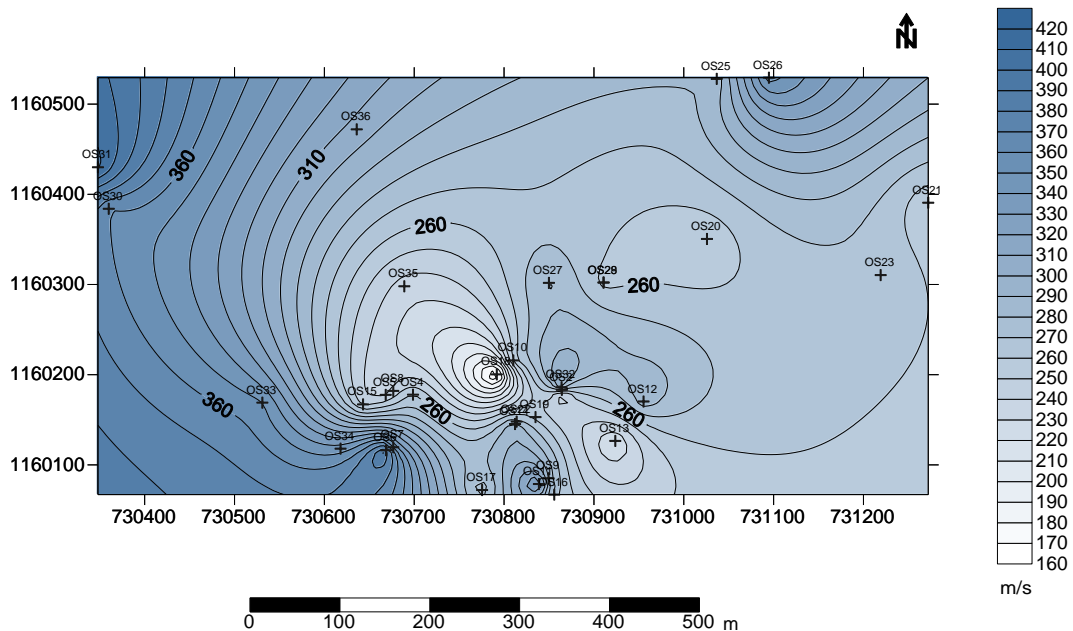


Figura 71. Mapa de V_s a 2.5 m de profundidad.

5.3.4 Mapa de Vs a 7.5 m de profundidad

El mapa de Vs a 7.5 m de profundidad (figura 72) muestra una división de la zona en estudio donde los valores más altos se destacan en la zona oeste y los valores más bajos hacia la zona este. Los rangos de velocidades presentes están entre 250 m/s y 450 m/s y los gradientes de velocidad más altos se encuentran asociados a la región central del área en estudio.

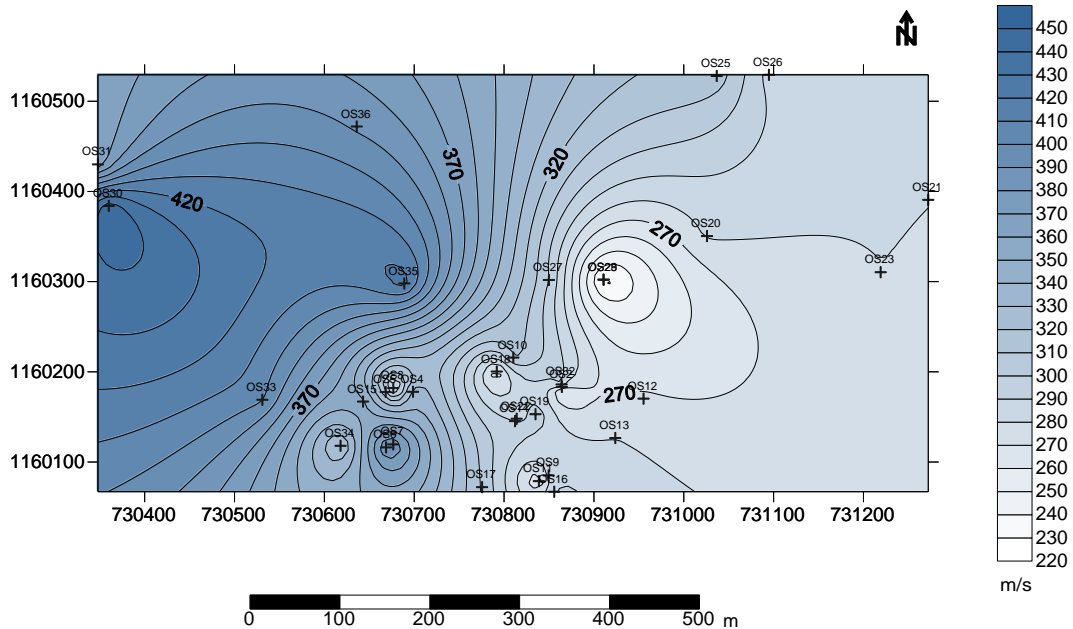


Figura 72. Mapa de Vs a 7.5 m de profundidad.

5.4 MÉTODOS ELÉCTRICOS

Se procesaron un total de 29 SEV de longitud variable; esta variabilidad estaba condicionada por el espacio disponible para realizar el sondeo. De los datos obtenidos se generaron un total de 4 mapas que muestran la distribución somera de los valores de resistividades en el campo de la universidad a distintas profundidades (2 m, 4 m, 6 m y 8 m). Para generar los mapas se empleó el algoritmo de interpolación de Kriging, controlando que el programa no realizara extrapolaciones negativas de los valores de resistividad. En los mapas se denotó la ubicación de los sondeos con las letras SEV y el número del sondeo.

5.4.1 Mapas de resistividades

5.4.1.1 Mapa de resistividades a 2 m de profundidad

En el mapa de resistividades a 2 m de profundidad (figura 73) los valores obtenidos se encuentran entre 5 Ωm y 305 Ωm , observándose los valores más bajos en la zona noroeste y central del campo de la Ciudad Universitaria, mientras que los valores más altos los observamos al este y suroeste de la misma. Es importante mencionar que por tratarse de una profundidad tan somera dichos valores pueden estar influenciados por efectos superficiales tales como: percolación del agua de lluvia y la proveniente de los sistemas de riego de los jardines.

