



INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.
POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

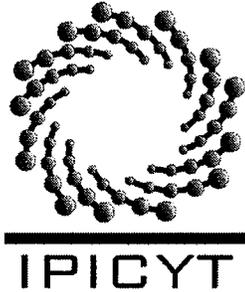
**Metodología para el análisis de información
geofísica de pozos implementando herramientas
FOSS: Caso de estudio Complejo Volcánico de
Colima**

Tesis que presenta
Iyotirindranath Gilberto Thompson Valencia

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis: Dr. Pablo Dávila Harris
Codirector: Dra. Birgit Steinich

San Luis Potosí, S.L.P., 27 mayo de 2016



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis ***“Metodología para el análisis de información geofísica de pozos implementando herramientas FOSS: Caso de estudio Complejo Volcánico de Colima.”*** presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Iyotirindranath Gilberto Thompson Valencia** y aprobada el **veintisiete de mayo del dos mil dieciséis** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Pablo Dávila Harris
Codirector de la tesis

Dra. Birgit Steinich
Codirectora de la tesis

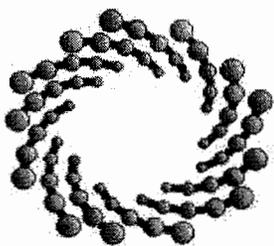
Dr. José Alfredo Ramos Leal
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Pablo Dávila Harris y codirección Dra. Birgit Steinich .

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (560074) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 015 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 27 días del mes de mayo del año 2016, se reunió a las 17:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Alfredo Ramos Leal	Presidente	IPICYT
Dr. Pablo Dávila Harris	Secretario	IPICYT
Dra. Birgit Steinich	Sinodal externo	.
Dr. José Tuxpan Vargas	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Iyotirindranath Gilberto Thompson Valencia

sobre la Tesis intitulada:

Metodología para el análisis de información geofísica de pozos implementando herramientas FOSS: Caso de estudio Complejo Volcánico de Colima.

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. Pablo Dávila Harris

Dra. Birgit Steinich

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 18:20 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 27 días del mes de mayo de 2016.


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



*Dedicado a
mi familia*

Agradecimientos

Agradezco a el **CONACYT** por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto.
Agradezco al **IPICYT**, institución académica de calidad por facilitarme el acceso a sus instalaciones de primer nivel y a su personal técnico-administrativo por sus atenciones y amable trato.

Quiero agradecerle a mi maestra preferida y directora de tesis, la Dr. Birgit Steinich por mostrarme el camino a ser mejor estudiante y ser mejor persona desde su muy peculiar y divertido estilo, por los consejos académicos y más por su gran paciencia.

Quiero agradecer por mucho a el Dr. Pablo Dávila Harris codirector de tesis por su amabilidad, su profesionalismo, sobre todo quiero agradecer la confianza que desde un inicio mostró en una idea medio planteada de temas que aunque no conocía del todo siempre se mostró con entusiasmo.

Quiero agradecer al secretario y miembro del jurado, el Dr. José Alfredo Ramos Leal por el atento y muy amable trato hacia mi persona, por la buena disponibilidad y atenciones que me ayudaron en gran medida para la culminación de este documento.

Quiero agradecer al miembro del jurado, el Dr. Tuxpan por su disponibilidad, por apoyarme, por sus concejos, comentarios y recomendaciones hacia mi trabajo de tesis que sin duda lo enriquecieron.

Quiero agradecer enormemente a Ciclos GIP, S.C., por permitirme compartir el acceso a información confiable y de calidad de su propio base de datos de registros de pozos. Al Ing. Adán González Nísimo por su generosa aportación, su buena disposición y por la atención prestada, al Ing. Uriel Gutiérrez Medina y a Dulce Abi Padilla Mérito por sus atenciones y tiempo prestado para facilitarme tanto la estancia como la data necesaria para el proyecto.

Agradezco a todas las personas involucradas de alguna manera con la culminación de este manuscrito. A mi gran familia que siempre están a mi lado, a Moni que me apoyado y alentado para no darme por vencido. A todos mis compañeros de generación y amigos Nery, Edgar, Jesús, Alex, Pachito, Jafet, Ignacio, Osvaldo, Paty, Regina, Claudia y Oscar que sin duda aportaron en mi formación tanto académica como personal.

Quiero agradecer a todos los maestros de la división de geociencias aplicadas que se preocupan por compartir conocimiento, agradezco sus consejos, el tiempo y la energía brindada a lo largo de esta etapa académica.
¡Muchas gracias a todos!

Resumen

En la actual era de la información las herramientas de software libre y de código abierto FOSS por sus siglas en inglés, son implementadas en gran variedad de disciplinas incluyendo servicios, en la industria, en tecnología y por supuesto en la ciencia (Ebart, 2008), debido a las ventajas de popularidad, fiabilidad, rendimiento, escalabilidad, seguridad y coste total de propiedad que tiene sobre los software especializados (Wheeler, 2007).

La toma de datos geofísicos en pozos es una práctica estándar en el proceso para la autorización de perforación y el aprovechamiento de agua subterránea. Estos datos se reportan con un mínimo de procesamiento en los informes y su interpretación se limita a la identificación de unidades geológicas principales.

Este estudio pretende implementar una metodología para dar estructura, para almacenar, para analizar y visualizar información geofísica de pozos con la finalidad de facilitar la interpretación y entendimiento de diversos contextos geológicos utilizando software libre y de código abierto.

La metodología se aplica en un área de interés delimitada en una franja circular con centro en el volcán Nevado de Colima localizado en la parte occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano. La franja tiene un ancho entre 25 y 30 km aproximadamente y se extiende media circunferencia desde la parte norte del volcán hacia su lado suroeste.

Este trabajo se basa en el análisis de 63 registros geofísicos (rayos gamma natural, resistividades y potencial espontáneo) de 40 pozos dispersos en la zona de estudio, con una densidad de información promedio de 40 sitios en un área total de 1500 km^2 . Se cuenta con una distribución suficientemente uniforme que justifica su procesamiento e interpretación de manera espacial.

La elaboración de mapas a partir de los datos geofísicos para las superficies escogidas respecto a la geometría del edificio volcánico en el sistema de información geográfica GRASS permitió describir la distribución de valores en tres dimensiones. Con base en el conjunto de mapas elaborados se presenta un modelo geofísico de los primeros 300 metros de profundidad con respecto a la superficie con tres perfiles de corte.

El procesamiento espectral de los datos utilizando filtros tipo pasa-bajos permite identificar las diferentes unidades principales en función de la dirección de los perfiles. Con base en las características físicas de los materiales geológicos de la zona se propone la clasificación de las unidades en materiales sedimentario y/o volcánico. Espesores típicos de las unidades principales en los diferentes perfiles fueron del orden de magnitud de decenas de metros. La continuidad de unidades específicas a lo largo de direcciones radiales así como circulares se infirió aplicando criterios estadísticos multivariados.

Dentro de dichas unidades principales al combinar el filtrado espectral y el análisis numérico de los datos se vuelve posible identificar y describir tendencias lineales, patrones y variaciones de diferentes órdenes de magnitud en los valores geofísicos; así como interpretar en términos de paquetes sedimentarios, intercalaciones de materiales volcánicos, geometría de unidades acuíferas, entre otros.

Los resultados obtenidos en el presente estudio sugieren que el procesamiento avanzado y la re-interpretación de datos geofísicos de pozos levantados de manera rutinaria para fines hidrogeológicos-administrativos puede conducir a un mejor entendimiento de ambientes geológicos diversos tal como se ilustró en el presente estudio para el caso de la región cercana al Complejo Volcánico de Colima.

Abstract

In the current information era, tools the free software and open (FOSS) are implemented in a variety of disciplines including; services, industry, technology and science (Ebart, , 2008). This mainly, due to the advantages that it represent, like popularity, reliability, performance, scalability, security and total cost of ownership, compared to that with that on the specialized software (Wheeler, 2007).

Geophysical surveys logs in water wells are a standard practice for the authorization process of the drilling and exploitation of underground water. These data are reported with a minimum of processing, and interpretation reports are limited to identifying main geological units and/or physical properties of rocks. This study aims to implement a methodology for structuring, storage, analyze and interpret of geophysical data for wells applicable to understand different geological units, all using free and open source software.

The study area comprises a sector of the Colima Volcanic Complex (CVC) and it is delimited by a circular fringe, centered at the summit of the Nevado de Colima volcano in the western part of The Trans-Mexican Volcanic Belt, the fringe 25 by 30 km wide, approximately, extending north from the volcano to the southwest side.

This work is based on the analysis of 63 well logs (natural gamma ray, resistivity and spontaneous potential) of 40 wells scattered throughout the study area, with an average density of information of 40 sites on a total area of 1500 km^2 . It has a sufficiently uniform distribution that justifies its processing and interpretation on a spatial way.

The mapping of geophysical data in the geographic information system GIS was performed for selected surfaces relatives to the geometry of the volcano, and this allowed me to describe the distribution of values in three dimensions. Based on the set of maps developed, models of the first 300 meters depth with respect to the surface with three surface profiles are presented.

The spectral data processing using low-pass filters allow the identification of different major units as a function of the direction on the profiles. Based on the physical characteristics of geological materials from the area, a classification of the units is proposed as sedimentary and / or volcanoclastic material. Typical thicknesses of major units in the different profiles were defined in the order of tens meters. The continuity of specific units along radial and circular directions is inferred by applying multivariate statistical criteria.

Inside major units where spectral filtering and numerical analysis of data are combined, it is possible to identify and describe linear trends, lengths variations of different orders of magnitude and patterns of geophysical value; and thus interpret in terms of sedimentary packages, interbedded volcanic materials, geometry of aquifer units, amongst others characteristics.

The results obtained in this study suggest that advanced processing and reinterpretation of geophysical data surveyed on wells routinely with hydrogeological purposes can lead to a better understanding of various geological environments such as illustrated in this case study the Colima Volcanic Complex.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Constancia de aprobación de la tesis	iv
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	ix
Lista de tablas	xii
Lista de figuras	xiii
Generalidades	1
Introducción	1
Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos de la metodología	2
Objetivos específicos	2
Localización	3
Marco teórico	1
Registros geofísicos (RG)	1
Registros eléctricos	2
Registros de radiactividad	7
Contexto geológico	9
Filtrado de señales digitales	19
Metodología	23
Análisis previo	24
Información disponible	24
Levantamiento de información	24
Herramientas FOSS	28
Preprocesamiento	31
Procesamiento	33

Análisis multivariable de GAMMA, SP y RES	34
Firmas geofísicas de unidades geológicas	34
Visualización espacial en 2D y 3D	37
Interpretación	37
Resultados	38
Descripción general del área de interés	39
Descripción general de los RG	40
Amplitud del parámetro gamma	41
Pendiente del parámetro gamma	44
Pendiente del parámetro de potencial espontáneo	48
Amplitud de las resistividades	52
RG en unidades geológicas del CVC	56
Correlación entre unidades principales	66
Perspectiva horizontal en 2D y en 3D	68
Mapas de gamma natural	68
Mapas de potencial espontáneo	71
Mapas de resistividad puntual	73
Identificación de unidades principales	75
Conclusiones	82
Bibliografía	84
Anexos	87
Anexo I: Registros Geofísicos de Pozos	88

Lista de tablas

1	Características físicas de las unidades geológicas del área de interés. Definición de abreviaturas ϕ 1 y 2*: porosidad primaria y porosidad secundaria, s-cte:semi-constante, N/A:no aplica, DFP:depósitos de flujos piroclásticos, DAV: depósitos de avalanchas volcánicas, DFL: Depósitos fluviales.	14
2	Límites característicos PostgreSQL	29
3	Resumen de procedimiento de clasificación multiparamétrica por unidad geológica en la zonas de interés	56

Lista de figuras

1	Mapa de localización de la zona de estudio.	4
2	Figura modificada de Kobr et al., (2005). Muestra la configuración de electrodos para medir Ra con sondas convencionales: R- reóstato, G-generador, mV- milivoltímetro, mA- miliamperímetro. a) arreglo de sonda larga y b) arreglo de sonda corta (16" y 64").	3
3	Figura modificada de Kobr et al., (2005). Muestra el esquema del circuito de medición SP: 1- carrete del cable; 2- registrador; 3- compensador de la polarización.	6
4	Figura modificada de Kobr et al., (2005). Muestra el esquema general de bloques de sonda para radiación gamma natural	8
5	Mapa que muestra la localización del CVTM en México.	10
6	Carta geológica del CVC (Cortés et al., 2005). Muestra la distribución de materiales ubicados en las inmediaciones del Volcán de Fuego de Colima, la orientación de los perfiles geológicos y la localización de los pozos disponibles en la base de datos.	11
7	Perfil geológico que muestra la configuración inferida del CVC tomado de Cortés et al., (2005). Dirección de los perfiles revisar Figura 5.	12
8	Figura de clasificación de rocas piroclásticas modificada de (Mazzoni, 1986)	15
9	Figura que muestra el esquema de la dispersión del material de caída producto de una actividad explosiva.	15
10	Figura que muestra un esquema comparativo de los distintos depósitos de piroclásticos; D. Caída, D. Surge y D. Flujo.	16
11	Figura que muestra un esquema con la relación que diferencia a los flujos piroclásticos de los surges en terminos de velocidad y de densidad (kg/m^3). Tomada de Wilson y Houghton (2000).	18
12	Mapa representativo de las ubicaciones de los productos volcánicos secundarios.	19
13	Ejemplo de una señal compuesta por funciones de impulsos	20
14	Clasificación de filtros ideales	22
15	Ejemplo teórico de filtrado de señales.	22
16	Esquema de representación para la metodología seguida.	23
17	Imágenes que muestran el equipo de medición y el procedimiento utilizado por la empresa Ciclos GIP para el levantamiento de información	25
18	Parámetros medidos por las herramientas wirelines 9144 y 9074 (Figura 17(a)).	27
19	Esquema de representación para la primera etapa del preprocesamiento.	31
20	Esquema de representación para la segunda etapa del preprocesamiento.	32
21	Diagrama de clases; esquema estructural de la base de datos.	33

22	Filtrado de señales aplicado a gamma	36
23	Mapa del área de interés en el CVC. Las banderas blancas representan los 40 sitios de perforación y a su lado derecho se imprime el folio del registro. El área de interés se acotó en base al objeto de estudio.	40
24	Gráficos del parámetro gamma con ejemplos de grupos de clasificación en base a la amplitud	42
25	Mapa de agrupación en base a la amplitud del parámetro gamma	43
26	Gráficos del parámetro gamma con ejemplos de grupos de clasificación en base a la tendencia general	45
27	Mapa de agrupación en base a la pendiente promedio del parámetro gamma	46
28	Gráficos del parámetro SP con ejemplos de grupos de clasificación en base a la pendiente promedio del registro.	49
29	Mapa de clasificación del parámetro sp en base a la pendiente	50
30	Gráficos de res(16") con ejemplos de grupos de clasificación en base a la amplitud del registro.	53
31	Mapa de clasificación del parámetro de resistividades en base al orden de variación de los datos	54
32	Mapa del área de interés que muestra la distribución espacial de la agrupación de pozos en tres clases referentes al nivel de certeza en la localización de los pozos. Las tres clases son; pozos de control, pozos de validación y pozos estándar.	57
33	Firma de los parámetros gamma, SP y resistividad puntual en la unidad geológica: Qale (f24)- Pozo de control	59
34	Firma Unidad Geológica: CVN10 (f38)	61
35	Firma Unidad Geológica: CVN5 (f22)	63
36	Firma Unidad Geológica: CVP5 (f63)	64
37	Firma Unidad Geológica: Ktp (f34)	65
38	Perfiles geofísicos de pozos de control correlacionados con pozos incluyendo de validación.	67
39	Histogramas de los raster de información generada apartir de los mapas interpolados a diferentes profundidades dentro del área de interés.	69
40	Mapas "gamma" filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie	70
41	Mapas "sp" filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie	72
42	Mapas "res" filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie	74
43	Mapas resultantes del cálculo de mapas apartir de los raster interpolados de los datos filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie	76
44	Perfiles de corte generados en GRASS GIS.	78
45	Modelos superficiales de la zona de estudio en 3D visualizados en Blender.	79
46	Modelos de la sub-superficie del área de interés en 3D visualizados en Blender.	81
47	Registros geofísicos del pozo (f-1) Proyecto modelo-21.	88

48	Registros geofísicos del pozo (f-2) Ocote cuate 4.	89
49	Registros geofísicos del pozo (f-3) La tiznada.	90
50	Registros geofísicos del pozo (f-4) Ocote cuate.	91
51	Registros geofísicos del pozo (f-5) El oasis-2.	92
52	Registros geofísicos del pozo (f-6) Ocote cuate 5.	93
53	Registros geofísicos del pozo (f-7) El tepehuaje.	94
54	Registros geofísicos del pozo (f-8) Cruz de ordaz y paredes.	95
55	Registros geofísicos del pozo (f-9) Tlaxcolomo.	96
56	Registros geofísicos del pozo (f-10) Huescalapa.	97
57	Registros geofísicos del pozo (f-11) Presa de Pérez.	98
58	Registros geofísicos del pozo (f-12) Huescalapan-La joya.	99
59	Registros geofísicos del pozo (f-13) El gato.	100
60	Registros geofísicos del pozo (f-14) Pasito de la galera (SHB)-1 In- forme.	101
61	Registros geofísicos del pozo (f-15) Proyecto Colima modelo 24.	102
62	Registros geofísicos del pozo (f-16) Proyecto Colima modelo 24.	103
63	Registros geofísicos del pozo (f-17) El salvial- II.	104
64	Registros geofísicos del pozo (f-18) El cerillero.	105
65	Registros geofísicos del pozo (f-19) José Toledo.	106
66	Registros geofísicos del pozo (f-20) José Toledo.	107
67	Registros geofísicos del pozo (f-21) La tijera.	108
68	Registros geofísicos del pozo (f-22) El platanar.	109
69	Registros geofísicos del pozo (f-23) El platanar.	110
70	Registros geofísicos del pozo (f-24) Mendoza.	111
71	Registros geofísicos del pozo (f-25) Mendoza.	112
72	Registros geofísicos del pozo (f-26) La joya II.	113
73	Registros geofísicos del pozo (f-27) La joya II.	114
74	Registros geofísicos del pozo (f-28) La joya II.	115
75	Registros geofísicos del pozo (f-29) La joya II.	116
76	Registros geofísicos del pozo (f-30) Lomas del pinar.	117
77	Registros geofísicos del pozo (f-31) Lomas del pinar.	118
78	Registros geofísicos del pozo (f-32) El paraiso.	119
79	Registros geofísicos del pozo (f-33) Montelongo.	120
80	Registros geofísicos del pozo (f-34) Montelongo.	121
81	Registros geofísicos del pozo (f-35) Tezontel.	122
82	Registros geofísicos del pozo (f-36) Tezontel.	123
83	Registros geofísicos del pozo (f-37) Tezontel.	124
84	Registros geofísicos del pozo (f-38) Canoas 2.	125
85	Registros geofísicos del pozo (f-40) Canoas 2.	126
86	Registros geofísicos del pozo (f-41) Dr. Pedro López.	127
87	Registros geofísicos del pozo (f-42) Dr. Pedro López.	128
88	Registros geofísicos del pozo (f-43) La eriza.	129
89	Registros geofísicos del pozo (f-44) Altozano 4.	130
90	Registros geofísicos del pozo (f-45) Altozano 4.	131
91	Registros geofísicos del pozo (f-46) Altozano 4.	132
92	Registros geofísicos del pozo (f-47) Altozano 4.	133
93	Registros geofísicos del pozo (f-48) Potrero de enmedio.	134
94	Registros geofísicos del pozo (f-49) Potrero de enmedio.	135

95	Registros geofísicos del pozo (f-51)	La mesa.	136
96	Registros geofísicos del pozo (f-52)	El chivato CIAPACOV.	137
97	Registros geofísicos del pozo (f-53)	El chivato CIAPACOV.	138
98	Registros geofísicos del pozo (f-54)	CIAPACOV Carlos de la Madrid.	139
99	Registros geofísicos del pozo (f-55)	CIAPACOV Carlos de la Madrid.	140
100	Registros geofísicos del pozo (f-56)	Los alcaraces.	141
101	Registros geofísicos del pozo (f-57)	Los Alcaraces.	142
102	Registros geofísicos del pozo (f-58)	El guayabal.	143
103	Registros geofísicos del pozo (f-59)	El guayabal.	144
104	Registros geofísicos del pozo (f-60)	Palmillas.	145
105	Registros geofísicos del pozo (f-61)	Palmillas.	146
106	Registros geofísicos del pozo (f-62)	Tierra santa.	147
107	Registros geofísicos del pozo (f-63)	Tierra santa.	148
108	Registros geofísicos del pozo (f-64)	Las codornices.	149
109	Registros geofísicos del pozo (f-65)	Las codornices.	150

Generalidades

Introducción

La toma de Registros Geofísicos en el país crece junto con la necesidad de proveer agua mediante la perforación de pozos. El uso de esta información se limita a una interpretación general y cualitativa por parte del geofísico o el personal encargado de la perforación, esto para ayudarse como referencia para la toma de decisiones referentes al estado del pozo y para el cumplimiento legal con la norma federal *NOM-003-CNA*¹. La cual estipula los requisitos durante la construcción de pozos hídricos para prevenir la contaminación de acuíferos publicada en 1996. Entre la documentación requerida se encuentran los registros eléctricos; con las curvas de Potencial Espontáneo o Natural (SP) y de resistividades (normal corta o a 16", normal larga o a 64" y lateral), siendo dicha información un gran referente cuantitativo de distintas propiedades físicas del subsuelo. En este trabajo se propone una metodología que se basa en la estructuración, en el manejo y en el análisis de grandes volúmenes de datos, mediante métodos de tratamiento masivo utilizando herramientas avanzadas de software libre y código abierto. Aplicado a datos de registros geofísicos de pozos facilitados por Ciclos GIP S.C. de una base de datos con informes de registros archivados del 2005 al 2015, ubicados en las cercanías del CVC en los estados de Colima y Jalisco.

El Volcán de Colima y el Complejo Volcánico de Colima han sido objeto de estudio de investigaciones orientadas hacia distintas disciplinas (Rodríguez-Elizarrarás, 1995; Luhr and Carmichael, 1990b; Cortés et al., 2005) compartiendo la misma finalidad, el entendimiento del sistema geológico. Sin embargo las escalas manejadas no permiten entrar en detalle en la interpretación y descripción de materiales ubicados en profundidades más someras menores a 500 metros.

La generación de mapas de resistividades, potencial espontáneo y rayos gamma natural brindaron una perspectiva espacial del comportamiento general en profundidad de cada registro levantando en las inmediaciones del CVC.

Se atenuaron la respuestas registradas con los distintos sensores aplicando filtrado de señales digitales con técnicas de convolución para conocer a detalle la configuración de las unidades identificadas así como los espesores típicos de los estratos dentro de cada unidad mediante análisis numérico.

¹Documento consultado en <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo68740.pdf> el 27 de enero de 2016.

El álgebra de mapas facilita la generación de hipótesis mediante la aplicación de funciones que relacionan variables pertenecientes a cada parámetro medido por la sonda.

La representación visual en 2.5D y 3D de la información geofísica facilita la interpretación de los registros tomados en el subsuelo.

Objetivos

Objetivo general

Presentar una metodología basada en software libre que facilite el tratamiento, almacenamiento, análisis y la interpretación de grandes volúmenes de datos medidos en pozos de extracción de agua.

Objetivos de la metodología

- Proponer un tratamiento estructurado y seriado para datos geofísicos.
- Diseñar e implementar una base de datos espacial BDE para almacenar información referente a RGP.
- Generar algoritmos para el despliegue de gráficos de RGP.
- Generar un modelo visual de datos geofísicos en 2.5D y 3D.

Objetivos específicos

- Aplicar la metodología en un contexto volcánico.
- Diseñar el área de interés con base al objeto de estudio.
- Caracterizar las variaciones de los RGP en el área de interés.
- Determinar espesores típicos de las unidades geológicas del área de interés.
- Generar funciones multi-paramétricas para discriminar características físicas de los materiales del subsuelo
- Con base a los resultados obtenidos se elabora un modelo geofísico en 2.5D y 3D del subsuelo para los primeros 300 metros de profundidad.

Localización

La zona de estudio se encuentra en la parte occidental del Cinturón de Volcánico Transmexicano (CVTM) en los límites de los estados de Colima y Jalisco. (Figura 1). Los pozos se ubican con banderas blancas con su folio de identificación del lado derecho, se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de un medio círculo orientado hacia la parte sureste del Complejo Volcánico de Colima (CVC).

Tomando como referencia el Volcán de Fuego de Colima (VFC) ubicado en las coordenadas geográficas $19^{\circ}31'45''$ Norte y $103^{\circ}37'01''$ Oeste, el área de interés se extiende en una franja de puntos con un radio promedio de 30 km hacia el sureste del volcán formando el medio círculo ver Figura 1. Abarcando en las proximidades de los municipios de Comala, Colima, Cuauhtémoc, Villa de Alvarez y Yerbabuena en Colima y en Tuxpan, Ciudad Guzmán, San Gabriel, Zapototlán, Zapotiltic y Tonila en Jalisco.

Las principales vías de acceso a las ubicaciones de los pozos son la carretera federal No. 54 etiquetada como Ciudad Guzmán- Colima situada a una distancia aproximada de 20 km al sureste del VFC, y la carretera federal No. 110 (Jiquilpan-Colima) ubicada 15 km más al sureste, junto con sus respectivas desviaciones en el segmento desde Ciudad Guzmán a Colima.

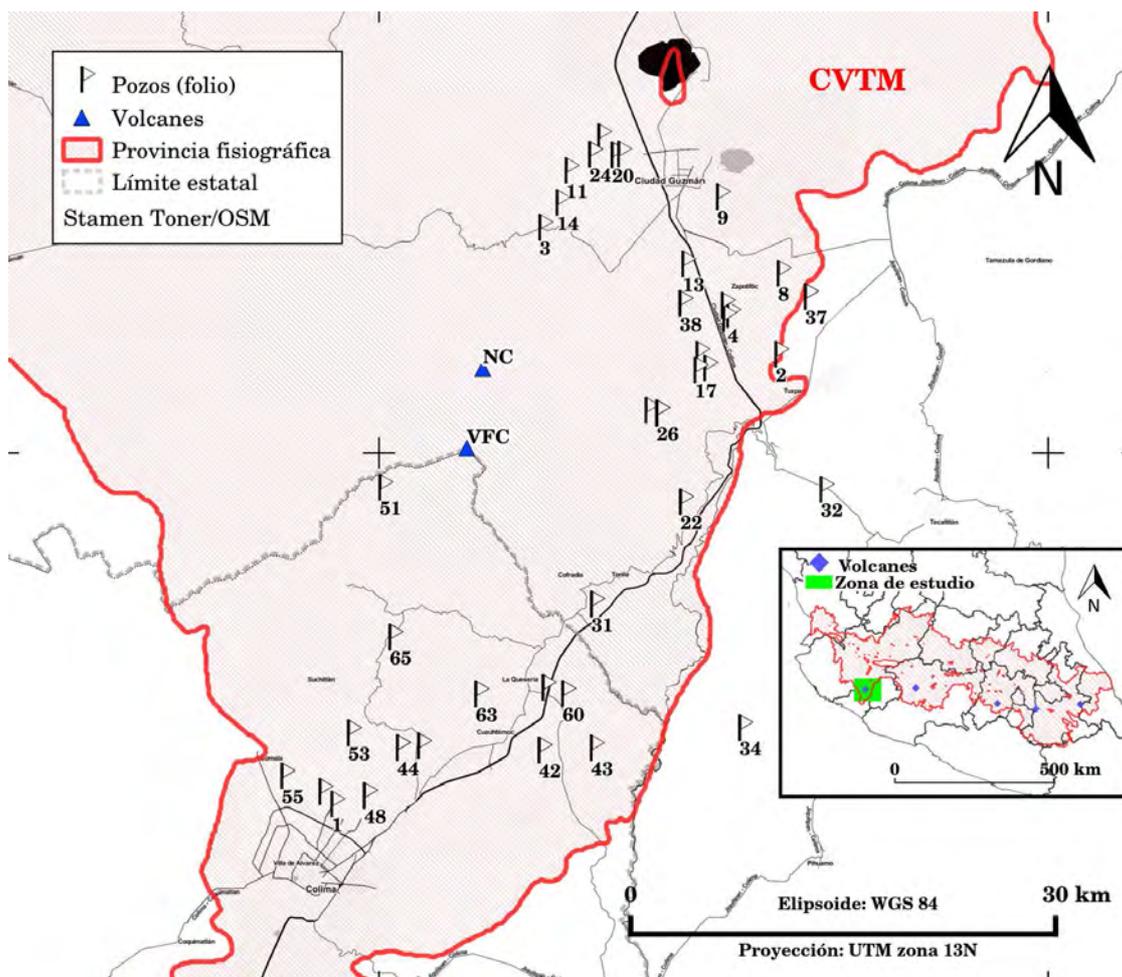


Figura 1: Mapa de localización de la zona de estudio.

Marco Teórico

En el presente capítulo se pretende comprender el principio físico que aplican las sondas modernas y cuales son las propiedades físicas del suelo que detectan los distintos sensores. Se busca introducir a aspectos a tomar en consideración de situaciones y eventos dentro de la zona de estudio que puedan llegar a verse reflejados en los datos y conocer de que forma lo pueden hacer. Se muestra de una manera muy general la teoría de filtrado de señales digitales procedimiento utilizado posteriormente en la metodología.

Registros geofísicos

Los métodos geofísicos son usados como una técnica de prospección del subsuelo que monitorea las propiedades físicas de las formaciones de roca a través de un dispositivo de medición dentro del pozo llamado sonda (Bjorlykke, 2010).

En 1927, los hermanos Schlumberger iniciaron con los registros eléctricos los cuales miden la conductividad eléctrica de las rocas. En 1939 se implementaron de los métodos radiactivos por parte de Well Surveys Inc., estos miden la radiación natural de isótopos de Uranio, Torio y Potasio de las formaciones de los pozos (Kobr et al., 2005).

Actualmente las herramientas de registro utilizan métodos técnicamente avanzados y sofisticados. Aplicando varios tipos de registros (nucleares, acústica, eléctricos, etc.) al mismo tiempo integrando los instrumentos en una tubería larga de acero inoxidable de 53 mm (2.1 in.) de diámetro y un peso de 15 kg (33 lb.) que se le conoce como wireline o sonda. Existen varios tipos de sondas dependiendo de los parámetros que pueda medir o el uso que se le pueda dar, ya sea para la industria petrolera o para la hídrica existen muchas agrupaciones en base a las propiedades que mide o el parámetro físico mensurable que se puede conocer de la roca (Keys, 1989).

En este documento se introduce a una clasificación con base al principio físico de medición, los principales parámetros son: los registros eléctricos, radiactivos y los que miden propiedades directas en el pozo (caliper y registros de temperatura). Existen otros tipos de registros geofísicos como los acústicos o sónicos, los dipmeter, incluso de imágenes sin embargo no se usaron en este estudio (Glover, 2000).

El lodo de perforación se infiltra en la formación afectando en las mediciones mayormente por su composición química (agua o aceite). Se usa como regulador de

la presión de agua en la formación y como medio de transporte de los fragmentos de roca cortada por la broca de perforación. (Wonik and Olea, 2007).

La mayoría de parámetros medidos dependen del contacto directo con las paredes del pozo exceptuando a los registros de radiactividad, razón por la cual es preciso que se ejecuten antes de que instalen el revestimiento en el pozo (Ellis and Singer, 2007). Enseguida se describen las principales características de los parámetros utilizados en la aplicación de la metodología.

Registros eléctricos

Los registros eléctricos permiten obtener la resistividad eléctrica de la formación que generalmente depende de dos tipos de conducción; electrónica y electrolítica, donde la primera es la conducción eléctrica común y la segunda hace referencia al mecanismo que depende de la presencia de sales disueltas en un líquido (Ellis and Singer, 2007).

En los registros eléctricos se incluyen a los denominados auto-potenciales, de resistividad y de conductividad debido a que funcionan bajo el mismo principio, la ley de Ohm. La cual establece que la corriente I que fluye desde un punto A a un punto B en un conductor, es proporcional a la diferencia de potencial eléctrico ΔE entre los puntos multiplicando a una constante de proporcionalidad se le llama conductancia eléctrica c . La corriente se mide en amperios (A), la diferencia de potencial en voltios (V), y la conductancia en siemens (S) (Ellis and Singer, 2007).

$$I = c\Delta E$$

En donde la resistencia eléctrica r , que es la inversa de la conductancia es medida en Ohms(Ω). $r = \frac{1}{c}$

$$I = \frac{\Delta E}{r}$$

El valor de la resistencia es una propiedad que describe que tanto el material resiste al paso de una corriente dada por una diferencia de potencial aplicada (Glover, 2000). Por lo que si la resistencia es alta, la diferencia de potencial dada ΔE dará una pequeña corriente I . Y si la resistencia es baja, la diferencia de potencial dará una corriente alta I . Si el tamaño de la muestra de roca se duplica se puede ver que la resistencia de la muestra al paso de la corriente también se duplica.

Entonces si tomamos la resistencia y le multiplicamos o agregamos una unidad de área y longitud, se puede remover el efecto de la dimensiones de la muestra y el valor obtenido solo queda función de la propiedad del material y no de las dimensiones. La resistencia por unidad de longitud y área es llamada resistividad R , y se expresa como:

$$R = \frac{\Delta E}{I} \frac{A}{L}$$

En donde:

R = la resistencia de la muestra (Ω o ohm.m)

ΔE = la diferencia de potencial a través de la muestra (volts, V)

I = el flujo de corriente a través de la muestra (Amperes, A)

A = el área de sección transversal de la muestra perpendicular al flujo de corriente (m^2)

L = la longitud de la muestra (m)

Por lo que la conductividad C se define de manera reciproca a la resistividad R ;

$$C = \frac{1}{R} = \frac{I}{\Delta E} \frac{L}{A}$$

El arreglo de medición de resistividad de forma general (Figura 2) consta de cuatro electrodos: dos (A y B) que emiten corriente alterna, pulsante de baja frecuencia a través del medio rocoso hacia los otros dos receptores identificados como N y M .

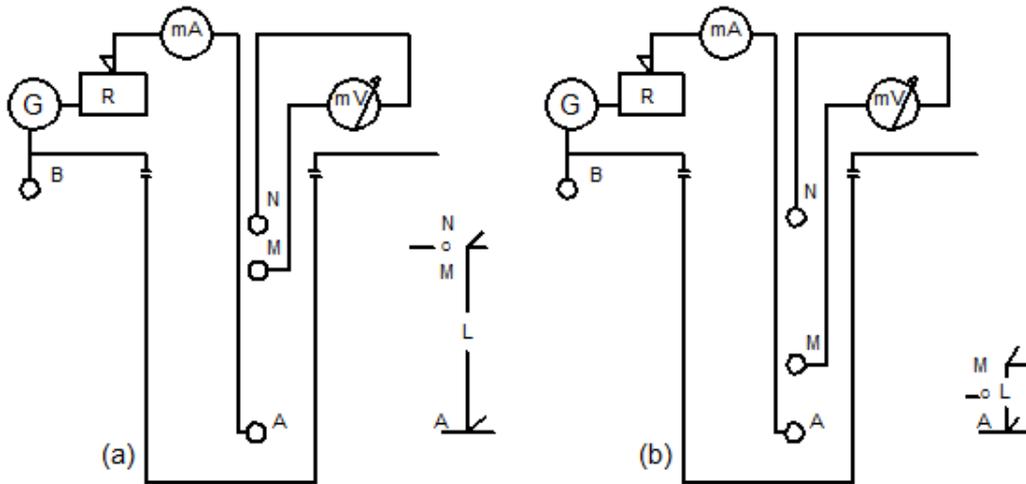


Figura 2: Figura modificada de Kobr et al., (2005). Muestra la configuración de electrodos para medir R_a con sondas convencionales: R- reóstato, G- generador, mV- milivoltímetro, mA- miliamperímetro. a) arreglo de sonda larga y b) arreglo de sonda corta (16" y 64").

La diferencia de potencial (ΔU_{MN}) esta en función de la corriente I y la resistividad R de la roca donde esta colocada la sonda. Por lo que se calcula R mediante ΔU_{MN} (Kobr et al., 2005).

$$\Delta U_{MN} = f(I, R)$$

Los electrodos A, M y N se colocan en un contenedor cilíndrico conocido como sonda y se instalan a distancias fijas de antemano. El cuarto electrodo B se coloca próximo a la boca del pozo y la distancia entre los electrodos se determina dependiendo de la tarea a resolver. Los electrodos se conectan mediante un cable al generador (G) y a los instrumentos de medición miliamperímetro (mA) y milivoltímetro (mV), en los que se mide la intensidad de corriente I y la diferencia de potencial ΔU_{MN} , permitiendo determinar la resistividad aparente y el espesor de las rocas que atravesó la perforación.

Cada sonda tiene parámetros característicos que las diferencian y dependen de las relaciones entre las distancias de los electros de alimentación A, B y los de medición M, N :

- Cuando la distancia $AM \gg MN$ el arreglo es lateral y mide la diferencia de potencial ΔU entre los electrodos M y N .

- Cuando la distancia $AM \ll MN$ el arreglo es normal y la sonda mide el potencial eléctrico U_M del electrodo M .

Otras características de las sondas son la longitud y el punto de referencia de la medición:

- En el arreglo lateral la longitud se define por $L = AO$, donde AO es la distancia entre el electrodo de corriente A y el punto medio de los electrodos M y N . El punto O coincide con el punto de referencia de la medición.
- Y para la sonda potencial normal la longitud es la distancia entre el electrodo de corriente A y el de medición M , es decir $L = AM$ y el punto de referencia de la medición se encuentra en la mitad de esta distancia.

Ambas sondas obtienen registros de resistividad pero no se trata de la resistividad real de la roca sino de una resistividad aparente Ra que depende de;

- la resistividad real del medio rocoso
- del tipo de sonda
- de la distancia entre los electrodos
- del diámetro del pozo
- de la resistividad del lodo
- de la heterogeneidad de la roca
- entre otros factores

La Ra medida según la normal a la estratificación es menor que la resistividad aparente medida en la dirección de la estratificación (Glover, 2000).

Las respuestas de las curvas de resistividad aparente varían dependiendo del tipo de sonda (normales o laterales) y en función de las relaciones entre espesores de capa y la longitud de la sonda. Por ejemplo, en la curva medida con la sonda normal frente a una capa con distinta resistividad tiene una forma simétrica, pero no registra las capas delgadas de alta resistividad, con espesores menores que la longitud de la sonda. La curva correspondiente a la sonda lateral siempre mantiene las relaciones adecuadas entre las diferentes resistividades de las diferentes capas, no son simétricas y tiene puntos extremos (mínimos y máximos de Ra), los cuales facilitan definir bien las fronteras entre las capas.

Como se sabe los distintos arreglos de sondas modernas tratan de atenuar o eliminar las contribuciones externas con fin de acercarse a conocer la resistividad real de la roca. Por ejemplo para eliminar la alteración de las líneas de corriente de una capa de alta resistividad, se concentran las líneas de corriente con electrodos enfocadores de igual polaridad que el electrodo de corriente de la sonda, que estén equidistantes de al electrodo central por arriba y abajo, de tal manera que en el espacio entre los electrodos A y M , las líneas de corriente penetren perpendicularmente a la superficie del pozo en la roca que lo circunda. Este arreglo de electrodos enfocadores puede ser de dos tipos: esféricos considerados como puntuales y cilíndricos, alargados. La

diferencia esta en que la primera sonda de corriente enfocada puntual tiene siete electrodos y la sonda de corriente enfocada con electrodos alargados tiene sólo tres electrodos.

La resistividad eléctrica de las rocas fundamentalmente depende de la conductividad eléctrica del material (minerales) que la compone y de la proporción y distribución en que se encuentran en su interior, así como la composición de los fluidos que contienen. Como el rango de variación de la resistividad eléctrica de los minerales y de los fluidos que saturan la roca es muy grande, la medición varía también entre límites muy amplios (Ellis and Singer, 2007) .

Con base a la resistividad de los componentes y de los fluidos que contienen en la zona de estudio se pueden considerar dos sistemas;

- rocas compuestas de minerales de alta resistividad que presentan intrusiones conductoras, y
- rocas compuestas de minerales de alta resistividad y que tienen líquidos conductores en los poros.

Por lo general el primer grupo es portador de energía debido a la conductividad de los electrones, en este caso los minerales de alta resistividad constituyen la mayor parte de la roca por lo que las variaciones registradas dependen de la proporción y la distribución de los minerales conductivos y sobre todo la interconexión entre estos últimos.

Puede encontrarse rocas con pobre contenido de minerales de alta conductividad o bajas resistividades pero con una red interconectada que reflejará en el registro a pequeños valores de resistividades y rocas con la distribución de materiales conductores en una red aislada reflejando valores altos de resistividad, pero también se pueden encontrar rocas con un buen sistema poroso que por lo general esta ocupado por agua, clásico en rocas sedimentarias, principalmente detríticas.

Este grupo los minerales de alta resistividad constituyen el esqueleto que conforma la parte solida de la roca, como son el cuarzo, los silicatos, óxidos, carbonatos, etc., y la conductividad del agua del poro es de tipo iónico por lo que su resistividad es mucho más baja que la del esqueleto rocoso. Pueden encontrarse minerales de bajas resistividades y de conductividad electrónica como la magnetita-pirita en la parte solida de algunos sedimentos, el mineral de glauconita si se manifiesta con cierta periodicidad en las areniscas (Kobr et al., 2005; Glover, 2000).

Con el mismo arreglo y bajo el mismo principio físico se mide el auto potencial, en la Figura 3 se representa el esquema general del parámetro; SP registra la diferencia de potencial ΔU_{MN} de un electrodo móvil colocado en el pozo M y uno fijo colocado en la superficie N , del tal manera que U_N las variaciones en ΔU_{MN} corresponden a U_M .

Son tres requerimientos esenciales para que se pueda llevar a cabo la medición de la corriente sp; un fluido de perforación conductor (un lodo a base de agua), un sándwich de un lecho poroso y permeable entre la baja porosidad y formaciones impermeables y que exista una diferencia de salinidad entre el fluido de pozo y el fluido de formación. En algunos casos en donde no hay diferencia de salinidad se puede correr el registro debido a una diferencia de presiones en el líquido (Glover, 2000).

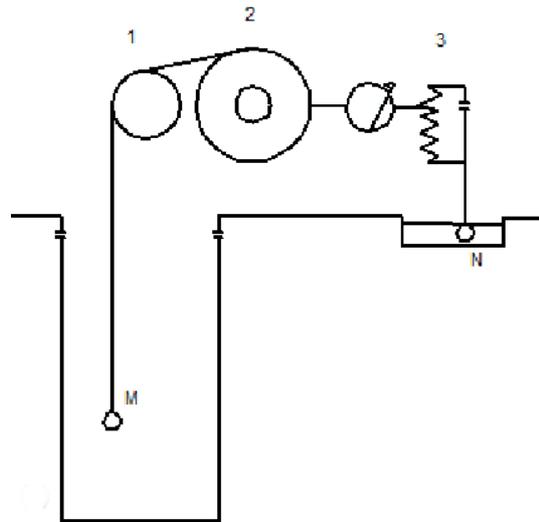


Figura 3: Figura modificada de Kobr et al., (2005). Muestra el esquema del circuito de medición SP: 1- carrete del cable; 2- registrador; 3- compensador de la polarización.

La corriente se genera de manera natural por lo que el registro de potencial espontáneo ocurre en ausencia de cualquier corriente aplicada artificialmente. Se crea entre el lodo de perforación y el agua de los poros de la roca (formación) debido a varios procesos físico-químicos que ocurren en las rocas que circundan al pozo. Los principales procesos son los de difusión, absorción (membrana), electro-filtración y, oxido-reducción (Hawkins, 1984).

En cortes sedimentarios donde se manifiestan procesos difusión-absorción, las rocas de referencia son las arcillas debido a que en ellas el potencial es estable y los valores máximos positivos se presentan cuando la resistividad del lodo de perforación es mayor a la resistividad del agua de formación; a su vez, las variaciones del potencial espontáneo medido en formaciones porosas y permeables dan origen a deflexiones negativas en las curvas registradas (Kobr et al., 2005).

Las propiedades eléctricas de las rocas en general dependen de dos tipos de conducción electrónica y electrolítica; en donde la segunda hace referencia al mecanismo dependiente de la presencia de sales disueltas en el líquido (Ellis and Singer, 2007). Los materiales rocosos típicos en esencia son aisladores, de hecho que las rocas de yacimientos no tienen conductividad detectable, resultado de la presencia de conductores electrolíticos en el espacio poroso. La excepción son los minerales de arcilla y las sales (KCl NaCl), debido a que la conductividad tiene lugar a través de la fase líquida entonces depende de la cantidad de agua en relación con el volumen de la roca, del grado en el que el lodo de perforación invade la formación y esta en función de la porosidad (el volumen relativo de poros de la roca) y la permeabilidad (la distribución de los poros en la roca) (Bjorlykke, 2010).

Registros de radioactividad

Existen tres tipos de radiación en materiales alfa beta y gamma; la radiación alfa consiste en el movimiento rápido de átomos de H_2 despojándose de sus electrones, la radiación beta consiste en los electrones energéticos, y la radiación gamma son los paquetes de radiación electromagnética también conocidos como fotones cuantizables en el proceso (Bjorlykke, 2010).

Los registros de rayos gamma detecta la radiación total emitida naturalmente por una formación. Miden la emisión natural de rayos gamma a partir de las rocas del pozo, esto es un producto de la desintegración natural de las pequeñas cantidades de elementos radiactivos (Keys, 1989). Esta es la radioactividad a la que se hará referencia en posteriores capítulos.

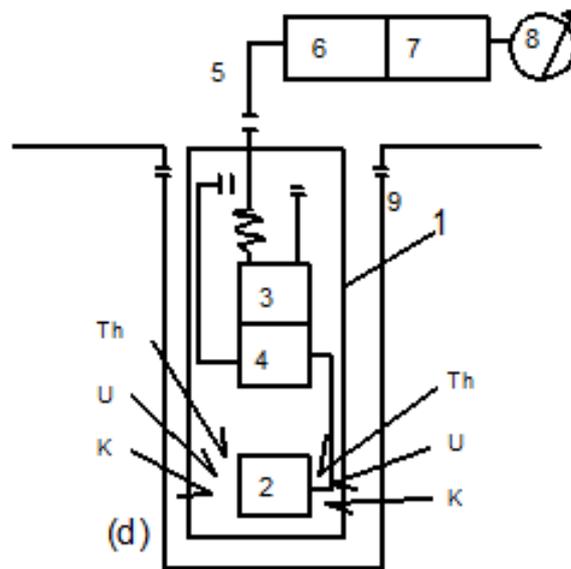
La radiación gamma se origina a partir de isótopos de potasio-40 (K^{40}) y de uranio-radio (U) y de torio (Th). Una vez que se emite el rayo gamma de un isótopo en la formación, progresivamente reduce su energía como resultado de colisiones con otros átomos en la roca la llamada dispersión de Compton. La dispersión Compton se produce hasta que el rayo gamma es de una energía tan baja que se absorbe por completo en la formación (Wonik and Olea, 2007).

La Figura 4 se muestra el equipo utilizado, se compone de 1) una sonda donde se encuentran; 2) el detector de la radiación gamma, 3) una fuente de alta tensión que alimenta los contadores de radiación y 4) un amplificador que se conecta a la salida de los contadores amplificando los pulsos que producen cuando el fotón gamma llega a él. Los pulsos amplificados suben a la superficie por medio del 5) cable, y pasan a los paneles 6), 7), 8) en la superficie. El bloque 6) es un analizador de amplitud empleado para las mediciones espectrales, que se sustituye en el caso de las mediciones integrales por un discriminador que elimina los ruidos provenientes del detector o del equipo del pozo. El bloque 7) normaliza en amplitud y duración de los pulsos que se produjo en el detector en la unidad de tiempo. Esta tensión eléctrica pasa al registrador 8), donde se registra su magnitud.

Existen registros que miden directamente las propiedades del pozo como por ejemplo: el registro de Caliper que registra las variaciones del diámetro del pozo, el registro de temperatura y registros de imágenes.

Los registros de Temperatura son una herramienta para medir directamente la temperatura en el pozo. Los sensores de temperatura están asociados a cada combinación de herramientas que se corre en el pozo para la medición de la máxima temperatura (asumiendo que esta en el fondo del pozo). Las lecturas hechas por una serie de termómetros de máxima unidos a diferentes combinaciones de herramientas y que se ejecutan en varios momentos se analizan para dar la temperatura corregida de la parte inferior de la perforación (botton hole temperature, BHT) (Keys, 1996)

El gradiente geotérmico es un concepto que hace referencia al incremento de la temperatura con respecto se avanza en la profundidad (Valdivia, 1996). El gradiente típico para embalses(reservoirs) son 20 a $35^{\circ}C/km$, en zonas tectónicamente activas son hasta de $85^{\circ}C/km$, en interiores de plataformas continentales estables de $0.05^{\circ}C/km$. Esto supone que el gradiente geotérmico es constante pero en la



Esquema medición
gamma natural

Figura 4: Figura modificada de Kobr et al., (2005). Muestra el esquema general de bloques de sonda para radiación gamma natural

práctica no suele ser el caso, debido a las diferencias en conductividades térmicas de rocas entre el fondo del pozo y la superficie, las fluctuaciones en la temperatura de la superficie que penetran en la sub-superficie y que perturban la temperatura subsuperficial.

Sin embargo en algunos casos la temperatura disminuye debido al proceso lento y largo de regulación de la temperatura de la formación del pozo la cual fue modificada por la perforación debido al lodo introducido y por el ambiente natural de modera y regula la temperatura natural de la formación (Glover, 2000) .

Rocas como la pizarra con baja conductividad térmica actúan como aislante térmico y cuentan con un gran gradiente de temperatura a través de ellos, mientras que rocas con alta conductividad térmica como la sal, permiten una transferencia de calor de manera eficiente con un pequeño gradiente de temperatura a través de ellos.

El sondeo de la temperatura del pozo es un parámetro importante en el análisis de los registros de resistividad, para la detección del movimiento de fluido, el análisis de las presiones de fluidos y el modelado geoquímico de formaciones, etc. (Glover, 2000).