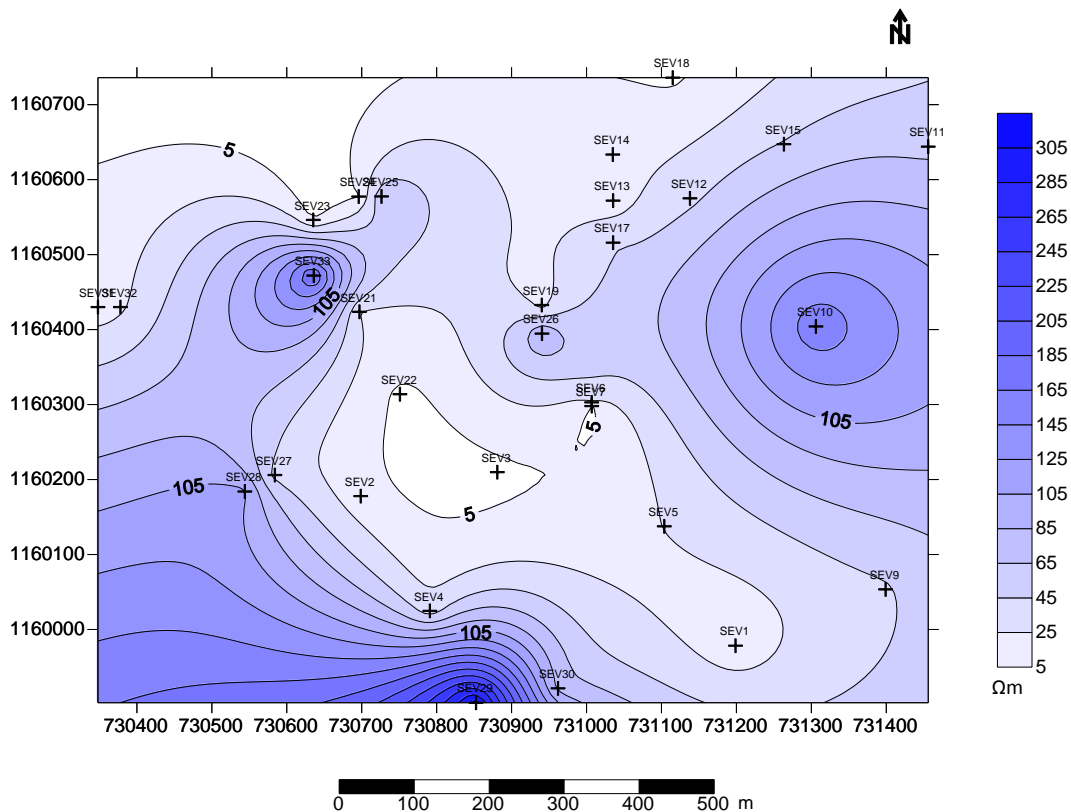


Figura 73. Mapa de resistividades a 2 m de profundidad.

5.4.1.2 Mapa de resistividades a 4 m de profundidad

A la profundidad de 4 m (figura 74) el rango de valores de resistividades se mantiene similar, encontrándose entre 5 Ωm y 385 Ωm , sin embargo, los valores mínimos para este caso se encuentran en la zona central mientras que los valores máximos se distribuyen

principalmente hacia el oeste de la zona en estudio asociados con la cercanía del afloramiento de la Formación las Mercedes.

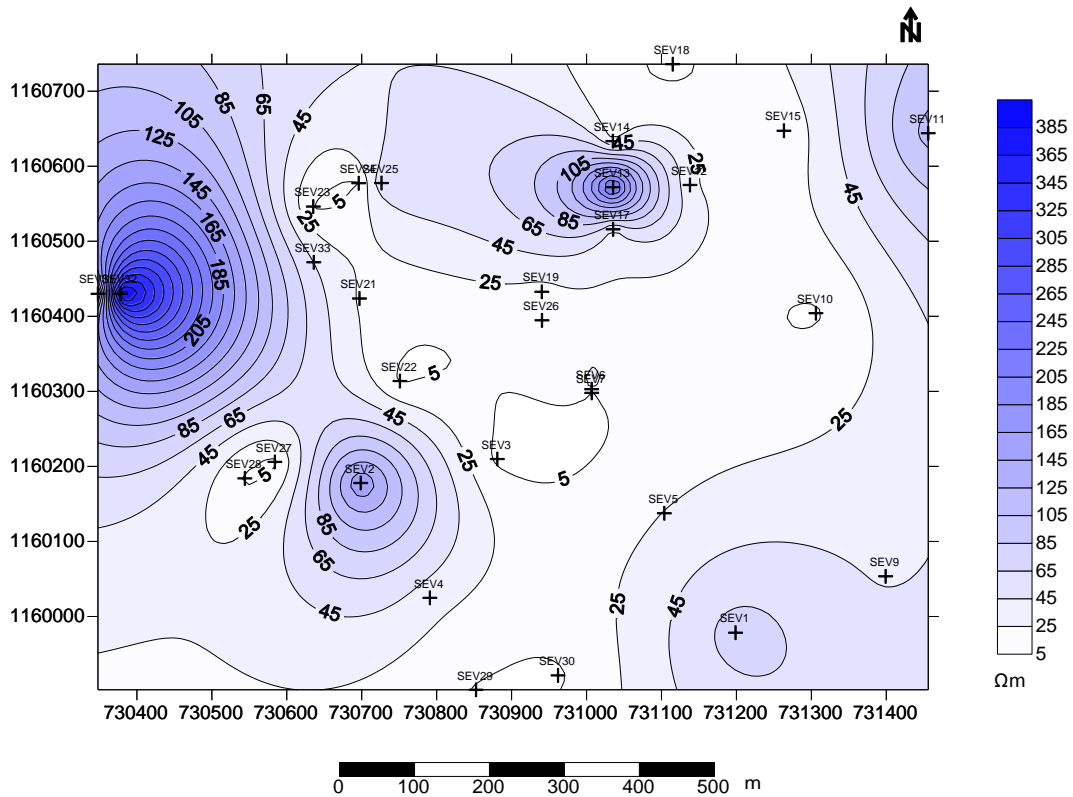


Figura 74. Mapa de resistividades a 4 m de profundidad.

5.4.1.3 Mapa de resistividades a 6 m de profundidad

Para el caso de la distribución de resistividades a 6 m de profundidad (figura 75) la tendencia general se mantiene con relación a los 2 mapas anteriores, los valores más bajos en la zona central y los valores más altos en la zona oeste, y el rango de resistividades se encuentra entre 5 Ωm y 405 Ωm .