El registro caliper mide el diámetro del agujero. Algunos pueden registrar la forma en tres dimensiones de las paredes del pozo. Típicamente los registros de caliper son presentados como el diámetro del pozo en pulgadas. Se espera que en este parámetro los agujeros en arcillas y esquistos mal compactados tendrán un mayor diámetro de la broca puesto que tiene a derrumbarse después de la perforación y la erosión por el lodo de perforación. En donde tenemos arenisca porosa una concentración de barro se puede desarrollar, haciendo que el diámetro sea menor. Las variaciones en el diámetro del agujero y derrumbes influyen en las mediciones de los diferentes registros descritos anteriormente (Bjorlykke, 2010).

Algunos registros requieren aplicarse antes de que se introduzca la carcasa de acero para obtener contacto directo con la formación pero los rayos gamma penetran el acero por lo que a este parámetro no es requerimiento (Glover, 2000).

Contexto geológico

La zona de estudio se encuentra en el Complejo Volcánico de Colima que se ubica en la parte parte occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. El CVTM un arco volcánico o un arco magmático continental, conformado por miles de estructuras volcánicas y cuerpos intrusivos. Emerge de provincias magmáticas Cretácicas y Cenozoicas, sobre un basamento heterogéneo de terrenos tectónico-estratigráficos de diferentes edades y litologías construido sobre fallas regionales que atraviesa en zigzag el centro de México en la latitud 19°. Comienza desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México. Cuenta con una longitud aproximada de 1000 km y un ancho que varía entre los 65 y 200 km (Demant, 1978; Verma, 1987; Mooser, 1972; Ferrari, 2000).

Entre sus principales características se conoce que: 1) su parte central no es paralela a la Trinchera Mesoamericana; 2) sus estratovolcanes tienden a alinearse transversalmente (N-S) con respecto a la orientación del arco; 3) cuenta con una gran variedad geoquímica al tener productos de zonas de tipo subducción y de

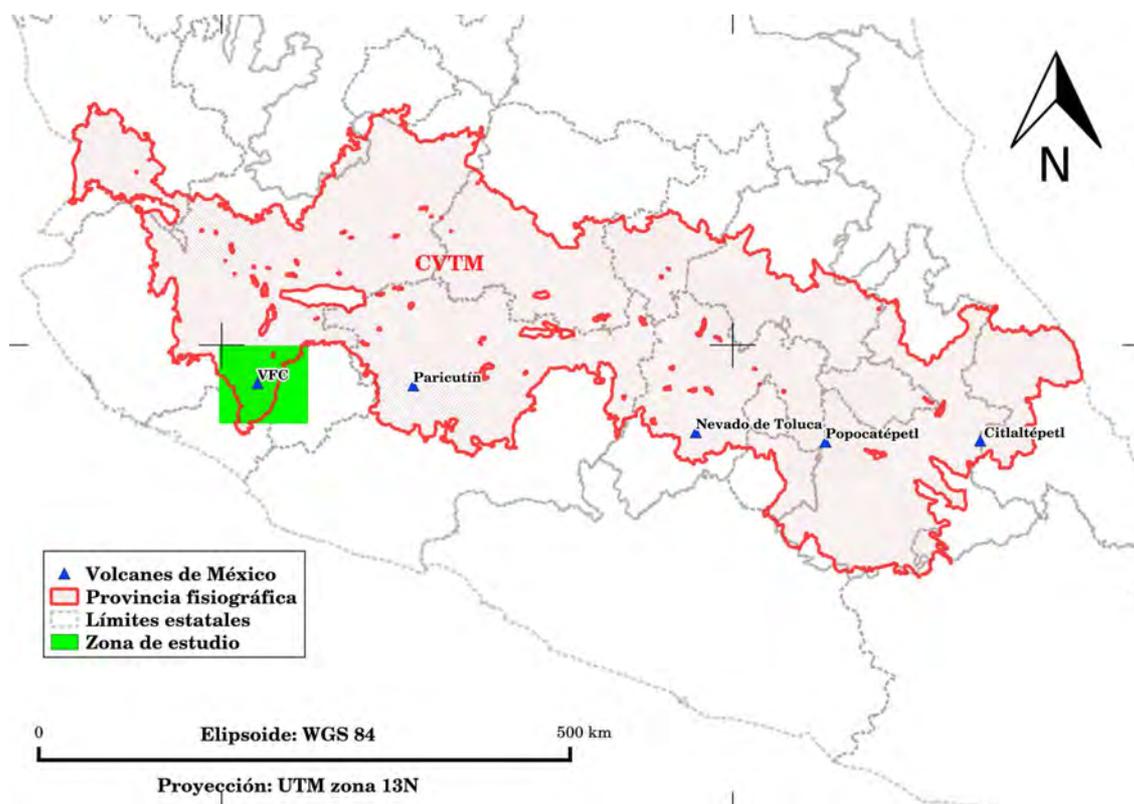


Figura 5: Mapa que muestra la localización del CVTM en México.

tipo intraplaca; 4) las placas que subduce son relativamente jóvenes (Rivera con 10 Ma y entre 11 y 23 Ma para Cocos), hechos que en otros casos presentan un escaso vulcanismo; 5) no presenta sismicidad por debajo de la zona volcánica (Ferrari et al., 2012)

Es dividido en tres sectores Occidental, Central y Oriental: el sector Occidental esta delimitado en el Este con el rift de colima, al norte con el bloque Jalisco y el limite meridional con la sierra madre occidental; el sector Central esta ubicado entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende; y el sector oriental el cual no denota fallamiento se extiende hasta las costas de Veracruz (Verma, 1987; Ferrari, 2000; Ferrari et al., 2012).

El CVC esta construido sobre la parte sur de la placa de Norteamericana, y se relaciona con la subducción de la placa Cocos y la placa Rivera. Esta conformado por el volcán El Cántaro (300 msnm), el Nevado de Colima (4300 msnm) y el VFC (3860 msnm) orientados norte-sur respectivamente (Rodríguez-Elizarrarás, 1995). Presentan gran altura y una forma cónica debido a múltiples capas de lava endurecida, piroclastos y cenizas volcánicas (Saucedo et al., 2005; Yarza de De la Torre, 1992).

El basamento del CVC consta de una secuencia de rocas Mesozoicas sedimentarias de la Sierra Madre del Sur, de plataforma del Cretácico Inferior y de depósitos volcánico-sedimentarios, tipo arco insular marginal asociado con cuencas marinas (Vidal et al., 1980) (Ramos, 1983). Derivadas de la actividad de un límite magmático convergente de placas en el occidente de México en el Cretácico Inferior (Campa and Ramírez, 1979). El plegamiento y fallamiento inverso se originó durante el Cretácico Medio Tardío, ocasionado por los esfuerzos compresionales generados por

el movimiento orogénico Laramídico que provocó la formación de rocas plutónicas que plegaron, fracturaron e intrusaron los sedimentos preexistentes (Cortés, 2002).

La comisión para la mitigación de desastres volcánicos de la IAVCEI lo seleccionó como uno de los 16 volcanes de la última década del siglo XX (Newhall, 1996) debido a la frecuencia eruptiva y el riesgo que representa en la población.

El Volcán de Fuego de Colima (VFC) se encuentra construido en el interior de antiguos cráteres originados por el colapso de edificios volcánicos ancestrales. Esta conformado por ciclos de derrames andesíticos y depósitos de flujos piroclásticos y de caída. El estratovolcán se caracteriza por la generación de corrientes de densidad piroclásticas (CDPs) que alcanzan 15 km del cráter, como los formados en la erupción de 1913 (Saucedo et al., 2010; Macías et al., 2006).

El VFC ocupa un área de 20Km^2 , y un volumen aproximado de 10Km^3 , y tiene un crecimiento registrado a razón de $0.002\text{Km}^3/\text{año}$ (Luhr and Carmichael, 1990a; Luhr and Carmichael, 1990b). Los cambios morfológicos en la cima son ocasionados por ciclos de actividades explosivas y efusivas, por la gran pendiente y por la presencia de material no consolidado. Se observa basculamiento hacia el sur del mismo, el cual ha sido asociado con la falla de Tamazula.

En zonas cercanas al volcán de fuego incluyendo en algunas partes del área de interés, la morfología tiende a cambiar de suave a abrupta con pendientes de entre 20° y 40° , lo que ocasiona una erosión tipo fluvial, más intensa con remoción de masa y barrancos en red.

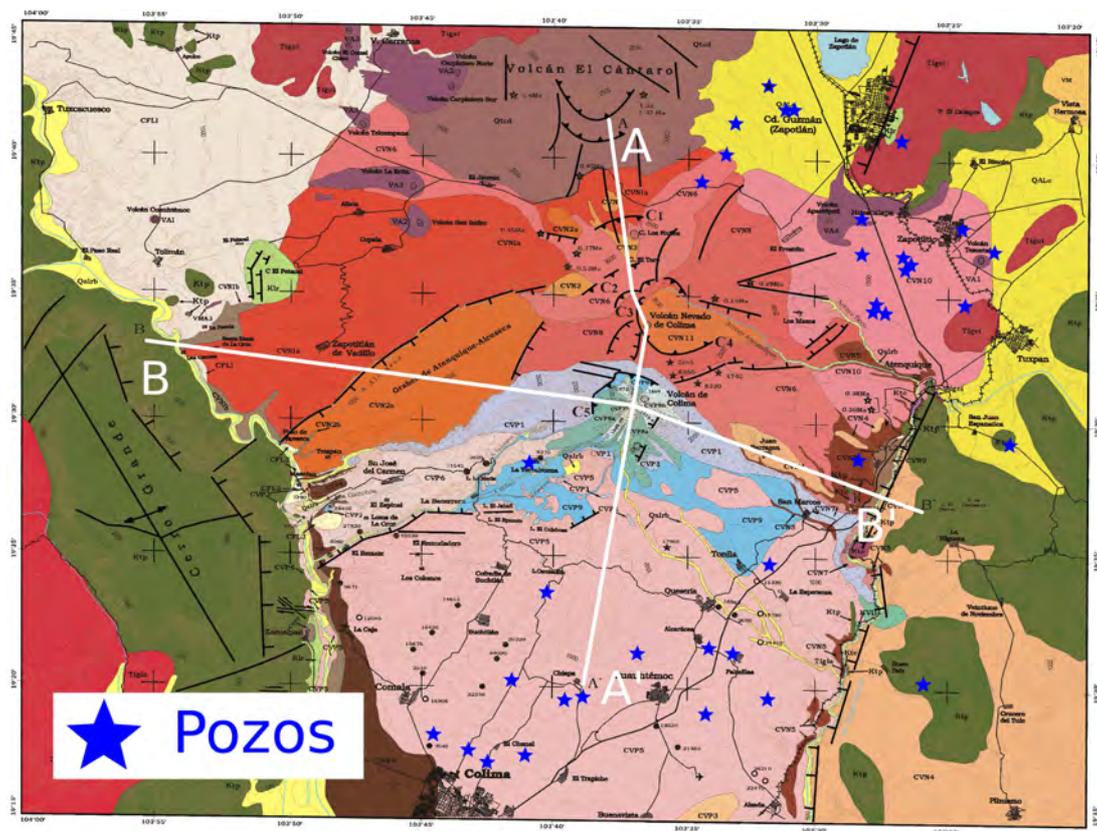


Figura 6: Carta geológica del CVC (Cortés et al., 2005). Muestra la distribución de materiales ubicados en las inmediaciones del Volcán de Fuego de Colima, la orientación de los perfiles geológicos y la localización de los pozos disponibles en la base de datos.

En la Figura 6 se muestra el mapa de unidades geológicas del Complejo Volcánico de Colima. En el se muestran los principales materiales geológicos y la distribución de los sitios con registro. Las unidades en donde se tiene muestras certeras serán descritas en base al movimiento de las manecillas del reloj.

En la parte norte con un azimut de 25° con respecto al Norte a una distancia mayor a 12 km desde el volcán NC se encuentra la unidad **QAle** de color amarillo; identificada como material de caída aérea y epiclástos, y a 8 km en la misma dirección se encuentra la unidad **CVN6** de Rosa claro, identificada como lavas, flujos piroclásticos y material de caída aérea.

En el NE con un azimut de 56° , a una distancia radial de 17 km del NC, se encuentra la unidad **Tigei** de color marrón oscuro; identificada como lavas, flujos piroclásticos y Material de caída aérea, y a una distancia de 13 km con el mismo rumbo se encuentra la unidad **VA4** de color morado; identificado como vulcanismo alcalino.

En la parte Este del área de interés se encuentra la unidad **CVN10** de color rosa; identificado como flujos piroclásticos y material de caída aérea y pasando los 23 km se encuentra la unidad **QAle**, en esta zona existe un área de aproximadamente $2km^2$ de la unidad **Tigei** a una distancia de 20 km y un azimut de 90° .

Con un azimut de 110° y a una distancia de 25 km se registran calizas masivas identificadas con la leyenda **Ktp**. Con un azimut de 120° y a una distancia de 16 km y hasta la falla Normal se ubica la unidad **CVN5** de color cafe; identificada como Fm. Atenquique; lahares, fluviales y fluviolacustres en alternancia con flujos piroclásticos. A los 140° y a unos 27 km se encuentra un área de unidad **Ktp**. A partir de 140° hasta los 210° se tiene a la unidad **CVP5** identificada como avalanchas volcánicas.

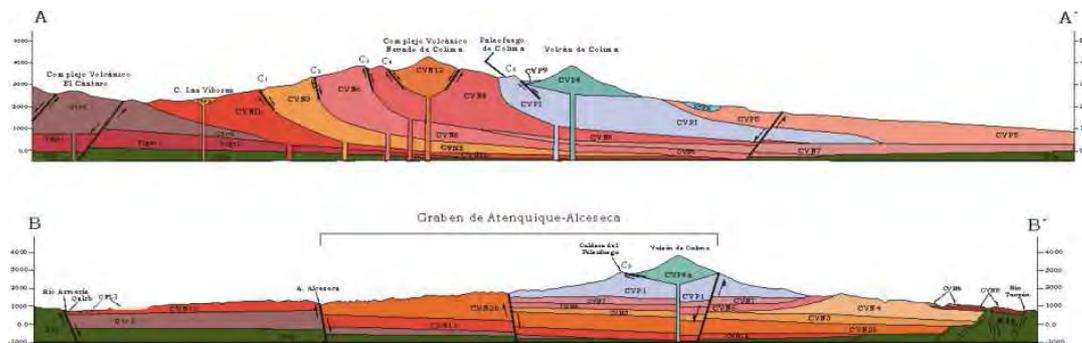


Figura 7: Perfil geológico que muestra la configuración inferida del CVC tomado de Cortés et al., (2005). Dirección de los perfiles revisar Figura 5.

Unidades como **CVN6, Tigei, Ktp, CVP5** son descritas por la secciones de la Figura 6 tomada de Cortés et al., 2005 en donde se espera falla-miemento normal en los contactos entre unidades y con espesores de 600 metros aproximadamente, lo que nos indica que en algunos casos los registros no llegan hasta alguna otra unidad con excepción de los sitios ubicados en menores distancias radiales del centro de los volcanes.

En total en el área de interés se despliegan 5 unidades que se espera sean excluyentes entre sí en los diferentes parámetros físicos:

1. **Lavas**; material ígneo extrusivo de altas temperaturas de composición andesítica y viscosa, de poco alcance debido al enfriamiento rápido, contiene

gases que son liberados dejando buena porosidad.

2. **Depósitos de caída aérea;** Depósitos formados por decantación suspensiva luego de que el material ha sido expulsado explosivamente desde la boca eruptiva en una columna ascendente. Son partículas muy pequeñas transportadas por viento y depositadas por gravedad.
3. **Flujos piroclásticos;** se describen como una nube ardiente de gran temperatura y de gran presión de origen explosivo contiene gases y material detrítico a altas temperaturas que se transporta por gravedad sobre la pendiente del volcán.
4. **Depósitos de Lahares;** Son los depósitos de un flujo esencialmente contemporáneo a la erupción, son producto de remoción por agua y presentan laminación, estratificación, dunas, etc. Se identifican debido al mayor contenido de matriz que de clastos.
5. **Depósitos fluvio-lacustres;** depósitos transportados por agua, sin importar procedencia, a mayor distancia menor tamaño de clasto
6. **Avalanchas;** es el colapso de un sector del edificio o un depósito no consolidado o desgajamiento con estructuras tipo de rompecabezas, con poca matriz y muchos clastos con grandes bloques y pueden no ser de origen ígneo, y en algunos lugares más alejados
7. **Calizas masivas;** se le llama a la roca intermedia entre una caliza microcristalina y una arcilla. Compuesta por cristales microscópicos de CO_3Ca y minerales arcillosos en distinta proporción. Poseen colores muy diversos, aunque generalmente los tonos verdosos y grisáceos-cemento son los más comunes.

La zona de estudio con tiene en su mayor parte material de origen volcánico y los componentes de las rocas denominadas piroclásticas contienen vitroclastos, cristalclastos y litoclastos. El material de la cámara magmática enfriado súbitamente se considera un líquido sobre-enfriado. Un vidrio común son las trizas vítreas (shards) y las pumitas de composición ácida. El vidrio básico o sideromelano es de color oscuro, con un alto índice de refracción con grandes fragmentos vesiculares y bombas, constituye las escorias. El vidrio volcánico es un materia altamente alterable debido a su carácter amorfo. Es un material con elevada entropía a causa de la carencia de estructura cristalina y la distribución desordenada de sus elementos constitutivos. La alteración ocurre tanto en bajas como en altas temperaturas; en altas temperaturas es muy rápida, se conoce como proceso de devitrificación y como resultado se genera un agregado microcristalino, normalmente de composición cuarzo-feldespática. La más común alteración del vidrio a bajas temperaturas conduce a la formación de argilominerales y/o zeolitas. El producto más característico de este fenómeno de alteración del vidrio es la esmectita. En la zona de estudio se cuenta con zonas con material vítreo en donde se puede presentar ambas alteraciones (Teruggi, 1978). Normalmente las rocas volcanoclásticas se clasifican en base al proceso de formación:

- Procesos volcánicos primarios en donde incluyen a los procesos piroclásticos que forman rocas piroclásticas y hialoclastitas, y a procesos autoclásticos que forman autobrechas (en lavas AA y en bloque como en el VFC).

Tabla 1: Características físicas de las unidades geológicas del área de interés. Definición de abreviaturas ϕ 1 y 2*: porosidad primaria y porosidad secundaria, s-cte: semi-constante, N/A: no aplica, DFP: depósitos de flujos piroclásticos, DAV: depósitos de avalanchas volcánicas, DFL: Depósitos fluviales.

Mat. Geo.	ϕ 1 y 2*	Cont. Mineral	Facies	Clasificación
Lavas	Baja Alta*	s-cte SiO_2 65/100, K, Ca Fe, Mg, +Ca, < 10/100 cuarzo Ferromagnesianos Plagioclasa K^+Na^+ Minerales de: feldespatos Magnetita Oxidos	Masiva Grandes angulares bloques	N/A
Depositos de caída	- Muy alta*	SiO_2 (65/100) Feldespatos (Pómez)	De caída	Bien seleccionada. G.N. Homo/heterogeneo
DFP -Densa	Baja Alta*	SiO_2 (60 – 70/100) Feldespatos Ferromagnesianos Ceniza	Matriz fina (mm) Homogeneo Grad. Horiz.	Mal seleccionada
Lahar	Alta Baja*	Bloques (lava) monolitológicos Arcillas	> matriz fina con bloques irregulares, G.H.	Mal seleccionada matriz
DFL Grano fino	Baja Media-baja	Arcillas Líticos	> matriz fina	Bien laminas seleccionada
DFL Grano grueso	Alta variable Alta*	Líticos Arillas	> clastos transporta- dos, G.H.	Selección moderada
DAV -FM	Media-alta Alta*	Matriz Bloques heterolitológicos	> matriz fina arcillas + Oxid. Boleros	Mal seleccionada
DAV -FB	Media-baja Alta*	Bloques heterolitológicos Matriz	> Bloques angulares SiO_2 + Oxid.	N/A
Calizas	Baja, Alta*	$CaCO_3$ Bajo en arcillas*	Masiva	N/A

- Procesos superficiales son los procesos de resedimentación y retrabajo los cuales forman rocas epiclásticas volcánicas.

Los depósitos piroclásticos se transportan ya sea por transporte en pluma, en flujo o debido a procesos secundarios. Los procesos de acumulación de las rocas piroclásticas se generan debido a la depositación de materiales originados por una erupción volcánica con un tipo de fragmentación explosiva.

Los depósitos se clasifican en función del mecanismo de transporte; depósitos de caída piroclástica y depósitos de corrientes piroclásticas (oleadas, surges).

Algunas características de los depósitos de caída son los fragmentos mayores son expulsados balísticamente y se depositan en zonas proximales los cuales comprenden a bloques, bombas y lapillos. La mayor parte del material es transportado por la pluma eruptiva, la movilización es altamente selectiva (por granulometría). Es sabido que los polvos volcánicos pueden desplazarse por miles de kilómetros. El diseño en planta de los depósitos se observa desde un círculo elíptico que depende de la influencia de los vientos. Pueden ser sub-aéreos o sub-ácueos, son controlados

Clasificación de las Rocas Piroclásticas

mm	PIROCLASTO (individuo)	TEFRA (agregado inconsolidado)	PIROCLASTITA (agregado consolidado)	
	BLOQUE BOMBA	CASCAJO PIROCL. AGLOME- RADO PIROCLASTICO	BRECHA PIROCL. AGLOME- RADO PIROCLASTICO	PROPSSETITAS
32	LAPILLO	LAPILLI	LAPILLITA	
2	TRIZA	CENIZA	TOBA	PROPSAMITAS
0,062	PULVÍCULA	POLVO	CHONITA	
				PROPELITAS

Figura 8: Figura de clasificación de rocas piroclásticas modificada de (Mazzoni, 1986)

por la gravedad y se depositan partícula a partícula. Generalmente no consolidados y presentan gradación normal de componentes. Tienen matriz clasto-soportado, las facies están definidas por cambios en la granulometría y el tipo de componentes.

En la Figura 9 se muestra el comportamiento típico del material de caída en donde la dirección preferencia o el eje de dispersión depende de la dirección de los vientos predominantes.

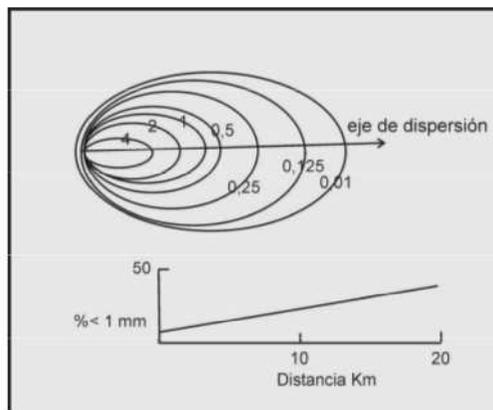


Figura 9: Figura que muestra el esquema de la dispersión del material de caída producto de una actividad explosiva.

Un ejemplo de los tipos de depósitos piroclásticos se muestra en la Figura 10, en donde se esquematiza los depósitos en la topografía. En donde se logra representar el acomodo del material de caída que se coloca conforme a la superficie expuesta en capas estratificadas. Los depósitos surge se asientan de una manera muy similar a los de caída con la variante de que en los valles topográficos o depresiones tienden a aumentar el grosor de la capa. Los flujos por otra parte tienden a desplazarse hasta alguna depresión o valle rellenándolo.

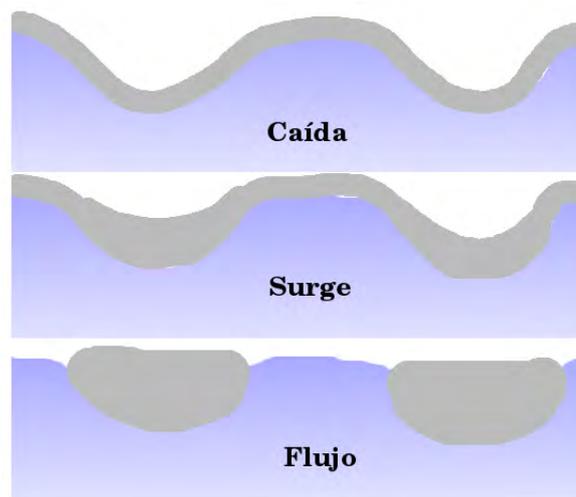


Figura 10: Figura que muestra un esquema comparativo de los distintos depósitos de piroclásticos; D. Caída, D. Surge y D. Flujo.

Los flujos piroclásticos se caracterizan por un mecanismo de alta concentración de materiales piroclásticos dispersados en gas y mantienen una relación inversamente proporcional ($\text{partículas/gas} > 1$), poseen alta fluidez, esta controlado por la gravedad, se considera como una corriente de densidad caliente e incandescente en veces. El mecanismo principal para la generación de un flujo piroclástico es el colapso de una columna eruptiva. También se puede producir por derrames o nubes ardientes o de cenizas, previas o sincrónicas a la generación de la columna eruptiva. Es sabido que llegan hasta los 200km/h y recorren distancias de más de 100 km, dependiendo de la topografía (Cas and Wright, 1987).

Algunas características de los depósitos de los flujos piroclásticos son:

- Se conocen como depósitos ignimbríticos. Presentan una composición preferentemente silícea.
- Los depósitos resultantes son generalmente masivos o pobremente estratificados.
- La granulometría va desde piropsefítica a piropsamítica. Poseen esqueleto quebrantado, selección pobre (desviación standard superior a 2) y no experimentan mayores cambios de textura con la distancia.
- La elevada temperatura (supera los 550o C) hace que con frecuencia se presenten soldados, aunque también hay depósitos no soldados. Los depósitos con soldamiento poseen textura eutaxítica, fiammes y concentrados de obsidiana, así como disyunción columnar hasta estructura en rampa.
- La superposición de depósitos de flujos incandescentes puede generar el desarrollo de unidades de enfriamiento más potentes.

Los flujos inflados (surges) u oleadas piroclásticas, pueden estar relacionadas con los flujos densos, en general proceden o son ulteriores al clímax de actividad de los flujos densos y son típicos depósitos de las explosiones hidromagnéticas. El material viaja en estado altamente fluido, favorecido por la presencia agua y vapor

de agua que aumentan la velocidad entre los 100 y los 200 km/h. Los depósitos surge o también denominados hialoclástos son característicamente no soldados y con una buena selección. Las estructuras sedimentarias primarias reflejan el muy alto régimen de los flujos (estructuras monticulares y capas planas), así como presentan depositación súbita de los materiales (estructuras de escape de fluidos en platos).

Algunas características de los depósitos de surges piroclásticas o flujos piroclásticos diluidos son:

- Cubren la topografía con forma de manto, pero tienden a acumularse en depresiones con mayor espesor.
- Formas de capa unidireccionales: 1. Estratificación entrecruzada de bajo ángulo 2. Dunas 3. Dunas escalantes 4. Chute and pool
- Presencia de conductos de desgasificación
- Enriquecidos en cristales y líticos
- Las láminas se encuentran bien ordenadas

Algunas diferencias entre los flujos piroclásticos y los surges se ilustran en la Figura 11. En donde se logra apreciar como el mecanismo de surge obtiene mayor velocidad con forme aumenta la altura sobre la base caso contrario a lo que ocurre con el flujo que la velocidad mayor la alcanza en la parte mas cercana a la base. En cambio la densidad el aumento de densidad ocurre de manera gradual reflejada en una curva que disminuye con forme se acerca a la altura base, en cambio la densidad del flujo es un tanto constante hasta que sobre pasa $1kg/m^3$ (Wilson et al., 2000).

Las rocas volcaniclásticas secundarias, epiclásticas volcanigénicas, retrabajadas y resedimentadas son producto de la depositación de materiales originados por la resedimentación o el retrabajo (fragmentación por meteorización) de depositos y/o materiales piroclásticos primarios. Los depósitos epiclásticos relacionados a cuencas sin o con poca actividad volcánica, los depósitos volcaniclásticos secundarios son generalmente transportados por flujos gravitacionales de sedimentos, corrientes ácuas o por el viento.

Existe una estrecha vinculación entre las rocas piroclásticas primarias, tanto formadas por procesos de caída como de flujo piroclástico, con las rocas piroclásticas secundarias. En los ambientes volcánicos es muy característica la asociación entre depósitos secundarios y depósitos de flujos piroclásticos. El retrabajo puede producirse en amplia gama de agentes de transporte como corrientes de agua y flujos gravitacionales de sedientos que poseen alta viscosidad que alcanzan hasta 200km/h y llegan a trasportarse hasta 40 km del origen.

En la Figura 12 se muestra un mapa representativo de los depósitos de los productos volcánicos. Los modelos de facies están relacionados con el tipo de ambiente volcánico y la proximidad o lejanía del centro efusivo. En las zonas proximales las facies volcaniclásticas están vinculadas directamente a los aparatos volcánicos. Aparecen asociaciones constituidas por depósitos de flujo piroclástico, de caídas proximales (depósitos de eyectos), y lahares y avalanchas. En zonas distales los modelos de facies pueden ser de ambientes sedimentarios clásicos (fluviales, lacustres, etc.) pero con particularidades debidas a la influencia del vulcanismo. Como

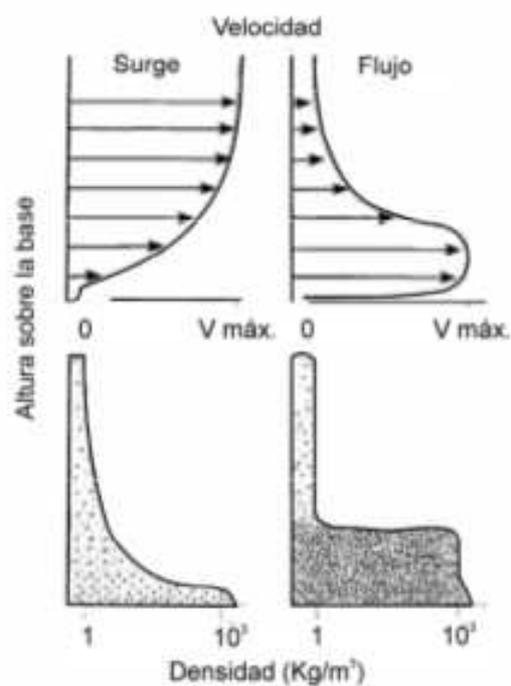


Figura 11: Figura que muestra un esquema con la relación que diferencia a los flujos piroclásticos de los surges en terminos de velocidad y de densidad (kg/m^3). Tomada de Wilson y Houghton (2000).

en un ambiente fluvial el vulcanismo puede modificar el patrón de canales o la tasa de gradación de la planicie de inundación.

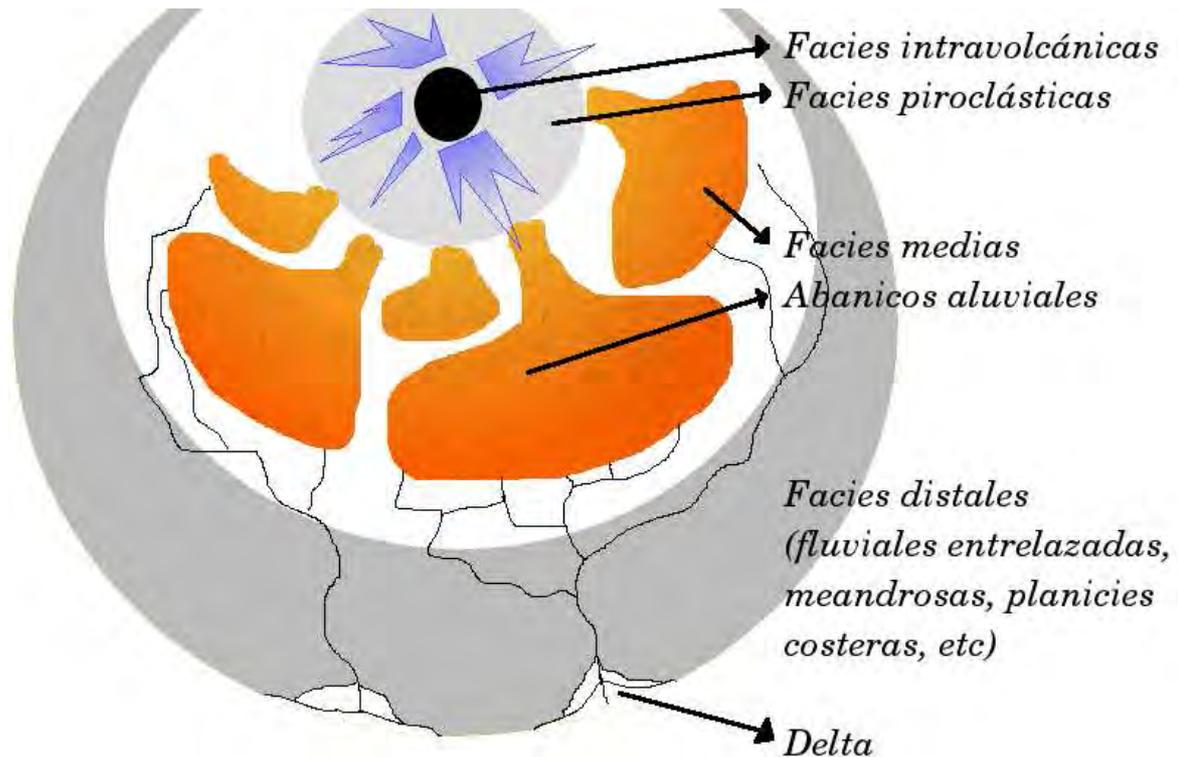


Figura 12: Mapa representativo de las ubicaciones de los productos volcánicos secundarios.

Filtrado de señales digitales

Debido a que posteriormente en la metodología se utiliza la técnica matemática de filtrado de señales digitales mediante filtros diseñados en el espacio de las frecuencias aplicados por medio de una convolución a los datos de los parámetros gamma, sp , de resistividad y de resistencia puntual. A continuación se describen los fundamentos de la teoría matemática de filtrado de señales digitales aplicada al conjunto de datos.

Una convolución es una operación matemática que combina al menos dos señales en una señal resultante. Es una operación matemática que define el cambio de forma de una onda que pasa a través de un filtro (Kanasewich, 1981). Como una operación de adición o multiplicación solo que esta es un poco más complicada. La convolución es utilizada tanto en series continuas como en series discretas. Una convolución generalmente se asocia a un impulso de respuesta, para un sistema lineal se obtiene una respuesta de tipo:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n - k]$$

En donde $x[n]$ es la señal de entrada, $h[n]$ es el impulso de respuesta, y $y[n]$ es la salida, y se denota la convolución por el símbolo $*$. Note que se multiplican los términos de $x[k]$ por los términos de un tiempo desplazado y se suman (Uki, 2007).

Adicionalmente para comprender mejor el concepto de la convolución debemos conocer el concepto de descomposición de señales. Una señal de entrada se compone

de la adhesión de componentes simples y la respuesta del sistema de la señal de entrada resulta en la salida mediante la salida de estos componentes en el sistema. En general, una señal se puede descomponer como una suma ponderada de señales de base. Por ejemplo, en la serie de Fourier, cualquier señal periódica (incluso señal de pulso rectangular) puede ser representada por una suma de funciones seno y coseno. Pero aquí, utilizamos funciones de impulso (delta) para las señales de base, en lugar de seno y coseno.

A continuación se muestra un ejemplo de la representación matemática de la composición de una señal:

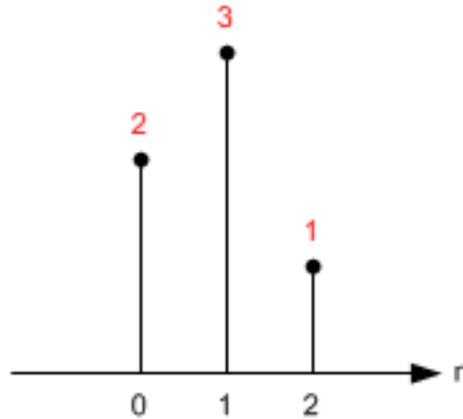


Figura 13: Ejemplo de una señal compuesta por funciones de impulsos

$$x[0] = x[0]\delta[n] = 2\delta[n - 0]$$

$$x[1] = x[1]\delta[n - 1] = 3\delta[n - 1]$$

$$x[2] = x[2]\delta[n - 2] = 1\delta[n - 2]$$

$$x[n] = x[0]\delta[n - 0] + x[1]\delta[n - 1] + x[2]\delta[n - 2]$$

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]\delta[n - k]$$

La transformada de Fourier juega un rol clave en el procesamiento de señales. Actualmente podemos categorizar las señales que encontramos en el procesamiento de señales como en continuas y discretas que a su vez pueden ser periódicas o no periódicas. La transformada de Fourier de una señal $f(t)$ se define como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

En donde, j es un operador complejo definido como $j = \sqrt{-1}$.

Para todos los tipos de secuencias de tiempo o variables discretas la versión de la transformada de Fourier se denomina Transformación Discreta de Fourier (DTFT por sus siglas en inglés). La Transformada Rápida de Fourier (FFT, en inglés) es una manera de calcular la transformadas de Fourier a series discretas en un lapso más corto de tiempo y optimizando recursos. En 1960 se comenzó con el concepto

de FFT por medio de Cooley y Tukey en donde los resultados finales entre la FT y la FFT aplicadas en series discretas eran los mismos.

Algoritmos FFT se basan en el principio fundamental de descomponer el cálculo de la transformada discreta de Fourier de una secuencia de longitud N en transformadas de Fourier discretas sucesivamente más pequeñas. Un N -punto DFT requiere N^2 multiplicaciones complejas y $N(N - 1)$ adiciones complejas en comparación con una FFT de N puntos, donde el cálculo es proporcional a $N \log N$. Por lo tanto, es mucho más rápido. Para encontrar información más detallada revisar referencias (Ramirez, 1985).

La operación DFT se basa en una secuencia periódica, es un cálculo de una secuencia en el dominio del tiempo de N puntos ocupa la secuencia como una serie infinitamente larga con N periodos. Matemáticamente, cuando se desplaza una secuencia periódica izquierda o derecha, un cierto número de muestras, una envoltura alrededor se produce en cada período de la secuencia. A esto se llama un desplazamiento circular o rotación de la secuencia en el intervalo.

Todo el procesamiento de señal digital llega a la filtración digital. Existen en general dos tipos de filtros digitales. Los que tienen impulsos de respuesta sobre un rango infinito, llamados Infinite Impulse Response (IIR). En contra de los filtros que tienen Impulsos de Respuesta sobre intervalo Finito o Finite impulse response (FIR). Los filtros IIR también se llaman filtros auto-regresivos (AR) o filtros auto-regresivos moving average (ARMA). Los filtros FIR, en comparación también se llaman filtros todo cero (all-zero) o no recursivo (non-recursive) o también filtros promedio en movimiento (moving average filters) (Duhamel and Vetterli, 1990).

Existe gran variedad de categorías para los filtros (Figura 14) pero las más usuales son; 1) filtro pasa bajas (Lowpass): Deja pasar las señales con frecuencias bajas y detiene las señales con frecuencias altas, 2) filtro pasa altas (Highpass): Deja pasar las señales con frecuencias altas y detiene las señales con frecuencias bajas, 3) filtro pasa bandas (Bandpass): Deja pasar las frecuencias contenidas en una banda específica y detiene todas las demás, 4) filtro pasa bandas (Bandstop): Hace lo contrario que el filtro pasa bandas, detiene a las frecuencias contenidas en una banda específica y deja pasar a todas las demás.

La Figura 15 muestra un ejemplo teórico sobre el filtraje convolutivo por medio de la FFT aplicado a dos señales periódicas con 2 frecuencias. La señal uno con frecuencia de 1Hz y la señal dos con 20 Hz que al juntarlas o añadirlas nos dan la señal 3 compuesta de ambas. Se muestra también un gráfico en el espacio de las frecuencias para la señal 3, en donde se grafica la magnitud calculada por la fórmula $mod = \sqrt{Re^2 + Im^2}$. En donde se distingue una bimodalidad ubicada en los valores pertenecientes a las 2 frecuencias contenidas en la señal tres. Se muestra el filtro de identidad característica intrínseca de la "convolución" que al multiplicarse por cualquier otra señal de la misma longitud se tiene como resultado la misma señal por la cual se multiplico. Se muestra también un filtro pasa bandas en donde pasa la banda ubicada en los 20 Hz y detiene todo lo demás, de manera que al hacer la convolución con la señal tres como resultado se obtiene la señal 1.

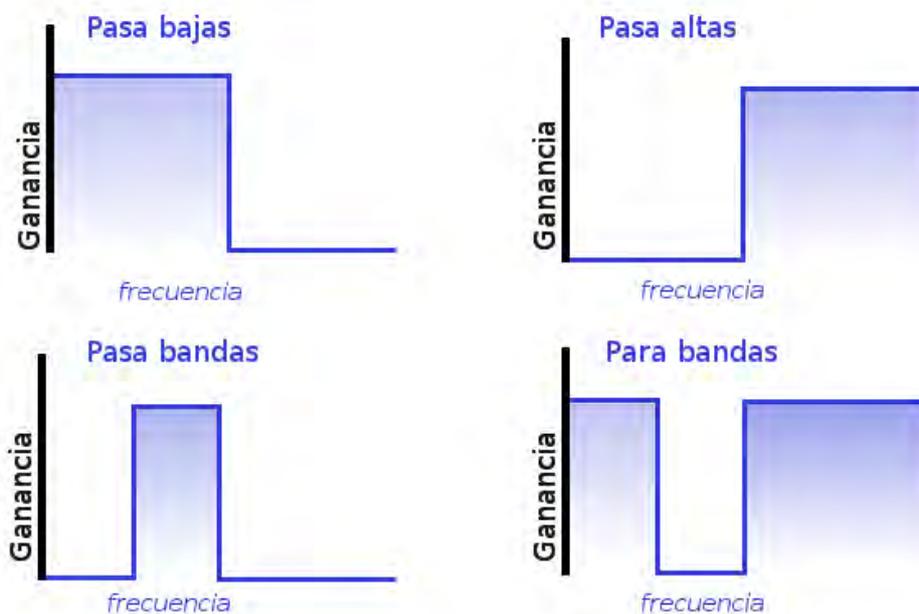


Figura 14: Clasificación de filtros ideales

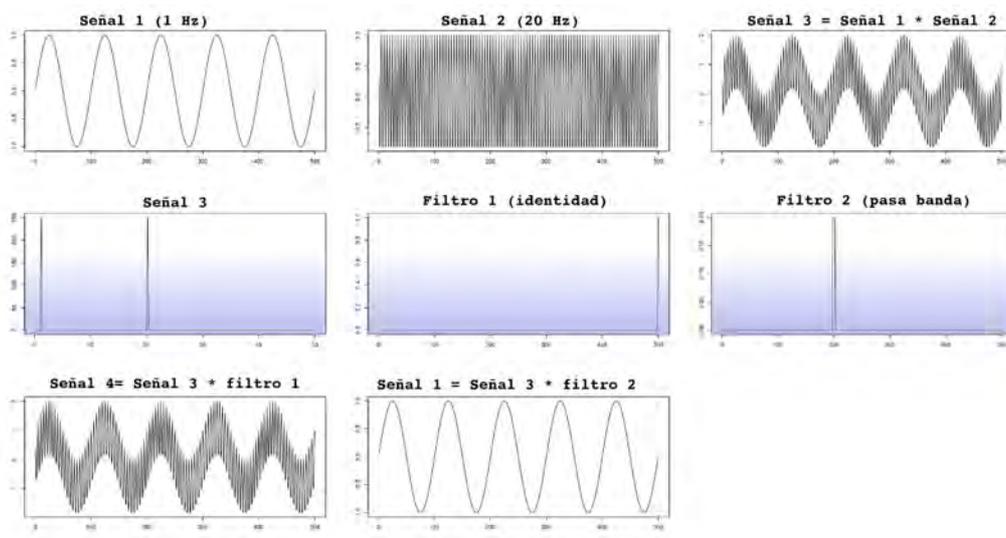


Figura 15: Ejemplo teórico de filtrado de señales.

Metodología

Para la culminación del presente estudio se propone una metodología la cual consta de un esquema de trabajo dividido en cuatro módulos o etapas; 1) análisis previo, 2) preprocesamiento, 3) procesamiento y 4) interpretación. Aunque la finalidad de la propuesta metodológica no implica un modelado geológico como tal, la metodología esta diseñada para ser implementada en cualquier área en donde se requiera procesamiento y visualización geofísica de datos puntuales tomados de manera seriada con la finalidad servir como esqueleto de la modelación geofísica en 2D y 3D. A continuación muestra un esquema que representa la secuencia de la metodología y se describe a detalle cada una de las etapas propuestas en la metodología.

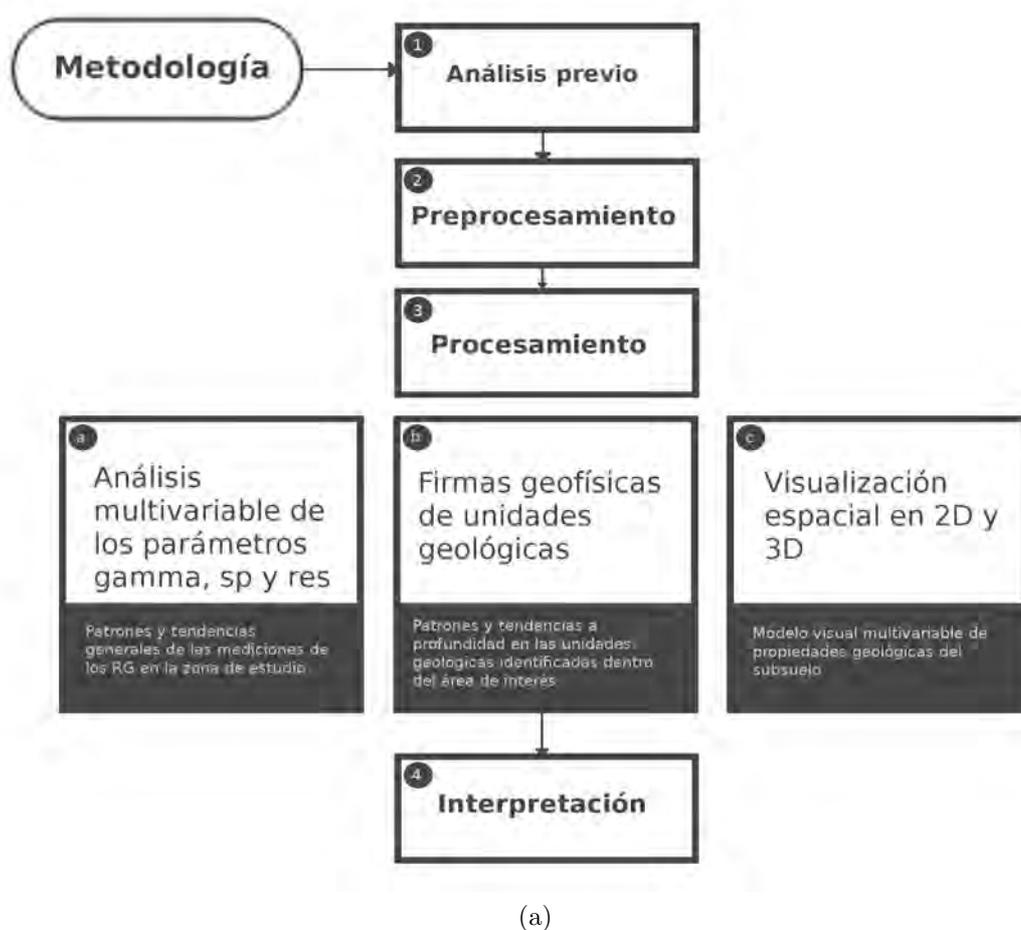


Figura 16: Esquema de representación para la metodología seguida.

Análisis previo

En el análisis previo se plantea como objetivo: 1) conocer integralmente la información con la que se cuenta con el fin de poder manipularla adecuadamente, 2) comprender el proceso de medición junto con todos los factores e implicaciones que pueden llegar a influir en los datos y 3) se conocen las herramientas tecnológicas o software, disponibles para la adecuación, manipulación, tratamiento, almacenamiento y visualización de la información en forma digital.

Información disponible

Para el presente estudio se cuenta con un conjunto de registros de pozos facilitados por *CICLOS-GIP*², una empresa que se encarga de proyectos de geología e ingeniería, entre otras cosas corre registros geofísicos de pozos en la mayor parte del territorio mexicano. Para la toma de datos se utilizaron los equipos de medición de la marca *Century Geophysical Corporation*, identificados como *9144 - Multi-Parameter E-Log Tool*, y *9074 - Three Arm Caliper Logging Tool* las cuales se muestran en la Figura 17(a).

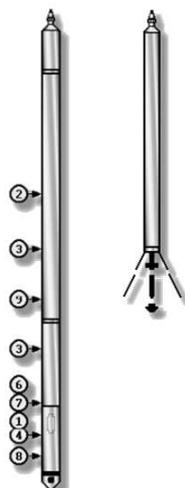
La mayor parte de los pozos se localizan en una planicie a nivel de valle en la parte SE cuyas cotas van desde 609 hasta 1773 msnm. Al rededor de seis se encuentran más cercanos a los edificios volcánicos y alcanzan a llegar al pie de monte del Nevado hacia el NE y del VFC hacia el Sur-Oeste con cotas de 1957 y 1500 msnm respectivamente. Algunos pozos ubicados hacia el lado Este se acercan al valle aluvial y a estructuras conocidas como Hummocks o lomerios (Garduño-Monroy et al., 1998; Lugo Hubp et al., 1993).

Levantamiento de información

El procedimiento empleado inicia una vez que la herramienta de perforación haya concluido el barreno, es cuando se comienza con la instalación de el equipo en cercanías del pozo a medir. Se posiciona y conecta el generador de corriente, se fija el sensor al cable que lo sostiene para después con ayuda de la estructura de la perforación centrar el sensor en el pozo.

Una vez centrado y a nivel de suelo, comienza el registro llamado en ingles "Down", que graba la respuesta medida en intervalos de 0.1 ó 0.025 metros mientras desciende. Cuando llega a la profundidad acordada en base a la perforación del pozo, se comienza con la medición del registro llamado "Up", que se toma con los mismos intervalos y la diferencia es que registra la información mientras la sonda se desplaza hacia arriba. Esta doble toma de registros sirve para corroborar las mediciones levantadas.

²Para obtener mayor información acerca de la empresa CiclosGIP visita <http://ciclogip.com>



(a) Herramientas wirelines 9144 y 9074.