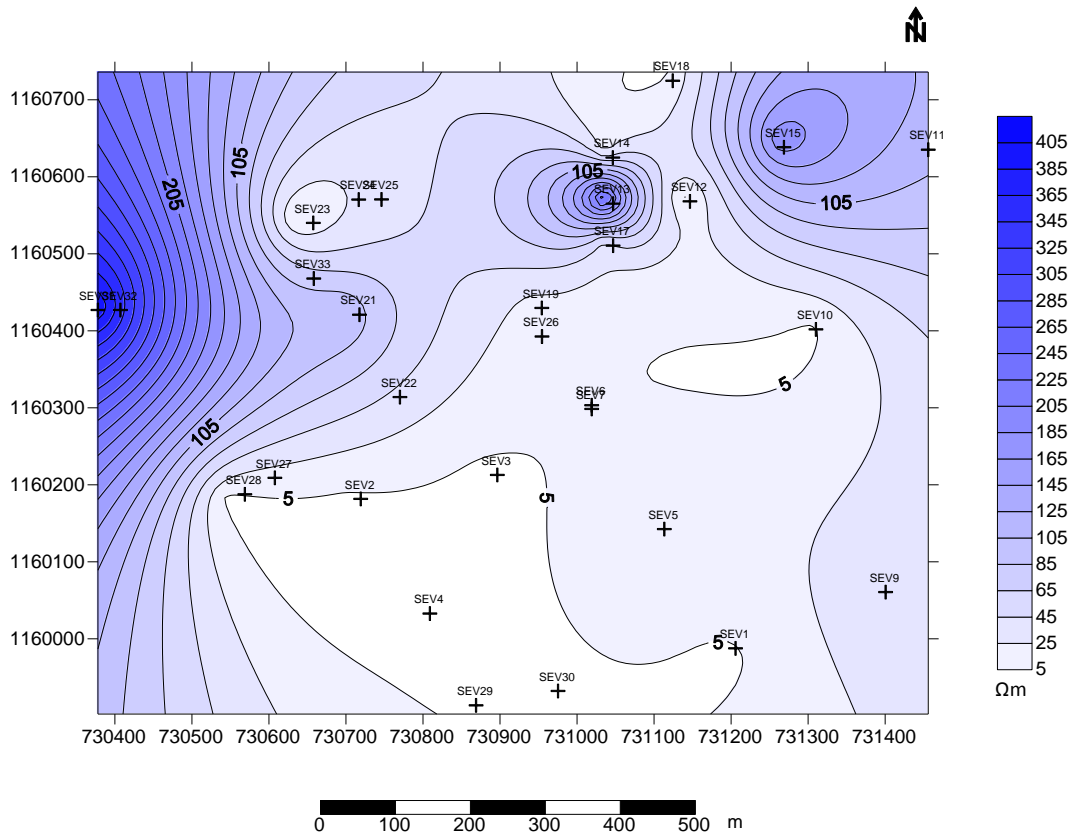


Figura 75. Mapa de resistividades a 6 m de profundidad.

5.4.1.4 Mapa de resistividades a 8 m de profundidad

Por último para el caso de 8 m (figura 76) el rango de resistividad se encuentran entre 5 Ωm y 405 Ωm , destacándose en la parte central una zona de bajas resistividades cuya ubicación y orientación presenta cierta coincide con la zona de baja velocidades observadas en los mapas de onda P y S.

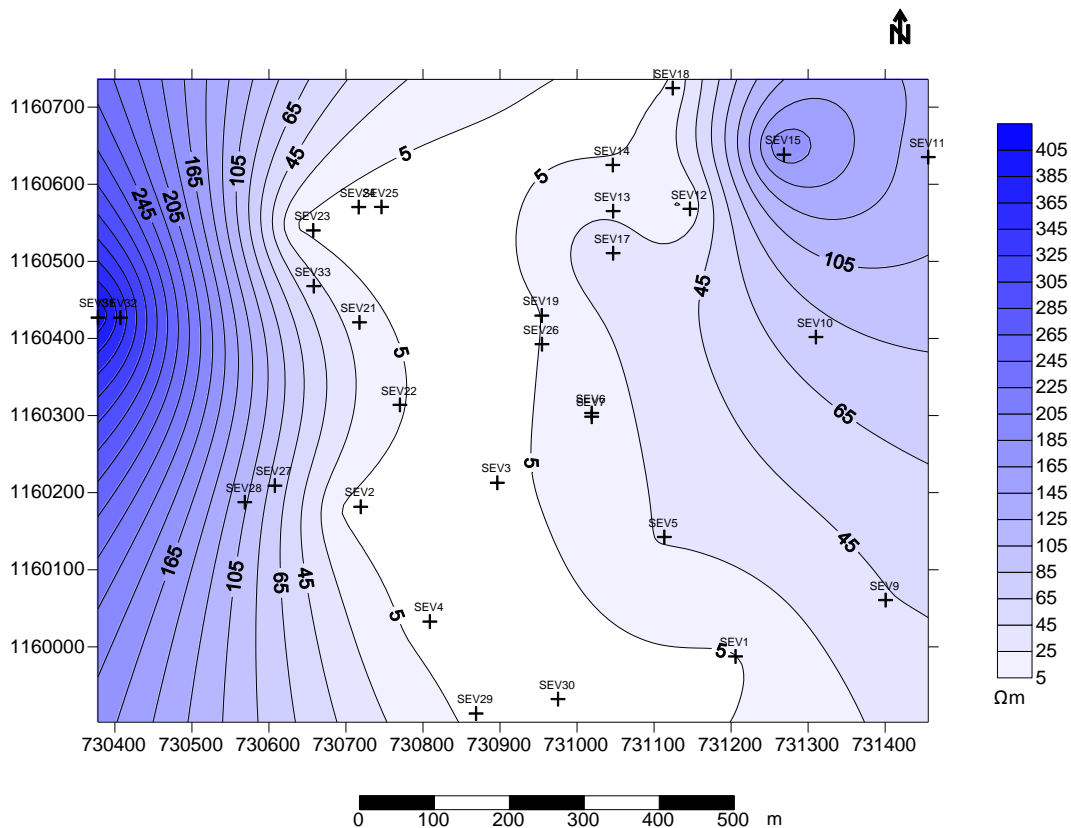


Figura 76. Mapa de resistividades a 8 m de profundidad.