(b) Toma de registros, imagen CiclosGIP

Figura 17: Imagenes que muestran el equipo de medición y el procedimiento utilizado por la empresa Ciclos GIP para el levantamiento de información

Existe un tercer registro llamado Caliper el cual se corre de manera similar a los anteriores, sin embargo puesto a que los registros geofísicos son a solicitud y bajo contrato privado, algunos pozos no corren los registros de Caliper o incluso algunos sólo existe información en un rango de profundidad del pozo, hecho que aplica incluso en los demás parámetros todo esta sujeto al interés del contratante. Por lo que en este caso sólo el pozo llamado "Canoas 2" con folio "f38", cuenta registro de Caliper adicional a los registros *Down*, *Up*.

Formato de archivos

Cuando finalmente el sensor sale por completo de pozo termina el registro, se limpian los aparatos y se almacenan. Las mediciones de los registros down, up y caliper de las diferentes unidades geológicas del subsuelo se almacenan como una serie finita y discreta, esto es con un mismo intervalo de desplazamiento y se exporta a un archivo con extensión *LAS (Log ASCII Standard)*. Los archivos LAS son de uso estándar en la industria petrolera y de gas ya que pueden contener información para un solo pozo y puede contener cualquier número de parámetros adicionales en un solo archivo.

Matemáticamente la información por cada columna de los archivos LAS se describe como una serie de la forma:

$$X(t) = (X(t_1), \dots, X(t_p))$$

Una secuencia de observaciones usualmente ordenada en el tiempo pero en este caso se orienta con respecto a la profundidad del pozo:

$$X(d) = (X(d_1), \dots, X(d_p))$$

Existe un termino DPS comúnmente identificados como señales discretas de tiempo (Discrete-Time Signals) lo que significa que es una señal que no es continua en el tiempo, sin embargo se compone de puntos discretos usualmente en intervalos iguales. Las señales registradas por los parámetros medidos se componen de varias señales generadas a su vez por diferentes materiales del subsuelo como si fueran ingredientes de la señal final registrada por el sensor (Giri, 2003; Uki, 2007)

En la Figura 18 se muestra un juego de datos de un pozo tomado aleatoriamente para este propósito, cada gráfico representa un parámetro monitoreado en los registros geofísicos son:

Gamma; gamma natural, Res(Fl); resistividad del fluido, SP; potencial espontáneo, Temp; temperatura, Del Temp; incremento de la temperatura, RES; resistividad puntual, Cond; conductividad del fluido, Caliper; diámetro del agujero, Res(16); resistividad a 16 pulgadas, Res(64); resistividad a 64" y Lat; resistividad medida lateralmente.

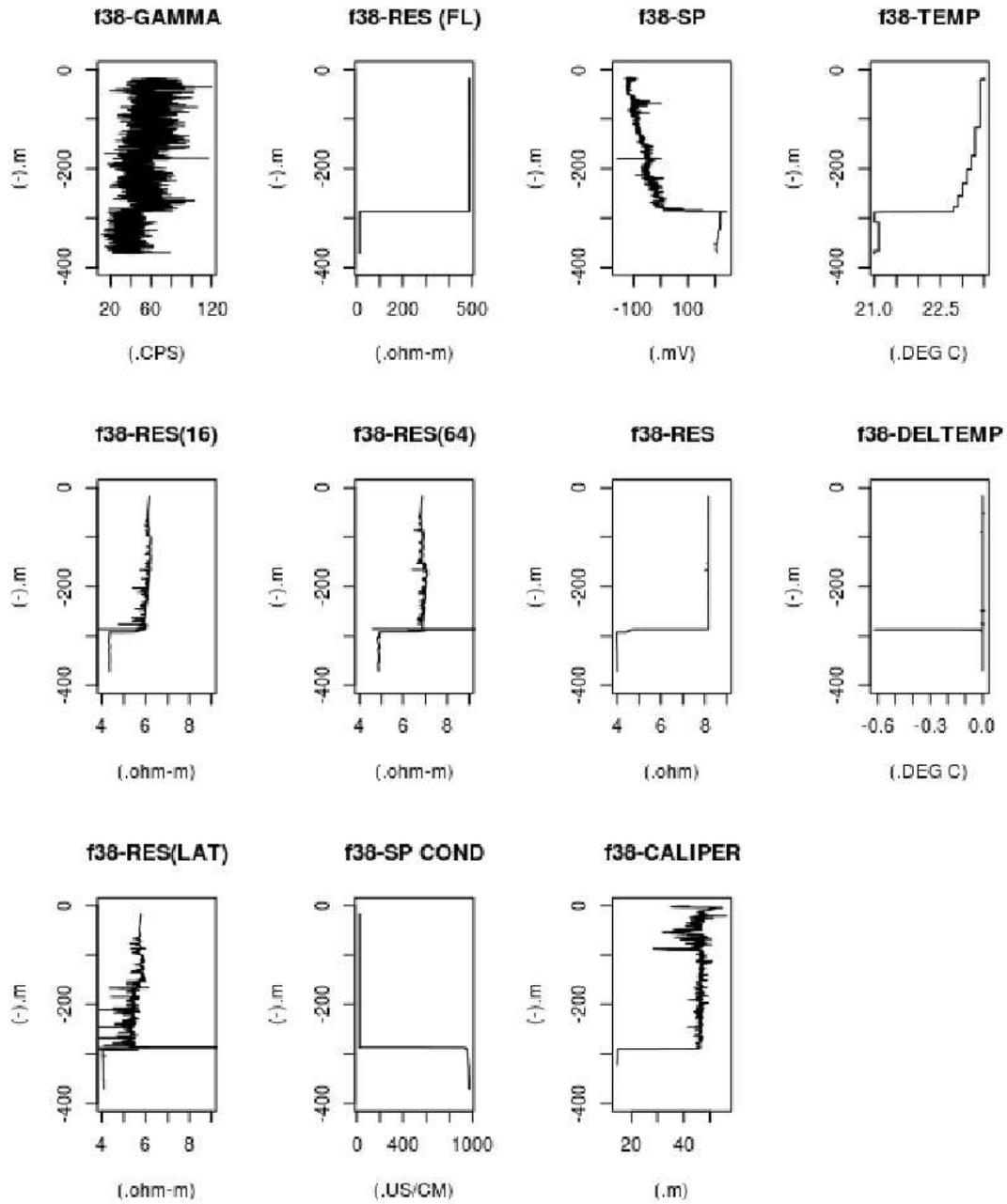


Figura 18: Parámetros medidos por las herramientas wirelines 9144 y 9074 (Figura 17(a)).

Herramientas FOSS

El uso de software libre como herramientas para el almacenamiento, el procesado numérico y la visualización de información espacial juegan un papel trascendental en la mayor parte de este proyecto debido a la constante iteración necesaria para el análisis (Raggi et al., 2010). Actualmente existen infinidad de ejemplos que muestran la aplicación de herramientas FOSS en software desarrollado (in-house) en EUA con un 43% y en la Union Europea con el 29%, en gran parte a la adaptabilidad, premisas y libertades que otorga a los usuarios y desarrolladores. Reduciendo en costo de software especializado (Ebart, 2008). A continuación se describen las herramientas que utilizaron con algunas características y requerimientos del sistema.

Se utiliza un sistema operativo basado en *GNU/Linux* con la distribución gráfica Unity de Ubuntu 14.04. sistema operativo desarrollado por la empresa Canonical Ltd. y Fundación Ubuntu, que utiliza un núcleo o kernel Linux. Para los usuarios nuevos en *SO UNIX* existe un termino shell que hace referencia a una interfase de interacción sistema-usuario, es un interpretador que nos comunica con la computadora. En este sentido shell solo es un programa aparte que encapsula el sistema y como tal, hay gran variedad a elegir (Newham and Rosenblatt, 2005; Johnson, 2009).

En este documento se usa *Bash (Bourne Again Shell)* el standard shell de GNU 4.3.11. Una shell de usos generales y con gran variedad de características que la hacen fácil para trabajar. Las herramientas Sed y Awk pueden llegar a ser muy eficientes para los usuarios, programadores y administradores debido a la facilidad para acceder a archivos estructurados de texto mediante la edición por número de filas. El lenguaje Sed es llamado así por sus siglas en ingles stream editor o de editor de texto y el Awk se debe a sus desarrolladores, Aho, Weinberger y Kernighan. Su aplicación perfecta esta en la edición de series por numero de filas y por numero de columnas. Aunque también permite la aplicación de técnicas para la estructuración de datos básica, con una sencilla sintaxis ya sea que se utilicen los datos como cadenas o matrices de información (Dougherty and Robbins, 1997).

Almacenamiento

Para el almacenamiento de toda la información, de los informes y de las coordenadas se utiliza *PostgreSQL Database Management System*³ un poderoso y fiable sistema de base de datos objeto-relacional, el cual se puede ejecutar en todos los sistemas operativos incluyendo Linux y UNIX en todas sus variantes y para Windows de 32 y 64 bits.

Cuenta con un buen funcionamiento manejando grandes cantidades de datos y con gran cantidad de usuarios que accediendo a la vez al sistema. Es compatible con el almacenamiento de grandes objetos binarios, incluyendo imágenes, sonidos, o de vídeo aunados a los objetos comunes como los enteros, booleanos, texto, etc.

³Para obtener mayor información acerca del proyecto PostgreSQL visita <http://www.postgresql.org/>

Tabla 2: Límites característicos PostgreSQL

Limite	Valor
Tamaño Máximo de la base de datos	Ilimitado
Tamaño Máximo de la tabla	32 TB
Tamaño Máximo de fila	1.6 GB
Tamaño Máximo de Campo	1 GB
Filas Máximas por tabla	Ilimitado
Columnas Máximas por tabla	250-1600 * tipo de columna

Cuenta con una gran la documentación disponible para todos los usuarios (Group, 2014).

Cuenta con una amplia gama de objetos diseñados específicamente para las diferentes necesidades de los usuarios. Funciona mediante el estandar SQL lo cual lo hace compatible con gran variedad de software. En la tabla 2 se mencionan algunas de las limitaciones generales de PostgreSQL.

Procesamiento

Para el procesado numérico-estadístico de la información geofísicas de las formaciones se utiliza *The R Project for Statistical Computing*⁴ un lenguaje y entorno de computacional gráficos estadísticos. Se encuentra disponible en términos de Free Software Foundation's GNU General Public License y puede ser compilado en Linux, UNIX y Windows.

R es un conjunto integrado de servicios de software para la manipulación de datos, cálculo y representación gráfica. Es un sistema planificado y coherente, en lugar de una acumulación gradual de herramientas muy específicas e inflexibles, como es frecuente con otros software para análisis de datos. Uno de los puntos fuertes de **R** es la facilidad con la que gráficas con calidad de publicación bien diseñados pueden ser producidos, incluyendo símbolos y fórmulas matemáticas cuando sea necesario, manteniendo todo siempre bajo control.

R-project se caracteriza por un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo. Ofrece gran variedad de técnicas estadísticas, análisis de series de tiempo lineal y no lineal, modelado, pruebas estadísticas clásicas, clasificaciones y agrupaciones (Jackman, 2003).

Brinda la posibilidad de crear funciones a conveniencia del usuario. Hereda la orientación a objetos de S y cuenta con una política de *lexical scoping* que se da a la tarea de extender **R**. Por lo que se puede integrar con distintas bases de datos y mediante bibliotecas o paqueterías que facilitan su utilización desde lenguajes de programación como Perl y Python.

Los usuarios avanzados pueden escribir código C para manipular directamente objetos R, incluso para tareas que requieren muchos recursos computacionales, C, C ++ y Fortran pueden vincularse.

Se utilizó el paquete **RPostgreSQL** para la creación de la conexión a la base de datos en PostgreSQL mediante una solicitud en lenguaje sql. De tal manera

⁴Para obtener mayor información acerca del proyecto R visita <https://www.r-project.org/>

que se tiene acceso a todos los datos almacenados en la base de datos para poder analizarlos, desplegarlos incluso te ofrece opciones para re-escribirlos dentro de la base de datos o para almacenarlos directamente en R como objetos.

Visualización espacial

Para el despliegue de información espacial se decidió utilizar *Geographic Resources Analysis Support System* ⁵, un sistema de información geográfica (SIG o GIS *en inglés*). Un SIG para la gestión de datos geoespaciales y análisis, procesamiento de imágenes, gráficos y producción de mapas, modelado espacial y visualización 3D.

GRASS GIS se puede utilizar como una aplicación independiente o como backend para otros paquetes de software como **QGIS** y **R** para hacer geoestadística. Es miembro fundador de la Fundación Geoespacial de Código Abierto (OSGeo). La fuerza y el éxito de GRASS GIS se basa en la comunidad de usuarios animados a desarrollar nuevas herramientas y aplicaciones.

Grass al estar diseñado para trabajar con grandes cantidades de información por lo que cuenta con poderosos drivers o manejadores de bases de datos como PostgreSQL que permiten modificar, consultar incluso insertar algún archivo vectorial o raster en la base de datos (GRASS Development Team, 2015).

Modelación geofísica en 3D

Para esta última etapa de modelación de la información geofísica superficial del área de interés se utilizó **Blender** en donde se exportaron los archivos en formato de imagen georeferenciada para la representación de subsuelo en 3D.

Blender es una suite libre y abierta para creación en 3D, animación, simulación, renderizado y seguimiento de movimiento, incluso la edición de vídeo y creación de juego. Algunos usuarios avanzados emplean API Blender para Python scripting personalizando la aplicación.

Es software liberado bajo la licencia GNU General Public License (GPL), la cual permite el uso para cualquier propósito, para uso, distribución y modificación. Creado por The Blender Foundation, con funcionalidad multiplataforma (Linux, Windows y Macintosh). Su interfaz utiliza OpenGL para proporcionar una experiencia coherente. Para confirmar la compatibilidad específica, la lista de las plataformas compatibles indica los evaluados regularmente por el equipo de desarrollo ⁶.

⁵Para obtener mayor información acerca de GRASS GIS visita <https://grass.osgeo.org/>

⁶Para obtener mayor información acerca de Blender visita <https://www.blender.org/>

Preprocesamiento

La etapa del preprocesamiento tiene como finalidad preparar y seleccionar las herramientas libres que permita acceder a archivos estandarizados en *log ASCII*, al mismo tiempo depurar y estructurar grandes volúmenes de datos, almacenarlos y desplegarlos visualmente de manera serial. La finalidad serial hace referencia al procesado de datos de una manera más eficiente en donde se pueda trabajar con todas las mediciones hechas en un pozo o por todas las mediciones hechas en pozos de un área determinada.

Este procedimiento se dividió en dos etapas; la primera primera etapa comienza cuando se obtiene el compilado de las localizaciones *KML* de los sitios en donde se encuentran los pozos que tienen registros. La segunda etapa inicia una vez que se tiene la base de datos de la información bruta o datos duros pertenecientes a los RGP seleccionados con anterioridad en la primera etapa.

A continuación se describen a mayor detalle las etapas seguidas en el preprocesamiento;

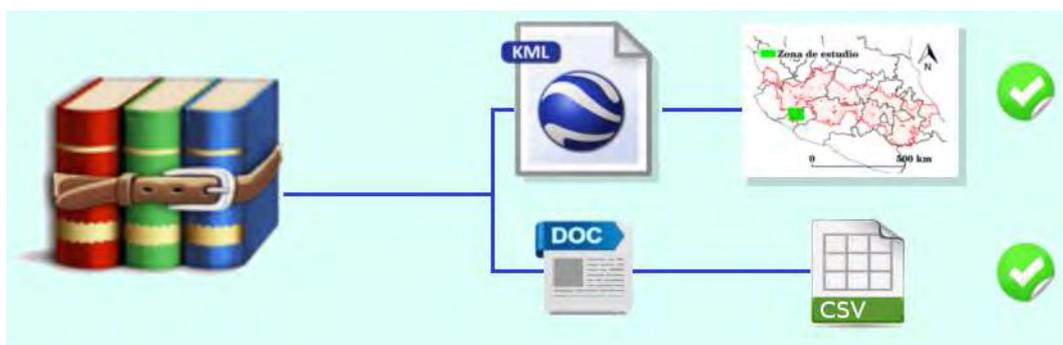


Figura 19: Esquema de representación para la primera etapa del preprocesamiento.

Esta etapa inicia una vez que se compartió el acceso al condensado de información referente a los registros de pozos de los estados de Colima y Jalisco. La base de datos consta de dos grandes bloques de datos; por un lado se tienen todos los archivos de los reportes generales de la toma de registros y un archivo de formato *KMZ* con las coordenadas de los pozos.

Se comienza el preprocesamiento importando los archivos *KML* y los archivos vectoriales de los límites estatales, municipales y el raster del modelo digital del terreno (CEM 3.0) descargados de los servidores de INEGI en el sistema de información geográfica GRASS.

Con la zona de estudio ya delimitada en las cercanías del VFC se realizó una consulta espacial seleccionando todos los pozos que se encontrarán dentro de un radio aproximado de 38 km.

Con los datos de los nombres y las coordenadas se manejaron en un formato de tabla *CSV*. Un formato muy simple y estructurado como una especie de arreglo en donde cada coma es un separador de cada columna y la principal ventaja es que puede ser reconocido en la mayor parte de software libres y de paga.

Una vez teniendo los nombres de los pozos que se encuentran en el área de estudio se completa la tabla con la finalidad de mandar un buen compilado de información

que sea relevante y que ayude a identificar más fácilmente a cada registro de interés para el proyecto. Se realizaron scripts con rutinas de búsquedas de texto en los archivos de los informes mediante comandos de bash *sed* y *awk* para obtener información adicional referente a cada informe. Por ejemplo; la fecha de levantamiento del registro, el nombre del estado, municipio, localidad o poblado del pozo, incluso el nombre de la empresa que elaboró el contrato, debido a la falta de orden y estructuración de la base de datos.

En el tiempo de espera de la información y aún en esta segunda etapa anterior al procesamiento se preparan las herramientas de trabajo con la finalidad de que se encuentren listas y disponibles para trabajar en ellas en cualquier momento del proyecto.

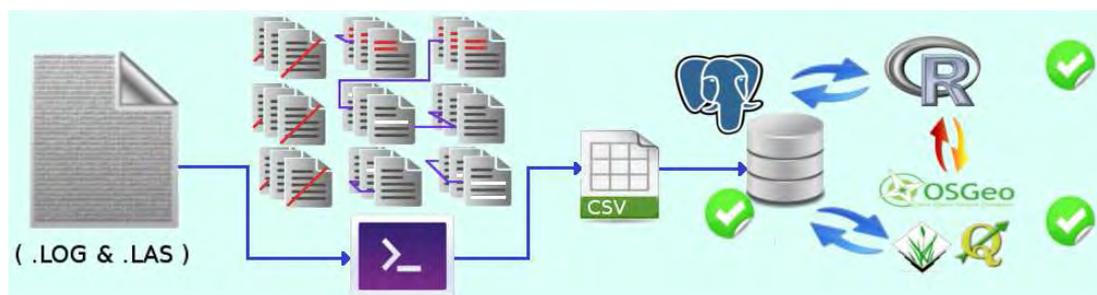


Figura 20: Esquema de representación para la segunda etapa del preprocesamiento.

Una vez que la información llega lo primero que se hace es un breve reconocimiento de la información disponible, se identifica cada pozo con su respecto al compilado solicitado. Se ubica espacialmente y se eliminan los pozos de los cuales no llegó información, se estructuran los archivos LAS para su inserción en la base de datos.

Con ayuda de *sed* y *awk* se depura, ordena y clasifica la información de los archivos LAS, se adecua para evitar errores con los valores nulos o errores de medición y se cambió a un formato más amigable para los programas utilizados, en este caso se decidió usar CSV.

Se diseñó el diagrama de clases referente a la base de datos (Figura 21) en el manejador de bases de datos *PostgreSQL*. La base de datos consta de cuatro tablas en total, tres tablas relacionadas a un informe. La primera tabla en la parte superior se llama "logs", es en donde se almacenan todos los parámetros medidos por las sondas. La tabla logs que contiene una columna llamada "folio" con la única función de identificar el informe al cual pertenece esa información. La BD tiene otras 2 tablas relacionadas a la tabla principal "inform", una llamada "well" viene con el nombre del pozo y el identificador del mismo, y la otra tabla es la que contiene la parte espacial, el país, la ciudad, el municipio, las coordenadas (X,Y) junto con un espacio para calcular la altitud del pozo debido a la gran relevancia con el estudio. Los tamaños de los campos no han sido identificados debido a la adaptabilidad del manejador de base de datos que optimiza recursos asignado tamaños de pequeñas magnitudes dependiendo del tipo de objeto asignado en el campo.

Cuando la BD ha sido creada, probada y se encuentre en funcionamiento se elaboraron algunos scripts SQL de inserción los cuales mediante sentencias y comandos que hacen referencia a los archivos CSV previamente creados, distribuyendo y acomodando la información en tablas de clases dentro del manejador de bases de datos.

Cuando se tiene la BD llena de toda la información se pueden realizar la conexión desde GRASS hacia PostgreSQL, ingresando información referente al nombre de la

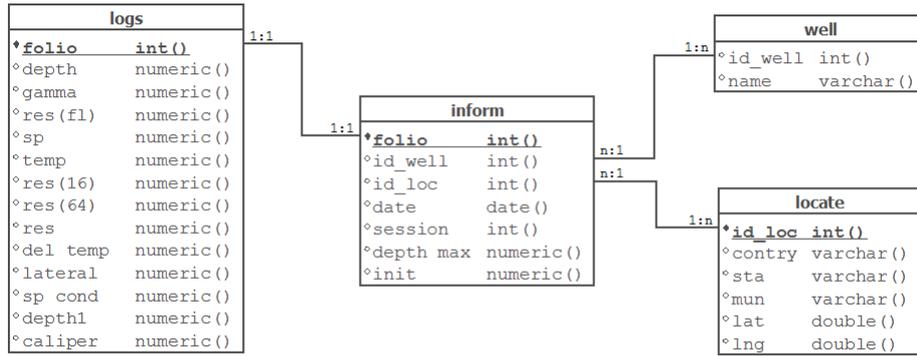


Figura 21: Diagrama de clases; esquema estructural de la base de datos.

BD, el driver o controlador que en este caso es "pg" perteneciente a PostgreSQL y el usuario al comando (db.connect). Una vez realizada la conexión se puede importar la tabla de localizaciones y crear un archivo vectorial de puntos que despliegue los pozos para la visualización espacial con respecto a las coordenadas de la tabla.

Con ayuda de las librerías DBI y RPostgreSQL, se realiza la conexión desde R-Project hacia PostgreSQL, lo único que necesitas es ingresar los datos de la BD a la cual quieres ingresar y el usuario. La manera de conexión con bases de datos es independiente en todos los programas pero es bastante similar en cuanto a la información solicitada lo único que cambia es la sintaxis la cual depende del software.

Se generaron rutinas en archivos script para conectar, para importar la tabla "logs" y asignar los distintos los parámetros registrados por pozo en un objeto de tipo "data.frame" en R, muy semejante a una matriz, siempre teniendo bien identificado el registro con su folio del informe.

Teniendo las herramientas software instaladas, funcionando y habilitadas las conexiones entre ellas se concluye la etapa de preprocesado con toda la información proporcionada almacenada en la base de datos lista para ser consultada.

Procesamiento

El procesamiento en general se puede englobar en tres enfoques los cuales cuentan con su respectiva implementación y los objetivos serán descritos a detalle en este capítulo. La primera sección se inclina hacia un enfoque más general, este enfoque de reconocimiento se realiza un análisis multivariable de los parámetros geofísicos medidos. El segundo enfoque se inclina hacia la búsqueda de patrones y tendencias específicas a profundidad de las unidades geológicas descritas en la bibliografía y su cambios en la componente horizontal. El tercer enfoque se inclina más hacia la visualización de la información en 2D y 3D con la finalidad de generar modelos geofísicos que sirvan de apoyo en la interpretación geológica. Es prudente mencionar que el nivel de detalle que se quiera lograr tanto en la componente horizontal como en la vertical dependerá de la magnitud del desplazamiento que se tenga entre cada medición y por tanto de los objetos de estudio que se quieran resaltar.

Análisis multivariable de GAMMA, SP y RES

Mediante R-Project se despliega la información en gráficos en 2 dimensiones en el eje "y" se representa la profundidad con valores negativos y en el eje "x" los parámetros medidos por la sonda con sus respectivas unidades físicas. En la Figura 22 se muestran cada uno de los 12 parámetros físicos de los 63 registros que se levantaron en un total de 40 pozos. Con la finalidad de poder comparar cada registro se igualan las escalas teniendo como referencia los valores máximos y mínimos de cada juego de datos por parámetro.

Se analizaron y crearon categorías excluyentes que clasifican a cada registro resultando de gran ayuda para un primer acercamiento hacia los datos permitiendo reconocer patrones y tendencias sobre el eje de la profundidad.

Se elaboraron tablas con una columna para el identificador "folio" del registro y columnas adicionales referentes a las diferentes clasificaciones hechas previamente, se exportaron en formatos CSV debido a la facilidad para ingresarla y desplegarla como una nube de puntos de formato vectorial dentro de GRASS-GIS.

La creación de mapas para cada clasificación de cada parámetro proporcionando una perspectiva espacial la cual permite observar tendencias a lo largo y ancho de la zona de estudio, así como algunas agrupaciones que reflejan similitudes entre pozos y registros. Se seleccionaron los parámetros de Gamma, SP, las resistividades (16", 64" y lateral) así como la resistencia puntual enfocada para conocer las características mensurables directamente de la formación ya que son los parámetros que proporcionan mayor contenido de información de la roca atravesada y aun que se cuente con algunas variaciones debido a agentes externos como los fluidos y los mencionados con anterioridad, por ahora se dejan de lado los parámetros que miden directamente propiedades físicas del fluido como resistividad del fluido, temperatura, el incremento de temperatura y sp conductividad para ser retomados en el proceso de interpretación.

Firmas geofísicas de unidades geológicas

Se realizó un filtrado de señales a los parámetros seleccionados ya que presentaban periodicidad con respecto a la profundidad y que presentaban mucha información en longitudes de onda muy pequeña que dificultan la visualización de grandes longitudes de onda.

Se diseñaron filtros Finite-extense Impulse Response(FIR) mediante el análisis de frecuencias con algoritmos Fast Fourier Transform(fft) a los parámetros gamma, sp y resistividades (16", 64", lateral y Res) por medio de rutinas que despliegan gráficos de la señal inicial, la señal en el espacio de frecuencias, el filtro y el resultado de la convolución de las dos señales.

La Figura 22 muestra el parámetro gamma del informe con folio 20 perteneciente al pozo con el nombre "Jose Toledo". En a) se presenta el dato crudo del parámetro gamma graficado la profundidad en el eje "x", en b) se muestra la primera parte de la magnitud de la señal en el espacio de las frecuencias en donde el eje "x" representa la

frecuencia en Hz, en c) se realiza un acercamiento a la primera parte de la magnitud de la señal, en d) se muestra el filtro FIR diseñado (lowpass), en e) se gráfica la señal resultante de la convolución y por ultimo en f) se muestra el gráfico con la escala vertical donde se representa a la altitud (msnm) y en la escala horizontal el valor resultante, un múltiplo de las unidades (.cps) del parámetro gamma.

Se decidió usar la técnica matemática de análisis espectral por medio de la fft debido a la gran facilidad con la que se obtiene el espectro de la señal, por lo que, observar la distribución de energías en diferentes frecuencias sirve para construir filtros de convolución optimizados. La señal original puede ser descompuesta en una serie de ondas sinusoidales cuyas frecuencias sean múltiplo entero de la frecuencia básica o fundamental $1/T$. Cada una de esta ondas tiene a) una cierta magnitud, por ejemplo; una medida de qué tanto particularmente la onda participa en la generación de la señal principal, y b) la fase, por ejemplo; el punto de comienzo para cada onda. Se diseñaron filtros pasa bajos con la finalidad de atenuar o eliminar frecuencias altas y dejar pasar frecuencias bajas debido a las altas variaciones por unidad de profundidad las cuales hacen referencia a altas frecuencias y a longitudes de onda muy pequeñas que no permiten observar una tendencia más grandes de los datos como se observa en el ejemplo de la Figura 22.

En base a la geología fueron seleccionados pozos de control ubicados fuera de los límites de las unidades geológicas descritas por (Cortés, 2002) , para su análisis individual con la finalidad de encontrar algún patrón en firma geofísica del tipo de unidad presente en por lo menos la parte más superficial del registro sin tomar en cuenta extrapolaciones del autor.

De igual manera se asignaron pozos de validación para los sitios en los que la ubicación es fidedigna pero cae en los límites de unidades descritas por la bibliografía, por lo que es posible que exista un contacto entre al menos 2 unidades. El procedimiento empleado para la selección de pozos de validación se basó en los registros que cuentan con la mayor profundidad o en su defecto se seleccionó al registro con algún patrón ya sea de tendencia general o alguna característica más específica que tenga en común con los pozos de control.

Por último se identificaron y analizaron pozos entandar localizados ya sea en una unidad o en los límites, en los cuales la ubicación esta comprometida puesto que no cuenta con coordenadas de pila en la base de datos, pero si cuenta con la localización básica del estado y municipio, por lo que se asignaron las coordenadas manualmente en base a la ubicación de la cabecera municipal.

Una vez descrita la firma física de los parámetros medidos se procedió hacer procesos estadísticos para cada unidad con la finalidad de poder hacer comparaciones cualitativas y cuantitativas con la unidades no identificadas de pozos de validación y estándar con respecto a las unidades de los pozos de control para observar detalles específicos.

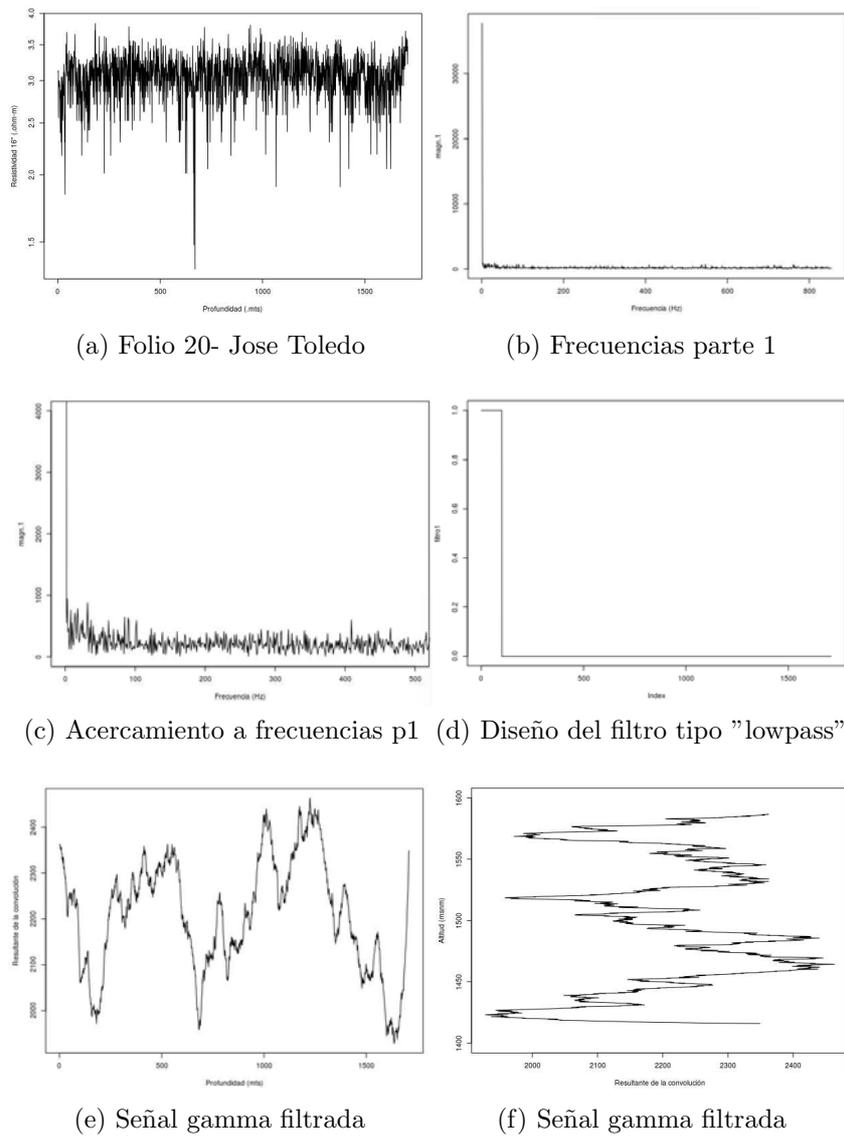


Figura 22: Filtrado de señales aplicado a gamma

Visualización espacial en 2.5D y 3D

Para interpretar la distribución espacial de los materiales se generaron mapas de interpolación tipo IDW de los valores de cada pozo a una profundidad dada con respecto a la superficie del terreno.

Se adecuaron las escalas de acuerdo del objeto de estudio que en este caso son los volcanes de Colima dado que son el origen de la mayor parte de materiales que se espera que se encuentre en el área de interés por lo cual se utilizó una forma simétrica en un sistema de coordenadas polares o cilíndricas para facilitar la descripción espacial y la comprensión e interpretación de zonas con anomalías reduciendo en menor medida la extrapolación de información.

Dentro de dichas zonas se muestran perfiles de corte que brindan una buena visión de los espesores y de la distribución espacial de las unidades geológicas.

Interpretación

Para la culminación de la etapa de procesado se propone una visualización del comportamiento espacial de las mediciones geofísicas con la finalidad de poder ayudar en la interpretación geológica. Se presentan perfiles geofísicos del área de interés y el modelo geofísico propuesto, el cual puede servir como esqueleto para el modelo geológico en donde la resolución a profundidad dependerá de intervalo de muestreo al igual que en la componente horizontal aunando a la densidad de puntos.

Resultados

En la actualidad la información es vital para la renovación global del entendimiento de la ciencia. El uso y aprovechamiento que se le dé juega un rol fundamental para consolidar el entendimiento de distintos temas en geociencias. Durante más 20 años se han recaudando datos digitales de registros geofísicos de pozos en todo México. Esta información es un referente directo del subsuelo por lo que puede ayudar en el gran variedad de disciplinas.

La metodología propuesta fue utilizada para el almacenamiento, análisis, procesamiento y visualización de más de 500 Gbytes de información referente a registros de pozos de los estados de Colima y Jalisco. El uso de software libre permitió y facilitó el trabajo sin el costo de la licencia de softwares especializados. El uso de comandos de edición de texto (Sed y Awk) en la terminal (Bash) permite la estructuración de gran cantidad información de manera serial.

La compatibilidad entre herramientas libres utilizadas (PostgreSQL, R, GRASS, Qgis y Blender) facilitó la tarea de análisis espacial necesaria para observar la distribución de los materiales en el área de interés, para conocer los espesores en decenas de metros de las unidades descritas por Cortéz et al., (2005). Ayudaron a apreciar las variaciones en profundidad de los materiales geológicos del CVC, los cuales son agrupados en dos tipos; volcánico en la parte sur y sedimentario en la parte norte del área de interés.

Las librerías y los protocolos de comunicación (PostGIS⁷ y RPostgreSQL⁸) entre los tres software utilizados enriquecen el abanico de posibilidades para generar nuevos procedimientos y metodologías que se enfoquen en la culminación de objetivos más específicos que involucren un mayor nivel de detalle en el análisis e interpretación.

La creación de rutinas para graficar todos los registros de pertenecientes a un sólo parámetro y para todos los parámetros de un pozo ya sea en escalas relativas o absolutas facilitó en gran medida la labor iterativa de análisis necesario para la agrupación multiparamétrica basado en el comportamiento de cada pozo con respecto a la profundidad.

Los parámetros que aportan mayor información de propiedades del medio rocoso y no tanto agentes externos al material rocoso del subsuelo (Gamma, SP y Resistividades) ayudaron a identificar limites de unidades con respuestas muy similares pero con una leve variación atribuida al proceso de remoción de materiales de origen volcánico. La elaboración de mapas temáticos para estos parámetros brindaron la

⁷Para mayor información acerca de PostGIS visita <http://postgis.net/>

⁸Para mayor información acerca de RPostgreSQL visita <https://cran.r-project.org/web/packages/RPostgreSQL/index.html>

perspectiva horizontal que facilito el entendimiento de la distribución espacial de los materiales contenidos en las unidades geológicas.

El filtrado con pasa-bajas se aplicó a las señales que presentaban ondulamiento periódico, resultando ser una buena herramienta para discriminar frecuencias y periodos de onda muy cortos y resaltar las frecuencias grandes mismas que enfatizan tendencias generales de las diferentes unidades geológicas y permite visualizar mejor el comportamiento de la señal en este caso de cada pozo.

La asignación de pozos de control ubicados en sitios confiables con un alto grado de certeza sirvieron para la toma de muestras para cada unidad. Con la finalidad de conocer la firma espectral de los parámetros gamma, sp y resistividades para las unidades geológicas que presumen encontrarse. La identificación de los pozos de validación ayudó en confirmar las respuestas por cada unidad y sus variaciones con respecto a la variante espacial o en la componente horizontal.

El procedimiento de interpolación de una superficie con información de todos los registros a una misma profundidad con respecto a la superficie permitió la observación del comportamiento o los cambios registrados por cada parámetro en el área de interés, tanto en la componente vertical como en la componente horizontal. Con la adecuación de tablas de color, procedimiento hecho en base al histograma general del compilado de señales filtradas, se logro apreciar mejor las variaciones y tendencias de manera visual (Figura 39).

Son muchas las posibilidades que se presentan cuando se trabaja con información de tipo raster. La técnica conocida como álgebra de mapas, se utilizó para el análisis multiparamétrico, debido a la eficiencia y facilidad para relacionar variables con funciones que de adapten mejor al objeto de estudio. La aplicación de este procedimiento en este caso se utilizó mediante una relación proporcional entre las tres variables gamma (API), sp (mV), res (ohm) que resulto ser acertada debido a las relaciones intrínsecas entre los parámetros utilizados.

A continuación se describen los resultados generados a partir de los procedimientos aplicados para el cumplimiento de los objetivos planteados anteriormente. Se presentan las figuras junto con su descripción por zonas, de los parámetros seleccionados para cada unidad geológica.

Descripción general del área de interés

El área de interés es un polígono radial de dos dimensiones con un total de 40 sitios distribuidos en un área de 1500 km^2 , con información suficientemente uniforme para validar la interpretación en la componente horizontal. Se generó el diseño circular del área de interés debido a que encapsula a todos los registros cercanos al volcán de Colima en un radio de 32 km y a su vez deprecia toda el área que no tiene datos, disminuyendo en porcentaje de extrapolación del proceso de rasterización y facilitando la descripción espacial. La adaptación del polígono con respecto al objeto de estudio y a las características generales del contexto geológico facilita la descripción de anomalías mediante distancias radiales y rumbos.

La figura 23, despliega un mapa generado con la delimitación del área de interés dentro de la zona de estudio. Se encuentra en los límites de Colima y Jalisco y esta

delimitada por dos segmentos de arco las cuales comienzan con un azimut de 10° y terminan con un azimut de 210° refiriendo al norte geográfico. El segmento de arco más cercano a los volcanes cuenta con un radio 10 km con respecto al volcán Nevado de Colima y el segmento de arco exterior tiene un radio de 32 km con respecto al Volcán de Fuego de Colima.

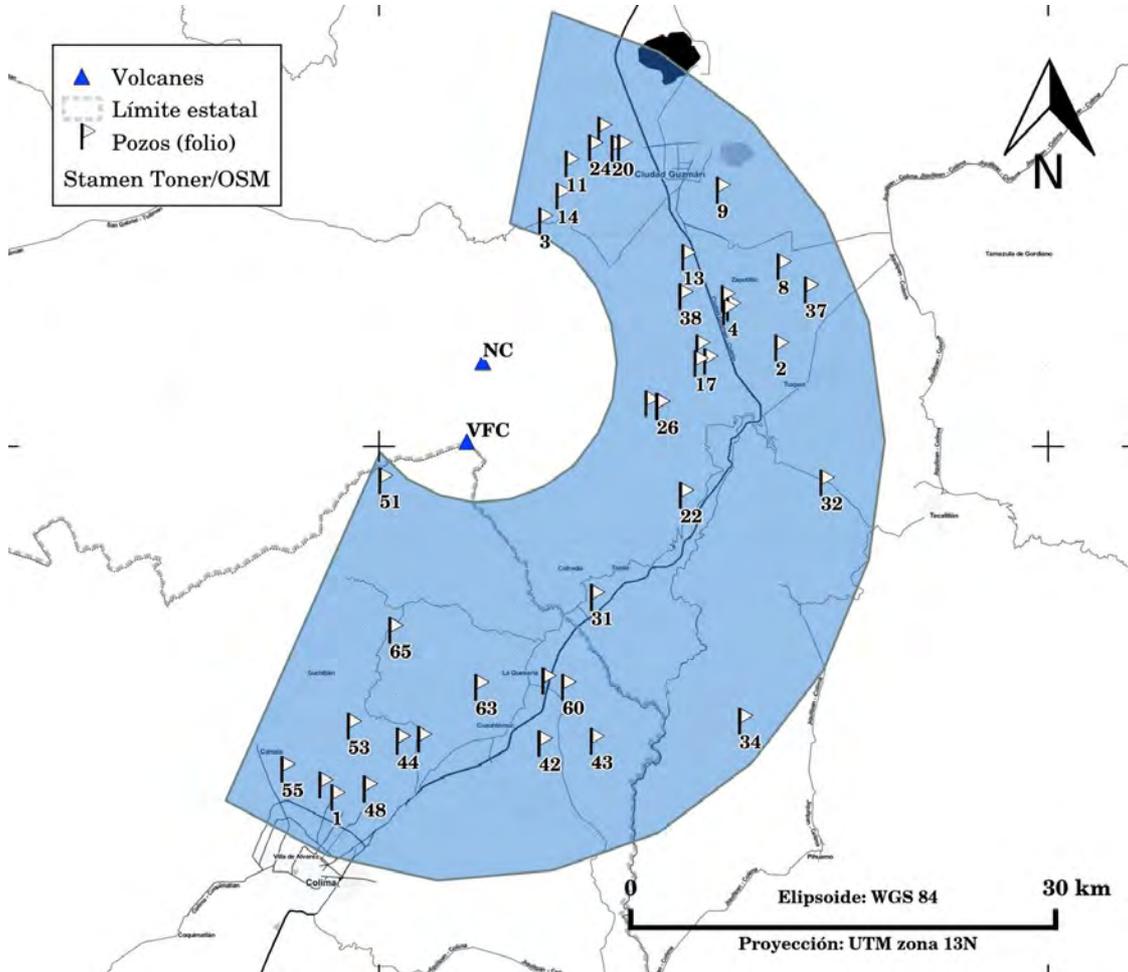


Figura 23: Mapa del área de interés en el CVC. Las banderas blancas representan los 40 sitios de perforación y a su lado derecho se imprime el folio del registro. El área de interés se acotó en base al objeto de estudio.

Descripción general de los RG

La evaluación de gamma, SP y resistividad puntual bajo estándar multivariable permite primeramente conocer los datos con los que se cuentan. La igualación de escalas facilita la agrupación de registros en base a patrones encontrados en los gráficos de los registros.

Debido a los comportamientos observados se acotó el área de interés en tres zonas, con la finalidad de lograr una observación con mayor detalle espacial y disminuir la

cantidad de área extrapolada. Se delimitaron las zonas en base a los lugares donde se presentaba mayor actividad o anomalías en los datos, así como zonas aparentemente estables. Como resultando se observa una disminución del superficie extrapolada de 15% con respecto al área de interés inicial.

- En la parte norte del área de interés identificamos la **zona I**, en justo un alineamiento de pozos con azimut de 20° y con una distancia de 10 km. Cuenta con un total de 9 registros distribuidos en 49 km^2 lo que acota aún más la densidad promedio.
- Con rumbo al E del área de interés identificamos la **zona II** con forma de un polígono irregular de orientación vertical. Con un total de 22 registros distribuidos en aproximadamente a 438 km^2 de área.
- Observando la parte sur del área de interés se ubica la **zona III**. La cual presenta 32 registros dispersos en 730 km^2 , contando con un poco más del 50% del total de registros.

Amplitud del parámetro gamma

El juego de datos del parámetro gamma se clasificó cuantitativamente en base a la amplitud, esto al considerar a la serie discreta como la sucesión puntos de una onda. Se identificaron los folios de los registros que presentan amplitudes similares. Las grades amplitudes nos hablan de material con alto contenido de elementos generadores de radiación gamma natural (Th, U, K) y por el contrario las amplitudes cortas se relacionan con material con poco aporte de material generador de radiación gamma.

En la Figura 24 se proyecta un ejemplo de las clases asignadas base al orden de amplitud de los datos. Los valores de frontera entre las clases se representa por las líneas de color. En el primer grupo proyectado hacia la parte central de la figura se encuentran los registros que presentan una amplitud por debajo o igual a 50 cps, con poco y constante contenido de material generador de radiación gamma natural, aumentando de escala se observan pequeñas variaciones periódicas. El segundo grupo proyectado a lado izquierdo de la figura, contiene los registros que presentan valores de amplitud mayores a 50 y menores o iguales a 100 cps, con variaciones constantes y longitudes de onda muy cortas que aparentemente no modifican la tendencia general del registro. Y en el tercer grupo proyectado al lado derecho de la imagen se muestra un ejemplo donde se encuentran registros con grandes amplitudes mayores a 100 cps, sitios con mayor contenido de material generador.

Como resultado del procedimiento se agruparon 7 registros con amplitudes cortas (menores a 50 cps), en el segundo grupo 47 registros con amplitudes medianas mayores al anterior y menores a 100 cps, en el tercer grupo 6 registros con amplitudes mayores a 100 cps, dejando fuera de la clasificación en base al criterio de amplitud a 3 registros debido a la poca cantidad de información.

Se desplegaron las agrupaciones espacialmente, en la Figura 25 se muestra el mapa que corresponde a las tres clases en base a la amplitud. En términos generales en el mapa se observa un alto porcentaje de sitios con amplitud promedio distribuidos

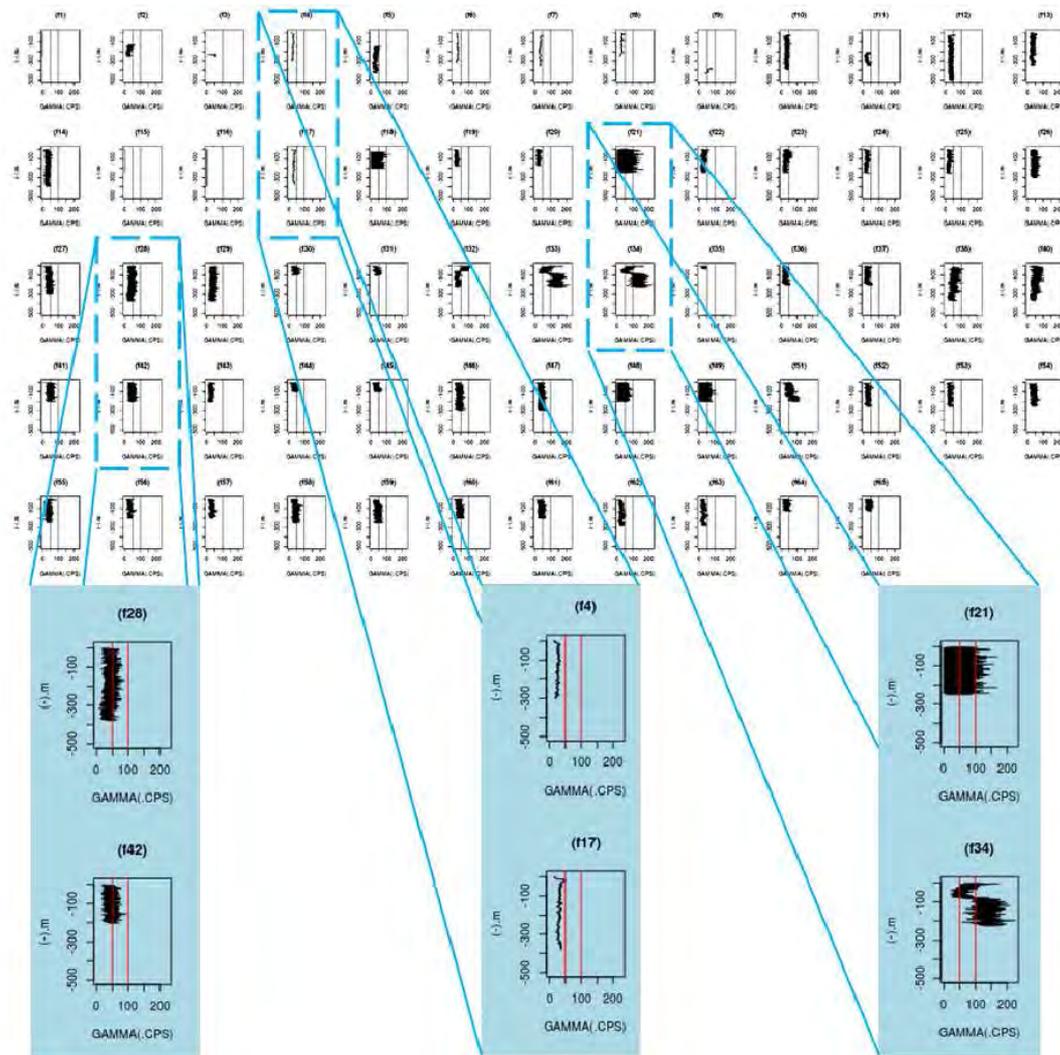


Figura 24: Gráficos del parámetro gamma con ejemplos de grupos de clasificación en base a la amplitud

en la mayor parte del área de interés lo que nos habla de la homogeneidad de los materiales lo que no resulta extraño debido a que la mayoría de depósitos son producto de un mismo sistema volcánico (CVC).

Se observa una concentración al norte del área de interés con amplitudes más cortas posiblemente asociadas al material depositado por caída y al vulcanismo alcalino encontrado en cercanías de Ciudad Guzmán. Algunos sitios con grandes amplitudes dispersos al Norte y Sur en distancias mayores a 15 km no ha sido posible vincularlas hasta este punto con algún material, contexto geológico o agente de alteración del medio lo cual provoque los valores registrados, aunque las altitudes de los sitios son menores en comparación con los pozos ubicados en cada una de las tres direcciones radiales.