Puede decirse de forma general que las zonas que poseen menores valores de resistividades en los mapas están asociadas a las zonas con litologías arcillosas o a litologías porosas con presencia de fluidos y los mayores valores están asociados a las zonas cercanas a los afloramientos del esquisto grafitoso de la Formación Las Mercedes.

5.5 CALICATAS ELÉCTRICAS

Se procesaron un total 18 de calicatas eléctricas tipo Wenner de diferentes longitudes. Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad en la distribución de los valores de resistividades, lo que evidencia una vez más la variabilidad litológica de los suelos estudiados debido a la presencia de depositaciones sedimentarias en forma lenticular que se corroboran con los perfiles geológicos propuestos por Acero y Domínguez (2005).

Los rangos de valores de resistividades obtenidos mediante los modelos de inversión de las calicatas se encuentran entre 5 Ωm y 300 Ωm mostrando una alta correlación con los valores obtenidos para los SEV.

5.6 MAPA DE PROFUNDIDAD DE BASAMENTO GEOTÉCNICO

De las 278 perforaciones geotécnicas con profundidades variables con las que se cuenta, 41 de ellas llegaron a roca permitiendo generar un mapa de profundidad de basamento geotécnico para la zona (figura 77). En el mapa se observa que la profundidad de la roca se encuentra entre 2 m y 62 m, obteniendo los menores espesores hacia la zona norte e incrementándose de manera regular en dirección sur.

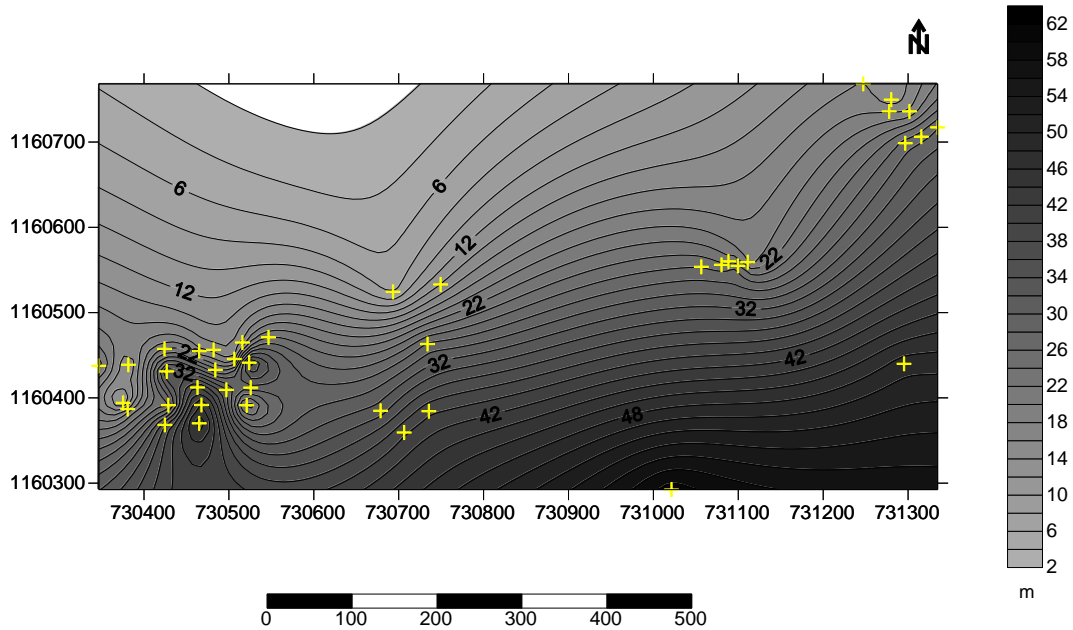


Figura 77. Mapa de profundidad de basamento geotécnico o de espesor de sedimentos.

5.7 INTEGRACIÓN DE RESULTADOS GEOFÍSICOS Y GEOLÓGICOS

Para la integración de los resultados geofísicos y los datos geológicos se hizo uso de la información litológica proveniente de las 44 perforaciones geotécnicas de la Ciudad Universitaria de Caracas recopiladas por Acero y Domínguez (2005) con el fin de correlacionar los resultados geofísicos obtenidos.

Para organizar la interpretación integrada dividimos el área en estudio en 3 regiones las cuales están constituidas por la unión de las zonas propuestas para la adquisición de la siguiente forma:

Tabla 10. Ubicación de las regiones de interpretación por zonas de trabajo

Región	Zonas	Ubicación
Oeste	6 - 7	Hospital Clínico Universitario (HCU) – Facultad de Ciencias – Facultad de Odontología
Central	1-5-8	Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica – Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Facultad de Farmacia – Facultad de Medicina – Biblioteca Central – Estacionamiento de la Facultad de Medicina
Este	2-3-4	Facultad de Ingeniería. Alrededores del edificio de las Escuelas de Geología Minas y Geofísica, Química y Petróleo. Escuela de Ingeniería Civil-Facultad de Arquitectura – Estadio Olímpico Universitario – Facultad de Ciencias Económicas y Sociales (FACES) – Comedor – Tierra de Nadie

En la siguiente fotografía aérea se muestran las 3 regiones a partir de las cuales se hace la interpretación integrada (figura 78).