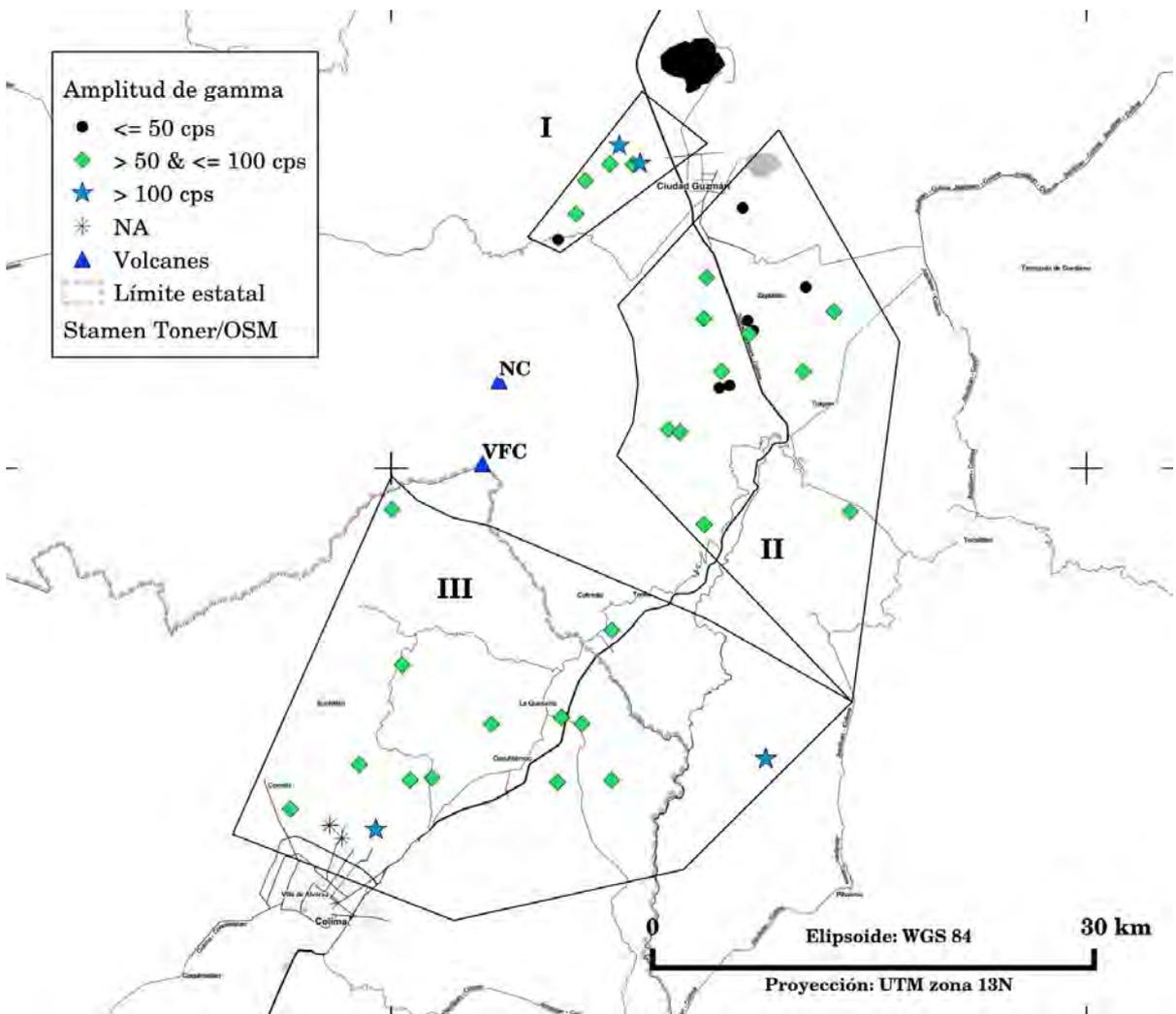


Figura 25: Mapa de agrupación en base a la amplitud del parámetro gamma

Zona I Se denota un aumento en la amplitud con forme se aleja del volcán, pasando del registro más cercano con una amplitud estrecha y con forme se va alejando pasa de amplitud media a tener un grandes amplitudes. Esto genera la impresión de una aparente tendencia radial del volcán Nevado de Colima que tiene el mismo azimut con respecto al N el cual comienza en partes cercanas y de mayor altitud con poco material generador de rayos gamma naturales y/o poca variación

de contenido y concluye en parte más lejanas (33 km) con grandes amplitudes pertenecientes a mayores concentraciones de material generador.

Zona II Partiendo desde el volcán Nevado de Colima hacia el E (azimut de 90°), se distinguen variaciones en las magnitudes de los registros que van desde valores identificados como estrechos menores a 50 cps hasta valores medianos que no sobrepasan los 100 cps. Esto nos habla de buena homogeneidad en los valores lo que hace referencia a una distribución tanto constante de material radiactivo con algunas leves variaciones de concentración al centro.

Zona III Se observa gran similitud en la zona con amplitudes de mayores a 50 y menores a 100 cps. Exceptuando dos sitios que presentan amplitudes mayores a 100 cps, ubicados a una distancia radial de 27 km, con azimuts de 180° y 130° con respecto al VFC. Dando una aparente impresión de contener cantidades muy similares de material radiactivo.

Pendiente del parámetro gamma

Se realizó una segunda clasificación al parámetro gamma debido las evidentes tendencias generales de los datos. Algunos registros muestran variaciones en ordenes de magnitud de decenas de metros en la horizontal dando la impresión de ser el reflejo de un cambio entre distintos materiales o tal vez variaciones significativas en contenido generador de radiación gamma en una misma unidad. En la Figura 26 se muestran ejemplos de los registros del parámetro gamma agrupados en base a la tendencia general a través de la profundidad, lo cual hace referencia a una pendiente constante o variante. Se proyecta del lado izquierdo de la imagen ejemplos de registros con pendiente semi-constante (promedio igual cero) y se proyecta hacia el lado derecho de la imagen registros que cuentan con una pendiente más variable.

Al finalizar el procedimiento se agruparon 43 registros con pendiente semi-constante e igual a cero, sitios que probablemente no crucen más de una unidad geológica y 14 registros con tendencias variables, dejando a 6 registros fuera de la clasificación debido a la cantidad limitada de información.

En la Figura 27 se muestra la distribución espacial correspondiente a la clasificación hecha al parámetro gamma en base a la tendencia general de la señal, lo que en términos cuantitativos hace referencia a la pendiente del registro. En el mapa se logra distinguir gran homogeneidad en la mayor parte del área de interés con sitios que presentan una tendencia constante, sin embargo los registros identificados con algunas variaciones o tendencias fluctuantes en la profundidad se encuentran dispersos en la parte S y en la parte E con distancias aproximadas de entre 8 y 16 km y entre 13 y 20 km respectivamente, presentando altitudes de entre 811 y 1240 msnm. La mayor parte (60 %) de los sitios con pendientes variantes se ubican en los límites o cerca de los límites de las unidades geológicas descritas por Cortés et, al. (2005).

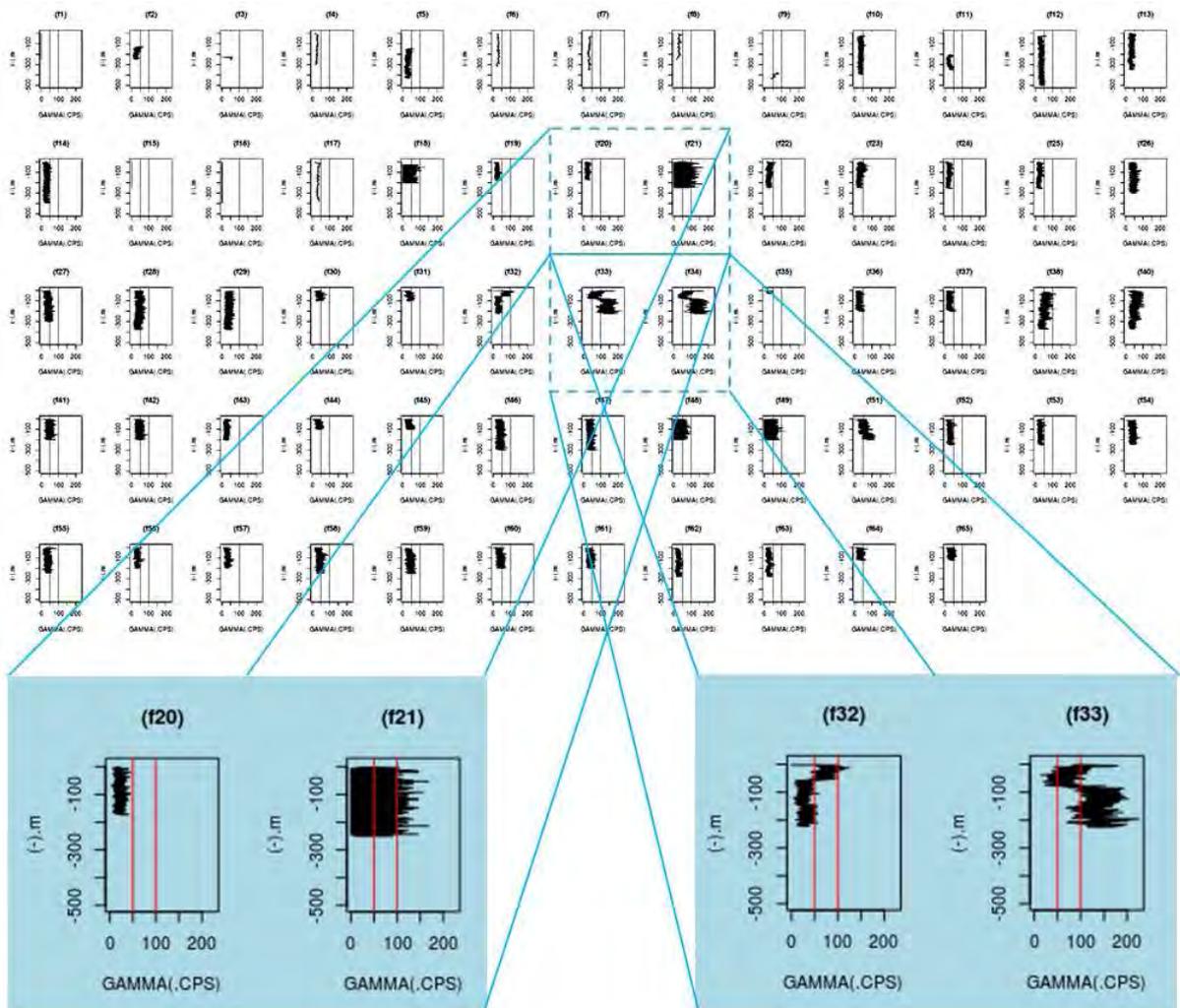


Figura 26: Gráficos del parámetro gamma con ejemplos de grupos de clasificación en base a la tendencia general

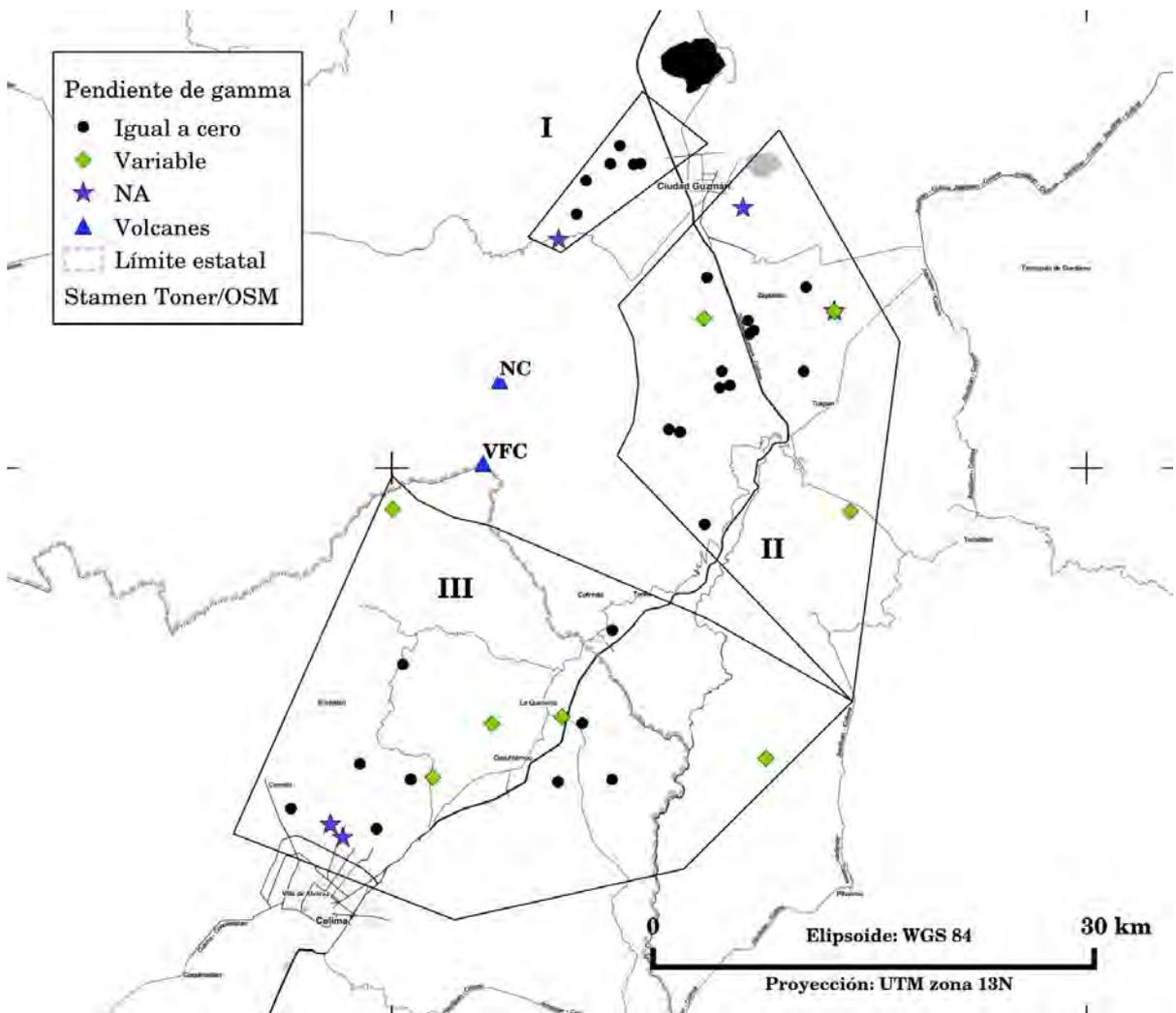


Figura 27: Mapa de agrupación en base a la pendiente promedio del parámetro gamma

Zona I Se distingue gran estabilidad en los registros desplegando solamente registros con pendiente semi-constante. Dando la impresión de ser una misma unidad geológica para dicha zona ya que no se presentan grandes variaciones o cambios evidentes de tendencia en la vertical que permitan inferir algún cambio de contexto geológico. Comparando los sitios de la clasificación con las ubicaciones en la carta geológica del CVC se localizan la mayoría (70%) en la unidad **QALe** descrita como material aluvial (material de caída con epiclástos).

Comparando con el mapa de la primera clasificación hecha donde se observó la tendencia horizontal creciente en amplitud con forme se aleja del volcán, se llega a la observación que en la zona **I** sea probablemente una misma unidad en la cual se perforó y en donde la tendencia general constante y las variaciones de amplitudes se deban al contenido de material radiactivo o generador de rayos gamma, o algún material que baje y establezca el promedio general de radiación gamma de la zona.

Zona II Se observa una concentración en la parte central de registros con tendencia constante. En los extremos W y E se presentan registros con tendencia variable, mismos que se ubican cerca de los límites de las unidades geológicas **VA4** descrito como vulcanismo alcalino, **QALe Tigei** descrito como lavas, flujos piroclásticos y material de caída, **CVN10** y **Ktp** descrito como calzas masivas. En la parte central de la zona se encuentra gran estabilidad en la componente vertical del registro, sitios los cuales se encuentran en la unidad geológica **CVN10** descritas como depósitos de flujos piroclásticos y material de caída.

Comparando con el mapa de clasificación de amplitud de gamma, se despliegan registros en la parte central con amplitudes pequeñas y algunas amplitudes medias con tendencias verticales estables. Un par de registros con amplitudes medias en los extremos, muestran variaciones en la profundidad lo que nos habla de un cambio ya sea litológico o de condiciones del lugar, con al menos de dos distintas respuestas con variaciones menores a 100 cps.

Zona III En la zona **III** se observa buena homogeneidad de registros con pendiente igual a cero. sitios localizados en la unidad geológica **CVP5** descrita como depósitos de avalanchas volcánicas con excepción de dos registros ubicados en los límites con la unidad **CVP9** depósitos de actividad más reciente ubicados en mayores altitudes, a 5 y 10 km del VFC.

Algunos cuantos registros con pendientes variables se localizan en la parte central en un alineamiento con dirección SW-NE, en el extremo N y otro más el extremo SE de la zona. Sin embargo los sitios de esta zona que presentan variación en la pendiente se encuentran alejados y fuera de los límites de la unidad geológica **CVP5**, por lo que se espera sean grandes variaciones internas en una sola unidad debido a la estructura interna caótica e irregular del depósito volcánico. Confirmando el supuesto al concluir la comparación con el mapa de amplitudes de gamma en donde se encuentra que la mayor parte de registros presentan amplitudes medias exceptuando uno en la parte extrema inferior de la zona.

En los mapas de clases generados a partir del parámetro gamma agrupado en base a la amplitud y a la tendencia general (Figuras 16 y 18). Los valores de los registros reflejan comportamientos semejantes y valores del mismo rango medio en la mayor parte del área de interés en valores que oscilan entre los 50 y los 100cps lo que resulta y se esperaba debido a que el material fuente en este caso es producto

volcánico y la composición de cada depósito en escénica es sino igual muy semejante en composición mineral y en contenido de material generador de radiación natural. En cuanto a la tendencia general de los pozos la mayor parte del área de interés tienen pendientes constantes mostrando algunos registros con variaciones reflejo de posibles fronteras entre unidades o algún cambio físico en el subsuelo que provoca variaciones en las mediciones hechas en las zonas **II** y **III**.

En la zona **I** se presenta una tendencia radial al aumento de la amplitud de onda del registro desde 50 a más de 100cps atribuida al aporte del material sedimentario que se va ganando conforme es transportado el material volcánico y a la naturaleza del proceso de depositación de material de caída el cual presenta una relación inversa con la tendencia radial en aumento de la amplitud del registro debido a que las capas laminares de los depósitos de caída (ceniza) bajan la intensidad de la radiación gamma.

Pendiente del parámetro de potencial espontáneo

Se realizó el mismo procedimiento para el parámetro de potencial espontáneo, se distinguieron comportamientos generales con respecto a la profundidad; en tendencias constantes y en tendencias variables. En la Figura 28, se muestra el juego de datos del parámetro SP clasificados cuantitativamente en base a la pendiente del registro. Se dividió la clase de tendencias variables en el momento de pasar a términos cuantitativos a dos clases; una de pendientes positivas, y la otra de pendientes negativas con la finalidad de distribuir mejor la agrupación y agregar otra clase en la agrupación.

Cuando se saben propiedades del lodo de perforación también se puede conocer información sobre la difusión de los iones de la solución más concentrada (salina) hacia la menos concentrada haciendo referencia al proceso de difusión, o en el proceso de absorción donde dependerá del material arcilloso y se agrega el intercambio iónico de la roca con la solución que está en contacto. Sin embargo en este estudio no se estudia a fondo los sistemas de difusión, absorción y de intercambio iónico. Sin embargo con la aplicación de la metodología propuesta y la información correcta, se pueden obtener datos espaciales de procesos internos que originan el potencial espontáneo en base a la declaración de funciones.

El parámetro SP nos puede sugerir que las pendientes constantes o iguales a cero, significan que los materiales saturados contienen la misma carga iónica por lo que no hay diferencia de potencial, o bien, que no hay conductividad hidráulica, o que el material de la zona no tiene mucha porosidad y es impermeable. Y en el caso contrario dependerá de la salinidad del lodo de perforación contra la salinidad del agua de formación. Metodologías hídricas y petroleras aplicadas al parámetro SP se puede relacionar con gamma y resistividad por medio del contenido de arcillas, en donde relacionan el aumento del contenido de arcillas en el depósito de manera proporcional con el aumento de SP y gamma y con la disminución de resistividad (Ellis and Singer, 2007).

En la Figura 28 se muestran las tres agrupaciones la primera proyectada del lado izquierdo de la imagen, pertenece a los registros que tienen pendiente promedio igual a cero. El segundo grupo proyectado hacia la parte central engloba a los registros

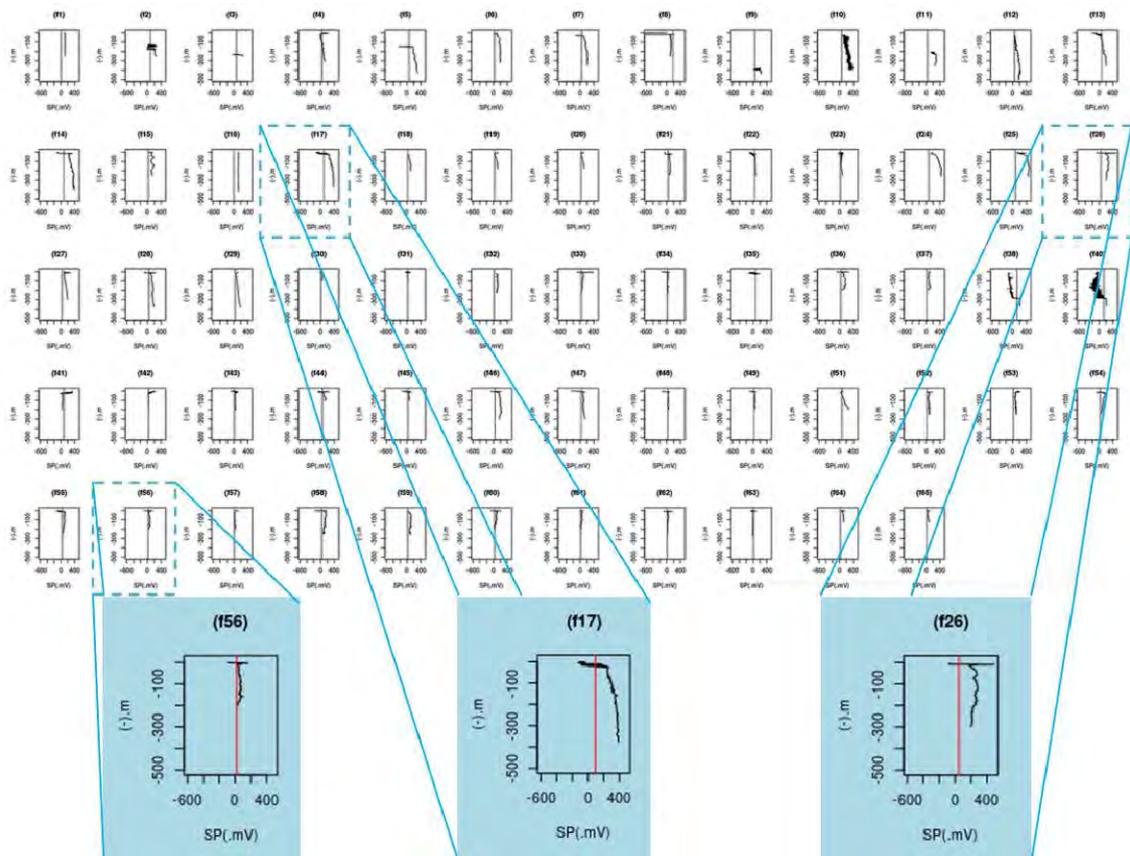


Figura 28: Gráficos del parámetro SP con ejemplos de grupos de clasificación en base a la pendiente promedio del registro.

con pendiente promedio positiva, con un leve aumento en los valores con respecto a la profundidad. El tercer grupo proyectado hacia el lado derecho de la figura perteneciente a los registros con valores de pendiente promedio negativa.

Al finalizar se encontraron con 27 registros clasificados dentro del primer grupo con pendientes iguales a cero, 23 con pendiente promedio positiva y 9 registros con pendiente promedio negativa. Cuatro registros fueron los que no se clasificaron en base a esta característica debido a la pequeña cantidad de información de los registros.

En la Figura 29, se muestra el mapa de la distribución espacial de las clases para el parámetro de potencial espontáneo clasificado en base a la pendiente promedio del registro. En el mapa se observa una estabilidad de registros con pendientes iguales a cero en la parte sur y en la parte norte un grupo de registros con pendientes variantes en su mayoría positivas con sólo dos pares de registros con pendientes positivas y pendientes iguales a cero en el extremo derecho de la zona.

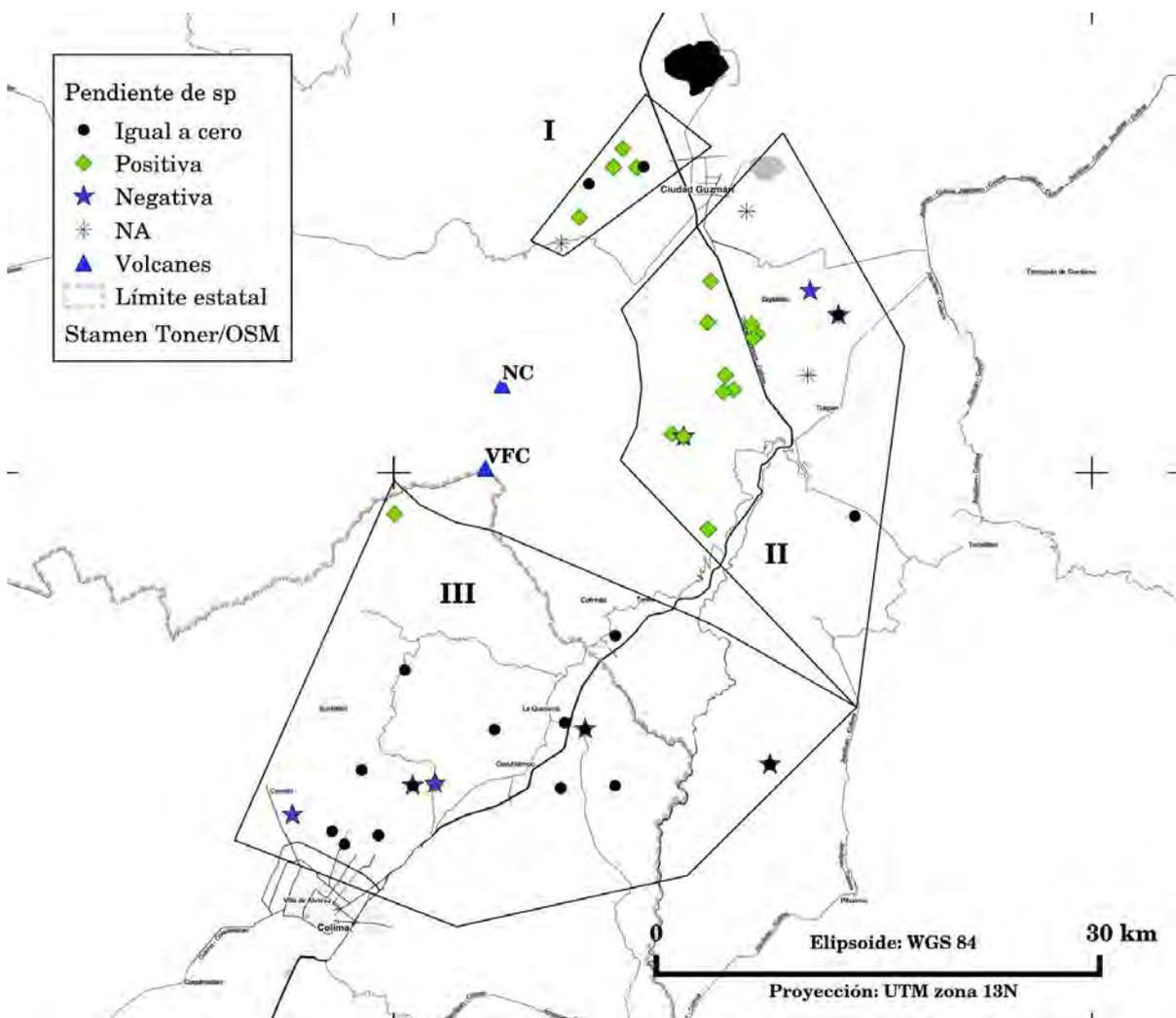


Figura 29: Mapa de clasificación del parámetro sp en base a la pendiente

Se observan algunas tendencias negativas a lo largo de un semicírculo con centro en el volcán Nevado de Colima en un radio de 26 km, los cuales no se han podido relacionar aun con algún material geológico como tal.

Zona I En la zona I, se observa hacia el rumbo del alineamiento de pozos pendientes variables positivas a constantes, después variables positivas y de nueva cuenta pendientes constantes. Comparando con las observaciones hechas en la clasificación de gamma, como el aumento de amplitud a razón de la distancia radial y la tendencia constante de la mayor parte de la zona, los valores de los campos eléctricos de polarización espontánea o natural presentan una constancia con algunos sitios con diferencias de potencial positivo lo que indica que existe conductividad, que existe una diferencia de potencial entre el lodo de perforación y el agua de formación, que hay buena porosidad y permeabilidad y que mientras mayor se la profundidad, mayor concentración de iones y cationes libres.

Zona II En la zona identificada como **II** se observan en su mayoría registros con pendiente positiva en las partes más cercanas a los edificios volcánicos.

Al depreciar los registros de la clase NA, se observa mejor una frontera entre registros con pendientes positivas a la izquierda localizados en sitios correspondientes a una sola unidad (**CVN10**) y registros sin pendiente y con pendientes negativas en el extremo derecho de la zona los cuales no se pueden relacionar directamente con la carta geológica puesto que caen en los límites de las unidades **QALe**, **Tigei**, **CVN10** y **Ktp**.

Comparando con las observaciones hechas en las clasificaciones de gamma, como la irregularidad y caos en la magnitud del registro y la pendiente promedio que es igual a cero, los valores de los campos eléctricos de polarización espontánea o natural presentan en su mayoría 85%, una diferencia de potencial y buena conductividad.

Observando a mayor detalle se distinguen pendientes iguales a cero y negativas en la parte E de la zona, correspondientes a sitios que mostraron valores gamma correspondientes a amplitudes medias en los extremos y con tendencias generales variables.

Los sitios que registran pendientes positivas ubicados en el lado izquierdo de la zona se relacionan con respuestas en el parámetro gamma de menor (50 cps) a mayor (100 cps) amplitud y con una tendencia en su mayoría constante, excepto uno ubicado más al N en los límites de las unidades **CVN10** y **VA4**. Y amplitudes cortas en el centro y parte E con tendencias más constantes en la profundidad con pendientes positivas y variaciones de amplitud gamma menores a 100 cps.

Zona III En la zona **III** se observa bastante homogeneidad de registros con pendientes iguales a cero, se nota algunos sitios con pendiente negativa ubicados sobre un medio arco con centro entre los volcanes y un radio de entre 15 y 25 km. En las clasificaciones gamma la zona es muy estable con amplitudes mayores a 50 cps y sólo con algunas tendencias generales variables en la parte este. Comparando con la clasificación gamma se tienen amplitudes medias con tendencias variables solo en la parte central y en los extremos Sur y SE se presentan amplitudes altas con tendencias variantes y con pendientes constantes en SP.

El mapa de clases del parámetro de potencial espontáneo agrupado en base al signo de la pendiente (Figura 29, nos ayudó a categorizar a las zonas **I** y **II** como zonas con buena susceptibilidad a tener mayor contenido de arcillas en comparación con la zona **III** restante. Atribuido al origen de meteorización y alteración hidro-termal de feldespatos, piroxenos y micas, el contenido mineral de la arcilla (filosilicatos de aluminio hidratados con cantidades variables de hierro, magnesio,

metales alcalinos, tierras alcalinas y otros cationes (Uddin, 2008)). Lo que genera grandes superficies que pueden absorber iones y así cargándose con electricidad estática (Wenk and Bulakh, 2004) como se presenta en la parte norte. En la zona **III** se presentan pendientes promedio constantes y cercanas a cero alusivas a sitios en los que se encuentran materiales similares o con la misma carga iónica por lo que no hay diferencial de potencial o bien materiales donde no existe conductividad hidráulica o que sea impermeable y con baja porosidad.

Amplitud de las resistividades

Los registros que miden la resistividad a 16", a 64", lateral y la resistencia puntual (Single Point Resistance) muestran comportamientos muy similares con algunas leves variaciones en la magnitud de los valores atribuido al arreglo de electrodos de cada sensor. En los registros se distinguieron algunas cíclicidades las cuales dan la impresión de ondas con variaciones en frecuencias y amplitudes.

La clasificación cualitativa se originó distinguiendo los saltos en el eje "x", las diferentes medidas de amplitud de la onda. En la Figura 30, se muestra el juego de datos pertenecientes al parámetro de resistividad a 16", agrupados en base a la magnitud de la varianza. Para ello se calcula la media del registro representada de color verde en escala semi-logarítmica. Con ayuda de los límites en color gris se logran clasificar tres grupos excluyentes; el primero proyectado hacia el lado izquierdo engloba a los registros de amplitud con ordenes de variación menores o iguales a 1×10^2 , el segundo grupo proyectado hacia el lado derecho pertenece a los registros con variaciones en valores de amplitud que van desde 1×10^2 hasta 1×10^4 , y el tercer grupo pertenece a los registros que cuentan con amplitudes mayores a 1×10^4 .

Como resultado del procedimiento se logran diferenciar 37 registros con amplitudes bajas, 18 registros con amplitudes medias y 6 registros con altas variaciones, dejando solo dos registros sin agrupación.

Debido a la acertada consideración de ondas hacia los registros se pudo clasificar con una distribución aceptable partiendo de la media de los datos y agrupando en base al valor de la amplitud de dicha onda, lo que nos habla de diferentes respuestas de varios ordenes de magnitud lo que se refleja del subsuelo son cambios de resistividades de materiales y/o condiciones totalmente diferentes unas de otras.

En la Figura 31, se muestra el mapa de clases para las resistividades hecha en base al orden de variación de la amplitud. En el mapa se observa que los registros que presentan pocas variaciones se ubican por toda el área de interés. Los registros clasificados con variaciones medias no se acercan a menos de 10 km aproximadamente de los volcanes y llegan hasta las partes más lejanas de la zona de interés. Por último los registros clasificados con grandes variaciones en la amplitud no se acercan menos de 15 km aproximadamente de los volcanes y de igual forma llegan hasta el extremo más alejado del área de interés.

Zona I En la zona identificada como **I** se registra buena actividad con variaciones de las tres clases propuestas, siendo en su mayoría pequeñas variaciones de amplitud, sin embargo se distinguen sitios con altas variaciones que pasan valores de ordenes

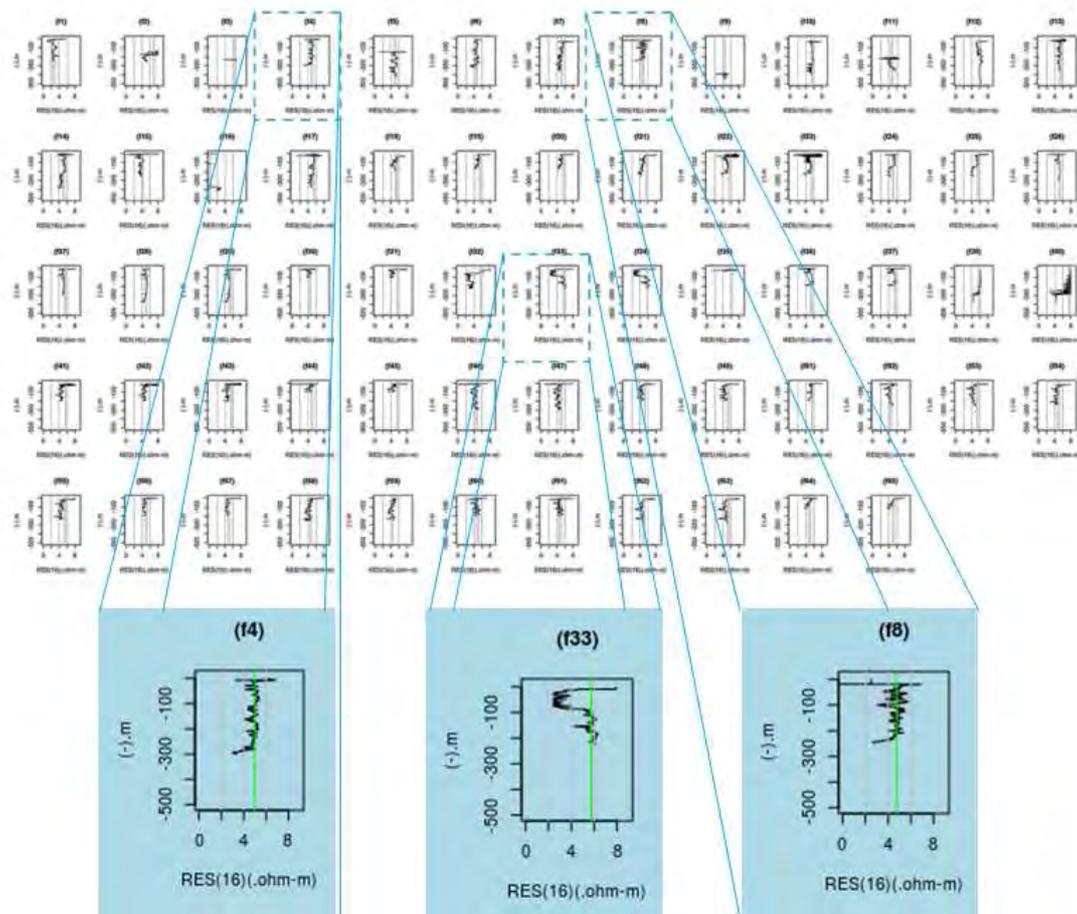


Figura 30: Gráficos de res(16'') con ejemplos de grupos de clasificación en base a la amplitud del registro.

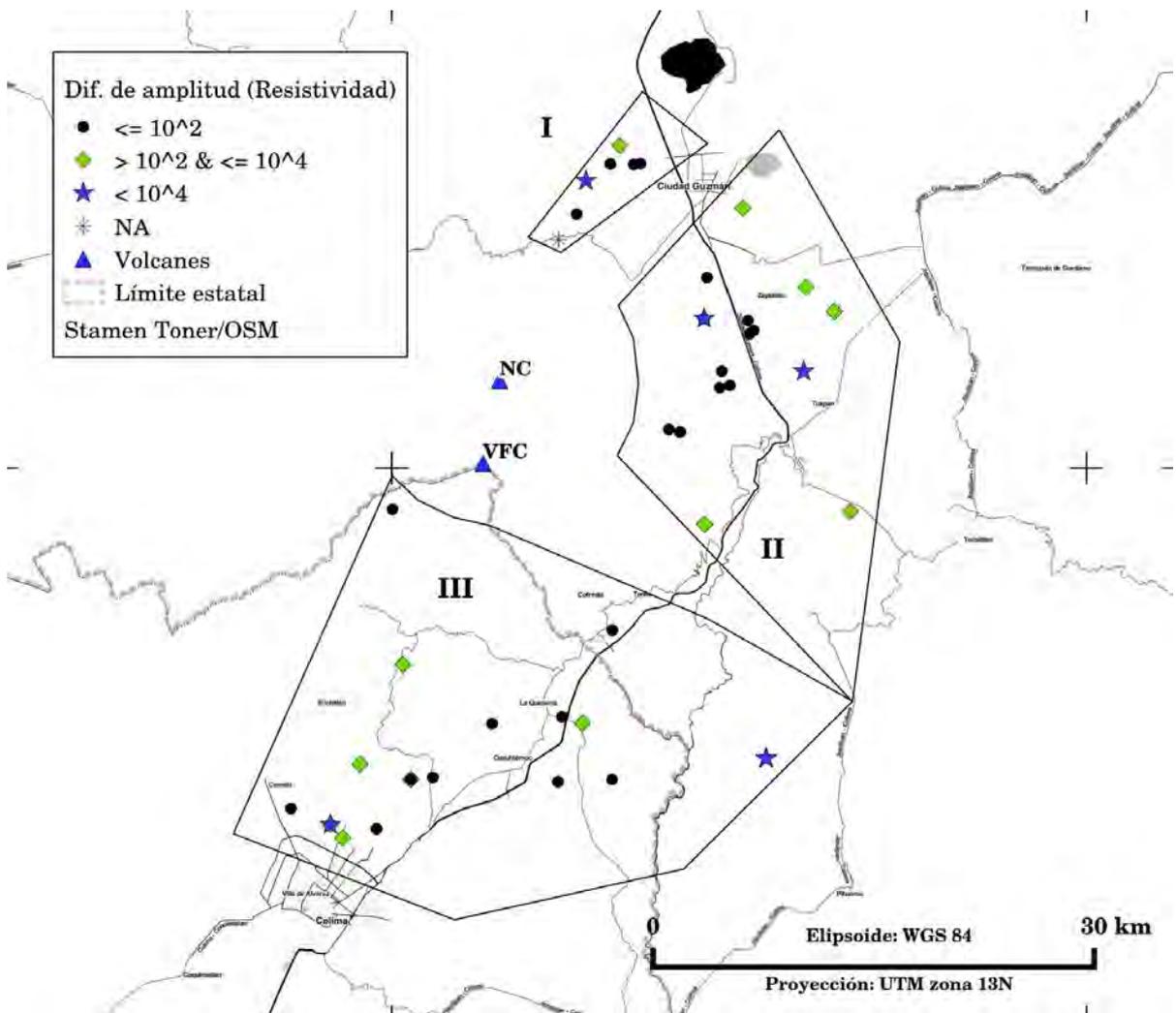


Figura 31: Mapa de clasificación del parámetro de resistividades en base al orden de variación de los datos

de magnitud de 1×10^2 y 1×10^4 . No se presenta tendencia radial alguna como en la amplitud del parámetro gamma, se tiene tendencias generales constantes en gamma y mayormente pendientes positivas intercaladas con sitios con pendiente igual a cero en sp.

Zona II En la zona **II** de igual forma se presenta mucha variación dentro de la zona, sin embargo se puede dividir en dos sub-zonas; una más cercana a los volcanes en la parte Oeste con registros de baja variabilidad en Res, con pendientes positivas en sp, tendencias generales constantes y amplitudes medias y bajas al centro. La otra sub-zona se encuentra en el extremo Este con variaciones de amplitudes medias, sin pendientes y con pendientes negativas en sp, con tendencias generales variables y con amplitudes medias y bajas en gamma.

Zona III En la zona **III** se observa en su mayoría sitios clasificados con variaciones bajas concentrados en la parte central los cuales tienen pendientes iguales y menores a cero, tendencias variables y amplitudes medias en gamma. Se denota un alineamiento con un azimut de aproximadamente 200° con respecto al Norte geográfico de pozos con amplitudes medias, pendientes iguales a cero en SP, tendencias constantes y amplitudes medias en gamma. También se tienen registros con altas variaciones en amplitud en los extremos este y oeste de registros con gran variación, con pendientes iguales a cero y negativas, con tendencia generales variables y grandes amplitudes en gamma.

El mapa de clases perteneciente al parámetro de resistividad en donde se agrupa por la magnitud del cambio o la amplitud presenta mucha variación en todas las zonas predominando en todas los cambios en amplitudes menores a 10^2 aunque no representan ni siguen patrones espaciales aparentemente se tiene sustento para proponer fronteras entre unidades a los sitios con amplitudes grandes (mayores a 10^4) y las respuestas medias (menores a 10^4 y mayores a 10^2) y bajas (menores a 10^2) se pueden atribuir a cambios de porosidades tanto primarias como secundarias (fracturas y/o fallas) y otras afectaciones como la resistividad del lodo de perforación, la alcalinidad del fluido que satura el medio rocoso, a etc.

Como resultado del procedimiento empleado para la descripción general de los RG, se generó la Tabla 3, la cual muestra un resumen de las clasificaciones de los tres parámetros analizados en base a las tres zonas acotadas y a las unidades geológicas descritas por Cortéz et al. en 2005. En la tabla se puede observar la similitud entre las respuestas en las tres zonas por lo que se complica la tarea para la discriminación de unidades y materiales pero nos brinda una buena perspectiva de la distribución espacial y distintas respuestas de los registros geofísicos. No olvidemos que la clasificación esta hecha en tendencias generales y comportamientos promedio de las variables, lo que nos sirve como primera aproximación sin embargo se observan algunos patrones en los registros que requieren un análisis a mayor detalle, el cual se efectuó con los gráficos vectoriales para mayor calidad en la observaciones.

En la Tabla 3 se muestra el resumen de las clasificaciones de los tres parámetros analizados en base a las tres zonas acotadas y a las unidades geológicas en donde se observa que las respuestas de los materiales que se encuentran en cada unidad geológica son muy semejantes entre sí, por lo que no es posible discriminar unidades como tal, por ejemplo en el parámetro gamma en las tres sub-zonas predominan las amplitudes medias y pendientes constantes, en el parámetro sp en la parte norte del

Tabla 3: Resumen de procedimiento de clasificación multiparamétrica por unidad geológica en la zonas de interés

<i>Unidad Geológica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Gamma</i>		<i>SP</i>	<i>Res</i>
Zona I		<i>Amplitud</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Amplitud</i>
	Mat. de caída aérea, Epiclásticos, Lavas, Flujos Piroclásticos, Mat. de caída aérea	MediaAlta Media*	Cte Cte*	(+) 2 (0) (+)* Cte	Baja 1 med y 1 alt Baja
Zona II					
	Roca ígnea extrusiva, Vulcanismo alcalino, Flujos piroclásticos, Mat. de caída aérea, Lahares, Fluvio lacustres, Mat. de caída aérea	Media baja Media Baja media Media Media	Cte Var Cte 1v Cte Var	(+) (+) (+)1(-) (+) 0 1 (-)	Alta Baja Baja 1 alta Media Media
Zona III					
	Avalanchas volcanicas, Calizas Masivas	Medias Altas	Cte 3 var Var	(+)3(-) 0 1 (-)	Med 3 bajas Alta

área de interés se tienen pendientes negativas y en la parte sur se tienen tendencias más constantes, y en el parámetro de resistividad se tiene gran variación por lo que no se puede relacionar directamente cada zona con algún tipo de respuesta arrojada por el registro.

RG en unidades geológicas del CVC

En el presente capítulo se pretende obtener una firma geofísica de las unidades geológicas que registra la literatura. La detección de firmas se genera en función de la referencia a un análisis multivariable que se efectúa sobre los RG con la finalidad de obtener patrones y/o tendencias de comportamiento por unidades geológicas y que ayuden en la correlación con otros registros aledaños. Se asignaron pozos para el control espacial de las unidades geológicas se realizó en base a la fidelidad espacial la cual será descrita a continuación.

Asignación de pozos de control

El proceso de identificación de sitios de control sirvió en la interpretación debido a que permite analizar si el valor registrado se encuentra dentro del margen promedio de los sitios que su localización no esta comprometida. Factor de importancia el cual se considera a la hora de interpretar los registros en la componente horizontal debido a que facilita la posible depreciación de sitios con lecturas anómalas y fuera de los promedios registrados en cada zona.

Como resultado del procedimiento se describen los gráficos de los pozos de control con la finalidad de buscar patrones de comportamientos en los datos. La comparación de respuestas con los pozos de validación en una misma unidad se realiza en el trazo o correlación de perfiles. El orden para la descripción de las distintas

firmas de cada unidad geológica se realiza en sentido de las manecillas del reloj y con forme a la localización de los registros en las unidades geológicas.

Los comportamientos y las observaciones específicas se harán con forme a los tres parámetros seleccionados anteriormente; gamma natural, SP y resistividad puntual, debido a como se menciona anteriormente, puesto que son los mejores exponentes cuantitativos de propiedades directas del material del subsuelo como del contenido mineral, de la diferencia de potencial natural entre capas y la resistividad eléctrica de cada unidad geológica por lo que se pueden depreciar las contribuciones ajenas al medio rocoso.

En la Figura 32 se muestra el área de interés junto con el compilado de los 63 registros agrupados como pozos de control, pozos de validación y pozos estándar. Los pozos de control se etiquetan con el folio de identificación de lado derecho así como se identifica la unidad geológica en la que se encuentra. En las cercanías de la ciudad de Colima se denota es un claro agrupamiento de sitios comprometidos en su localización en la parte S a 27 km del VFC. Se muestra un par del lado E a 5 km y otros dos más en la misma dirección a distancias de 27 km con respecto a NC.

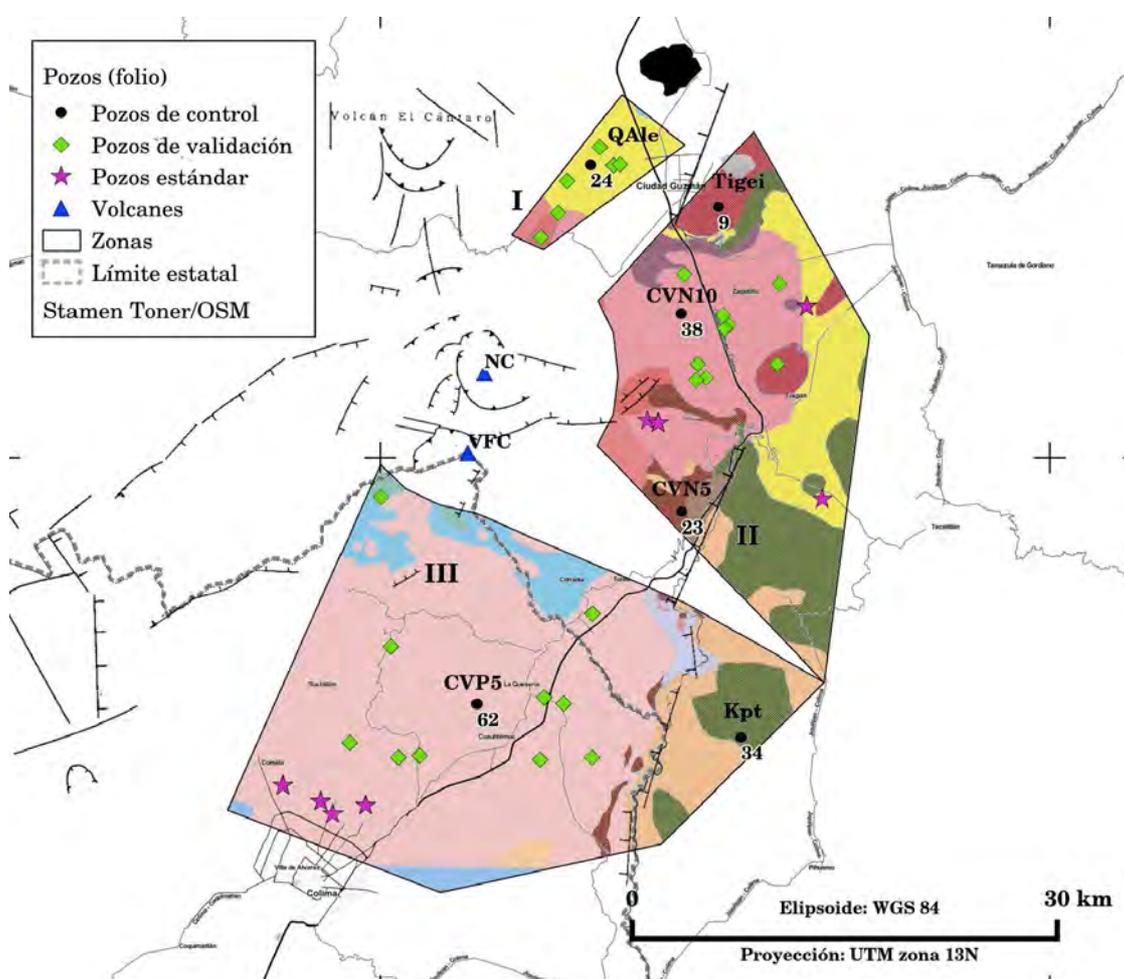


Figura 32: Mapa del área de interés que muestra la distribución espacial de la agrupación de pozos en tres clases referentes al nivel de certeza en la localización de los pozos. Las tres clases son; pozos de control, pozos de validación y pozos estándar.

El método para analizar las respuestas de registros en sitios con ubicación com-

prometida como los que cae en la unidades identificada como **tigei**-Rocas ígneas extrusivas no identificadas ubicada en la parte NE de los volcanes a una distancia aproximada de 30 km, **CVN6**- Lavas y **VA4**-Vulcanismo alcalino. En el pozo de control **f9** Se identifico en un tramo de 60 m ubicado en 1340-1400, a 350 m de profundidad de la superficie. En el pozo de validación para las rocas ígneas ya sean lavas o sean extrusivos se considera una respuesta similar debido a que la mayor parte del contenido de la matriz es prácticamente el mismo con algunas diferencias debido a el proceso de depositación de cada uno. En esta unidad se espera material ígneo extrusivo enfriado rápidamente, fracturado, con buena porosidad y con conductividad considerable, puede ser por caída o por escurrimiento. La diferencia principal se debe efectos secundarios del enfriamiento rápido y la colisión con la superficie. En los registros hechos en esta unidad se espera observar una porosidad semi-constante, con pequeños cristales, un contenido mineral semi-constante y algo de permeabilidad. Debido a la poca cantidad de metros del registro se opta a dejarlo de lado temporalmente hasta identificar algunas unidades en sus alrededores y así como confirmar si es posible algún contacto entre unidades grandes o si solamente se encuentra dentro de una sola unidad geológica.

Se consideran amenos seis unidades geológicas en el área de interés, las cuales cuentan con localización certera y se espera sean despreciables entre sí, estas son: 1) rocas ígneas extrusivas, 2) material de caída y epiclástos, 3) flujos piroclásticos, 4) lahares, 5) avalanchas volcánicas y 6) calizas masivas. En cada una de dichas unidades se tiene cuando menos un pozo de control, esto es una muestra con ubicación confiable y fuera de los límites de las unidades que describe Cortés et. al, (2005), con la seguridad de obtener una muestra de cada unidad amenos de la parte más superficial. La muestra sirve para identificar anomalías típicas de la unidad. Estas firmas se correlacionan con los sitios que tienen ubicación certera pero se encuentran cerca de alguna frontera de unidades geológicas sirviendo para delimitar la delimitación espacial de cada unidad. Este grupo de pozos los identificaremos como sitios o pozos de validación. Y por ultimo identificamos a los pozos entandar los que cuentan con una ubicación comprometida pero para fines del presente estudio el cual nos ayudaron para el entendimiento en la horizontal en una escala regional.

Zona I

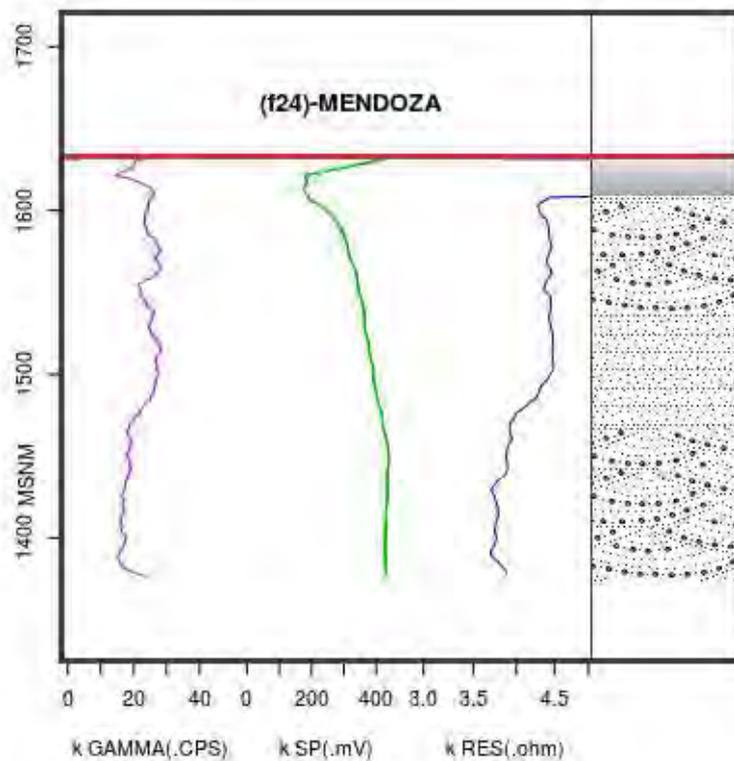
En la unidad geológica **QAle**- Material de caída aérea y epiclástos, se tienen un total de 11 registros en 7 pozos y en donde la máxima profundidad que se registra es hasta los 350 m, sin embargo el promedio de profundidad es 225 m. La altitud máxima y mínima son 1702 y 1401 respectivamente y el promedio esta en los 1570 msnm.

En la unidad ubicada en ciudad Guzmán en la parte norte de los volcanes se cuenta con el pozo de control es el registro "f24" situado en la parte central de la unidad y llega a la máxima profundidad de 250 m, la superficie del terreno se encuentra a un altitud de 1620 msnm.

En la Figura 33, se muestran las curvas de los parámetros de gamma, potencial espontáneo y resistividades puntual pertenecientes al registro con folio 24 llamado Mendoza. En curva gamma se pueden distinguir claramente dos respuestas diferentes en términos generales. La primera unidad o bloque de respuestas se ubica en la parte

más superficial con una profundidad máxima de 150 m, con longitudes de onda de 50 m y un promedio general de 24 cps, la segunda parte del registro en los 1500 msnm con promedio en 15 cps y con longitudes de onda de 10 m. En la curva de potencial espontáneo, se observa una tendencia general positiva; con crecimiento con respecto a la profundidad hasta los 1460 msnm con valores ascendentes que van desde 150 hasta casi 500 mV. Una vez pasando 160 m de profundidad se estabiliza en 450 mV, incluso aumentando la escala se nota una pendiente negativa. La altitud donde se presenta la deflexión es muy semejante a la registrada en el parámetro gamma con una diferencia de 10 m. En la resistividad puntual se denotan comportamientos semi-estables en pendiente, con magnitud promedio en el orden de $10^9 \text{ohm} - m$, con algunas ondulaciones coincidentes con bajos en gamma y pendientes iguales a cero en SP en altitudes de 1550 y 1560.

Pasando los 150 m de profundidad disminuye la magnitud a valores menores a 10^8 , donde las amplitudes y las longitudes de onda decrecen a ordenes de metros y decenas de metros respectivamente. Restado los dos bajos (valles) ubicados 1420 y 1340 msnm coincidentes con altos del parámetro gamma, con pendientes negativas en SP.



(a) Gamma

Figura 33: Firma de los parámetros gamma, SP y resistividad puntual en la unidad geológica: **QAlc (f24)- Pozo de control**

En esta unidad se muestra un material de grano fino y muy fino, mucha cantidad de arcillas y laminado en capas. Para la identificación de esta unidad se espera medir altos niveles de gamma debido a la cantidad de arcillas pero al mismo tiempo bajo debido el material menos denso que contiene, altos debido al contenido de mineral retrabajado, en sp se espera que sea muy constante o con pendiente igual a cero

una vez que alcance su estabilidad iónica de las zonas permeables y en resistencia puntual se distinguen bajos en resistividad la cual se atribuye a varios factores como a los clastos de material con mayor densidad y matriz arcillosa que elevan la conductividad del medio.

Zona II - DFP y DC

En la unidad geológica CVN10- Flujos piroclásticos y material de caída aérea, se tienen un total de 14 registros en 10 pozos y en donde la máxima profundidad que se registra es hasta los 502 m, sin embargo el promedio de profundidad es 360 m. La altitud máxima y mínima son 1561 y 1284 respectivamente teniendo como promedio 1448 msnm.

Unidad esta localizada dentro de la zona II y cuenta con información de aproximadamente 350 m de profundidad con una altitud de 1510 msnm. En la Figura 34, en el gráfico del pozo de control f38. En el se muestra el parámetro gamma, se distinguen tres respuestas con diferentes promedios (60, 50 y 35 cps). En términos generales se puede decir que son dos bloques de respuesta diferenciales; la primera va desde la superficie hasta los 300 m de profundidad llegando a la altitud de 1220 msnm con valores que oscilan de 40 a 65 cps un amplio margen con amplitudes de aproximadamente 10 unidades y longitudes de onda muy cortas de decenas de metros, y la segunda respuesta con valores medidos entre 35 y 40 cps, abarca los próximos 110 metros llegando a los 1120 msnm.

En el parámetro sp se observa una tendencia general al aumento con respecto a la profundidad hasta los 330 m llegando a los 1220 msnm, con valores que van desde los -100 a 0 mV. En la misma unidad se logran distinguir picos máximos en 1420, 1380 y 1230 msnm con amplitudes de 3 mV y longitudes de onda de decenas de metros. En la altitud de 1250 msnm se estabiliza, incluso se distingue una pendiente negativa que llega hasta los 200 mV.

En la resistividad se nota bloque de respuestas con un claro límite de medición en 10^{13} para el parámetro de resistividad puntual, en las demás curvas se alcanzan a distinguir tendencias generales constantes con una leve tendencia a disminuir característica que se pierde en después del filtrado por lo que refiere a respuestas de frecuencias muy altas las cuales se eliminan o atenúan. A mayor escala se presenta un patrón de menor a menor magnitud que comienza con la resistividad lateral (negro), resistividad a 16", a 64" y de mayor magnitud la resistividad puntual, comportamiento que se presenta hasta los 1210 msnm. Después de esta profundidad el registro de resistividad tiene a ser muy estable en valores menores a 10^8 en 100 m más de profundidad. El orden de magnitud de los parámetros de resistividad cambia comenzando en magnitudes menores con resistividad puntual seguida por la resistividad lateral, resistividad a 16" y por ultimo a 64".

En el registro se relaciona en su parte mas superficial hasta los 300 m de profundidad a una unidad que consta de depósitos de flujos piroclásticos reflejada en las grandes amplitudes y periodos cortos que no sobrepasan los 20 metros de espesor. En la parte mas baja se distinguen mediciones dentro de los promedios medidos en los depósitos de caída de Ciudad Guzmán. De acuerdo a observaciones hechas en el primer procesamiento se distinguen en la medición de resistividad con menos aporte

de líquido infiltrado o sea el parámetro Lateral registra la menor resistividad luego le sigue la medida en la zona saturada, la zona de transición y la más resistiva es la medida de forma puntual.

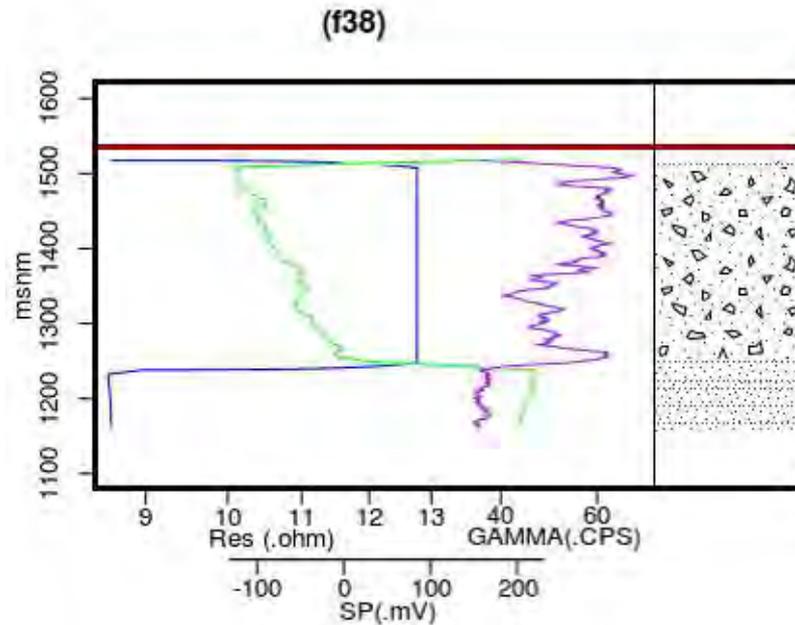


Figura 34: Firma Unidad Geológica: **CVN10 (f38)**

En los pozos de validación para la unidad **CVN10**, específicamente en los registros del parámetro **Gamma**, los gráficos muestran tendencias generales demasiado estables con promedios en 38 cps, con oscilaciones periódicas con amplitudes menores a 5 cps y longitudes de onda de metros. Los comportamientos de manera general son muy similares con las tendencias mayormente constantes y algunos picos bajos distribuidos de una manera periódica. En los gráficos del parámetro SP se distinguen pendientes positivas en la mayor parte del pozo, pero aumentando la escala se logra distinguir una relación en algunos picos con el parámetro gamma; en el pico bajo de gamma ubicado en la altitud se relaciona con altos en sp y bajos en resistividad. En los gráficos de las resistividades no se encuentra algún otro límite de medición, pero se conserva el patrón de resistividad (Res, Lat, Res 16" y Res 64"). Se muestran comportamientos muy similares a los pozos de control, en la mayor parte del registro con tendencias generales constantes y con picos bajos distribuidos de forma periódica a lo largo de la componente vertical. Coinciden picos bajos en gamma y resistividades con altos, en tendencias constantes de SP se muestran aumentos en gamma y resistividad.

En esta unidad se espera material de distintos espesores de grano desde cenizas hasta clastos grandes y el tamaño depende de la distancia recorrida y por supuesto por la acción de la gravedad. La depositación ocurre de manera decreciente de energía por lo que los clastos más grandes caen más rápidamente acomodándose en las partes más profundas. Debido a las capas de grano pequeño depositadas en las partes concluyentes a los eventos volcánicos se espera algunas capas semi-impermeables con visibles anomalías periódicas en el parámetro sp.

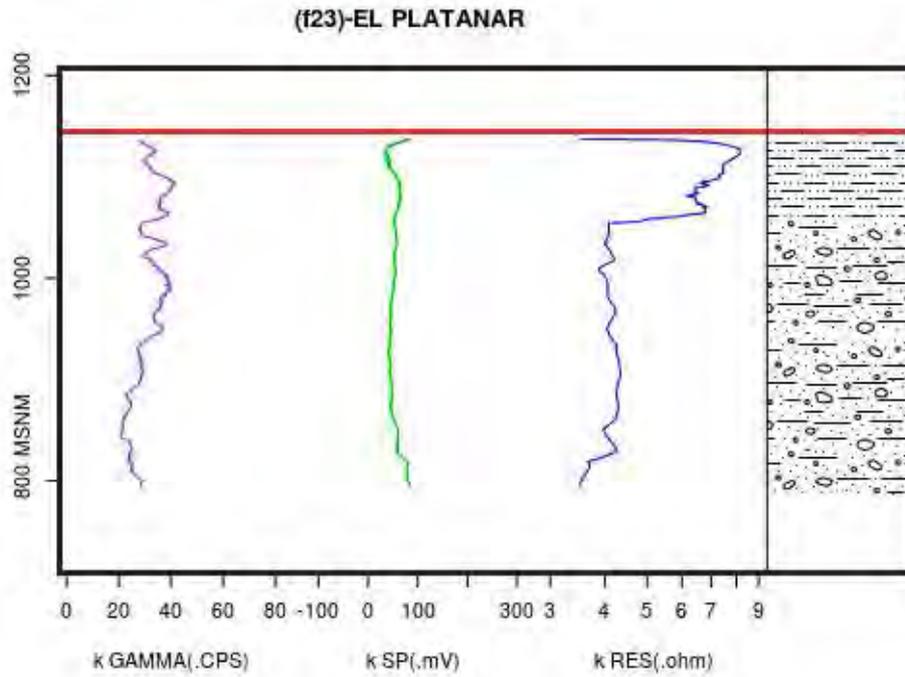
Zona II- Lahares, fluviales y fluviolacustres / DFP

En la unidad geológica CVN5- Lahares, fluviales y fluviolacustres / DFP se tienen un total de 2 registros pertenecientes a un pozo y en donde la máxima profundidad que se registra es hasta los 252 metros correspondientes a una altitud de 1143. En la unidad esta ubicada a una distancia de 10 km respecto a los volcanes y cuenta con información de 250 m aproximadamente comenzando en la superficie con una altitud de 1150 msnm. En la Figura 35, en el parámetro gamma se diferencian dos unidades grandes. La primera unidad alcanza un poco más de 200 m con respecto a la superficie del terreno, presenta mucha variación en valores gamma y el promedio en 35 cps. La segunda unidad continua con una media en los valores de 25 cps y oscilaciones que van desde 20 a 30 cps con una profundidad máxima de 150 m llegando a 800 msnm.

En el parámetro de potencial espontáneo se denota una tendencia general semi-constante en la primera unidad tiene pendiente negativa hasta los 200 m cambia a pendiente positiva. Observando la información a mayor detalle se pueden notar ondulaciones y distingue que cuando la curva de SP baja, baja resistividad y en mayor proporción gamma en la altitud 1090 msnm. Se distingue otro patrón en picos a 1030 msnm, los cuales tienen bajos niveles de radiación gamma, valores de diferencial potencial altos en SP y constante en res. En 1000 msnm se nota otro comportamiento donde aumenta gamma, SP aumenta y la resistividad disminuye un comportamiento típico de material arcilloso.

En las resistividades se distinguen dos bloques de respuesta distintos; el primero llega hasta los 90 m de profundidad con una magnitud promedio de 10^{11} ; el segundo bloque llega hasta la profundidad máxima del registro. Se presenta un comportamiento con variaciones en las amplitudes y las longitudes de onda de las curvas. Observando a más detalle el gráfico se distinguen en la altitud 820 msnm, picos bajos en gamma a 860 msnm, altitud en donde SP aumenta y la Res también decrece en un bajo (valle). De la misma manera mantienen relación inversa cuando gamma muestra un alto, SP muestra un bajo y las resistividades aumentan al igual que gamma.

En esta unidad se tienen materiales de depósitos piroclásticos removidos por agua proveniente de lluvias o derretimiento de nieve de zonas altas, generalmente contienen una buena aportación de estructuras sedimentarias (laminación, estratificación, dunas, etc.) por lo que se espera que la matriz sea fina en mayor proporción en comparado con los clastos.



(a) Gamma

Figura 35: Firma Unidad Geológica: CVN5 (f22)

Zona III- DAV

En la unidad geológica CVP5- Avalancha de escombros volcánicos se tienen un total de 28 registros en 15 pozos y en donde la máxima profundidad que se registra es hasta los 418 m, sin embargo el promedio de profundidad es 215 m. La altitud máxima y mínima son 1692 y 604 respectivamente y el promedio esta en los 894 msnm. En la unidad ubicada en la parte sur en la mayor parte de la zona III y cuenta con información de aproximadamente 300 m y se encuentra a una altura de 1100 msnm.

En la Figura 36, el parámetro Gamma se nota una tendencia general un tanto variable, con pendiente promedio positiva con dos mínimos en 120 m de profundidad a 980 msnm y en 220 m de profundidad a 880 msnm con valores en 15 cps, un máximo en los 40 cps a los 200m de profundidad en 900 msnm y promedio general en los 25 cps.

En el parámetro sp se distingue una tendencia general variante con pendiente negativa con respecto a la profundidad con valores negativos de 0 a -10 mV. Observando a mayor detalle se distinguen cuatro máximos las altitudes 1040, 980, 910, 860 msnm correspondientes a picos bajos o valles en los otros dos parámetros.

En la resistividad se nota una tendencia general semi-constante registrando tres picos de baja resistividad en 1040, 980 y 860 msnm con valores promedio de 10^8 ohms, intercalados de zonas muy estables en 10^9 ohms. Las curvas de resistividad se encuentran muy cercanas unas de otras, registrando con mayor conductividad en la medición puntual, después la lateral, siguiendo la medida en la zona saturada res(16) y dejando con mayor resistividad a la zona de transición res(64). Nótese que

cuando se presentan los picos de valores bajos se cortan las líneas, dejando como menos resistiva a la lateral, res(16), res puntual y por ultimo igual res(64).

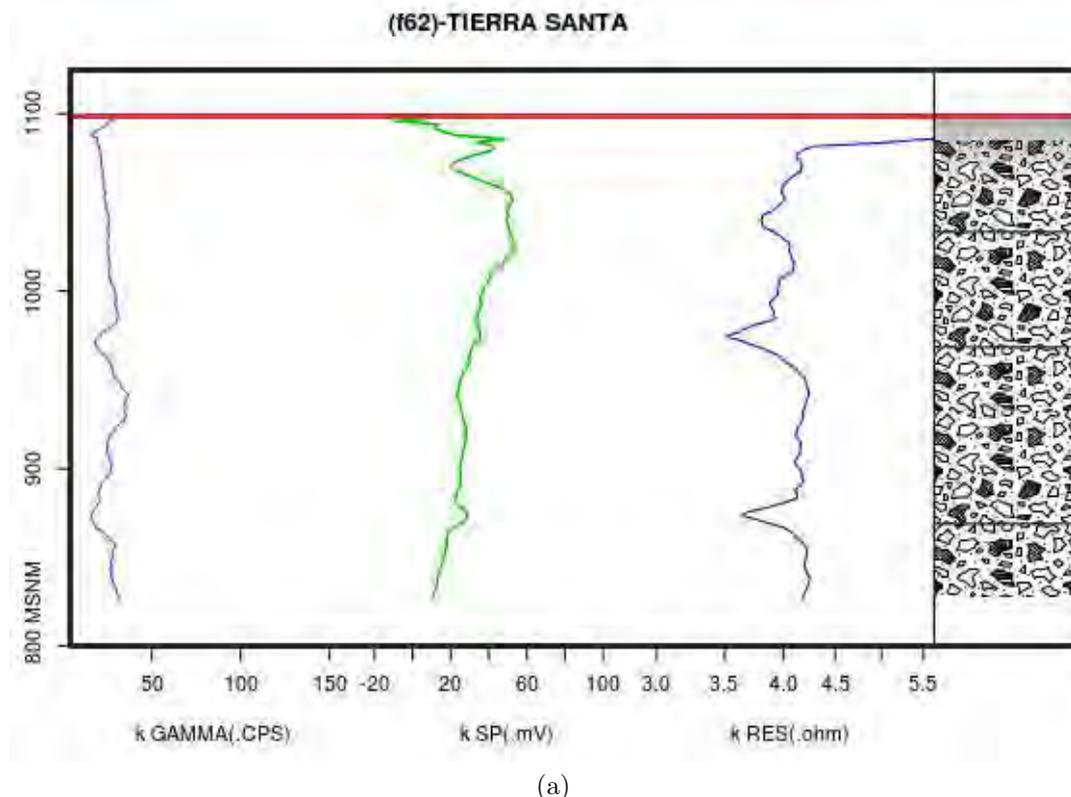


Figura 36: Firma Unidad Geológica: **CVP5 (f63)**

Se espera un material de composición muy semejante a los descritos como lahares, debidas al colapso o desgajamiento de algún sector del edificio con algunas estructuras muy particulares de rompecabezas, con menor cantidad de agua comparado con materiales fluviolacustres cuenta con mayor porcentaje de clastos o bloques y con poca matriz fina.

Zona III- Caliza masiva

En la unidad geológica Ktp- Caliza masiva se tienen un total de 2 registros pertenecientes a un pozo y en donde la máxima profundidad que se registra es hasta los 378 m correspondientes a una altitud de 1401. La unidad ubicada en el extremo SE del área de interés dentro de la zona **III** y cuenta con aproximadamente 200 m de información comenzando a una altitud de 810 msnm.

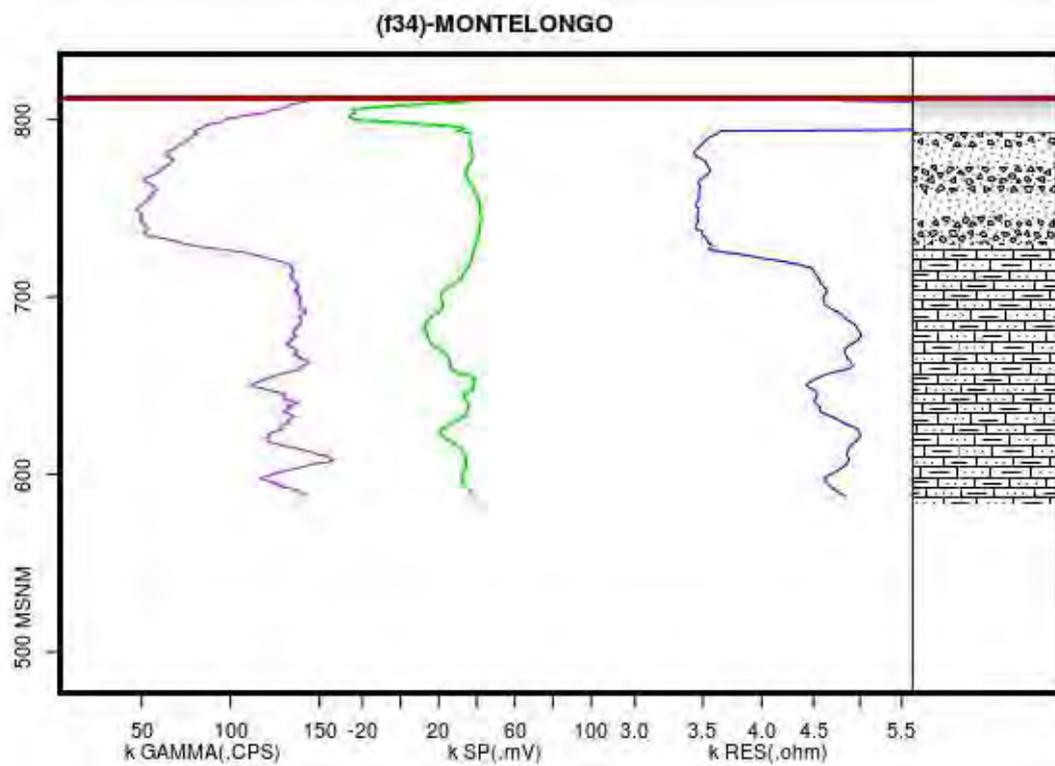
En la Figura 37, en el parámetro Gamma se observan dos respuestas de materiales muy diferentes, la primer respuesta partiendo desde la superficie hasta una profundidad de 80 m se registran respuestas en valores bajos en promedio de 65 cps. A partir de los 730 msnm se presenta una tendencia general semi-constante con variaciones de amplitud de 40 cps en los 650 y 600 msnm, con longitudes de onda de decenas de metros. En el parámetro de potencial natural se observa una tendencia variante con la profundidad de pendiente negativa, comenzando en los 100

y finalizando en los 40 mV. Dando la impresión de tener una relación inversa con el parámetro gamma; cuando gamma disminuye el SP parece alcanzar sus valores máximos y cuando gamma aumenta, SP disminuye aunque en menor proporción.

En la resistividad se denotan de igual forma que en gamma dos diferentes respuestas, coincidentes en la altitud del límite ubicado a 730 msnm. En la primera unidad se observa una tendencia general constante con pendiente promedio igual a cero, con valores promedio en 10^6 . En la segunda unidad se nota periodicidad con amplitudes de decenas de metros y longitudes de onda mayores a 80 m.

En la resistividad de arreglo lateral, después la resistividad en la zona saturada, siguiendo con la zona de transición y terminando como la más resistiva la medida de manera puntual todos los valores oscilan entre ordenes de magnitud de 10^3 y 10^4 . En los 780 msnm se presentan anomalías en las líneas aparentando crecimiento por menos de 10 metros y luego regresa al comportamiento normal en la primera unidad. En los 730 msnm se presenta punto donde se cruzan las curvas y posteriormente cambia a la segunda unidad con valores en ordenes de magnitud de 10^5 .

Se espera encontrar material de porosidad constante con posibilidad de fracturamiento, resistividades del orden de 1×10^3 , variable baja porosidad, el contenido de agua baja la resistividad en zonas fracturadas.



(a) Gamma

Figura 37: Firma Unidad Geológica: **Ktp (f34)**

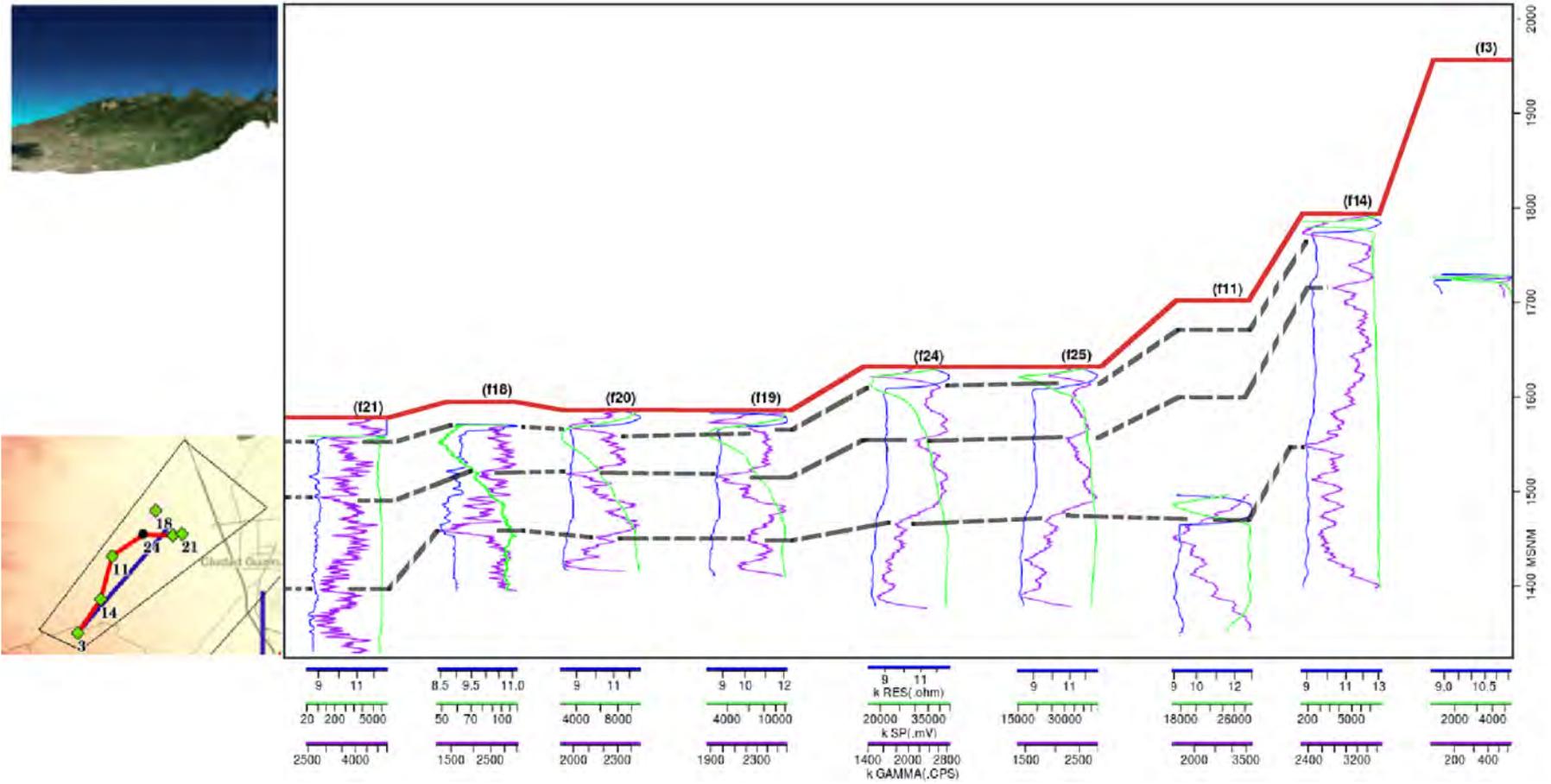
Una vez que se obtienen las firmas de gamma, sp y resistencia de cada unidad se procedió analizar las semejanzas entre los registros de los pozos de control en contra de los pozos de validación, esto mediante la correlación de los registros en el área de interés.

Correlación entre unidades principales

Se generaron perfiles para relacionar las respuestas en las tres zonas delimitadas dentro del área de interés. Se relacionan los patrones encontrados en cada unidad contra de los registros de sitios cercanos para lograr una buena perspectiva que ayude en la interpretación geológica.

En la Figura 38 se muestra el perfil de la zona I, cuenta con un azimut de 20° con respecto al N geográfico y tiene una distancia ideal de 8 km representada con la línea azul del mapa y la orientación de la vista es del SE hacia NW. La distancia real de los segmentos del perfil representado con la línea roja mide un total de 16.815 km. Se utilizan nueve registros para interpolación del subsuelo pero el las alto no se concidera debido a la poca información con la que cuenta. Con los ocho pozos restantes se realizo la correlación; cinco pozos de validación (f3, f14, f11, f25, f19, f20, f18 y f21) contra el pozo de control f-24 de la unidad **QAle**.

Se despliegan los registros del parámetro **Gamma** los gráficos muestran tendencias semi-constantes con variaciones periódicas y longitudes de onda de entre 50 y 70 m y con amplitudes promedio de 5 cps, valores y comportamiento muy semejante al observado en el pozo de control en donde sólo varia un poco la amplitud del registro. En las curvas del parámetro **SP** los sitios presentan tendencias con pendientes positivas hasta los 1400 msnm, respuesta con muy poca variación con respecto al pozo de control en donde cambia de pendiente positiva a semi-constante (cero) en los 1450 msnm. Las curvas de resistividad despliegan tendencias semi-constantes en valores con orden de magnitud de 10^9 , con variaciones periódicas de longitudes de onda de 70 metros y amplitudes menores a dos ordenes de magnitud. Los comportamientos con respecto a los pozos de control son muy semejantes y las altitudes de los bajos (valles) varían en decenas de metros. Se presenta un patrón en las resistividades que depende del sensor de la medición y de las distintas contribuciones externas o internas del medio. Se nombrarán de menor a mayor con respecto al orden de magnitud de cada unidad medida. La resistividad puntual, resistividad lateral, resistividad normal a $16''$, resistividad normal a $64''$, las cuales hacen referencia a la resistencia del medio rocoso, la zona no invadida (sin influencias del lodo de perforación), la zona de transición y la zona lavada o invadida respectivamente.



(a)

Figura 38: Perfiles geofísicos de pozos de control correlacionados con pozos incluyendo de validación.

Perspectiva horizontal en 2D y en 3D

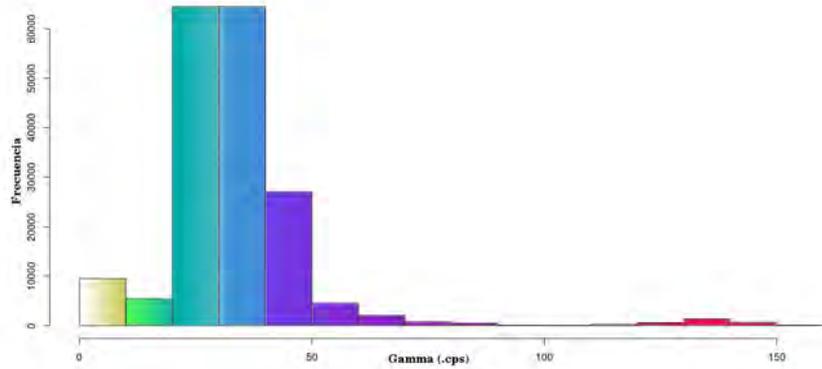
Se generaron mapas raster aplicando la interpolación de superficie utilizando aproximación numérica de promedio ponderado del cuadrado de la distancia inversa entre puntos, algoritmo identificado como Inverse Distance Squared Weighting (**idw**), en los 40 sitios con registros hasta los 250 metros profundidad para los parámetros gamma, sp y resistencia.

Se diseñaron las tablas de colores en base a la distribución de valores en el histograma de todos los registros almacenados en la base de datos con la finalidad de poder apreciar de una manera nítida los valores con mayores frecuencias de cada parámetro dentro de la base de datos.

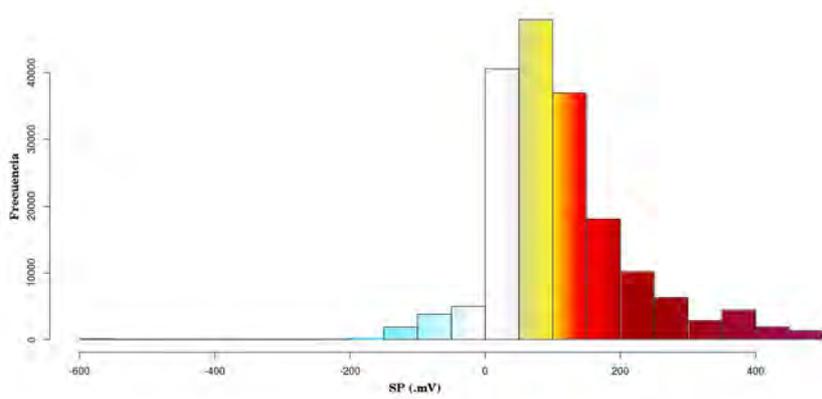
En la figura 31 se muestra la relación entre la tabla de colores y cada unidad general.

Mapas de gamma natural

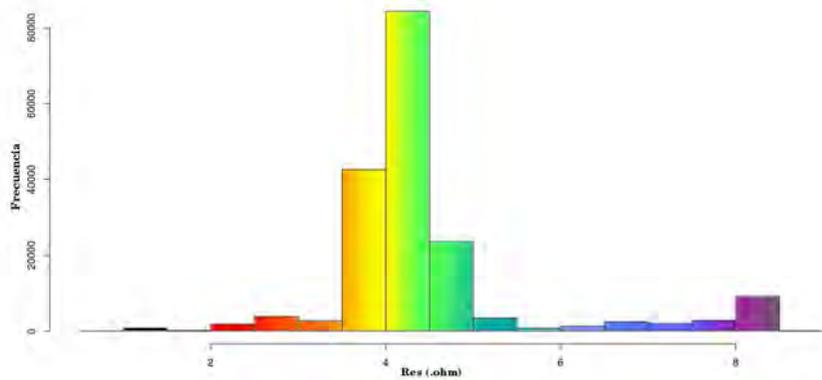
En la Figura 40 se muestra una colección de mapas raster generados de valores filtrados con pasa bajas del parámetro "gamma" en varias profundidades que van desde los 30 hasta los 240 metros bajo la superficie. La tabla de color situada del lado izquierdo de cada mapa representa valores múltiplos de las cantidades en (.cps) de los registrados con el sensor originalmente por lo que la integridad de las tendencias del gráfico no son comprometidas. De acuerdo a los mapas interpolados a partir de los valores filtrados del parámetro "gamma" se observa una tendencia que consideraremos normal en zonas de color azulado con valores 3500 unidades aproximadamente debido a que son grandes extensiones con valores similares y que conforme se avanza en la profundidad tienden a expandir su área y a contraerse, pero siempre dejando un remanente de color azulado. Se distingue una pequeña zona muy estable yendo hacia el extremo Sur del área de interés con valores gamma muy bajos reflejados con colores rojos o cobre. Por el contrario se observan valores de gamma muy altos en el extremo Sur-Este del área de interés datos apoyados sólo en un sitio sin embargo su contribución espacial es extensa. En la zona **I** se registra una variación con valores que vienen con dirección NE desde los volcanes con valores bajos que van de colores desde cobre o rojizo hacia colores en tonos verdes, variaciones del orden de 1×10^3 . En la zona **II** se observa buena actividad, variaciones de colores que van desde verde hasta color violeta con valores aproximados de entre 2000 a 8000 unidades. Donde la predominancia en valores esta por los 3500 reflejados en color azulado con tonos violetas. En la zona **III** se observa de igual forma buena actividad la cual oscila en casi los mismos valores que en la zona **II** entre 2000 y 7000 unidades de colores verdes a azules con tonos violetas. Dentro de la zona se identifica una micro-zona en la parte sur con valores apenas de 0 a 2000 unidades apoyados en 3 sitios.



(a) Gamma



(b) SP



(c) Res

Figura 39: Histogramas de los raster de información generada apartir de los mapas interpolados a diferentes profundidades dentro del área de interés.

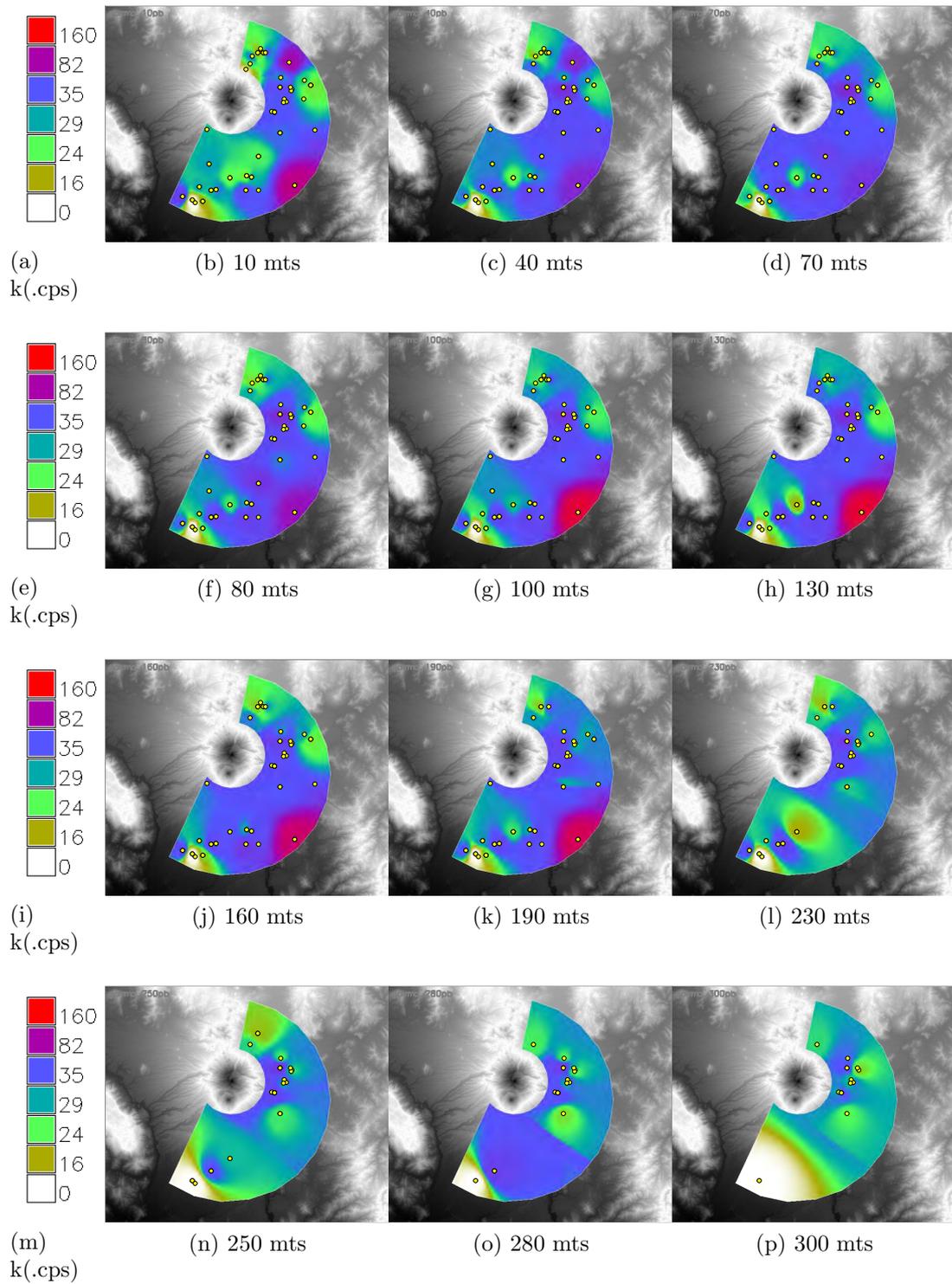


Figura 40: Mapas "gamma" filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie

Mapas de potencial espontáneo

En la Figura 41, se muestran los mapas raster generados del parámetro SP a varias profundidades que van desde los 30 hasta los 240 metros bajo la superficie. La tabla de color situada del lado izquierdo de cada mapa representa valores múltiples de las cantidades en (.mV) de los registrados con el sensor originalmente por lo que la integridad de las tendencias del gráfico no son comprometidas. De acuerdo a los mapas interpolados con valores filtrados del parámetro de potencial natural se observa en la mayor parte de los mapas dos zonas la primera zona ubicada desde la parte central hacia la parte Norte del área de interés, con valores positivos del orden de 1×10^3 reflejados en el mapa con colores violetas y rosas. La segunda zona ubicada de igual forma a partir de la parte central del área de interés hacia la parte Sur con valores negativos con ordenes de magnitud de 1×10^4 reflejados en los mapas con colores rojos hasta el color verde pertenecientes a valores cercanos al cero. En la zona **I** se logra diferenciar una zona de altos con colores rojos y variaciones de 1×10^3 . Partiendo de la superficie con variaciones significativas desde valores negativos y cercanos a cero en sitios distantes con 10km del volcán hasta 22mil unidades aproximadamente en partes más alejadas, valores que conforme se avanza en la profundidad tiende aumentar hasta 50mil unidades. En la zona identificada como **II** en el extremo NW se observa una micro-zona casi constante en profundidad con valores negativos cercanos a cero con colores blancos y verdes, respaldada en aproximadamente 5 sitios. Hacia el este de la zona **II** partiendo desde la superficie se tienen colores azules oscuros pertenecientes a valores negativos muy grandes de -60×10^3 unidades, sin embargo con forme se avanza en la profundidad van aumentando hasta llegar a los 50×10^3 unidades representados en el mapa en colores rojos oscuros. La mayor predominancia de color en esta sub-zona son los tonos azules verdoso que representa los valores positivos cercanos a cero. La zona **III** es muy interesante aunque no presenta los colores pertenecientes a los valores máximos, se muestra una buena variación entre valores cercanos al cero. En los primeros metros de profundidad las variaciones van de colores verdes a blancos en el extremo SW de la sub-zona y avanzando 5km hacia el este se observa un aumento de valores a colores violeta, los 5km posteriores con el mismo rumbo se presentan valores de cero en colores blancos, avanzando otros 5km regresan los colores violeta y hasta el extremo SE del área de interés regresan los valores de cero, lo que resulta en una muy buena variación a lo largo de un perfil con una distancia radial constante con centro en volcán NC.

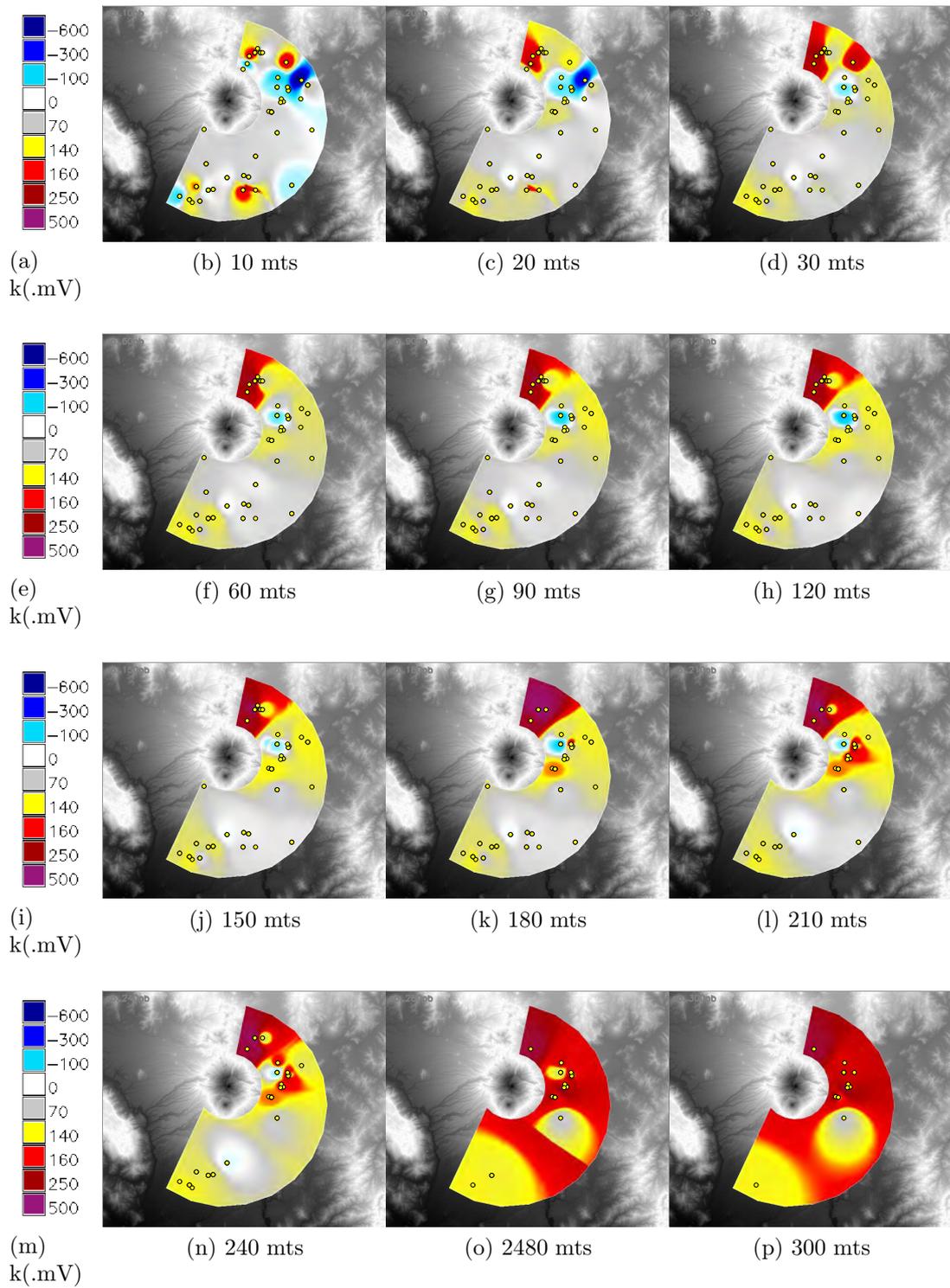


Figura 41: Mapas "sp" filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie

Mapas de resistividad puntual

En la Figura 42 se muestra la colección de mapas raster generados a partir de datos filtrados con pasa bajas del parámetro "res" a varias profundidades que van desde los 30 hasta los 240 metros bajo la superficie. La tabla de color situada del lado izquierdo de cada mapa representa valores múltiples de las cantidades en (ohm-m) de los registrados con el sensor originalmente por lo que la integridad de las tendencias del gráfico no son comprometidas. De acuerdo a los mapas interpolados con valores filtrados del parámetro "res" se observan de igual manera que en los pasados registros de resistividad en los primeros 10 metros altos valores reflejados en colores violetas y azules, pasando dicha profundidad se logra pasan decenas de metros con colores en transiciones de azul a verde y amarillo hasta llegar al color rojo perteneciente a los valores más bajos. Se denota una zona con colores rojos en la parte Sur del área de interés en profundidades mayores de 60 mts. En la zona **I** se observa gran constancia con leves variaciones en colores rojizos, exceptuando claro a los primeros 30 mts de profundidad en donde las variaciones de valores van desde los valores más altos a los valores más bajos. Una vez pasando dicha profundidad los datos se estabilizan en valores bajos. En la zona identificada como **II** se observa en la parte NW de dicha sub-zona valores algo constantes en tonos azules y violetas en partes más cercanas al volcán Nevado de Colima mientras que conforme se avanza hacia el SE se observa un decrecimiento en los valores con tonos de verde, amarillo e incluso rojo. La zona **III** presenta gran variación en la mitad inferior del rango de valores oscilando en los primeros 30 metros de profundidad, pasando los 40 metros se estabilizan los colores a rojos con valores de 2000 a 7000 k(ohms).