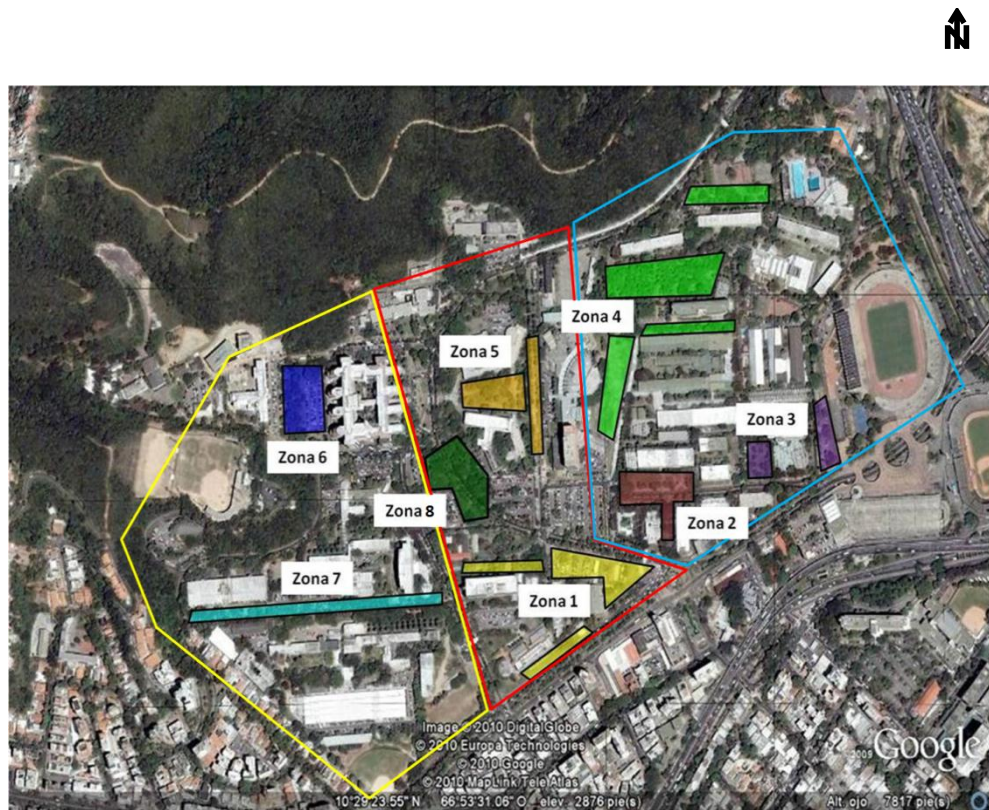


Figura 78. Mapa de ubicación de las regiones de interpretación por zonas de trabajo

5.7.1 Región oeste

5.7.1.1 Zona sur

Al sur de la región oeste se encuentran valores altos de velocidad de onda P y S para las capas 1 y 2, con espesor promedio para la capa 1 de 2.5 m; estos valores están asociados de

acuerdo a las perforaciones geotécnica de la zona a una capa de arena limosa de un espesor promedio de 5 m, y por debajo de esta capa se encuentra una arcilla de alta plasticidad con arena de espesor promedio de 3 m.

Para la zona sur se destacan valores de módulo de rigidez altos para ambas capas, para la capa 1 en el orden de 230 MPa y para la capa 2 en el orden de 650 MPa y de módulo de Poisson en el orden de 0.28 para la capa 1 y un incremento a 0.35 para la capa 2 debido a la presencia de arcillas.

En el mapa de Vs30 para la zona se encuentran valores promedios de 400 m/s que indican de acuerdo a la tabla de clasificación la presencia de un suelo tipo C que corresponde a un **suelo denso - roca suave** ratificando los resultados obtenidos. Otro parámetro importante obtenido durante las perforaciones del ensayo geotécnico SPT es el número de golpes, el cual muestra que para la zona se presentan valores en el orden de entre 20 y 30 golpes que según la tabla de correlación indica que estamos en presencia **suelos duros o densos (medianamente rígidos)**, evidenciando una alta correlación entre los valores teóricos de Vs y el módulo de rigidez y los obtenidos en el procesamiento de los datos.

En los mapas de resistividades para esta misma zona se observan para los primeros 4 m valores en el orden de 150 Ω m que corresponden a la arena limosa que representa la capa 1; mientras que de 6 m a 8 m están presentes valores de resistividades bajos en el rango de 5 Ω m a 50 Ω m correspondiente a la mayor conductividad de la arcilla de alta plasticidad con arena y a la presencia del nivel freático reportado durante la perforación a 12 m en una capa subyacente de arena limosa.

El espesor sedimentario promedio para la zona es de 35 m basado en el mapa de profundidad de basamento geotécnico obtenido de las perforaciones (figura 77).

5.7.1.2 Zona norte

Al norte de la región oeste se encuentran valores de velocidad de onda P para la capa 1 en el rango de 450 m/s a 600 m/s correspondiente, según los valores más altos según las perforaciones geotécnicas, a una arcilla limosa rígida y los valores más bajos a una zona de relleno sedimentario. Para la capa 2 las Vp se encuentran en un rango de valores que están

entre 900 m/s y 1200 m/s asociado a la presencia de la roca (esquistos de la Formación Las Mercedes) que constituye el basamento rocoso de la zona. Para la misma zona se presentan valores de módulo de rigidez para la capa más somera en el orden de 130 MPa y valores más alto en el orden de 650 MPa para la capa 2 e igualmente se presenta un módulo de Poisson promedio de 0.18 para la capa 1 y de 0.22 para la capa 2, lo que indica la presencia de una roca competente sin presencia de fluidos. La capa somera presenta un espesor promedio de 3 m asociado a valores de resistividades en el orden de 80 Ω m correspondientes a la arcilla limosa y a la zona de relleno pero a medida que profundizamos los valores de resistividades van aumentado hasta 385 Ω m lo que corrobora la presencia del basamento rocoso y la no presencia de fluidos.

Los valores obtenidos a partir del ensayo SPT para la zona se encuentran en el orden de 50 golpes, lo que indica que estamos en presencia de **suelos duros o densos (medianamente rígidos)**, corroborando una vez más los valores obtenidos mediante los métodos sísmicos.

Los valores obtenidos para la zona, en el mapa de Vs30, indican según la tabla de clasificación la presencia de un suelo tipo C que corresponde a un **suelo denso - roca suave** ratificando los otros resultados obtenidos.

Basado en el mapa de profundidad de basamento geotécnico se puede observar que el espesor sedimentario promedio para la zona es de 15 m debido a la cercanía del afloramiento de la Formación Las Mercedes.

5.7.2 Región central

5.7.2.1 Zona sur

Al sur de la región central del área en estudio se presentan valores de velocidad de onda P para la primera capa en el rango de 350 m/s a 600 m/s y un espesor promedio de 2.5 m; los valores de velocidad de onda de corte se encuentran entre 170 m/s y 280 m/s, estos valores corresponden, según las perforaciones geotécnicas, a una zona de relleno con presencia de lentes de arcilla de baja plasticidad que presenta módulo de rigidez en promedio de 90 MPa y módulo de Poisson en el rango de 0.18. En el mapa de resistividad correspondiente para

la capa 1 se observan valores de resistividades que se encuentran entre 5 Ωm a 100 Ωm , siendo consistentes con los otros datos obtenidos.