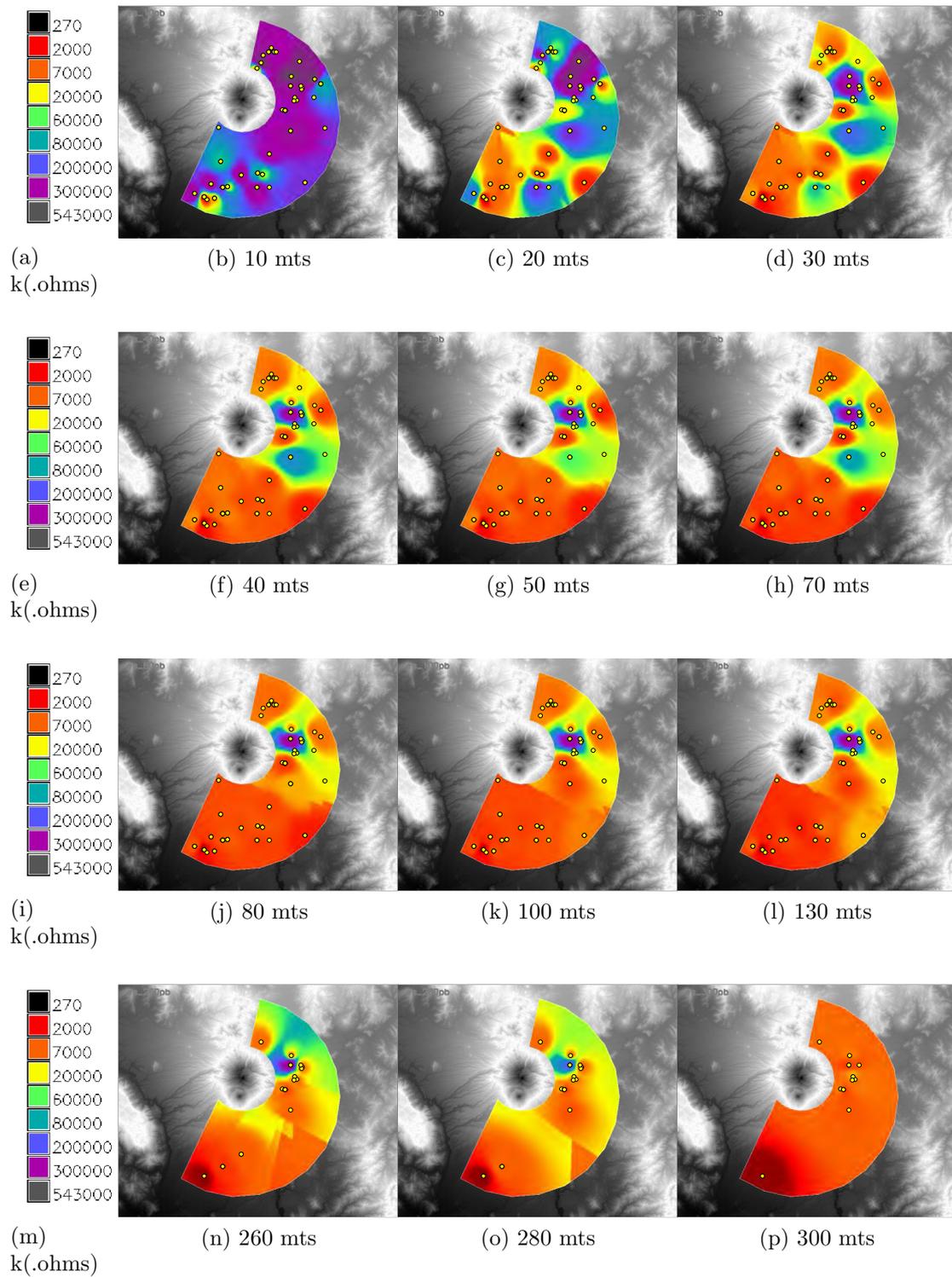


Figura 42: Mapas "res" filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie

Identificación de unidades principales

Para resaltar características del subsuelo se utilizó la técnica conocida como álgebra de mapas. Se decidió aplicar esta técnica debido a la facilidad de empleo y aplicación a las capas raster ya generadas a partir de la interpolación de los sitios de muestra. En la mayor parte de unidades son difíciles de discriminar con un sólo parámetro tal como se observa en la Tabla 8 se utilizó la calculadora raster en donde se creó una función tomando en cuenta la proporcionalidad que existe entre los parámetros (γ , sp y res) y con base a la medición física del terreno. Con dicha función de proporcionalidad se espera que aumenten los valores res y γ en su relación un tanto proporcional. Se espera atenuar y resaltar con diferentes tonalidades los límites entre ellas debido a la propiedad de balance iónico del parámetro sp como se muestra en la Figura 43.

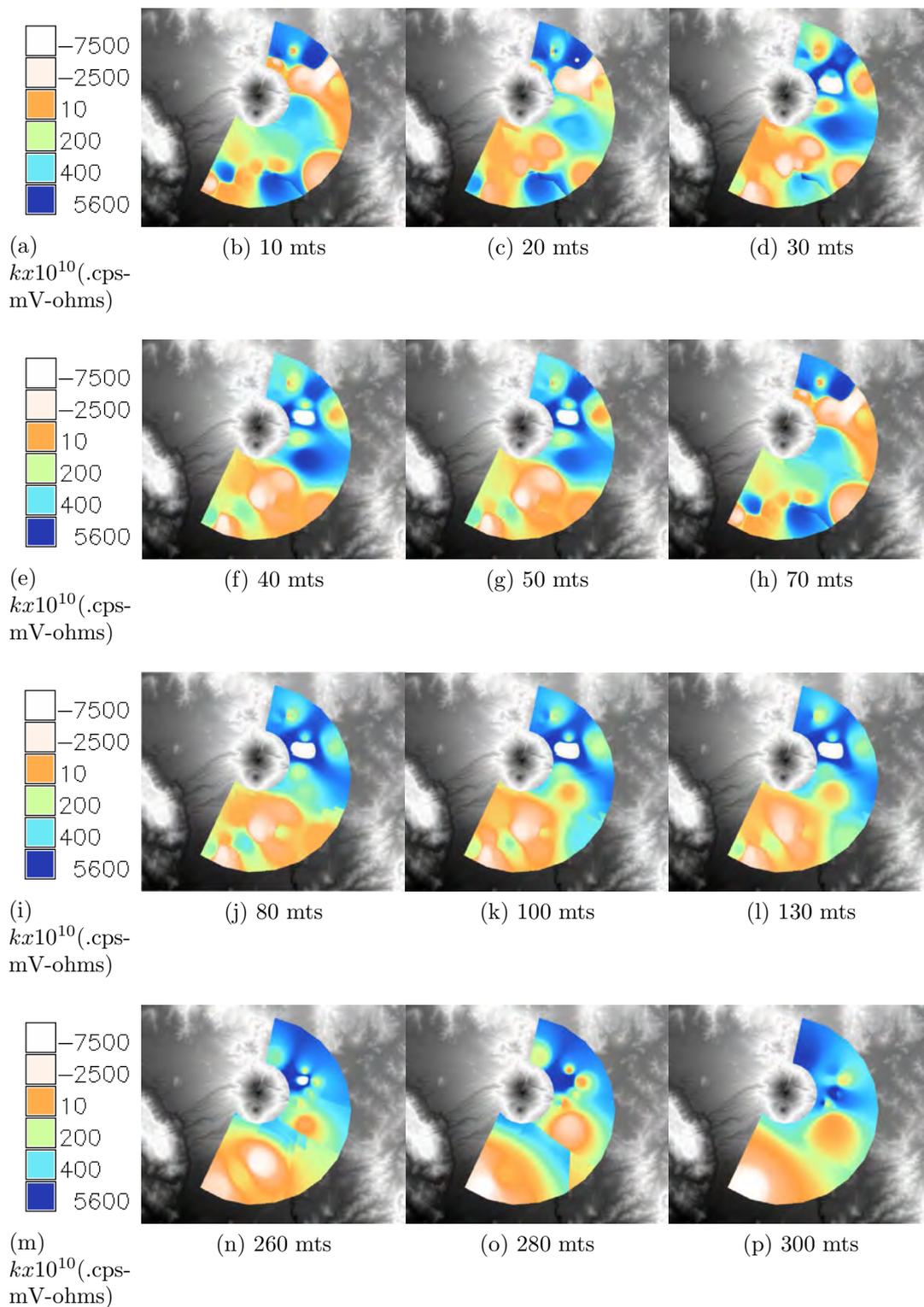


Figura 43: Mapas resultantes del cálculo de mapas apartir de los raster interpolados de los datos filtrados con PBajas a distintas profundidades en metros de la superficie

El software GRASS GIS proporciona herramientas adecuadas para la visualización en 3D aunque el nivel de detalle es muy pobre. La Figura 44 muestra el modelado en 2.5D debido a que son superficies superpuestas a diferentes altitudes generadas en el software GRASS GIS. Las superficies se hacen a cada 10 metros.

En b), c) y d) se distinguen tres perfiles de corte del área de interés en donde se puede observar que se existen dos dominios predominantes con algunas variaciones dentro de ellas atribuidas a la gradación y/o caoticidad que se espere tener en cada zona. Las unidades de medición del gráfico son producto de la relación entre los datos filtrados con pasa bajas por lo que son unidades derivadas de cps's, mV's y Ohm's. El perfil 1 b) tiene un azimut de 60° con respecto al N, en el se distingue un cambio de tonalidad justo por donde pasa el río Nalranjo y se encuentra la falla del graben de Colima. En el perfil 2 c) cuenta con un azimut de 45° con respecto al N. Se logra distinguir una unidad en tonalidades oscuras en la parte S y en la NE se observa muchas variaciones en tonalidades claras pertenecientes a valores bajos. En el perfil 3 d) se tiene un azimut de 20° y cruza de manera radial en las zonas I y III. En el se puede apreciar mejor el espesor de los estratos de la zona I y las dimensiones del material volcánico.

Cabe hacer mención que se cuenta con información con un detalle de 0.1 y .025 metros en escala vertical (profundidad), sin embargo en este caso en específico con las dimensiones reales del área de interés no se logra distinguir los 300 metros de información en la vertical contra los casi 40 km de radio que tiene el círculo exterior del área de interés. El propósito de este estudio se limita en un panorama regional y la escala es asignada a criterio numérico basado en los datos. Las distancias fueron asignadas manualmente en intervalos distintos con diferencia de altitud en números múltiplos de 10 debido a el promedio de longitudes de onda y amplitudes de los registros a razón de poder observar con mayor claridad los estratos de las unidades geológicas.

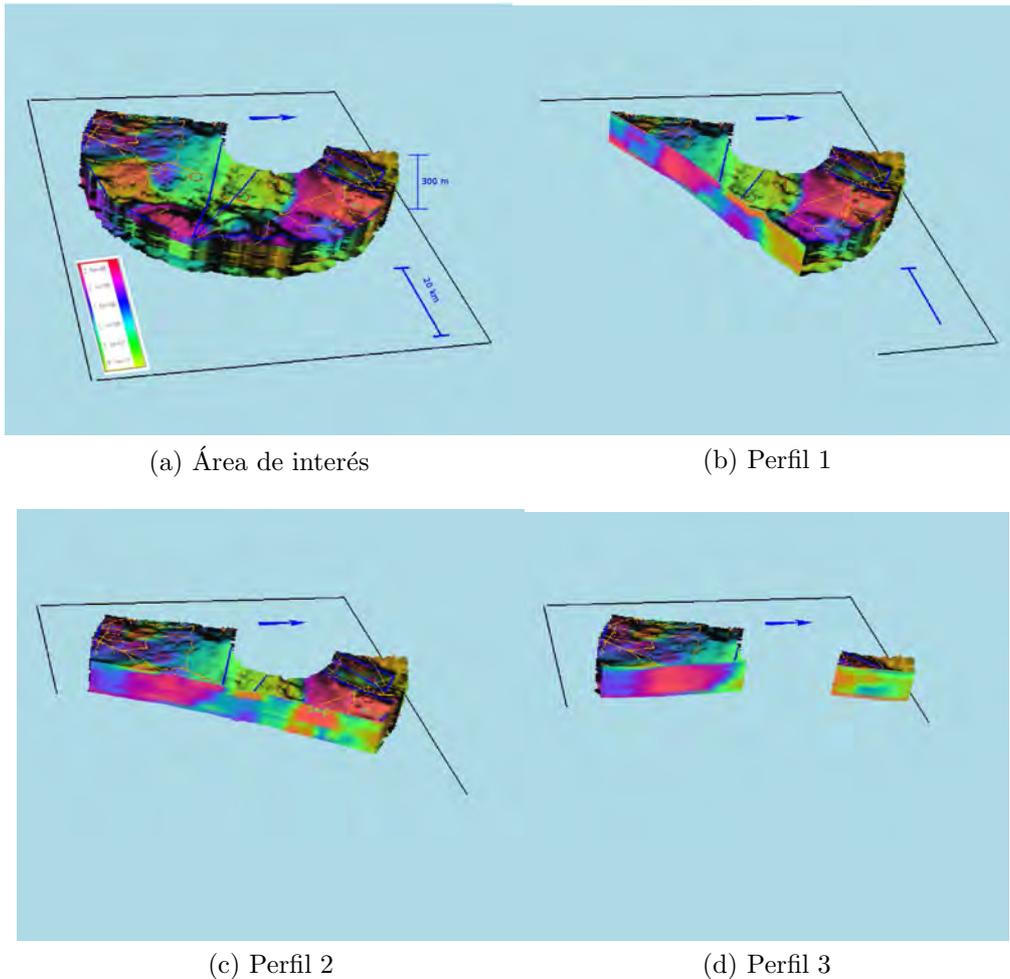


Figura 44: Perfiles de corte generados en GRASS GIS.

Debido a la poca calidad visual de los datos geofísicos representados en GRASS GIS se modeló la zona de estudio como una superficie en 3D con el software Blender para la observación y el análisis de los datos, se re-assignaron profundidades de manera que se exagero la profundidad mil veces para facilitar su visualización. En la Figura 45 se muestra una imagen del modelo en 3D de la superficie topográfica de la zona de estudio elevado a la altitud de CEM3.0 de INEGI y para la coloración se selecciono una imagen aérea facilitada por Bing. En el a) se muestra una vista en perspectiva viendo a los volcanes desde el NE. En el b) se muestra un zoom al área de interés desde la misma dirección focal. La dirección de la vista facilita el entendimiento topográfico en escalas que se asemejan más a la realidad y permite apreciar el leve disminución de altitud superficial del terreno en el área de interés, partiendo desde Ciudad Guzmán hacia Colima.

En la escala vertical se exagera con fines visuales la escala en el plano en la horizontal es real. En la escala de colores que se utiliza se modifico mediante el procedimiento de ecualización de histograma con color tipo *"terrain"* para resaltar los rasgos geomorfologicos del terreno. El límite estatal entre los estado de Colima y Jalisco se representa de color blanco y los círculos rojos representan los sitios de los pozos.

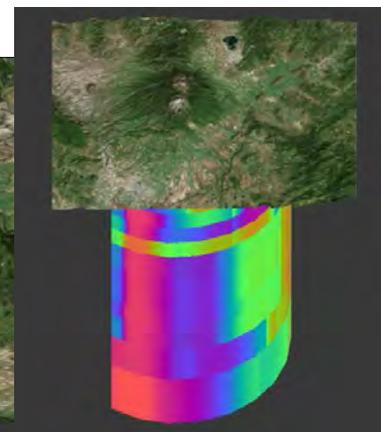
El software Blender se presenta con un gran potencial dentro del rubro de las



(a) Vista en perspectiva del zona de estudio desde el NE.



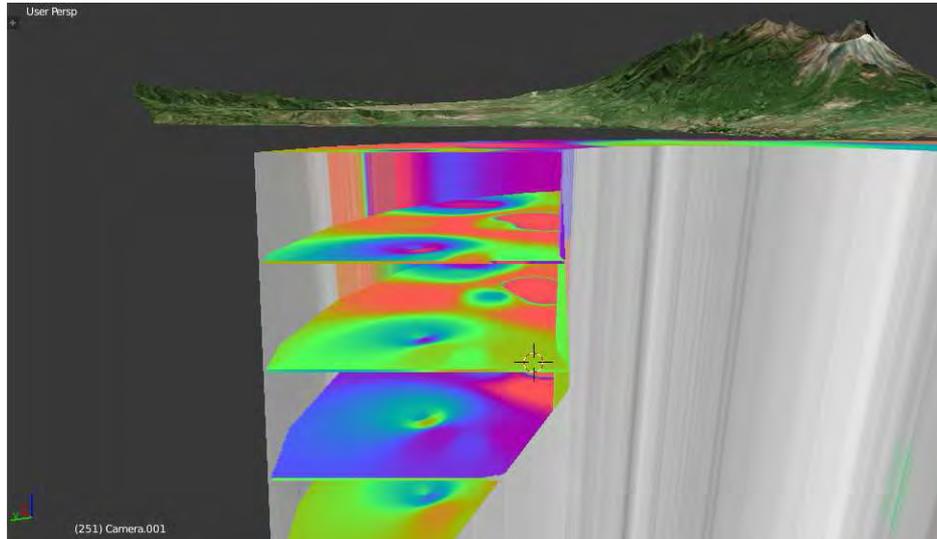
(b) Acercamiento al área de interés



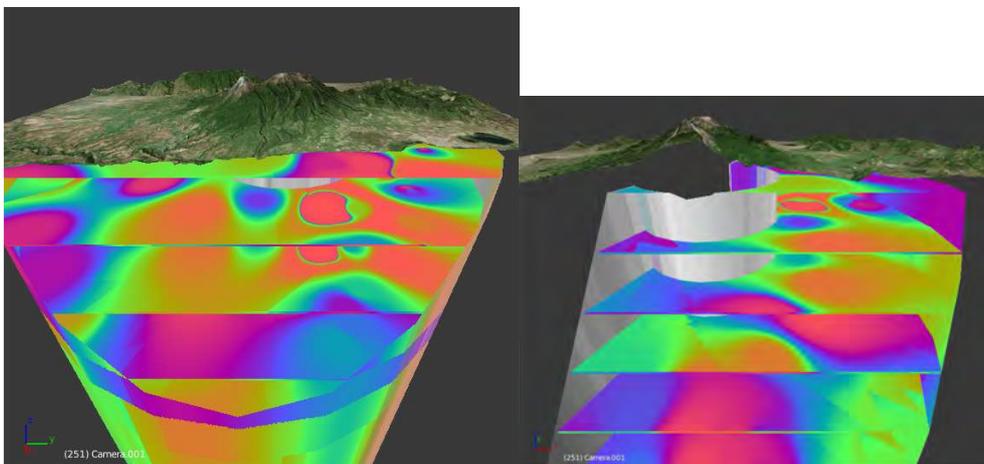
(c) Vista en perspectiva de la zona de estudio vista desde el S.

Figura 45: Modelos superficiales de la zona de estudio en 3D visualizados en Blender.

geociencias aplicadas y cada día aumentan módulos para utilizar información georeferenciada en esta suite. En la Figura 46 se muestran acercamientos a las tres zonas delimitadas en el área de interés. En el a) se muestra los primeros 170 metros divididos en 5 superficies paralelas que tienen profundidades de 50, 60, 70, 100, 120 y 170, altitudes seleccionadas debido a que representan las variaciones internas de la unidad entre una capa de inactividad. En el b) se muestra un acercamiento a la zona II visualizada desde la parte E y a sus primeros 170 metros de profundidad en donde se muestran las variaciones y tendencias en profundidad de los datos geofísicos que hacen referencia a la litología y composición mineralógica reflejada en zonas de transición entre dos diferentes mediciones situadas en zonas con diferentes respuestas que siguen el comportamiento del cause del río Tuxpan-Salado que delimita zonas de mayor aporte mineral generador de radiación gamma, relacionado con ambientes fluviales y zonas de deposito de material retrabajado. En el c) se muestra un acercamiento a la zona III vista desde el S. En la imagen se denota mucha semejanza en los 200 metros de profundidad en donde se distinguen los cambios entre respuestas con tonos oscuros y claros. El límite de las unidades esta definido por la zona de transición que se encuentra justo en el cause del Rio Tuxpan.



(a) Acercamiento a la zona I.



(b) Acercamiento a la zona II vista desde el E. (c) Acercamiento a la zona III vista desde el S.

Figura 46: Modelos de la sub-superficie del área de interés en 3D visualizados en Blender.

Conclusiones

Los RGP recolectados en todo el país pueden complementar el entendimiento de varios contextos geológicos del país tal como se aplicó en este estudio para el Complejo Volcanico de Colima.

La metodología facilita el tratamiento, almacenamiento y despliegue masivo de información digital en formatos estructurados en código ASCII.

Las herramientas FOSS (GRASS GIS, PostgreSQL y R) facilitan el procesamiento y el despliegue masivo de información. Presentan módulos para ser utilizados en conjunto y facilitar su gestión, aunado al beneficio de la reducción de costos por licencias de software especializado.

El diseño del área de interés de acuerdo a las necesidades del objeto de estudio resultó en aumento de la densidad promedio a $2.6 \text{ sitios}/\text{km}^2$. La delimitación de zonas dentro del área de estudio ayudó a focalizar las anomalías o variaciones en los datos geofísicos. Análisis multivariable aplicado en los distintos parámetros ayudo a identificar zonas de posibles contacto, relacionadas directamente con grandes cambios en Gamma, SP y Res, así como un primer acercamiento en las tendencias en la componente horizontal.

Los filtros pasa bajas ayudaron a atenuar frecuencias altas lo que facilita ver tendencias generales grandes relacionadas con la frecuencia de corte, como en este caso se aplicó para estratos con espesores múltiples de 10 metros.

Los modelos presentados en 2.5D y 3D permiten un panorama en capas equidistantes de la superficie del terreno a profundidades seleccionadas en base a las necesidades de estudio.

El álgebra de mapas de datos que se derivan de los parámetros gamma natural, potencial espontáneo y resistencia enfocada o puntual permite la discriminación de material volcánico y sedimentario ubicados en la parte sur y en la parte norte de los volcanes debido a la diferencia que se refleja en las facies de subsuelo resultado de conglomerados en la parte S y conglomerados arcillosos en la parte N teniendo en la parte E o zona II una transición desde el N al S.

El proceso de comparación entre los pozos de control y los pozos de validación facilita la descripción de la firma espectral así como la correlación entre las respuestas geofísicas de las unidades geológicas del área de interés.

La información interpretada a partir de los RGP es consistente con lecturas en la parte Sur (zona III) y Norte (Zona I) de las secciones geológicas del subsuelo interpretadas por Cortés y colaboradores en 2005. En la zona III se tienen material volcanoclástico, joven y con grandes dimensiones, con poco transporte y bastante fracturas alusivas al proceso formación.

En la zona I se encuentra material piroclástico, explosivo de grano fino, más fragmentado en términos volcánicos, con rocas más antiguas y de mayor transporte, consistente la migración del vulcanismo del CVC.

Los registros de la unidad **QAle** son masivos o de más de 200 metros espesor debido a las tendencias semi-constantes de gamma y resistividad puntual y por las constantes pendientes positivas de ρ_p , la matriz es de material areno-arcilloso con laminaciones de ceniza volcánica y pomez que bajan la magnitud de gamma y baja la resistencia de la unidad.

Referencias

- Bjorlykke, K. (2010). *Petroleum geoscience: From sedimentary environments to rock physics*. Springer Science & Business Media.
- Campa, C. U. and Ramírez, J. (1979). *La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero*. Universidad Autónoma de Guerrero.
- Cas, R. and Wright, J. (1987). Volcanic successions, 528 pp.
- Cortés, A. (2002). Depósitos de avalancha y flujos de escombros originados hace 3,600 años por el colapso del sector suroeste del volcán de Colima.
- Cortés, A., Garduño-Monroy, V., Navarro-Ochoa, C., Komorowski, J., Saucedo, R., Macías, J., and Gavilanes, J. (2005). Cartas geológicas y mineras 10. *Carta Geológica del Complejo Volcánico de Colima, con Geología del Complejo Volcánico de Colima: México DF, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, escala, 1(10,000)*.
- Demant, A. (1978). Características del eje neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2):172–187.
- Dougherty, D. and Robbins, A. (1997). *Sed & awk*. ” O’Reilly Media, Inc.”.
- Duhamel, P. and Vetterli, M. (1990). Fast fourier transforms: a tutorial review and a state of the art. *Signal processing*, 19(4):259–299.
- Ebart, C. (2008). Open source software in industry. *Software, IEEE*, 25(3):52–53.
- Ellis, D. V. and Singer, J. M. (2007). *Well logging for earth scientists*. Springer Science & Business Media.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la faja volcánica transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1):84–92.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., and Manea, M. (2012). The dynamic history of the trans-mexican volcanic belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522:122–149.
- Garduño-Monroy, V. H., Saucedo-Girón, R., Jiménez, Z., Gavilanes-Ruiz, J. C., Cortés-Cortés, A., and Uribe-Cifuentes, R. M. (1998). La falla tamazula, límite suroriental del bloque jalisco, y sus relaciones con el complejo volcánico de Colima, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2):132–144.

- Glover, D. P. W. (2000). *Petrophysics*. University of Aberdeen, UK.
- GRASS Development Team (2015). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software*. Open Source Geospatial Foundation.
- Group, T. P. G. D. (1996-2014). *PostgreSQL Database Management System*.
- Hawkins, D. M. (1984). A method for stratigraphic correlation of several boreholes. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16(4):393–406.
- Jackman, S. (2003). R for the political methodologist. *Software and Books: Reviews and Previews*, 11(1):20.
- Johnson, C. (2009). Pro bash programming. *New York, Apress*.
- Kanasewich, E. R. (1981). *Time sequence analysis in geophysics*. University of Alberta.
- Keys, W. S. (1989). *Borehole geophysics applied to ground-water investigations*, volume 6375. National Water Well Association Dublin.
- Keys, W. S. (1996). *A practical guide to borehole geophysics in environmental investigations*. CRC Press.
- Kobr, M., Huizar, R., and Campos, J. O. (2005). *Evaluacion Hidrogeologica de Pozos a Traves de Registros Geofisicos, Fundamentos*. UNAM.
- Lugo Hubp, J., Martín del Pozzo, A., and Vázquez Selem, L. (1993). Estudio geomorfológico del complejo volcánico de colima. *Geofísica Internacional*, 32(4).
- Luhr, J. F. and Carmichael, I. S. (1990a). *Geology of volcán de Colima*, volume 107. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Luhr, J. F. and Carmichael, I. S. (1990b). Petrological monitoring of cyclical eruptive activity at volcán colima, méxico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(3):235–260.
- Macías, J., Saucedo, R., Gavilanes, J., Varley, N., Velasco Garcia, S., Bursik, M., Vargas Gutierrez, V., and Cortes, A. (2006). Flujos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del volcán de colima y perspectivas futuras. *GEOS*, 25(3):340–351.
- Mazzoni, M. M. (1986). Procesos y depósitos piroclásticos. Technical report.
- Mooser, F. (1972). El eje neovolcanico mexicano, debilidad cortical pre-paleozoica reactivada en el terciario: Memoria de la ii convencion nacional de la sociedad geologica mexicana. *Mazatlan, Sinaloa*, pages 186–187.
- Newhall, C. (1996). Iavcei/international council of scientific unions' decade volcano projects: Reducing volcanic disaster. status report. *US Geol. Surv., Washington, DC*.

- Newham, C. and Rosenblatt, B. (2005). *Learning the bash shell: Unix shell programming.* " O'Reilly Media, Inc."
- Raggi, E., Thomas, K., and Van Vugt, S. (2010). *Beginning Ubuntu Linux.* Springer.
- Ramirez, R. W. (1985). The fft. fundamentals and concepts. *Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985*, 1.
- Ramos, E. L. (1983). Estratigrafía cretácica y tectónica de una porción del centro y noreste de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 44(1):21–31.
- Rodríguez-Elizarrarás, S. R. (1995). Estratigrafía y estructura del volcán de Colima, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12(1):22–46.
- Saucedo, R., Macías, J., Gavilanes, J., Arce, J., Komorowski, J., Gardner, J., and Valdez-Moreno, G. (2010). Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 plinian eruption of volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191(3):149–166.
- Saucedo, R., Macías, J., Sheridan, M., Bursik, M., and Komorowski, J. (2005). Modeling of pyroclastic flows of Colima volcano, Mexico: implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139(1):103–115.
- Teruggi, M. E. (1978). *Rocas piroclásticas, interpretación y sistemática.* Number 5. Asociación Geológica Argentina: exclusive distributors, Librart, Department of Argentine Scientific Publications.
- Uddin, F. (2008). Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(12):2804–2814.
- Valdivia, L. (1996). *Propiedades geofísicas de la tierra.* Cuadernos del Instituto de Geofísica. UNAM.
- Verma, S. (1987). Mexican volcanic belt: Present state of knowledge and unsolved problems. *Geofísica Internacional*, 26(2).
- Vidal, R. et al. (1980). El conjunto petrotectónico de Zihuatanejo, Guerrero-Coahuila, Michoacán. *Sociedad Geológica Mexicana: Resúmenes de la V Convención Geológica Nacional*, pages 111–112.
- Wenk, H.-R. and Bulakh, A. (2004). *Minerals: their constitution and origin.* Cambridge University Press.
- Wheeler, D. A. (2007). Why open source software/free software (oss/fs, floss, or foss)? look at the numbers.
- Wilson, C., Houghton, B., and Sigurdsson, H. (2000). Pyroclastic transport and deposition. *Encyclopedia of Volcanoes*, pages 545–554.
- Wonik, T. and Olea, R. A. (2007). Borehole logging. In *Environmental Geology*, pages 431–474. Springer.
- Yarza de la Torre, E. (1992). *Volcanes de México.* IG/UNAM, México.

Anexos

Anexo I: Registros Geofísicos de Pozos

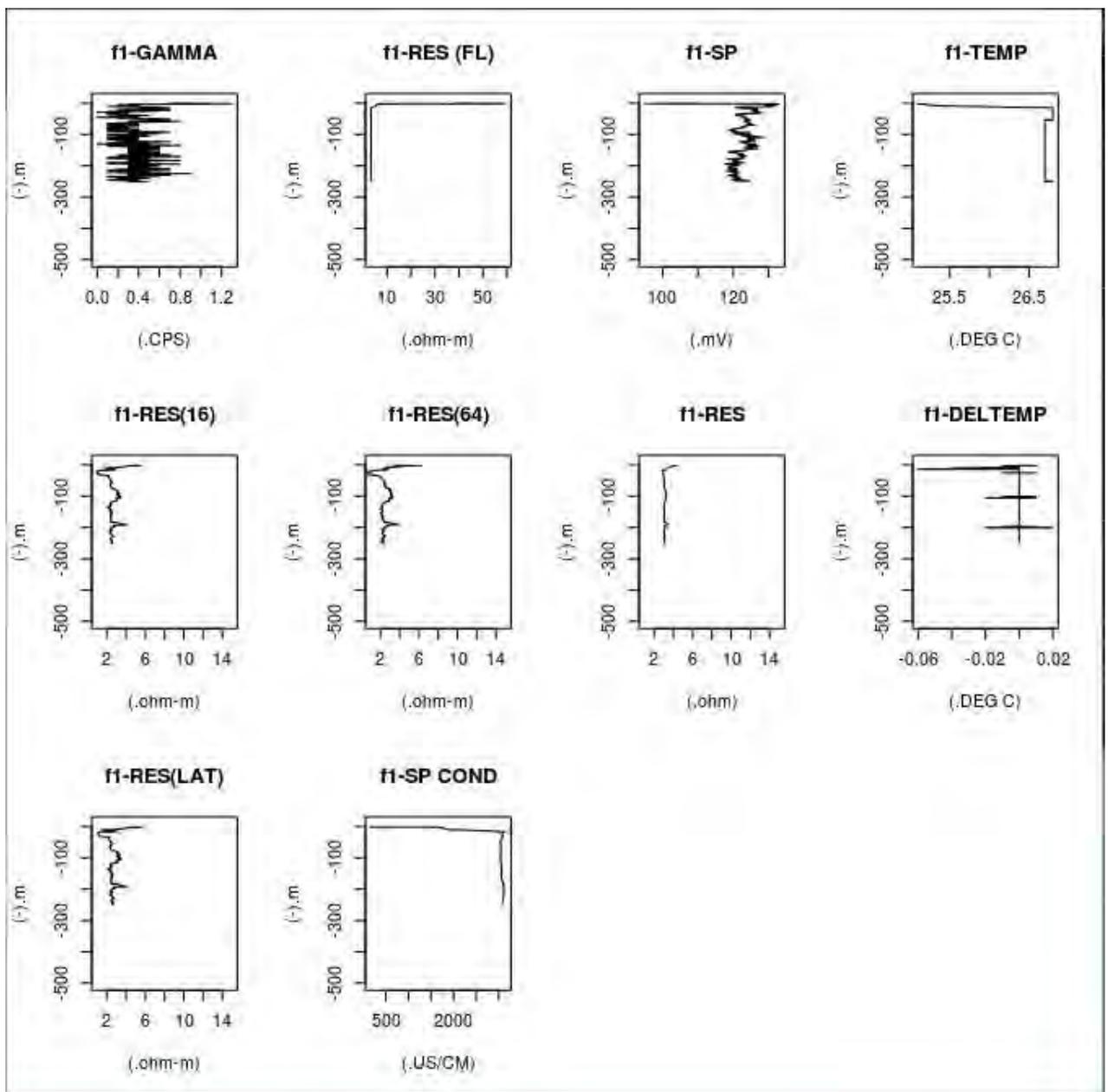


Figura 47: Registros geofísicos del pozo (f-1) Proyecto modelo-21.

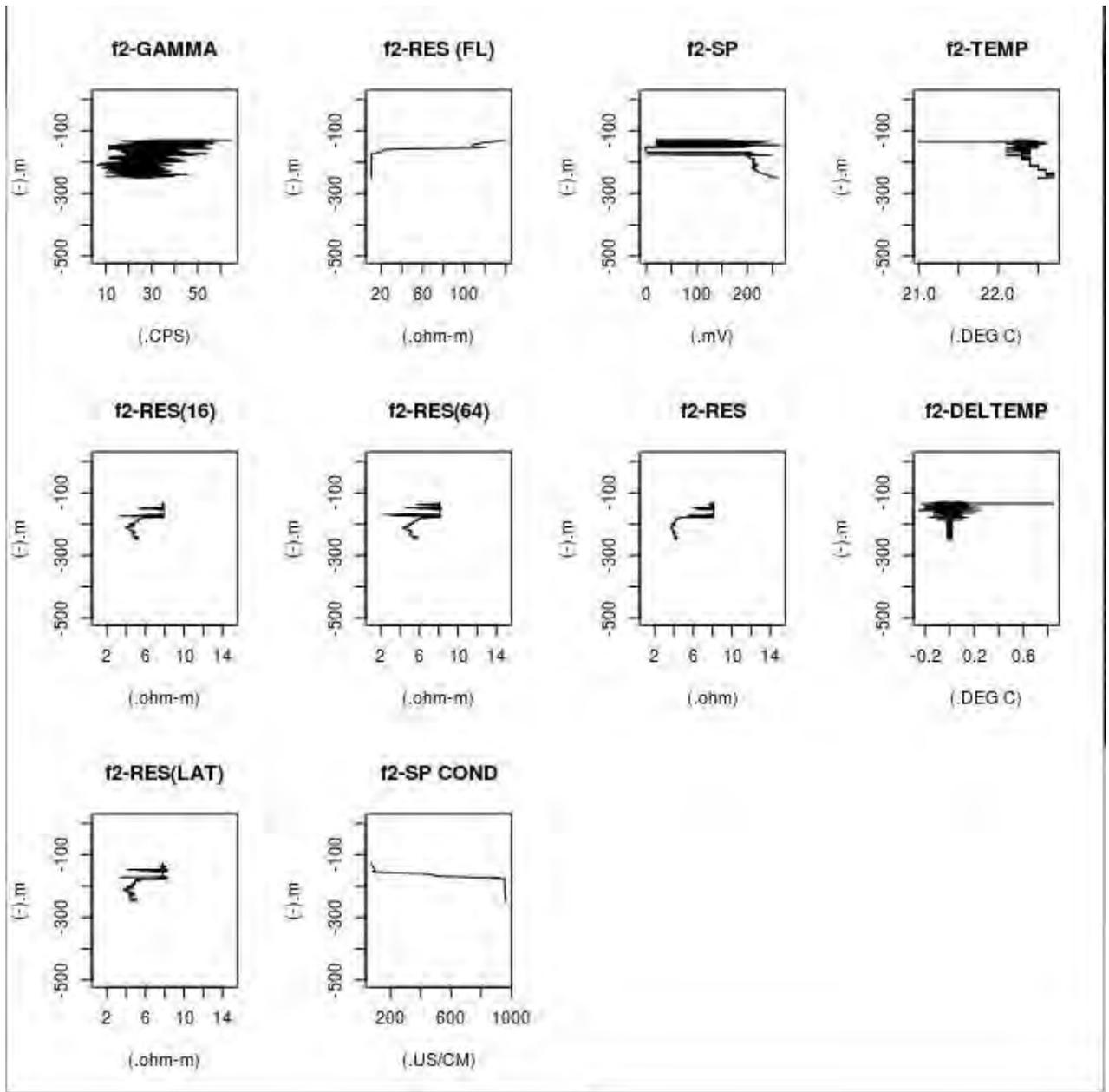


Figura 48: Registros geofísicos del pozo (f-2) Ocote cuate 4.

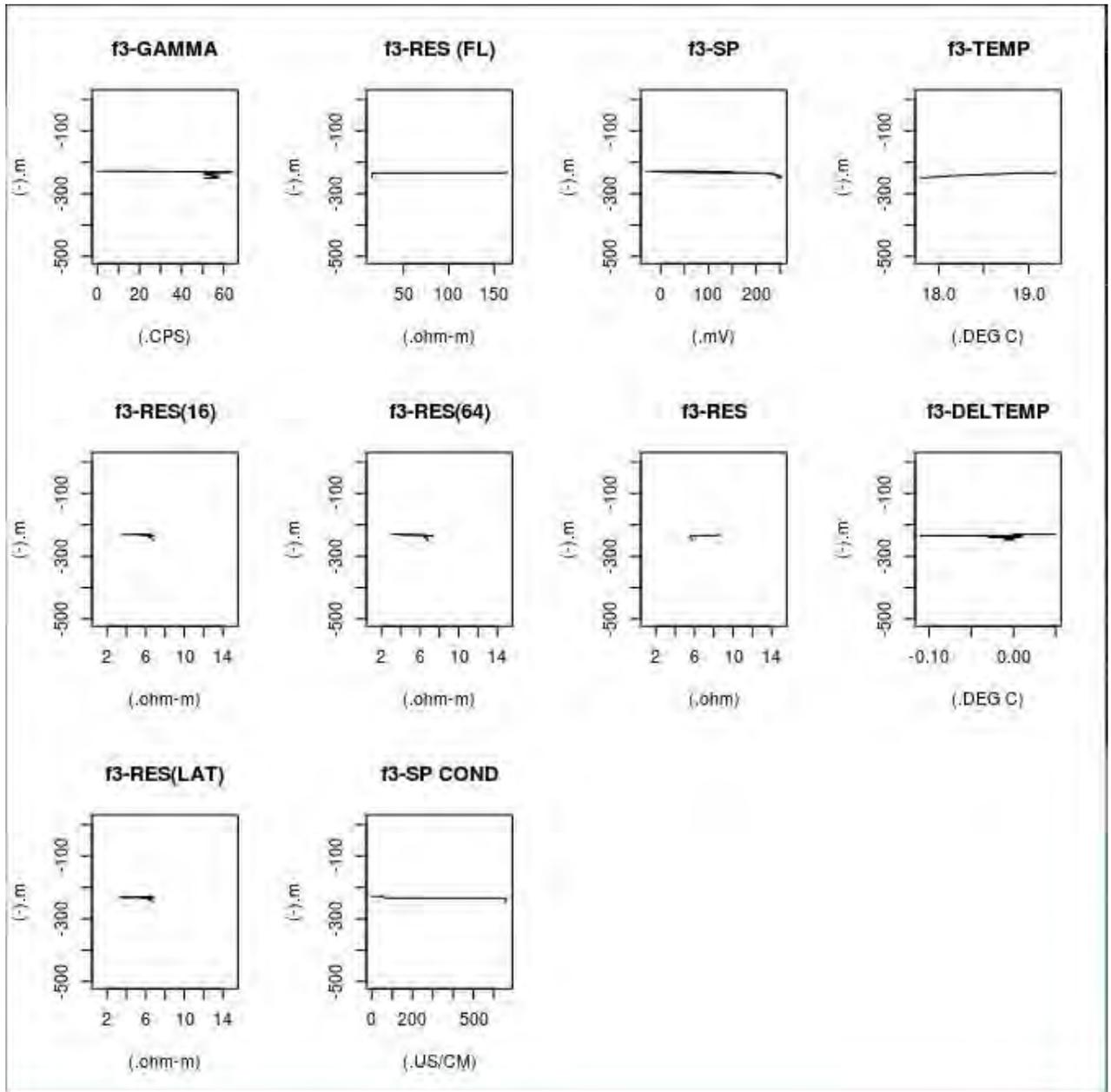


Figura 49: Registros geofísicos del pozo (f-3) La tiznada.

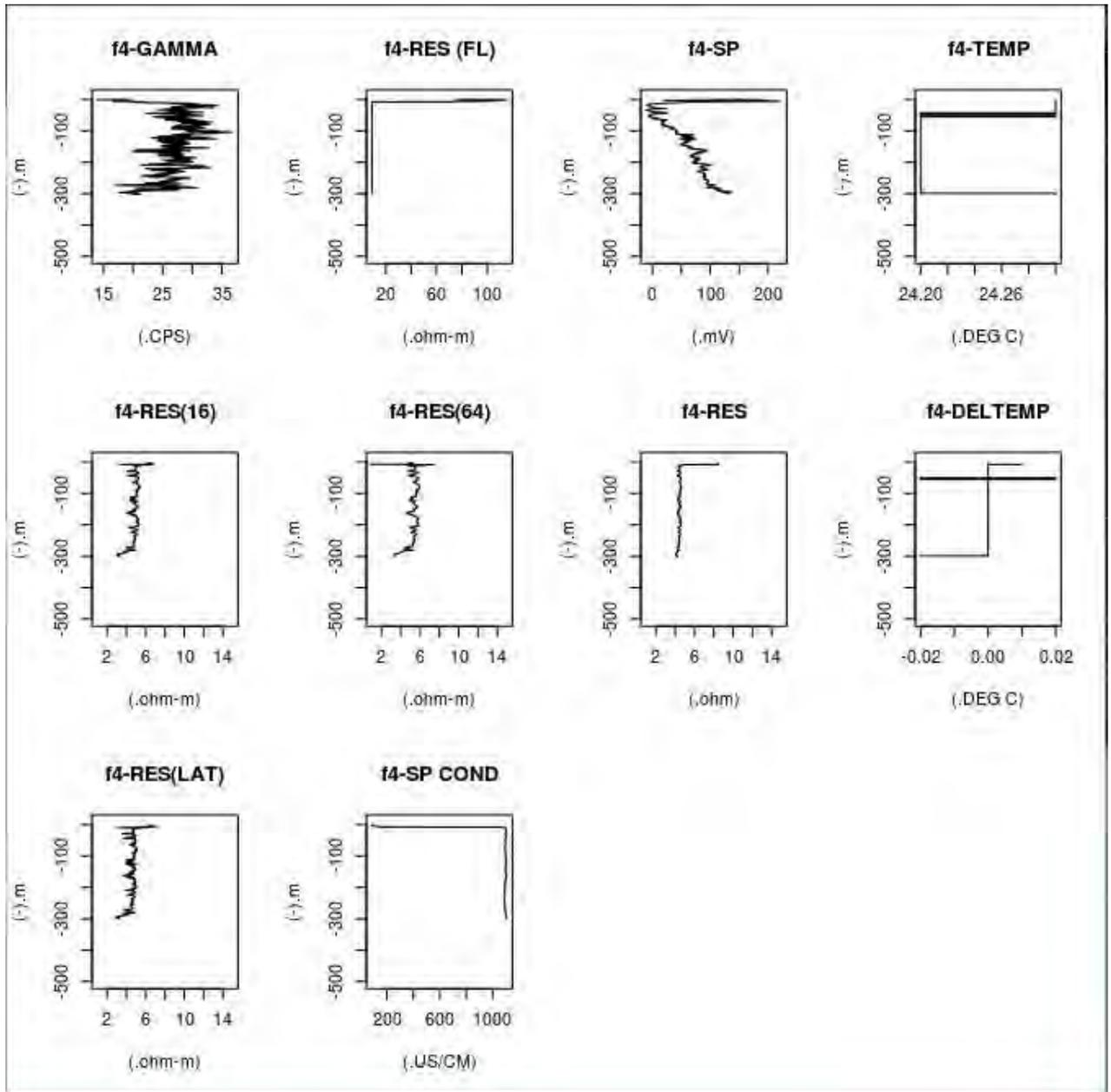


Figura 50: Registros geofísicos del pozo (f-4) Ocote cuate.

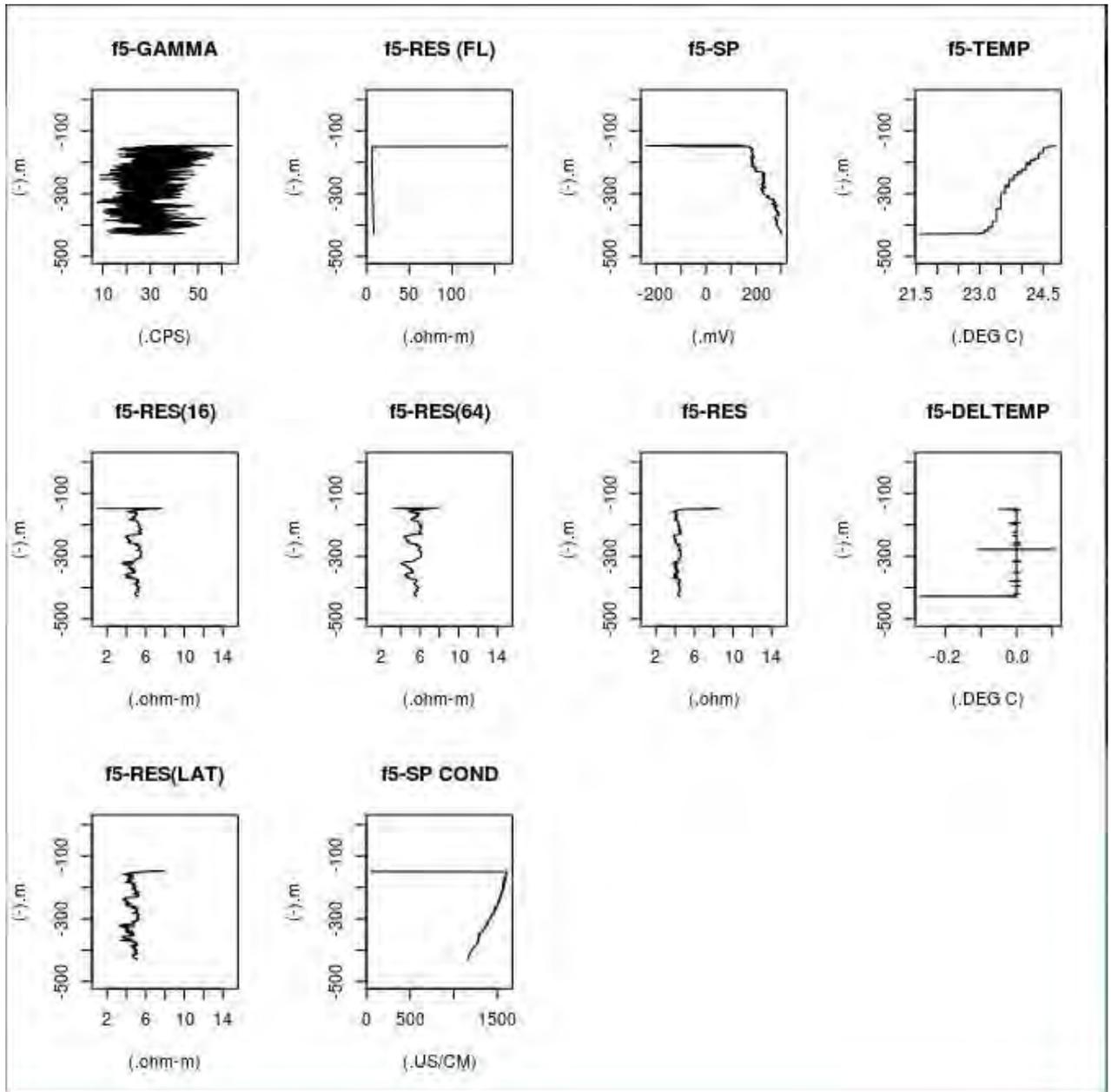


Figura 51: Registros geofísicos del pozo (f-5) El oasis-2.

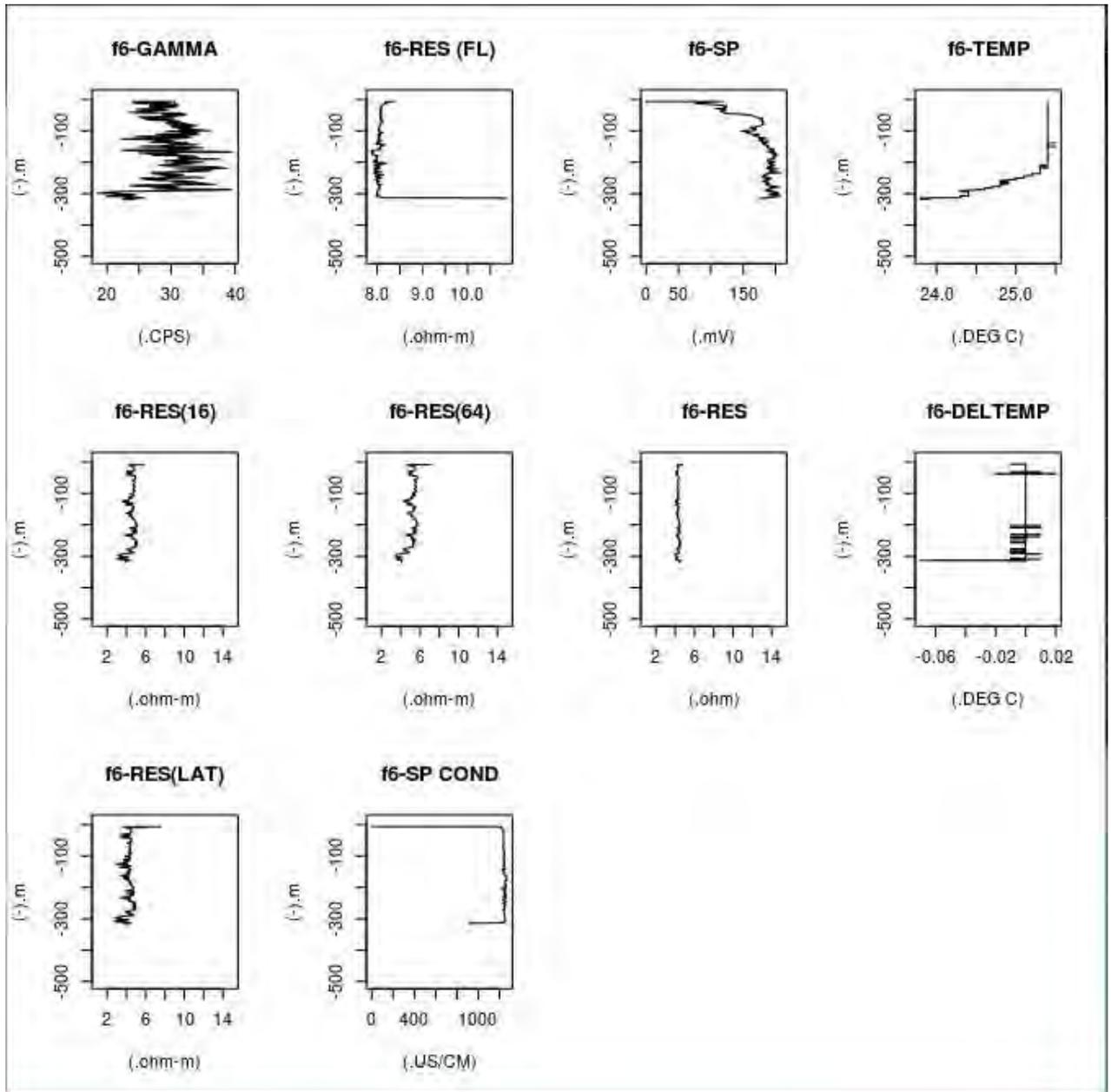


Figura 52: Registros geofísicos del pozo (f-6) Ocote cuate 5.

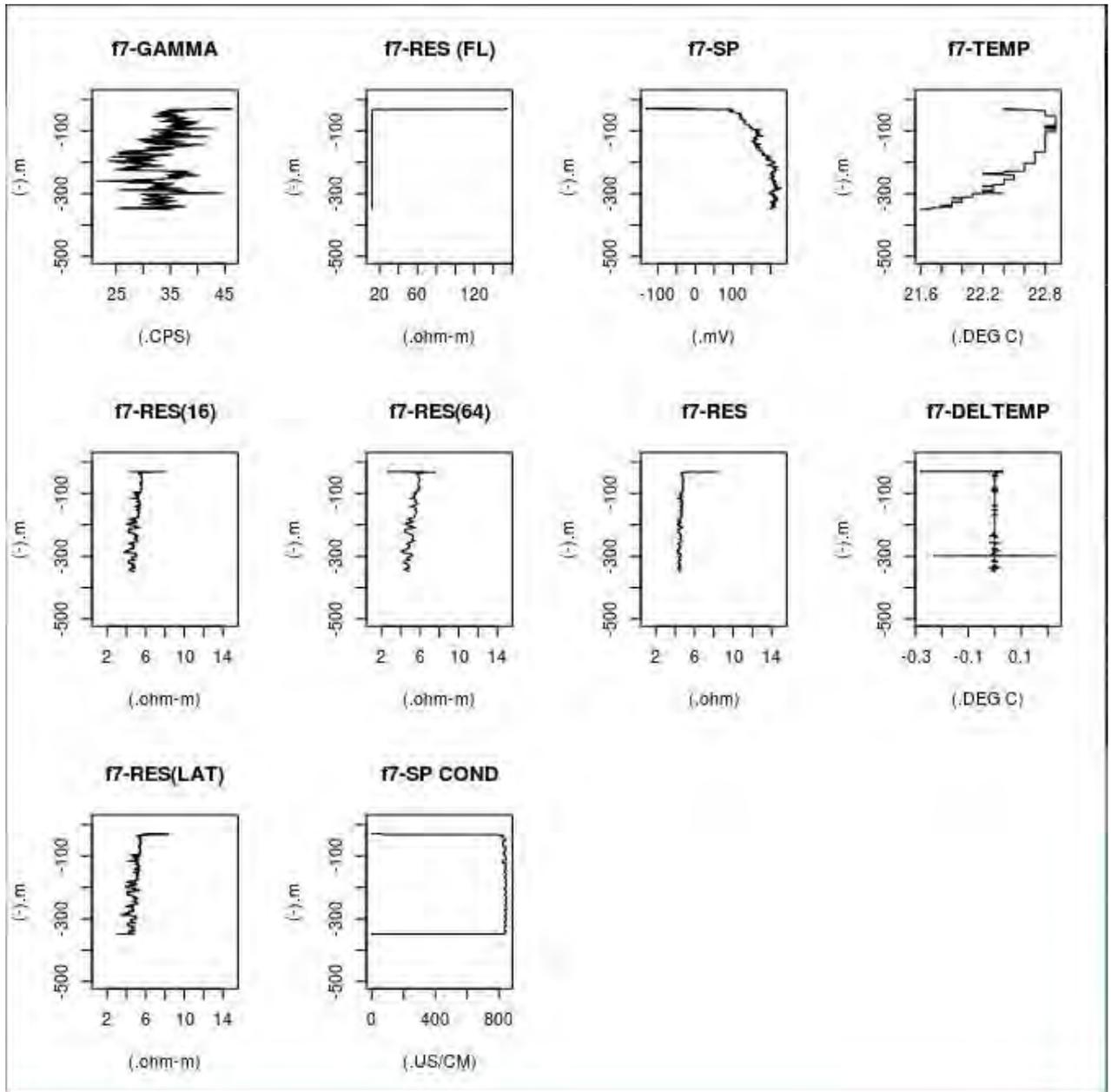


Figura 53: Registros geofísicos del pozo (f-7) El tepehuaje.

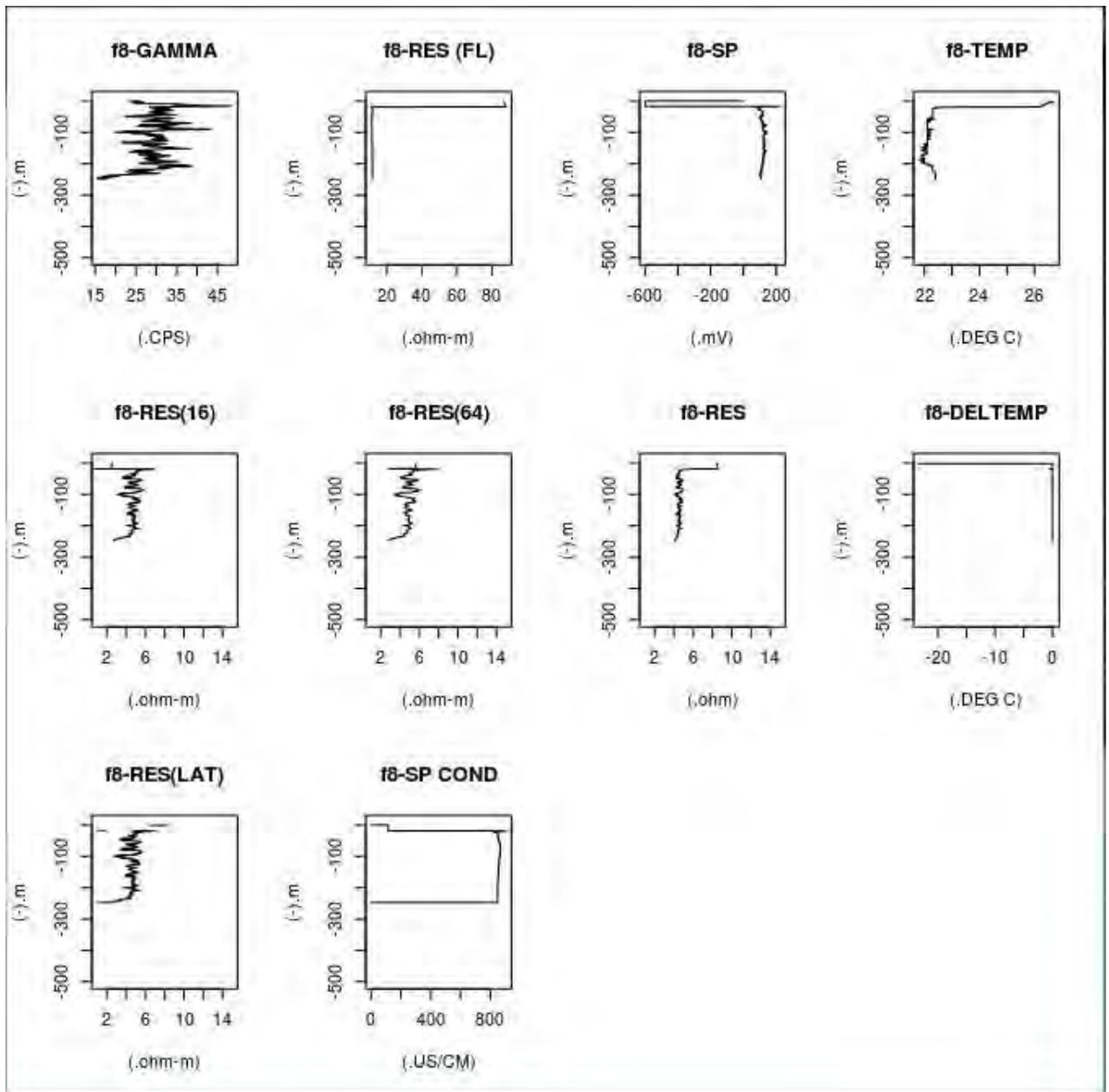


Figura 54: Registros geofísicos del pozo (f-8) Cruz de ordaz y paredes.

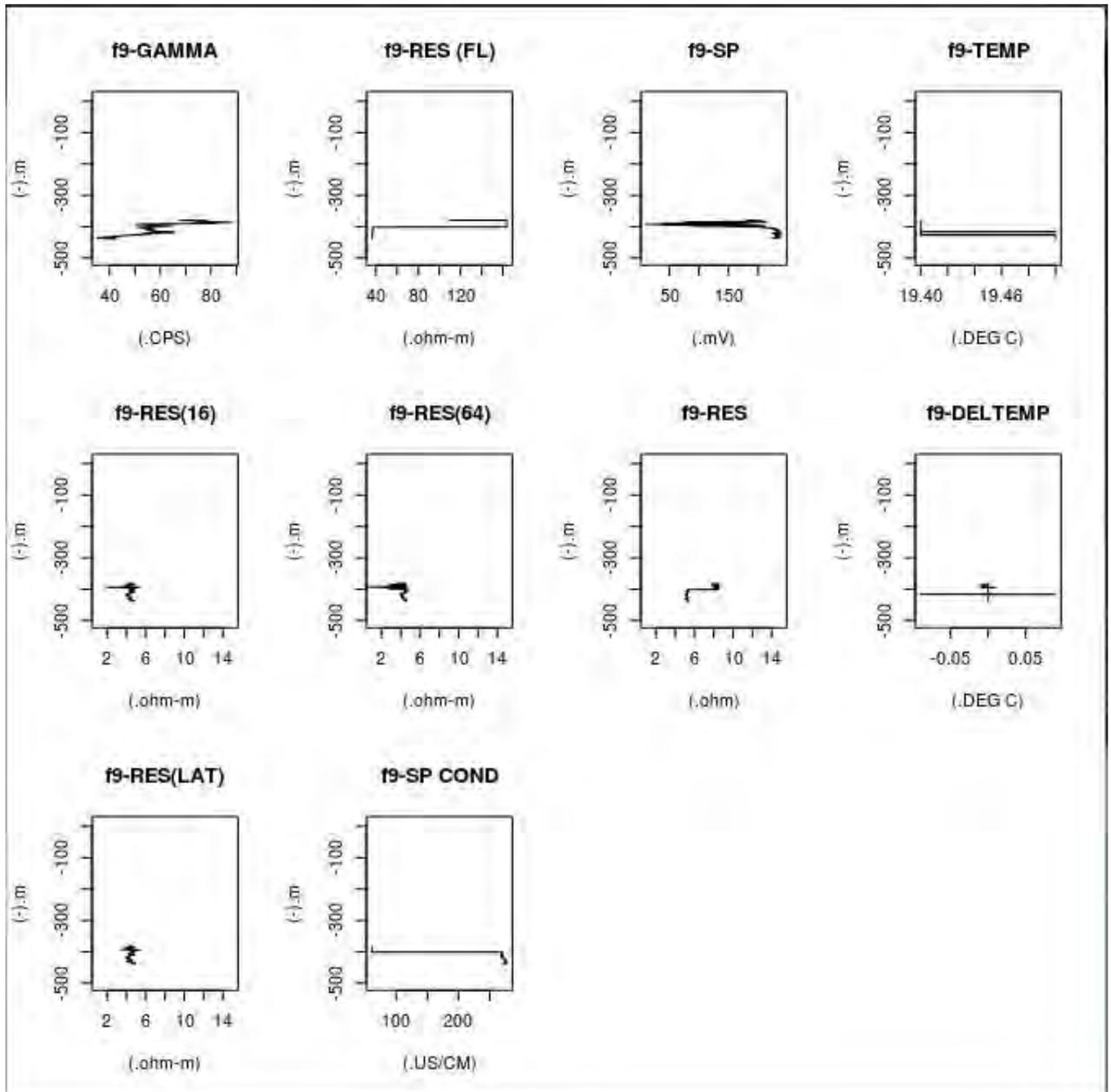


Figura 55: Registros geofísicos del pozo (f-9) Tlaxcolomo.

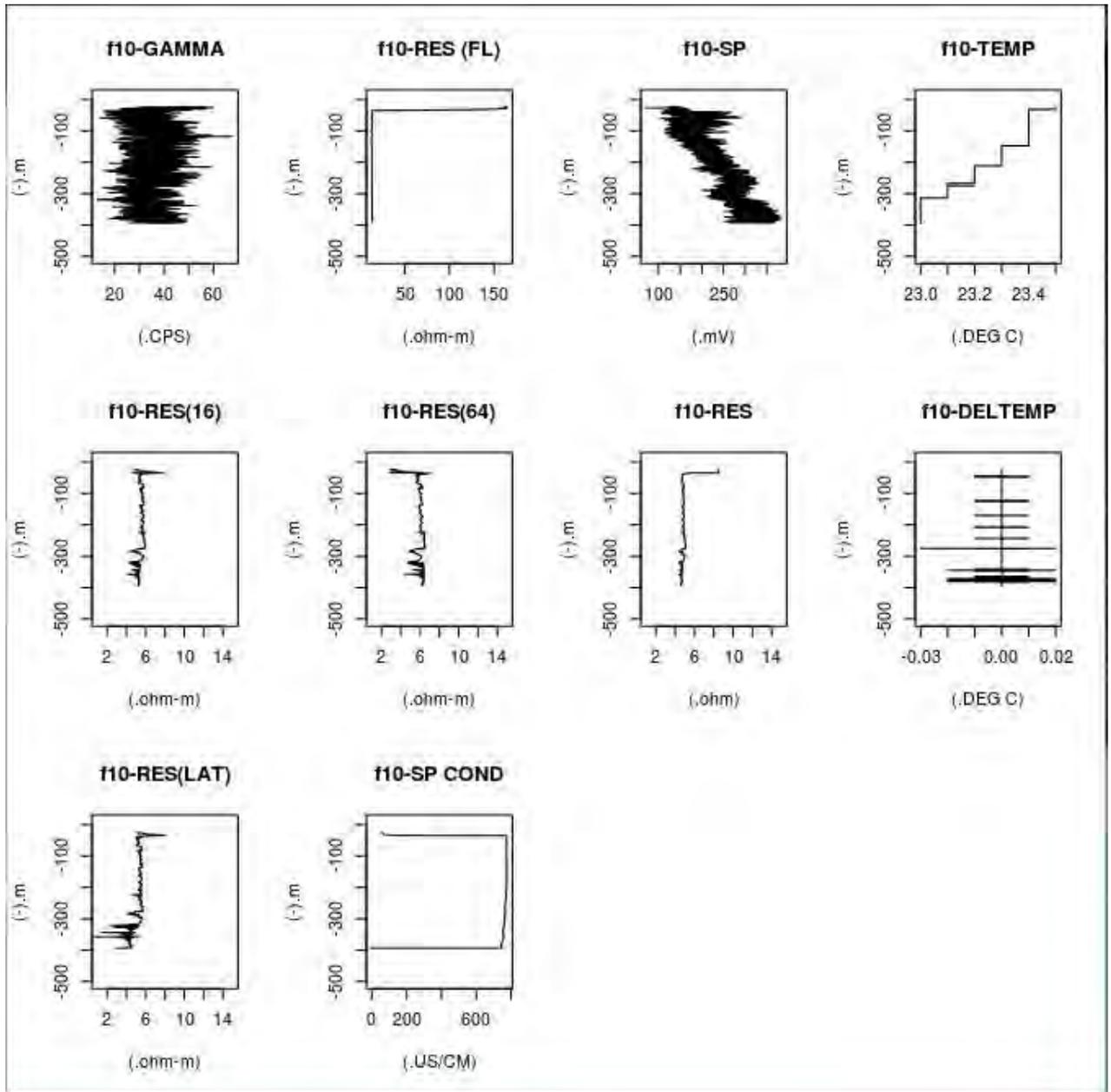


Figura 56: Registros geofísicos del pozo (f-10) Huescalapa.

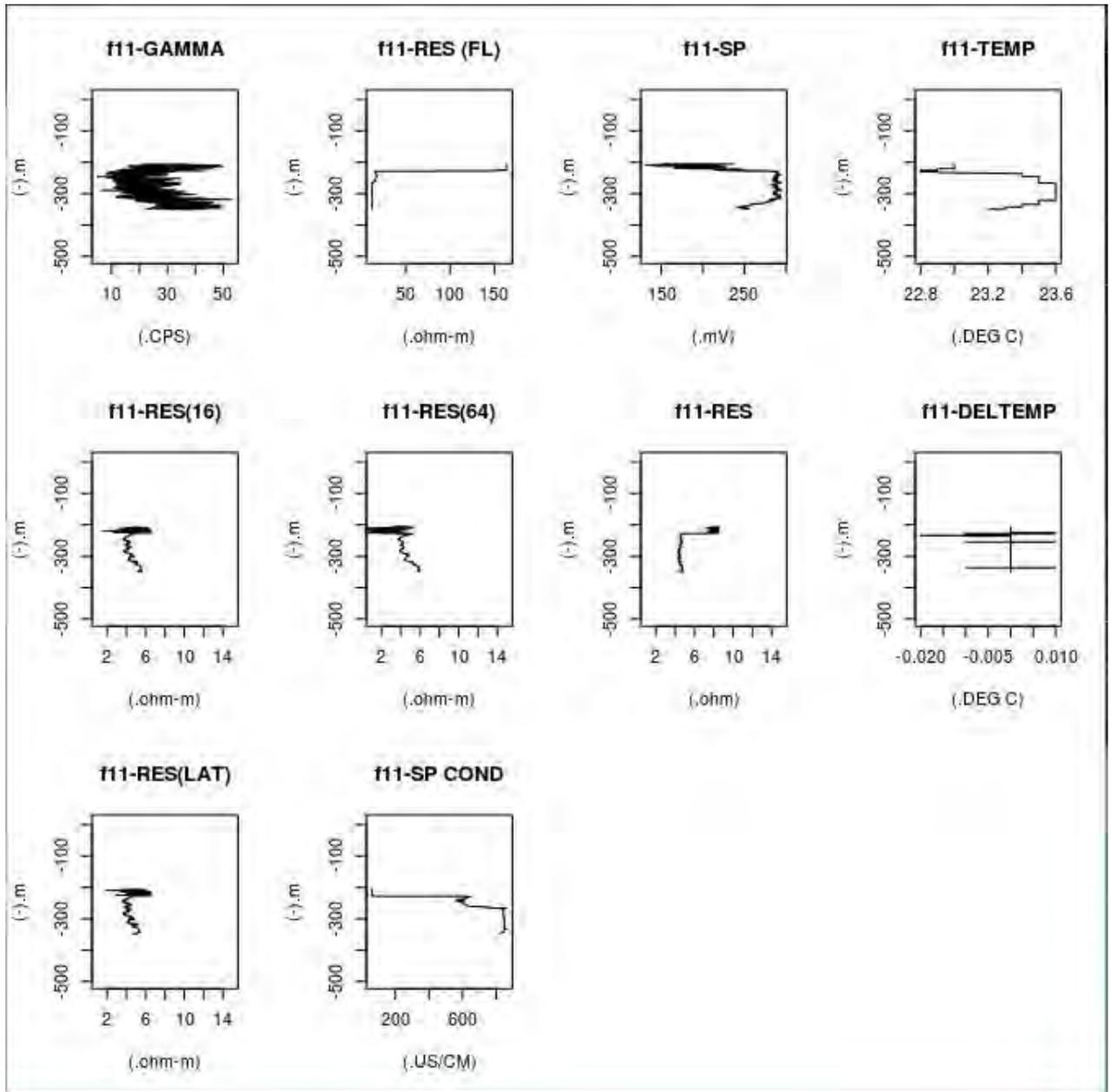


Figura 57: Registros geofísicos del pozo (f-11) Presa de Pérez.

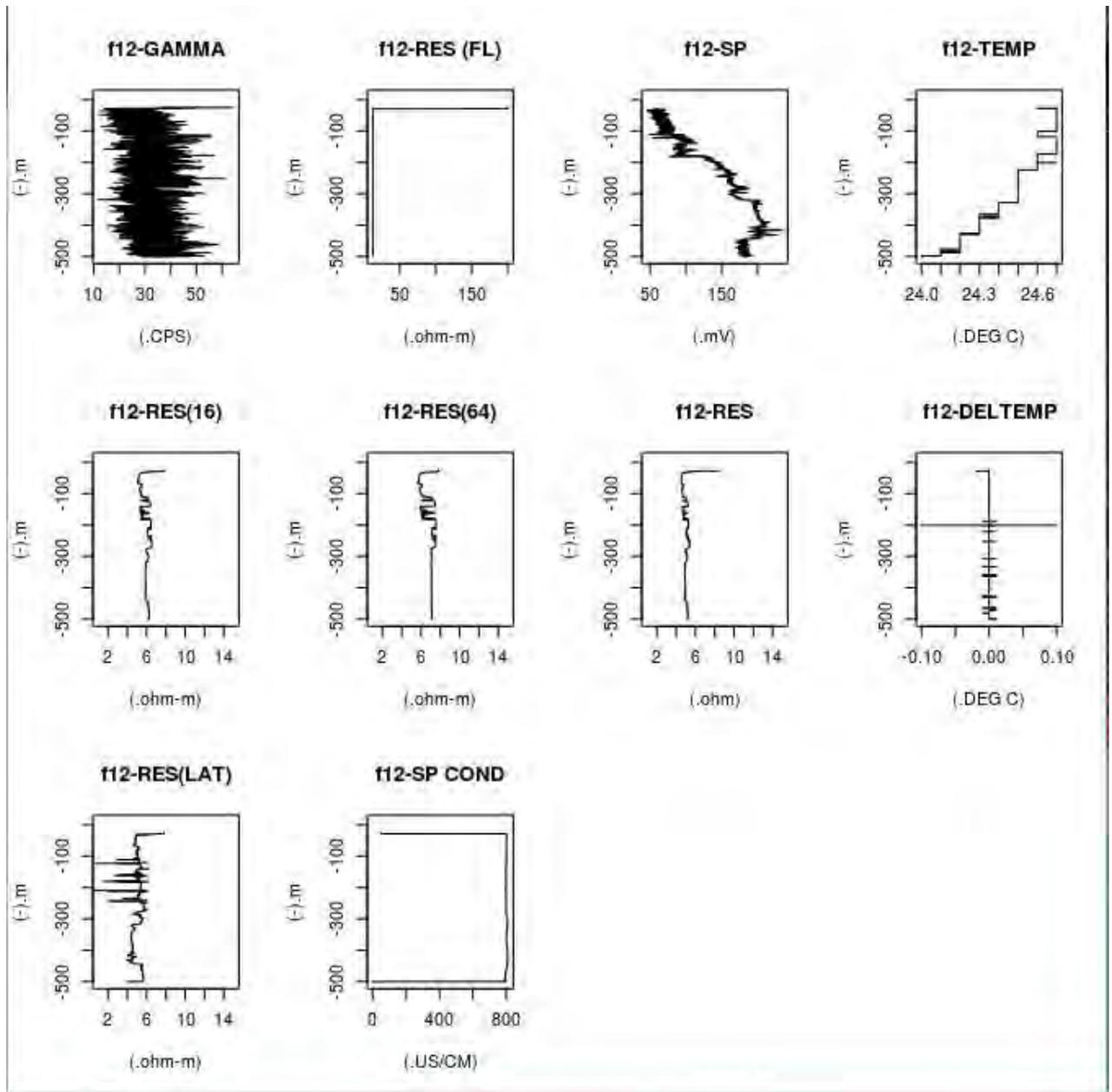


Figura 58: Registros geofísicos del pozo (f-12) Huescalapan-La joya.

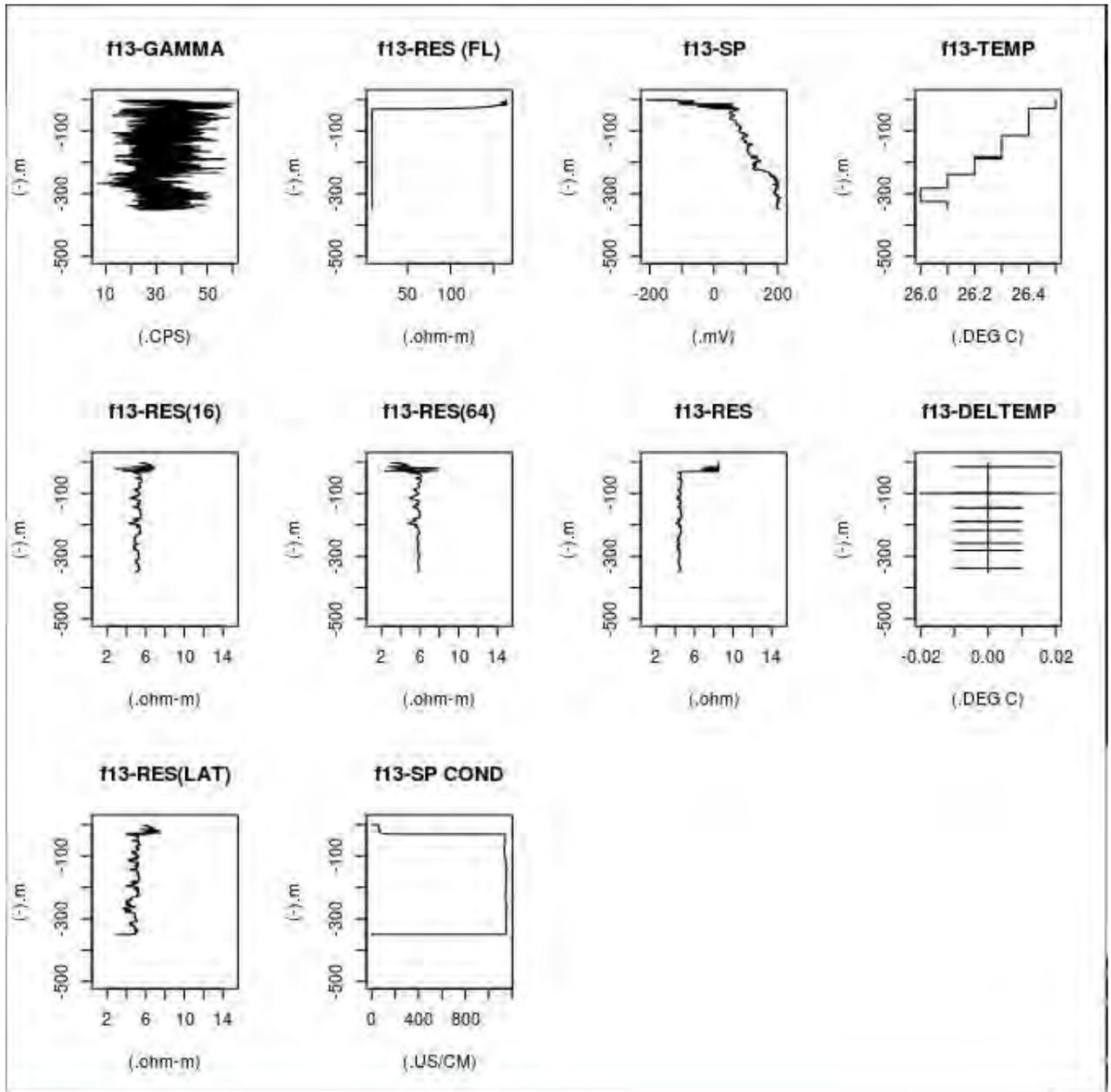


Figura 59: Registros geofísicos del pozo (f-13) El gato.

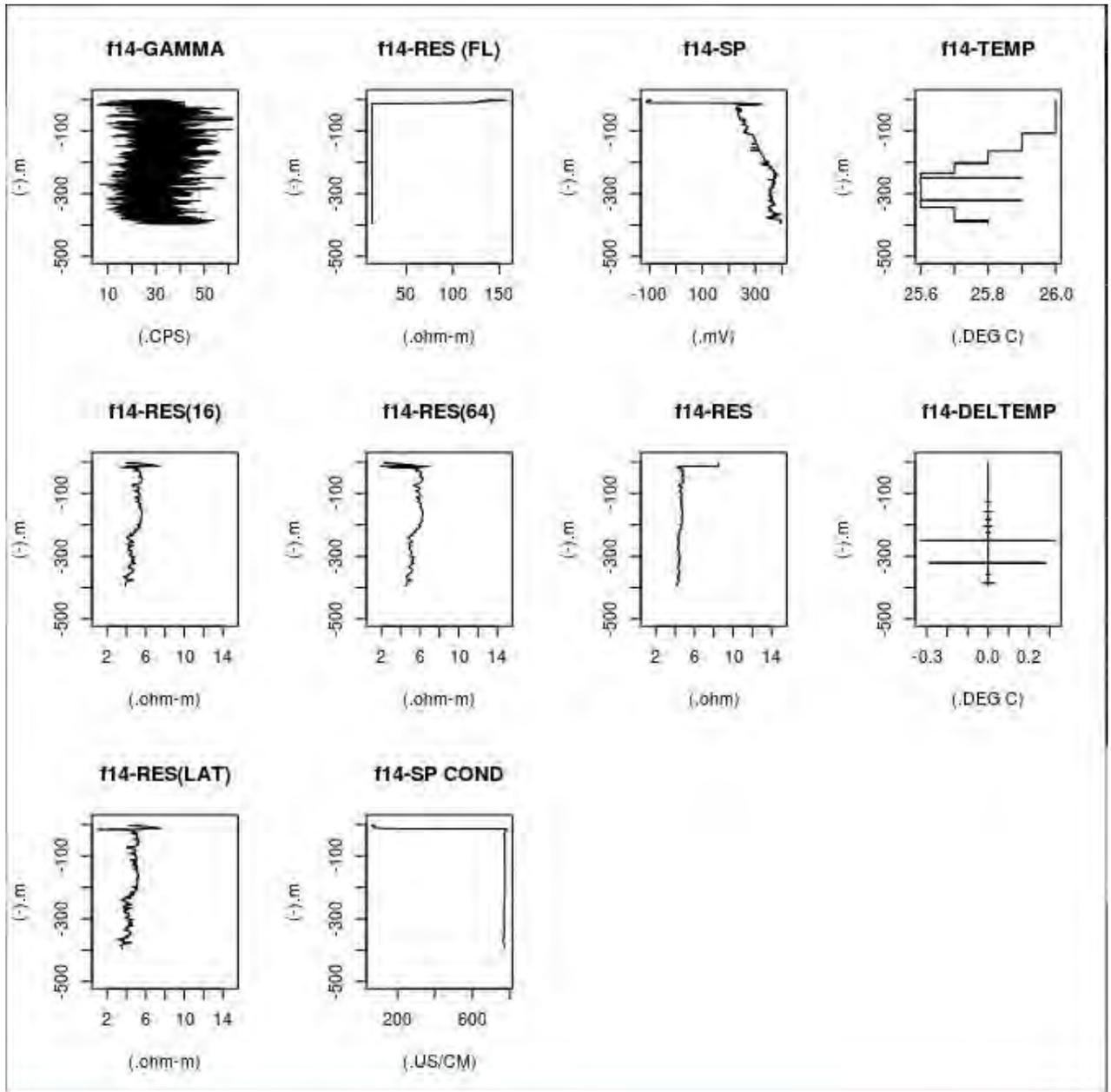


Figura 60: Registros geofísicos del pozo (f-14) Pasito de la galera (SHB)-1 Informe.

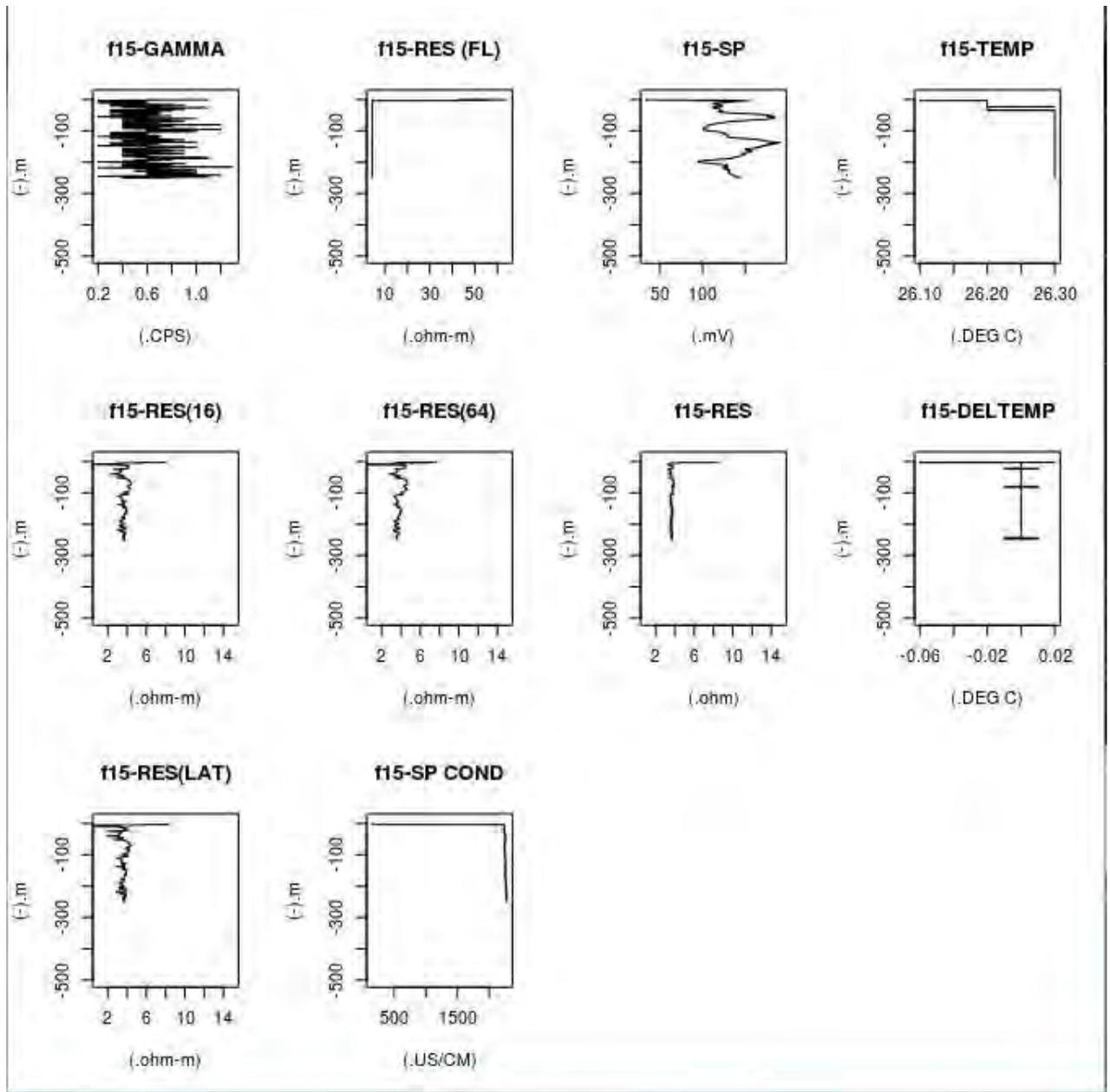


Figura 61: Registros geofísicos del pozo (f-15) Proyecto Colima modelo 24.

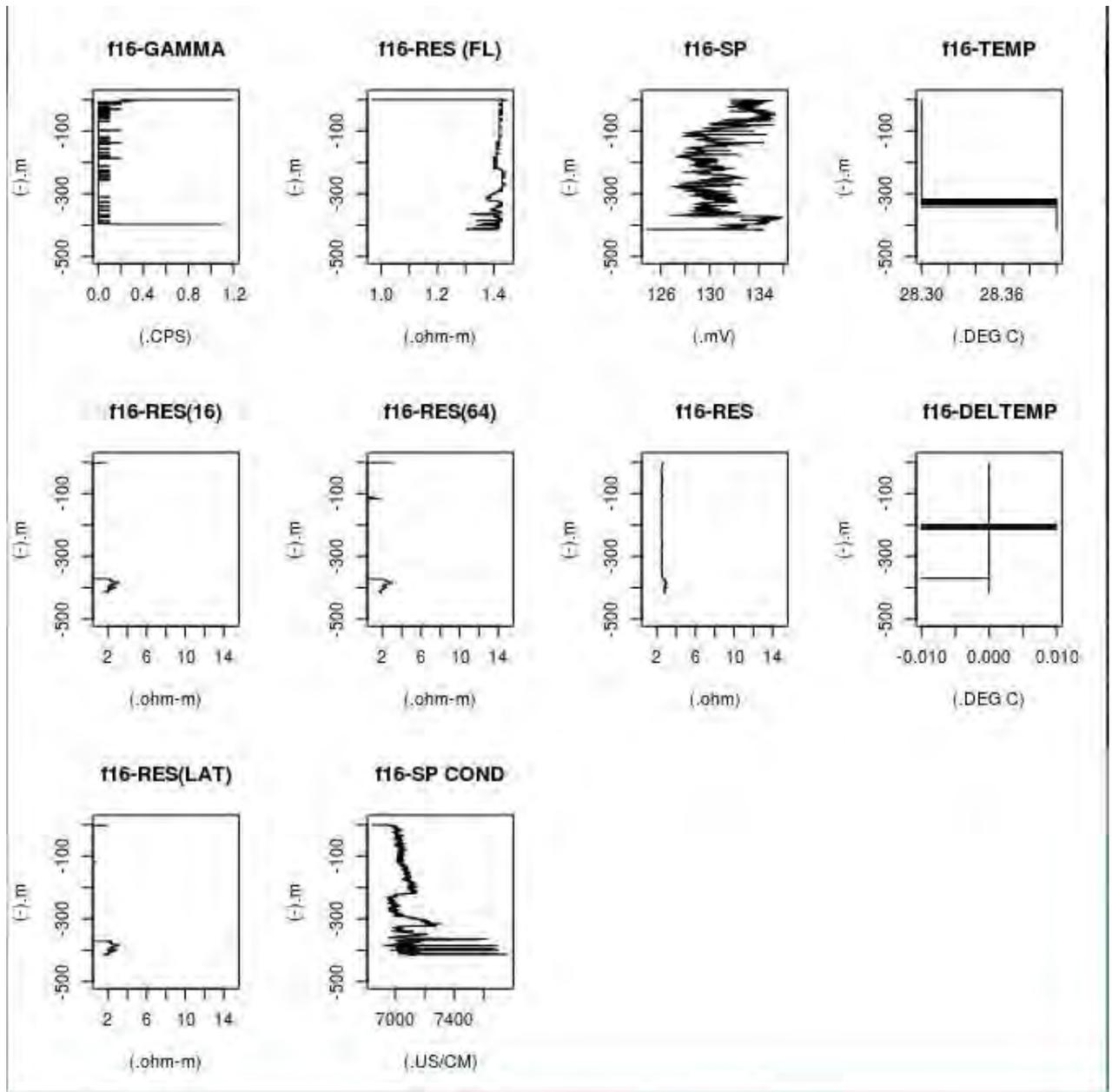


Figura 62: Registros geofísicos del pozo (f-16) Proyecto Colima modelo 24.

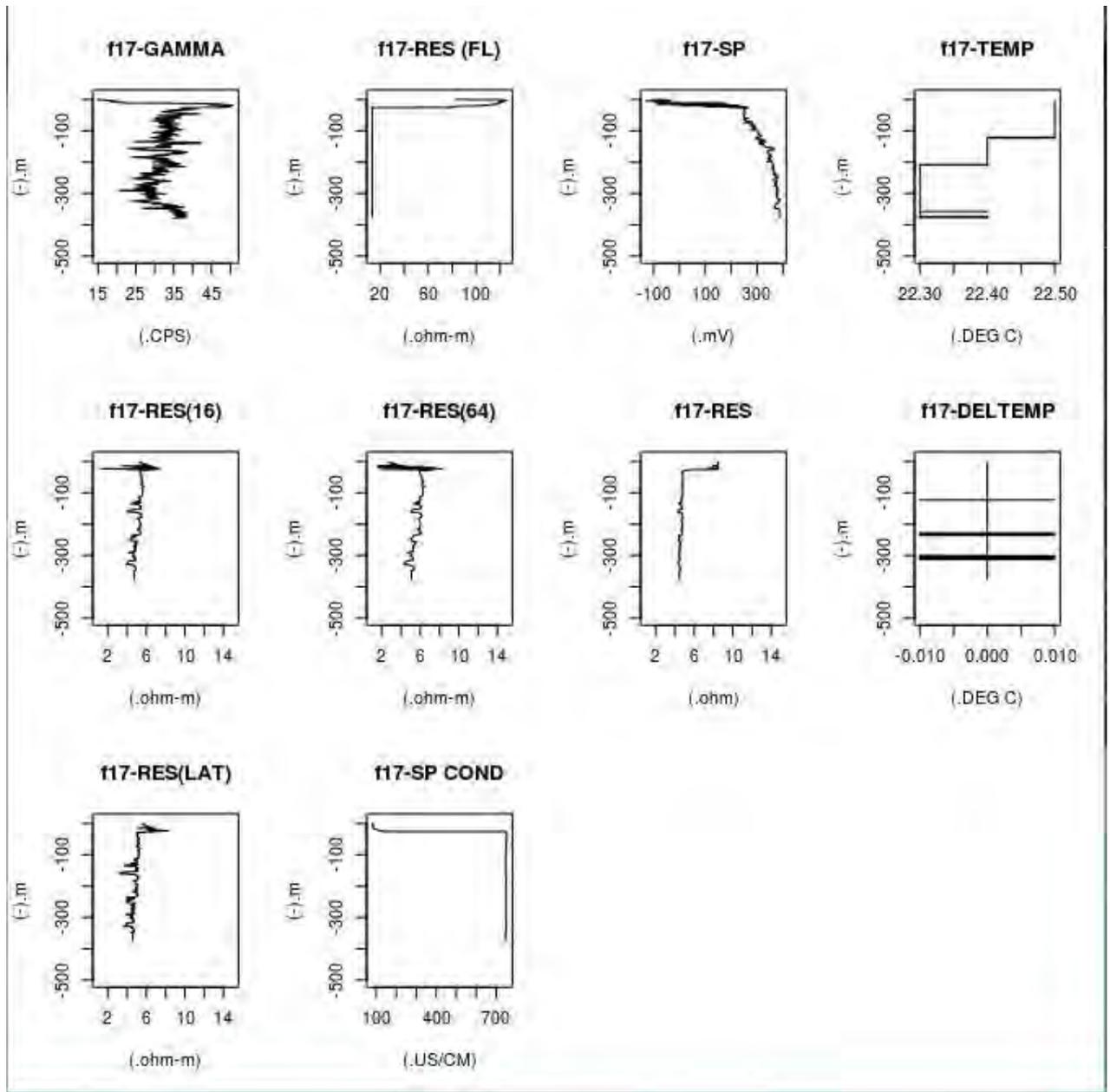


Figura 63: Registros geofísicos del pozo (f-17) El salvial- II.

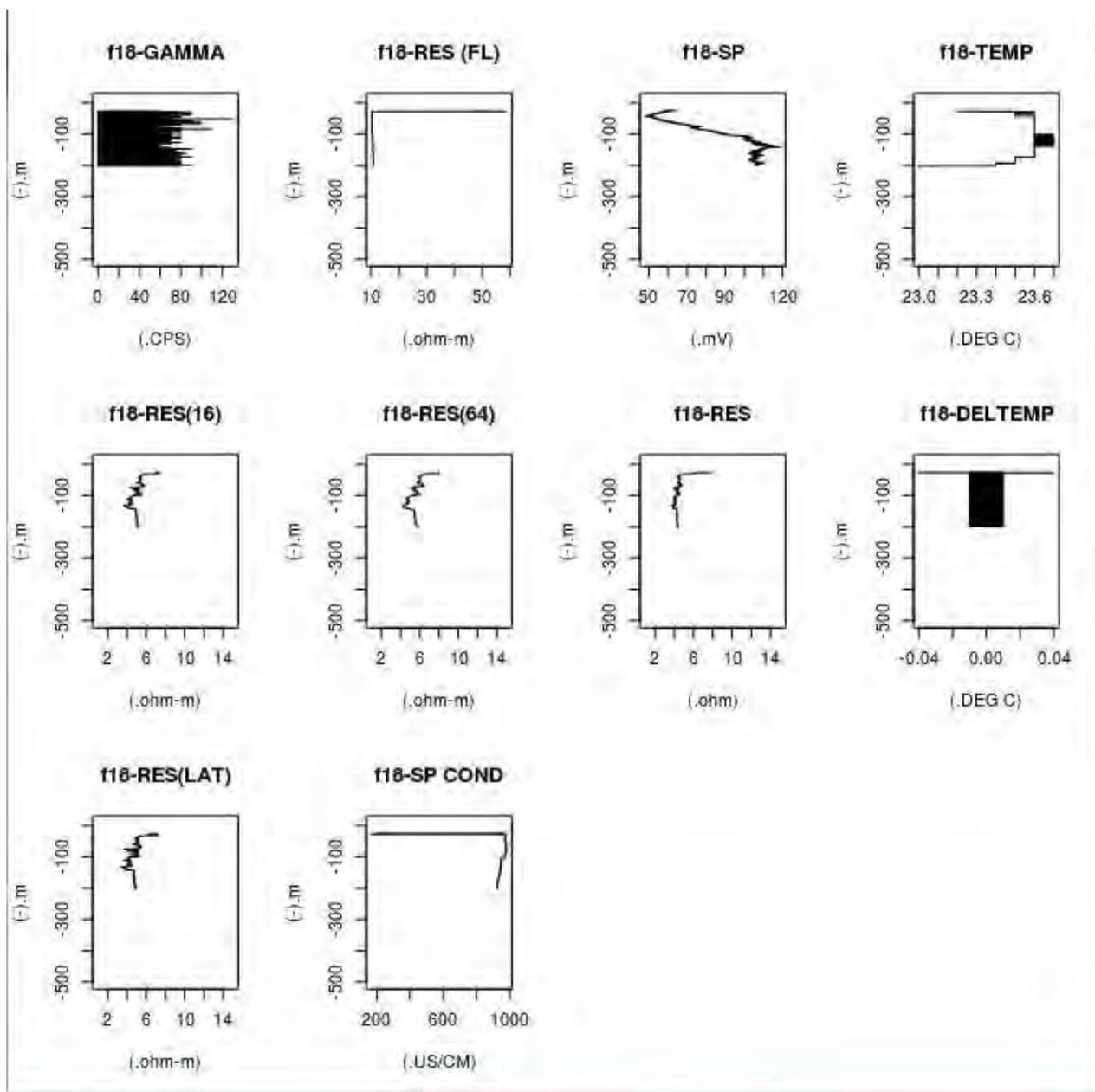


Figura 64: Registros geofísicos del pozo (f-18) El cerillero.