Para la capa 2 el rango de V_p se encuentra entre 500 m/s y 900 m/s, los valores de onda de corte se encuentran en el rango de 320 m/s a 420 m/s, por lo que se puede decir que los valores más bajo V_p y V_s de este rango de velocidades, basados en las perforaciones geotécnicas, corresponden a la zona donde existe la presencia de arcilla de baja plasticidad, y los valores más altos a la zona donde se encuentra localizada arcilla de baja plasticidad arenosa. Para esta capa el módulo de rigidez está en el orden de 350 MPa, mientras que el módulo de Poisson presenta un valor promedio de 0.22, esto es debido a la presencia de la arcilla. La caracterización geoelectrica de esta zona correspondiente a la capa 2 muestra valores de resistividades entre 5 Ωm y 30 Ωm asociados a la presencia de material arcilloso y la localización del nivel freático reportado en la perforación a 6 m en una capa de arena limosa con grava. Las calicatas eléctricas realizadas en esta zona igualmente se presentan valores de resistividades en el orden de 7 Ωm a 4 m de profundidad, destacándose una alta variabilidad lateral de la propiedad debido a los cambios litológicos presentes en el subsuelo.

Para la zona sur de la región central se presentan valores de V_{s30} en un rango de 300 m/s a 400 m/s, lo que indica, según la tabla de clasificación, la presencia de un suelo tipo C que corresponde a un **Suelo denso - Roca suave**. Igualmente se obtuvieron de las perforaciones geológicas valores del ensayo SPT en el orden de 25 golpes lo que indica que estamos en presencia de **suelos duros o densos (medianamente rígidos)**, corroborando los valores obtenidos mediante los métodos sísmicos.

Basado en el mapa de espesor de basamento geotécnico puede mencionarse que el espesor sedimentario promedio calculado para la zona es de 55 m.

Otro aspecto importante que destacar de la región central es la presencia de una franja donde se muestran los mayores espesores sedimentarios calculados con los datos sísmicos para la capa 1 y valores bajos de velocidades y de resistividades; basado en las perforaciones de la zona, las fotografías aéreas, los antecedentes históricos (Castillos y Ramos, 2011) y la geomorfología, puede la presencia de un posible paleocanal principal

donde vertían sus agua los pequeños afluentes provenientes del sector de Sierra Maestra; este afluente principal contribuyó a la variada y compleja depositación sedimentaria del *Campus* de la Ciudad Universitaria de Caracas.

5.7.2.2 Zona norte

Al norte de la región central se presentan valores de velocidad de onda P para la capa 1 en el rango de 400 m/s a 550 m/s correspondiente, según las perforaciones geotécnicas, las zonas de menores velocidades a una arcilla de baja plasticidad arenosa y las zonas de mayores velocidades a una arcilla de baja plasticidad arenosa con grava, el espesor de esta capa varía entre 2 m y 4 m del centro al norte de esta región, con un elevado gradiente en la parte norte debido al alto buzamiento de la Formación Las Mercedes. Basado en las características litológicas de esta capa se obtiene un módulo de rigidez en el orden de 150 MPa y un módulo de Poisson con un valores promedio de 0.18. Los valores de resistividades obtenidos para esta profundidad en la zona se encuentran entre 15 Ω m y 45 Ω m igualmente asociados a la baja resistividad de las arcillas y no a la presencia de fluidos.

Esta zona en la capa 2 presenta velocidades de onda P más elevadas en el rango 900 m/s y 1100 m/s y velocidades de onda S entre 470 m/s y 620 m/s; basado en las perforaciones podemos asociar los valores más bajos a la presencia de arcilla de baja plasticidad arenosa más compacta y los valores más altos de V_p y V_s a la presencia arena arcillosa limosa y del basamento rocoso que en esta zona se encuentra a una profundidad promedio de 6 m. En cuanto al módulo de rigidez se tienen valores promedio de 550 MPa y módulo de Poisson entre 0.24 y 0.18 evidenciando la presencia de arcilla en la zona con bajo contenido de fluidos.

Los valores obtenidos para la zona en el mapa de V_{s30} se encuentran entre 300 m/s y 400 m/s lo que indica, según la tabla de clasificación, la presencia de un suelo tipo C que corresponde a un **Suelo denso - Roca suave**. Estos resultados se corroboran con los valores de obtenidos del ensayo SPT para la zona que están en un rango promedio de 25 golpes que según la tabla de clasificación corresponde a **suelos duros o densos (medianamente rígidos)**.

5.7.3 Región este

5.7.3.1 Zona sur

Al sur de la región este de nuestra área en estudio se presentan valores de V_p para la capa 1 en el rango de 480 m/s a 580 m/s y un espesor promedio de 4 m; los valores de V_s se encuentran entre 270 m/s y 320 m/s; esta zona para la primera capa presenta una litología bastante variada y compleja según lo evidencian las perforaciones de la zona, indicando que algunos puntos de la zona corresponden a relleno sedimentario y otros puntos a arcilla de baja plasticidad con contenidos de arena variable, por lo que podemos asociar las mayores velocidades de ondas P y S a las zonas donde se está en presencia de mayor contenido de arena y las velocidades más bajas a las zonas de rellenos y a las arcilla de baja plasticidad con poco contenido de arena. Los valores de módulo de rigidez obtenidos presentan un rango promedio de 150 MPa, y el módulo de Poisson posee un valor promedio de 0.14 lo que indica la no presencia fluido. Los mapas de resistividades muestran para las capas someras valores intermedios en el rango de 25 Ωm y 65 Ωm que igualmente están asociados a la presencia de arcillas. Para la capa 2 el rango de V_p se encuentra entre 450 m/s y 650 m/s, los valores de V_s para esta capa se encuentran en el rango de 280 m/s a 340 m/s, por lo que se puede decir que los valores más bajos de velocidades de ondas P y S, según las perforaciones geotécnicas, corresponden a la zona donde existe la presencia de arcilla de baja plasticidad con arena y los valores un poco más altos a las zonas donde se encuentra localizado el limo arenoso y la arena limosa. Los resultados obtenidos del módulo de rigidez muestran valores en el orden de 150 MPa, es decir, la zona presenta una baja resistencia al corte, resultado que se correlaciona con los bajos valores de V_s obtenidos. Para esta capa el módulo de Poisson presenta valores de 0.20 en promedio. La caracterización geoelectrica de esta zona correspondiente a la capa 2 muestra valores de resistividades en un rango de 5 Ωm y 65 Ωm asociados a la presencia de material arcilloso que tienen baja resistividad y a la presencia de fluidos acumulado debido a la porosidad del material arenoso y el buzamiento de depositación de los estratos sedimentarios condicionados por la morfología del basamento rocoso que en esta zona alcanza espesores sedimentarios de hasta 60 m, información que se corrobora con las perforaciones geotécnicas donde se muestra el nivel freático en las litologías arenosas a un promedio de

profundidad de 10 m. Esta información es corroborada con la presencia de un pozo de agua que es utilizado para el consumo ubicado al frente del edificio de Ingeniería de Petróleo, Química, Geología, Minas y Geofísica, adicionalmente se puede observar en la calicata eléctrica realizada para la zona valores en el orden de 9 Ω m a 5 m de profundidad que validan los datos anteriores.

Para la zona sur de la región central se presentan valores bajos de V_{s30} en un rango de 270 m/s a 300 m/s lo que indica, según la tabla de clasificación, la presencia de un suelo tipo C que corresponde a un **Suelo denso - Roca suave**. Este resultado importante es igualmente corroborado con la clasificación basada en el ensayo SPT que para la zona tiene un valor promedio 15 golpes que corresponde a **suelos duros o densos (medianamente rígidos)**.

5.7.3.2 Zona norte

Las de velocidades de onda P para la capa 1 en la zona norte de la región este se encuentran en el rango de 380 m/s a 530 m/s y valores de velocidad de onda de corte desde 210 m/s a 270 m/s; basado en las perforaciones de la zona se puede asociar los valores bajos a las zonas donde existe la presencia de arcilla limosa y de relleno, y los valores más altos corresponden a los estratos someros de arena limosa. El mapa de espesores de la capa 1 muestra valores que van desde 1.5 m a 3.8 m.

En la zona se tienen valores de módulo de rigidez promedio de 110 MPa y valores del módulo de Poisson en el orden de 0.16. Las resistividades para las capas someras muestran valores en el rango de 25 Ω m y 105 Ω m asociados a la presencia de litologías arcillosas.

Para capa 2 el rango de V_p se encuentra entre 550 m/s y 950 m/s, los valores de V_s para esta capa se encuentran en el rango de 220 m/s a 460 m/s, se puede decir que los valores más bajos de velocidades de ondas P y S, según las perforaciones de la zona, corresponden a la zona donde existe la presencia de arcilla de baja plasticidad con arena y los valores más altos a la zona donde se encuentra localizada la arena limosa y grava bien gradada con arena. Los resultados obtenidos del módulo de rigidez muestran los valores promedio de 250 MPa lo que evidencia una baja resistencia al corte, resultado que se correlaciona con los bajos valores de V_s obtenidos. Para esta capa el módulo de Poisson presenta valores

promedio de 0.2. La caracterización geoelectrica de esta zona correspondiente a la capa 2 muestra valores bajos de resistividades en el orden de $5 \Omega\text{m}$ en el sector central cercano a la Facultad de Arquitectura asociados a la acumulación de fluidos en las litologías presentes en la zona tales como arenas y gravas y valores de mayores resistividades en el orden $105 \Omega\text{m}$ más al noreste de la región asociados la presencia de arcillas y basamento geotécnico. Las perforaciones ubicadas en las zonas de menores resistividades corroboran la presencia del nivel freático a una profundidad promedio de 10 m y en este sector se ubican 2 de los 4 pozos de agua que se hallan dentro del campo de la UCV.

Para la zona norte de la región este se presentan valores de V_{s30} en un rango de 280 m/s a 300 m/s lo que indica, según la tabla de clasificación, la presencia de un suelo tipo C que corresponde a un **Suelo denso - Roca suave**. Los valores de obtenidos del ensayo SPT para la zona están en un rango promedio de 15 golpes que según la tabla de clasificación corresponden a **Suelos firmes o medianamente densos (baja rigidez)**; estos valores promedios números de golpes obtenidos para la zona constituyen los más bajos de todas las regiones estudiadas. El mapa de espesores de basamento geotécnico muestra que los espesores sedimentarios se encuentran, para la zona, entre 8 m a 30 m, disminuyendo de forma gradual de norte a sur.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos después de emplear los distintos métodos geofísicos (sísmica de refracción, ondas superficiales, sondeos eléctricos verticales y calicatas eléctricas) para caracterizar el área en estudio y realizar la correlación con los datos geológicos, se pueden señalar las siguientes conclusiones:

- ✓ Existe una alta correlación entre las litologías descritas en las perforaciones y las velocidades obtenidas, también entre las velocidades y el número de golpes obtenidos en el ensayo SPT.
- ✓ A partir de los gráficos comparativos de V_p - V_s , se obtuvo una clara alineación de los diferentes grupos litológicos, mientras que para los gráficos V_s – NG se observó un agrupamiento de las litologías en función del número de golpes, validando estos resultados la aplicación del método de sísmica de refracción para este tipo de estudios
- ✓ La profundidad del basamento geotécnico varía desde 0 m al norte donde aflora la Formación Las Mercedes detrás de Hospital Clínico Universitario, hasta 65 m de espesor sedimentario al sur en la zona donde se localiza el Estadio Universitario de Caracas. El basamento geotécnico de manera general en la zona presenta un alto buzamiento (mayor de 45 °) que aunado a la acumulación de espesores sedimentarios importantes deben ser tomados en cuenta el momento de realizar cualquier obra civil.
- ✓ El rango de velocidades de la onda P para la zona en estudio se encuentra entre 400 m/s y 1500 m/s, rango que evidencia una alta variabilidad litológica asociada a litologías constituidas por roca a sedimentos pocos consolidados, mientras que los valores obtenidos para la onda S mediante los perfiles sísmicos se encuentran en el rango 220 m/s y 720 m/s, lo que indica que la zona en estudio posee una velocidad de corte en promedio alta. De forma general se puede interpretar que para las ondas P y S se presenta una distribución de los mayores valores de velocidades hacia la zona noroeste donde están presentes los menores espesores sedimentarios y que dichas velocidades disminuyen en dirección sureste hacia la zona donde se encuentran las mayores acumulaciones de sedimentos.

- ✓ El mapa de Vs30 presenta valores que van desde 250 m/s a 450 m/s, destacándose los valores más altos hacia la zona oeste y los valores más bajos hacia la zona este, permitiendo dividir el campo de la Universidad Central de Venezuela en 2 zonas: la zona oeste que presenta suelos con valores de Vs30 mayores a 360 m/s los cuales pueden clasificarse en **suelo denso o roca suave** y la zona este que presenta suelos con valores de Vs30 menores a 360 m/s los cuales pueden clasificarse en **suelo suave**.
- ✓ Los valores de módulo de rigidez dinámico obtenidos para la zona en estudio presentan valores que van desde 50 MPa a 950 MPa, observándose los valores más bajos hacia la zona sureste donde se acumulan los mayor espesores sedimentarios y los valores más altos al noroeste donde se encuentran los menores espesores sedimentarios.
- ✓ A partir de los valores calculados de módulo de Poisson se obtuvieron valores que varían entre 0.1 a 0.38, esta alta variabilidad está asociada a la variaciones litológicas y a la acumulación de agua en algunas zonas.
- ✓ Los mapas obtenidos mediante los sondeos eléctricos verticales muestran una gran variabilidad y en algunas zonas no permiten realizar una clara discriminación litológica, sin embargo, se pueden apreciar valores de resistividades que van desde 5 Ω m a 400 Ω m, presentándose los valores más altos en la zona oeste y este, y los valores más bajos en la zona central, en la misma posición de la zona de bajas velocidades de ondas sísmicas.
- ✓ Otro aspecto importante de resaltar es la presencia de una zona de bajas velocidades y resistividades que se destaca en la zona central del área en estudio asociada a la presencia de un posible paleocanal principal donde vertían sus aguas los pequeños afluentes provenientes del sector de Sierra Maestra; este afluente principal contribuyó a la variada y compleja depositación sedimentaria del *Campus* de la Ciudad Universitaria de Caracas.
- ✓ En las zonas del campo de la UCV donde existen pozos de agua se evidenció correlación con los valores de resistividades obtenidos mediante las calicatas realizadas en la zona.

- ✓ La aplicación combinada de los métodos geofísicos y las perforaciones geotécnicas constituye una metodología óptima que permite disminuir los costos y los tiempos de estudio de una zona, permitiendo adicionalmente obtener resultados espaciales de parámetros importantes como: las velocidades de las ondas, módulos elásticos y resistividades.

RECOMENDACIONES

- ✓ Garantizar un muestreo más regular, donde se ubiquen en las mismas posiciones los estudios geofísicos (sísmicos y eléctricos) y las perforaciones, para de esta manera facilitar el proceso de correlación de los datos obtenidos.
- ✓ Realizar un análisis estadístico detallado de los datos obtenidos como una medida adicional de correlación.
- ✓ Para trabajo donde se pretenda aplicar la misma metodología se deben realizar los perfiles y sondeos de mayor longitud para garantizar una mayor profundización del parámetro estudiado y de esta manera poder garantizar una correlación más simple entre las perforaciones y los datos geofísicos obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acero, M., Domínguez, J., 2005. Estudio geológico – geotécnico y evaluación de las condiciones del terreno que constituye el campus de la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 98 pp
- Aguerrevere, S., Zuloaga, G., 1938. Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa. Congreso Geológico Venezolano. 22 p.
- BSSC, 2003. NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures, Part 1 (Provisions) and Part II (Commentary). FEMA, Edition. Building Seismic Society Council 2003. Washington D. C., Estados Unidos de América.
- Cantos, F., 1974. Tratado de Geofísica aplicada. Litoprint. Madrid, España. 520 pp.
- Castillo, E., Ramos, T., 2011. Estudios geológicos de las microzonas sísmicas del campus universitario de la UCV y el Rincón de El Valle, El cementerio, en la ciudad de Caracas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 246 pp.
- COVENIN 1756-98, 2001. Edificaciones sismorresistentes. Fondonorma, Caracas, 113 pp.
- Davis, A.M., Schultheiss, P. J., 1980. Seismic signal processing in engineering-site investigation- a case history. Ground Engng 13. 44 - 48.
- Dobrin, M., 1960. Introducción a la Prospección Geofísica. McGraw Hill, New York, 446pp.
- Galavís, L., 1983. Estudio de suelo, Tramo Plaza Venezuela – Los Símbolos, Línea III del Metro de Caracas. Informe técnico de Oficina de Suelos C.A., Caracas, 111 pp.
- Kantak, P., 2001. Sediment thickness, an east – west cross section, shallow seismic velocities, and microtremor measurements in the Caracas Valley. Caracas, Venezuela. 268 pp.

- Orellana, E., 1982. Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid España. Volumen I 578 pp.
- Parasnis, D., 1970. Principios de geofísica aplicada. Paraninfo. Madrid, España. 208 pp.
- Rojas, S., Morales, C., Rojas, H., Cataldo, A., Schmitz, M. 2010. Determinación de las velocidades de propagación de las ondas de corte - parámetros Vs30, VsP, Vs500 y parámetros dinámicos - con métodos sismológicos en Caracas. Conferencia 50 Aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia “Estado de la Práctica” en Honor a Gustavo Luís Pérez Guerra. Caracas, Venezuela. 18 pp.
- Salcedo, D., Ortas, J. 2004. Estudio de factibilidad geológico – geotécnico y potencial de uso de los terrenos ubicados en la zona del Jardín Botánico, y estudio geotécnico para los tanques A y C, Universidad Central de Venezuela. Informe técnico de Ingeotec C.A., Caracas.35 pp.
- Singer, A., Zambrano, A., Oropeza, J., Tagliaferro, M. 2007. Cartografía de las unidades geológicas cuaternarias del Valle de Caracas a escala 1:25000. Memorias IX Congreso Geológico Venezolano, Geos 39.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. Tulsa Society of Exploration Geophysicists, USA.
- Smith, P., 1978. Temas de Geofísica. Reverté, S.A. Barcelona, España. 286 pp.
- Stokoe, K.H, Wright, G.W., James, A.B., Jose, M.R., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. ISSMFE Technical Committee #10. Oxford Publishers. New Delhi.
- Stuempel, H., Kahler, S., Meissner, R., Milkereit, b., 1984. The use of seismic shear waves and compressional waves for lithological problems of shallow sediments. *Geophysical Prospecting* 32. 662–675.
- Telford, W. M. 1976 Applied geophysics, Cambridge University Press, Reino Unido. 860 pp.

Tiab, D., Donaldson, E., 1996. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. Gulf Pub. CO. Houston, USA. 706 pp.

ANEXOS