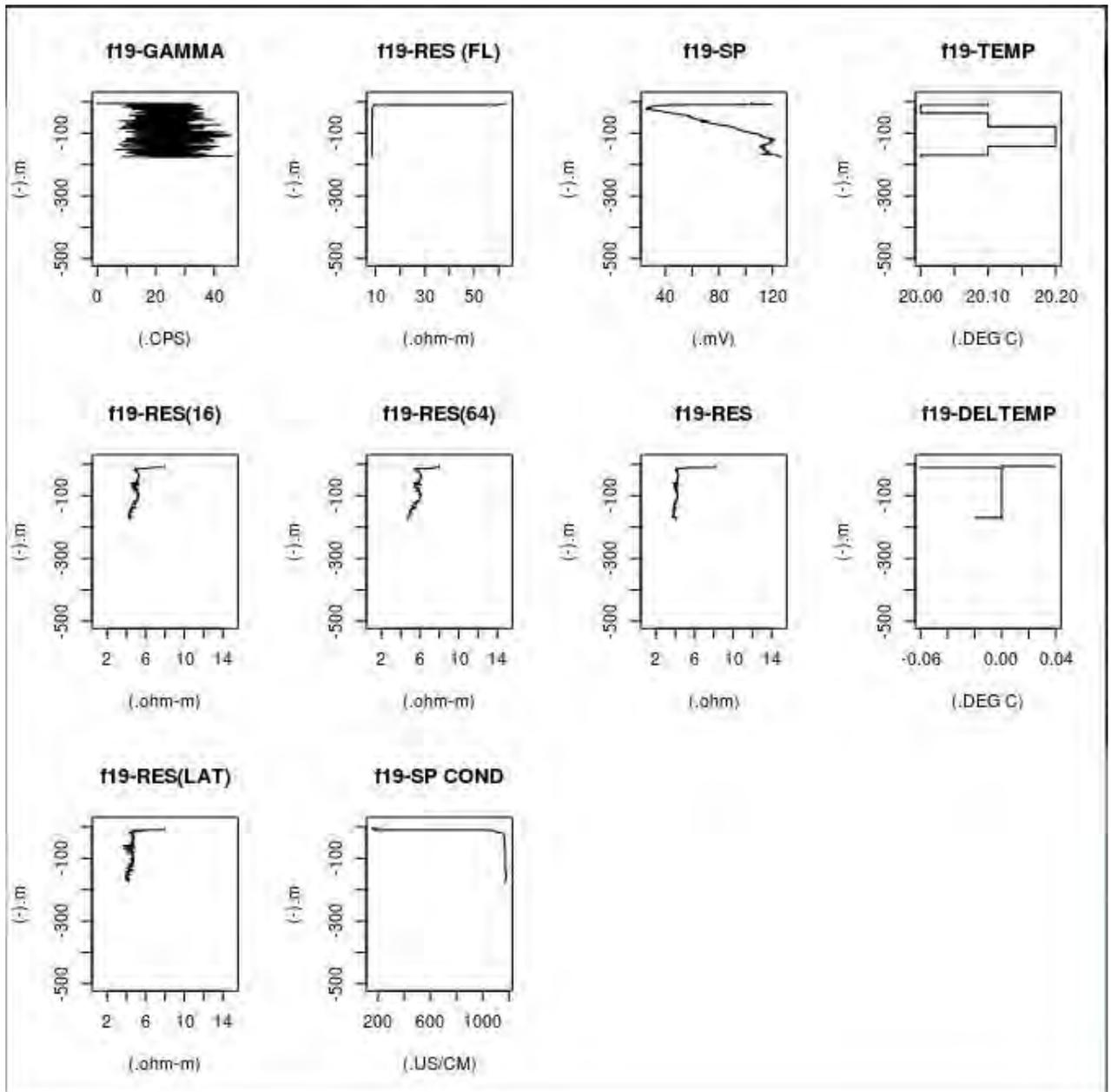


Figura 65: Registros geofísicos del pozo (f-19) José Toledo.

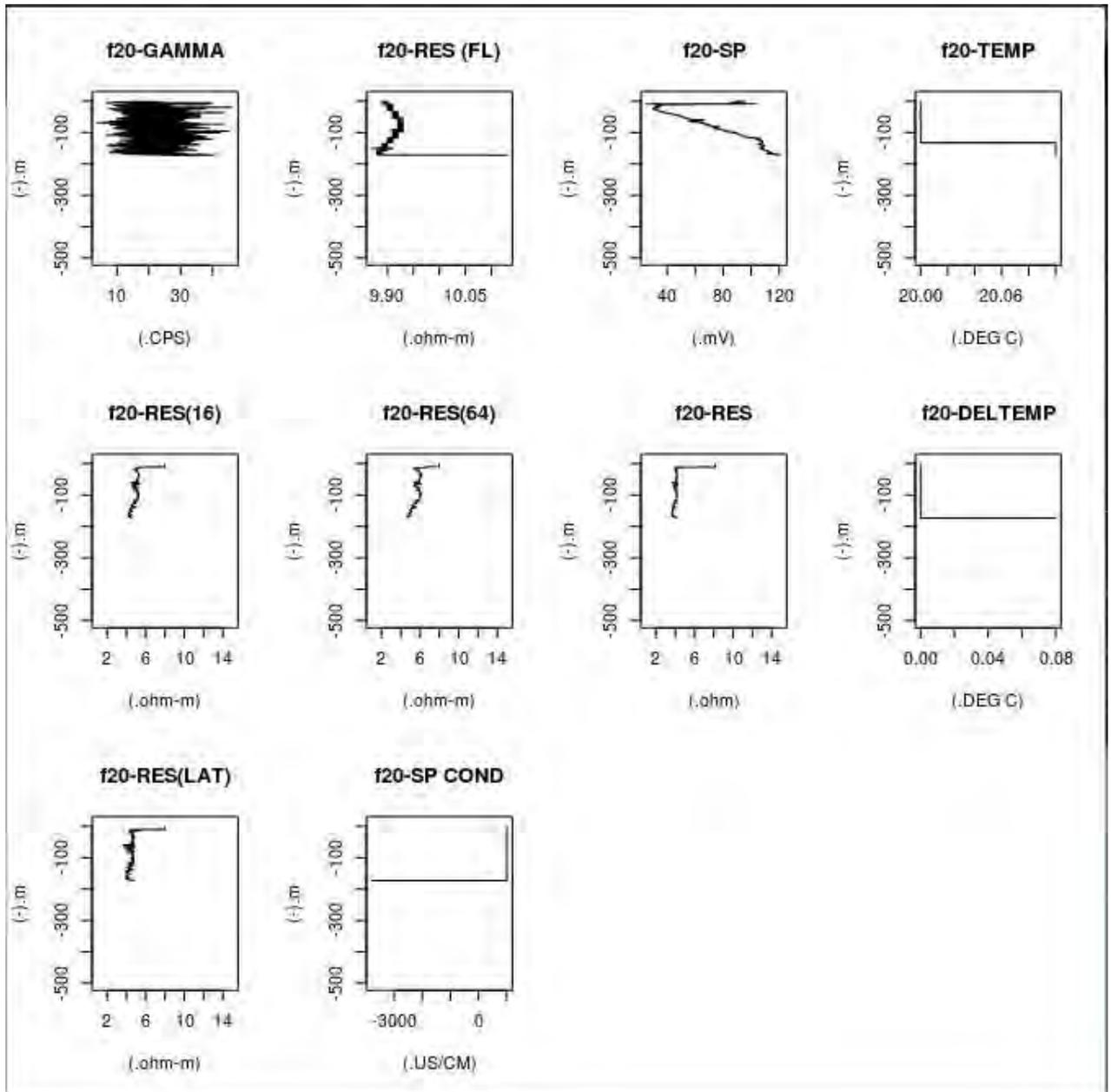


Figura 66: Registros geofísicos del pozo (f-20) José Toledo.

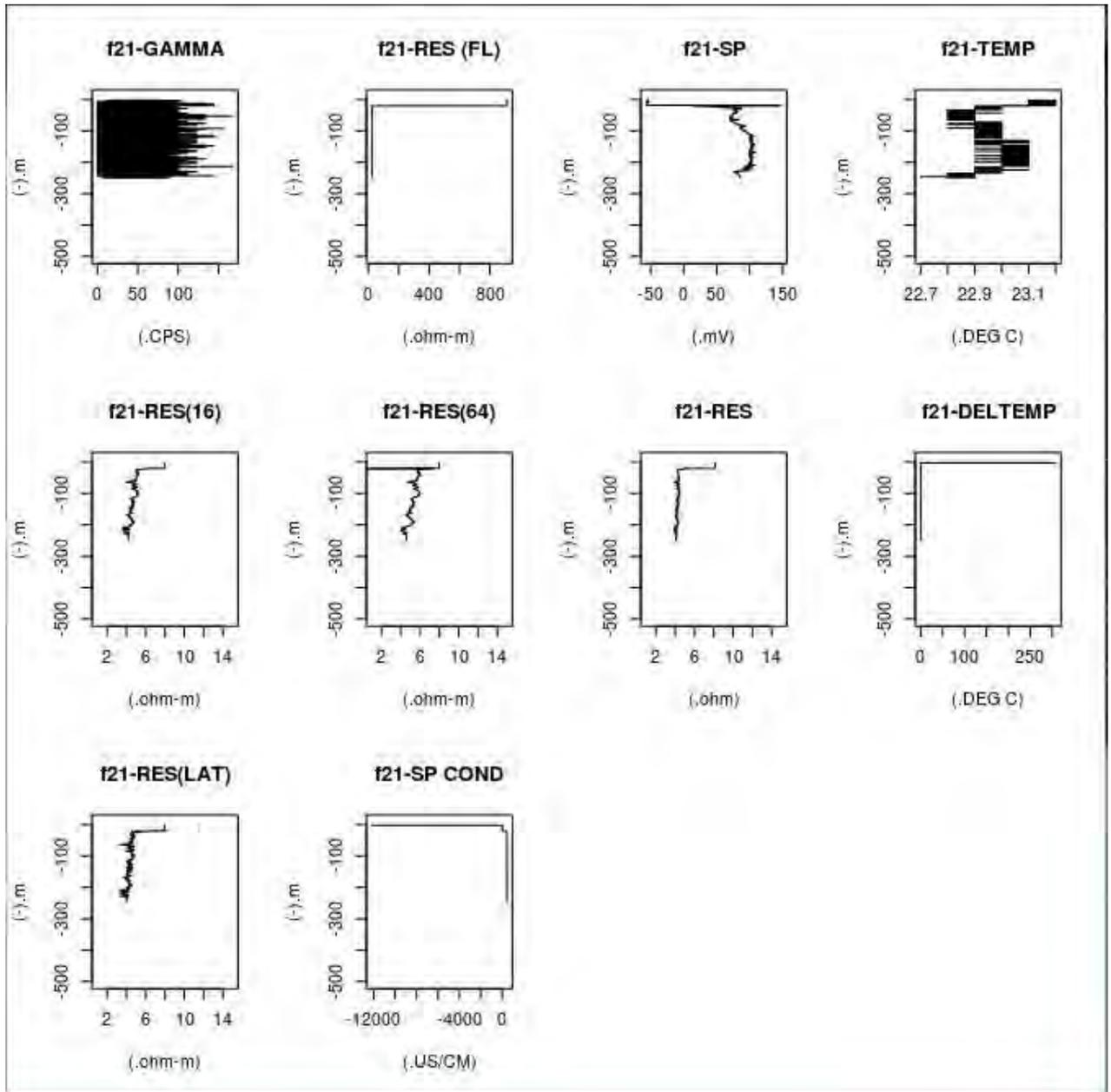


Figura 67: Registros geofísicos del pozo (f-21) La tijera.

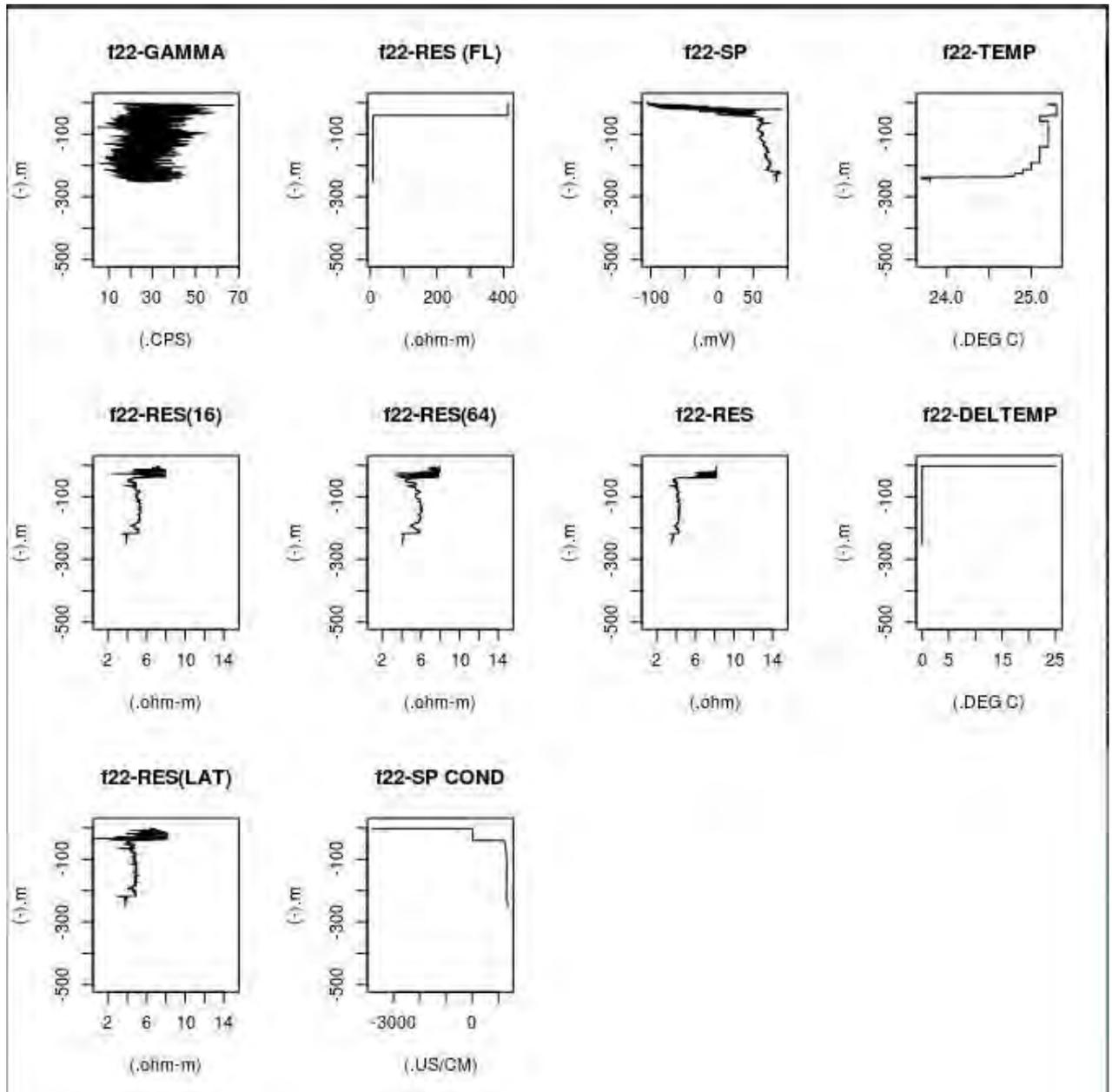


Figura 68: Registros geofísicos del pozo (f-22) El platanar.

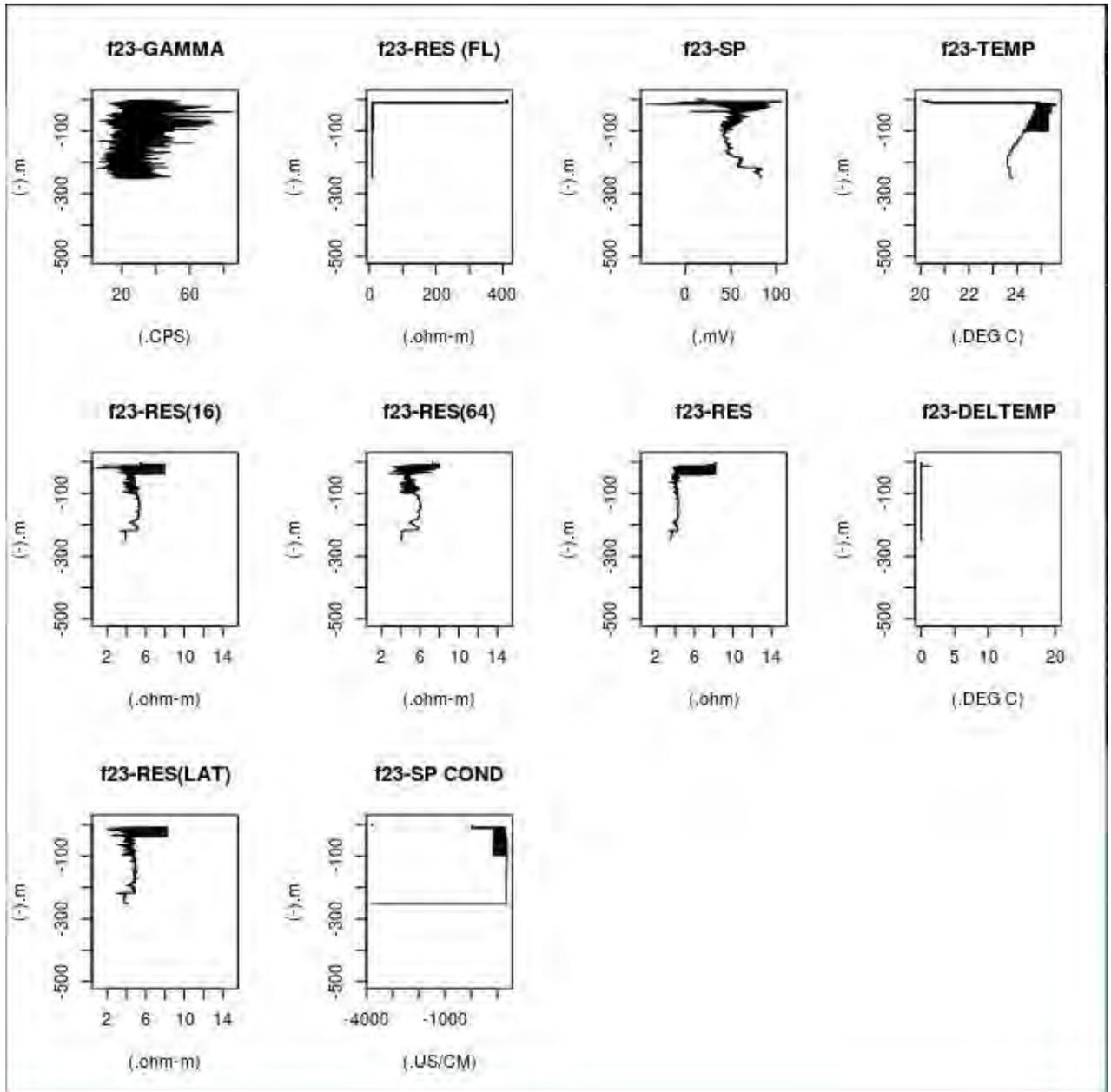


Figura 69: Registros geofísicos del pozo (f-23) El platanar.

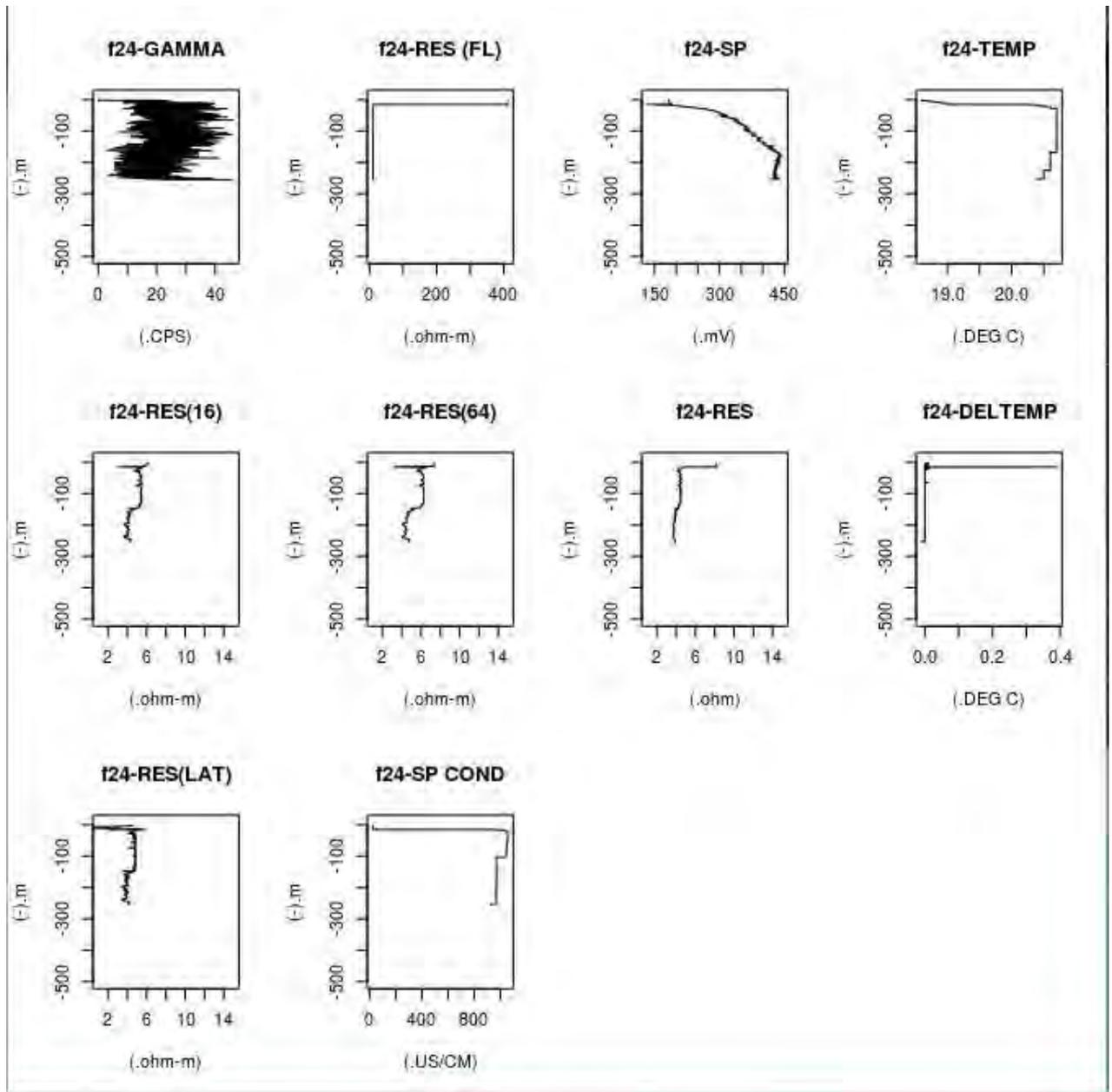


Figura 70: Registros geofísicos del pozo (f-24) Mendoza.

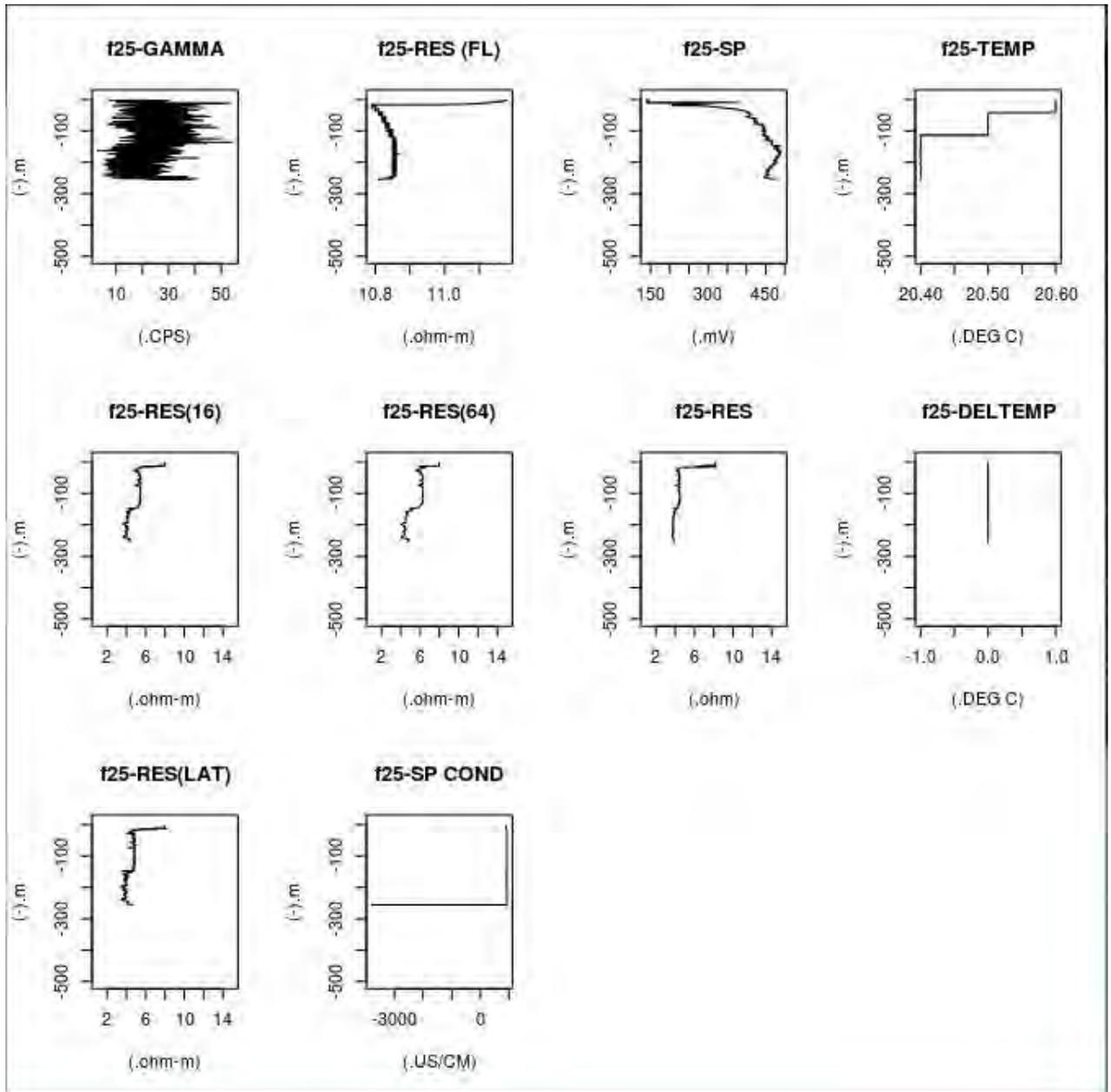


Figura 71: Registros geofísicos del pozo (f-25) Mendoza.

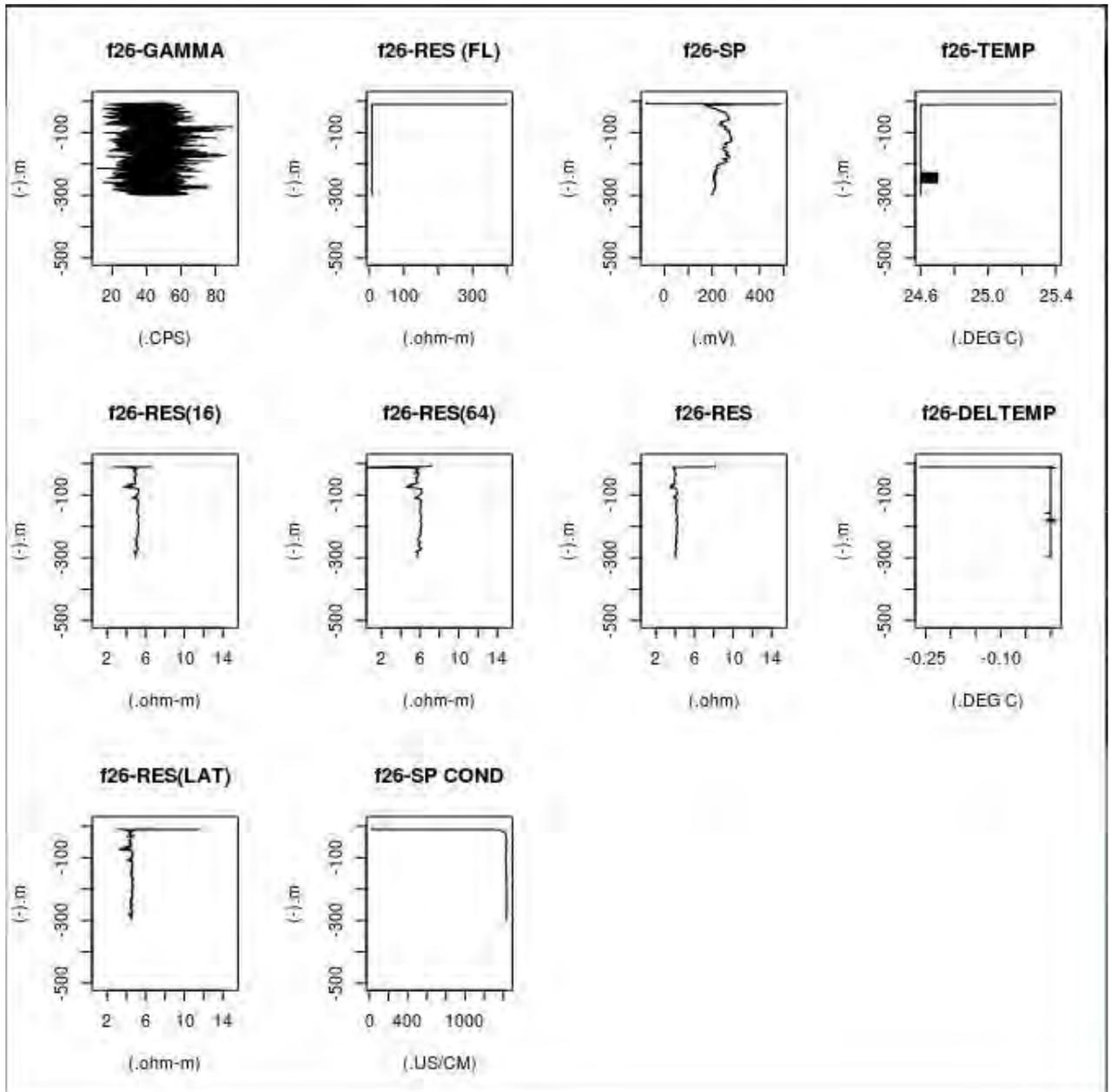


Figura 72: Registros geofísicos del pozo (f-26) La joya II.

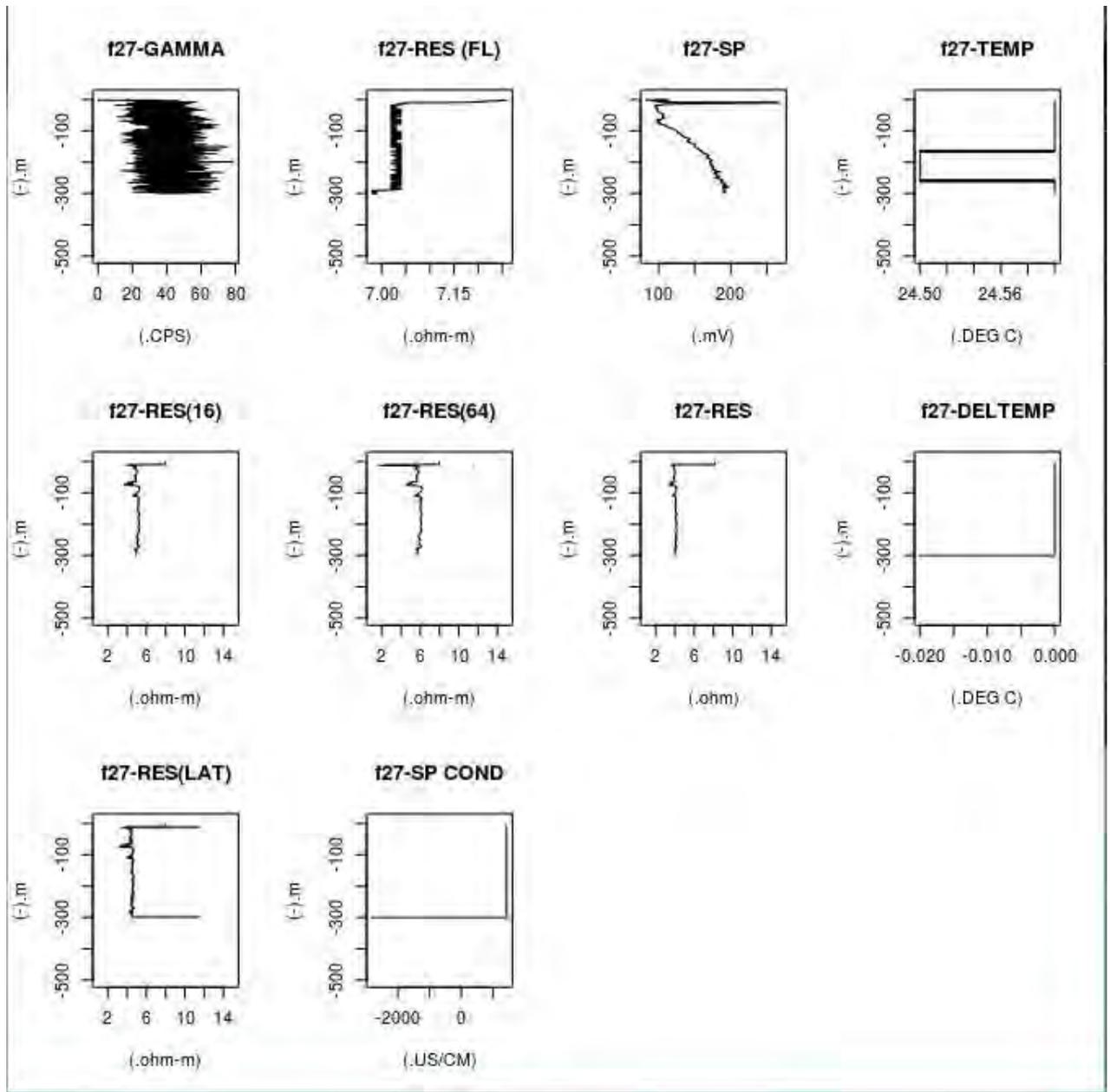


Figura 73: Registros geofísicos del pozo (f-27) La joya II.

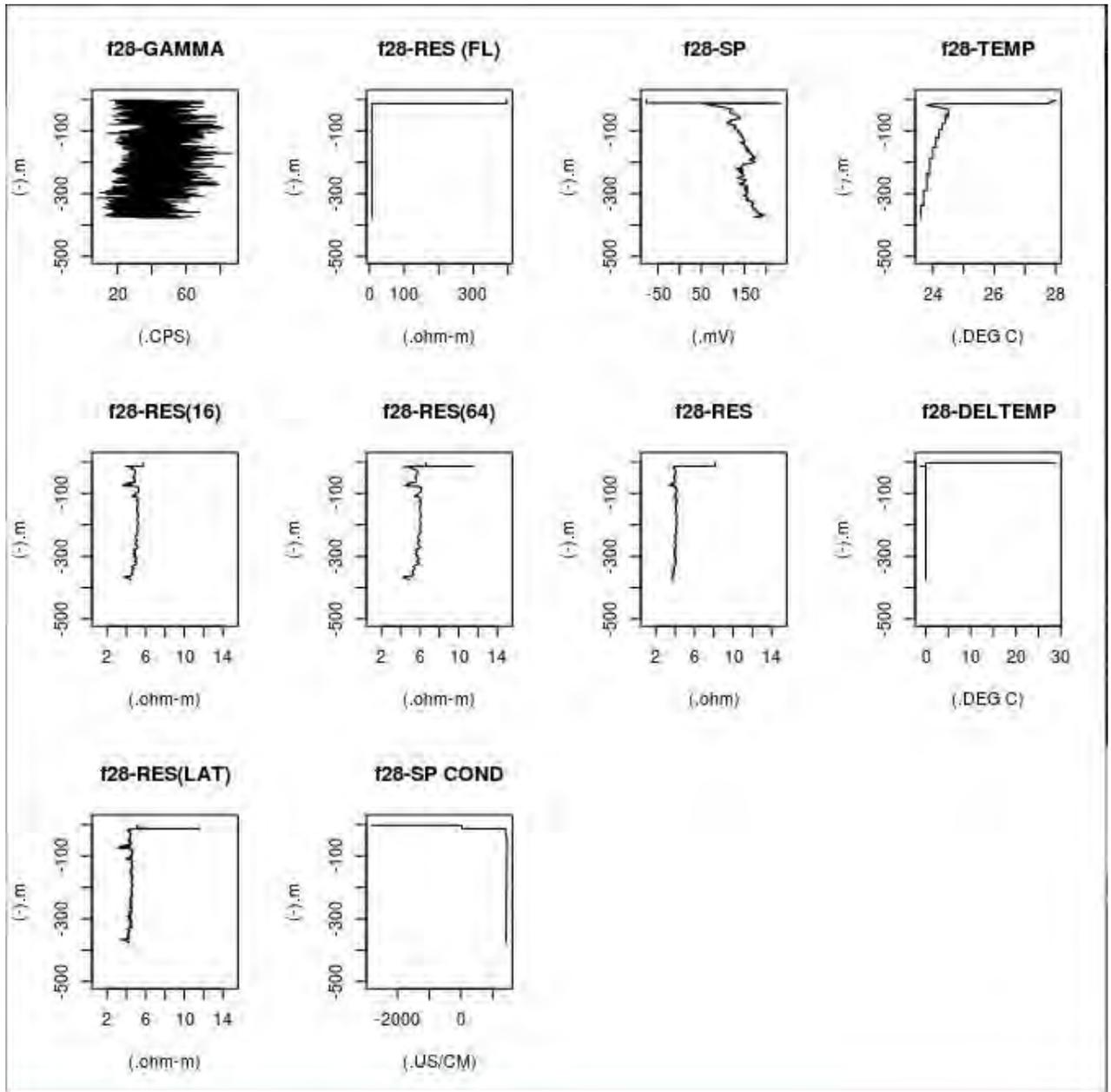


Figura 74: Registros geofísicos del pozo (f-28) La joya II.

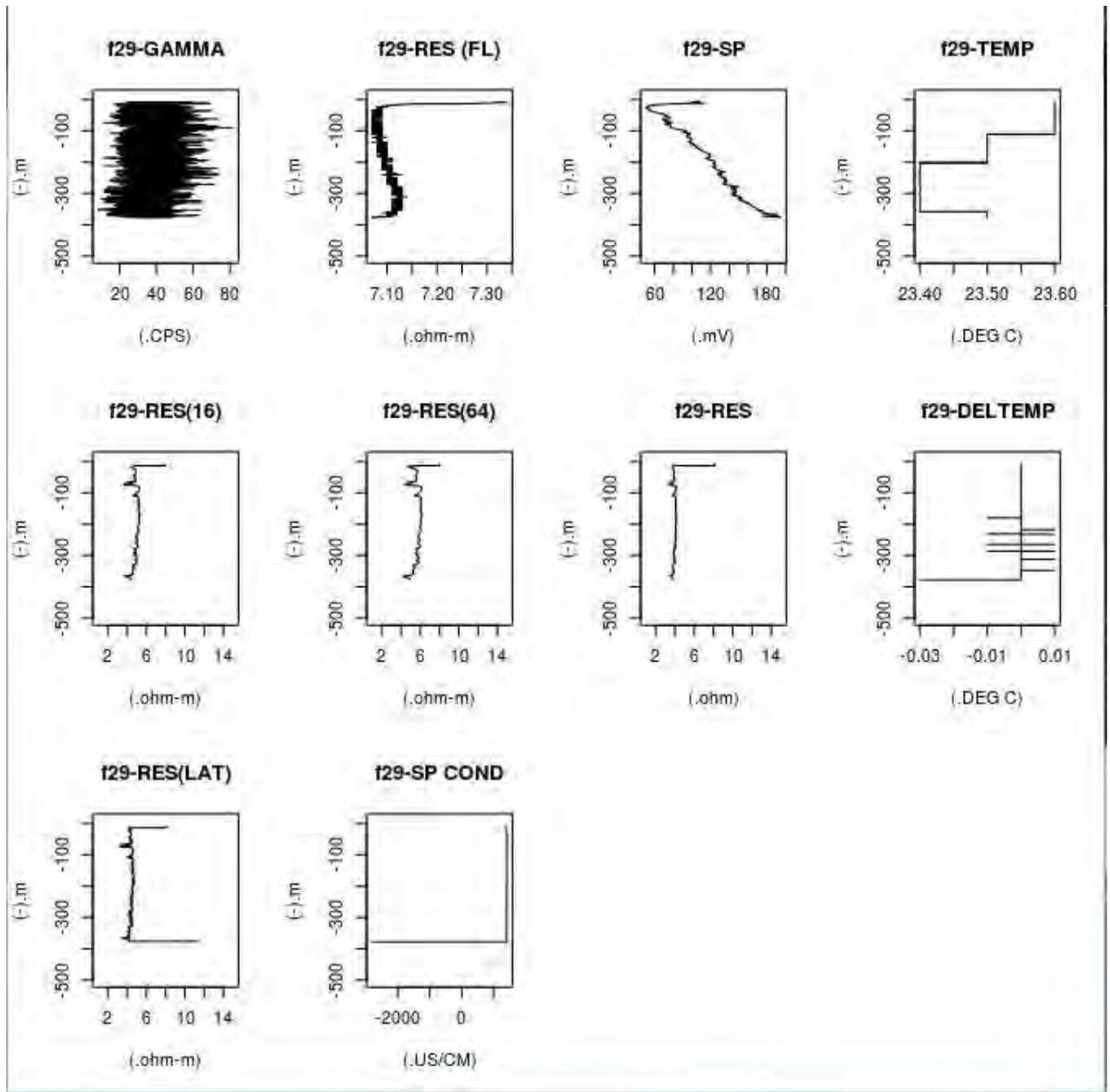


Figura 75: Registros geofísicos del pozo (f-29) La joya II.

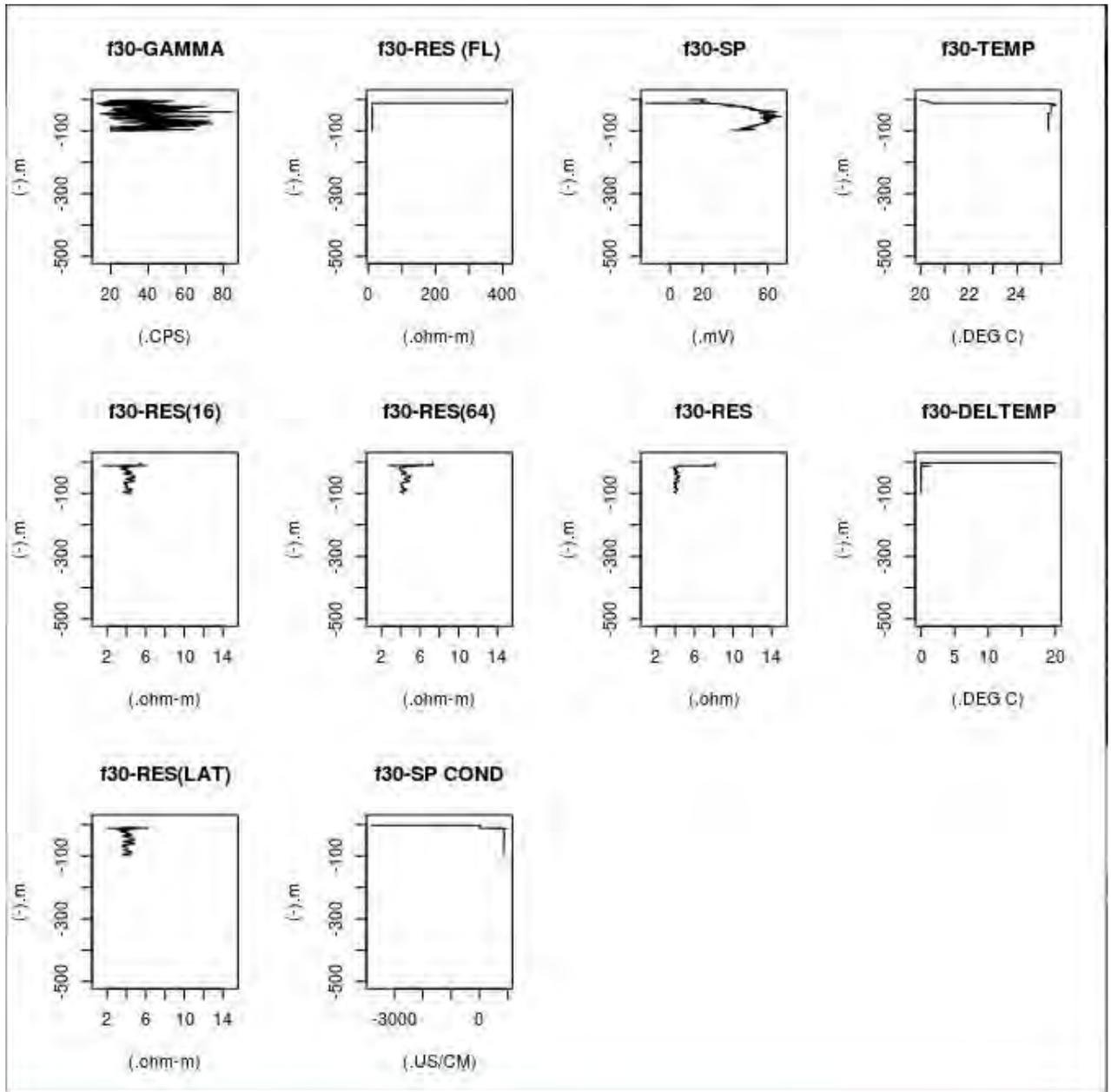


Figura 76: Registros geofísicos del pozo (f-30) Lomas del pinar.

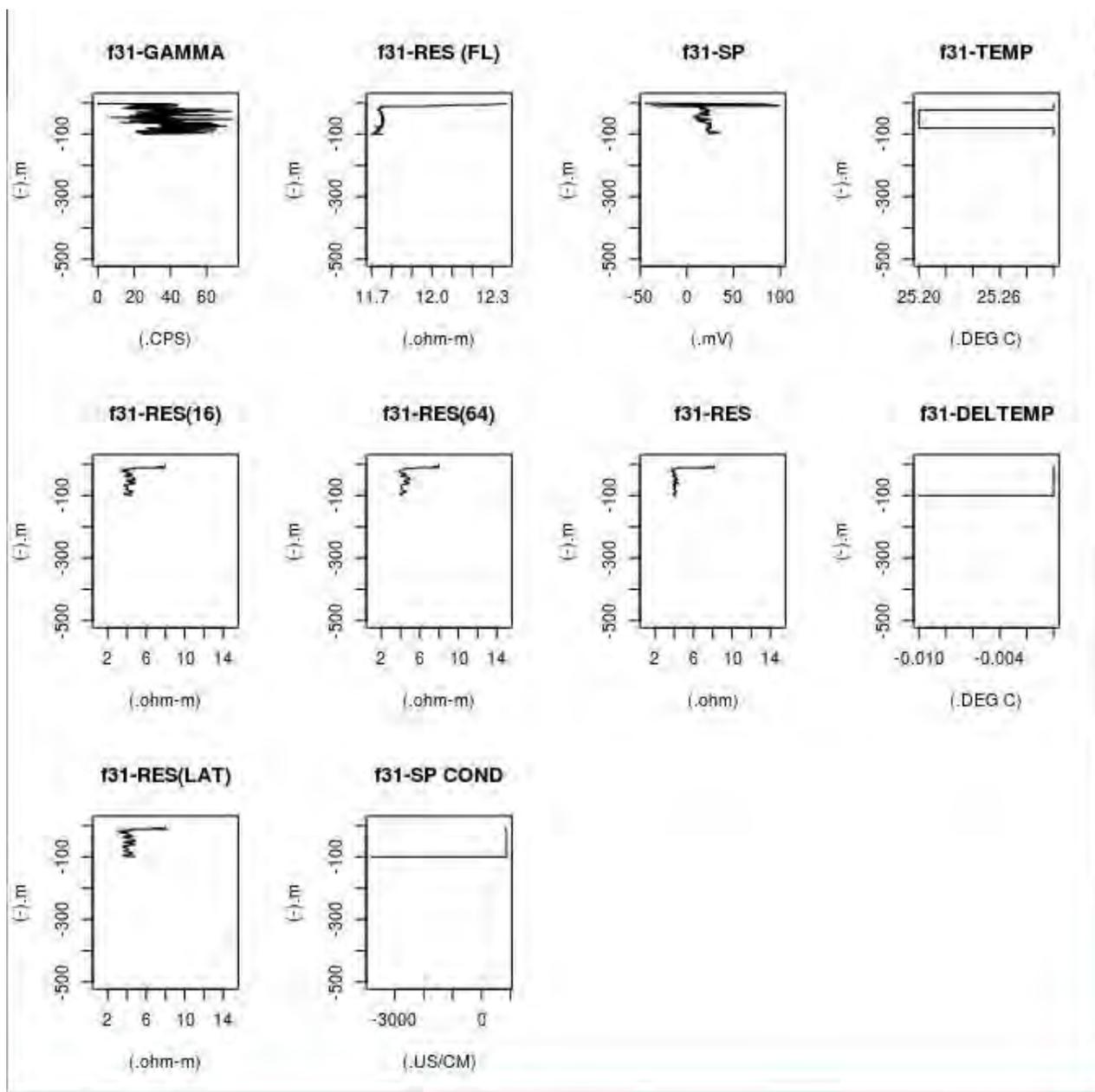


Figura 77: Registros geofísicos del pozo (f-31) Lomas del pinar.

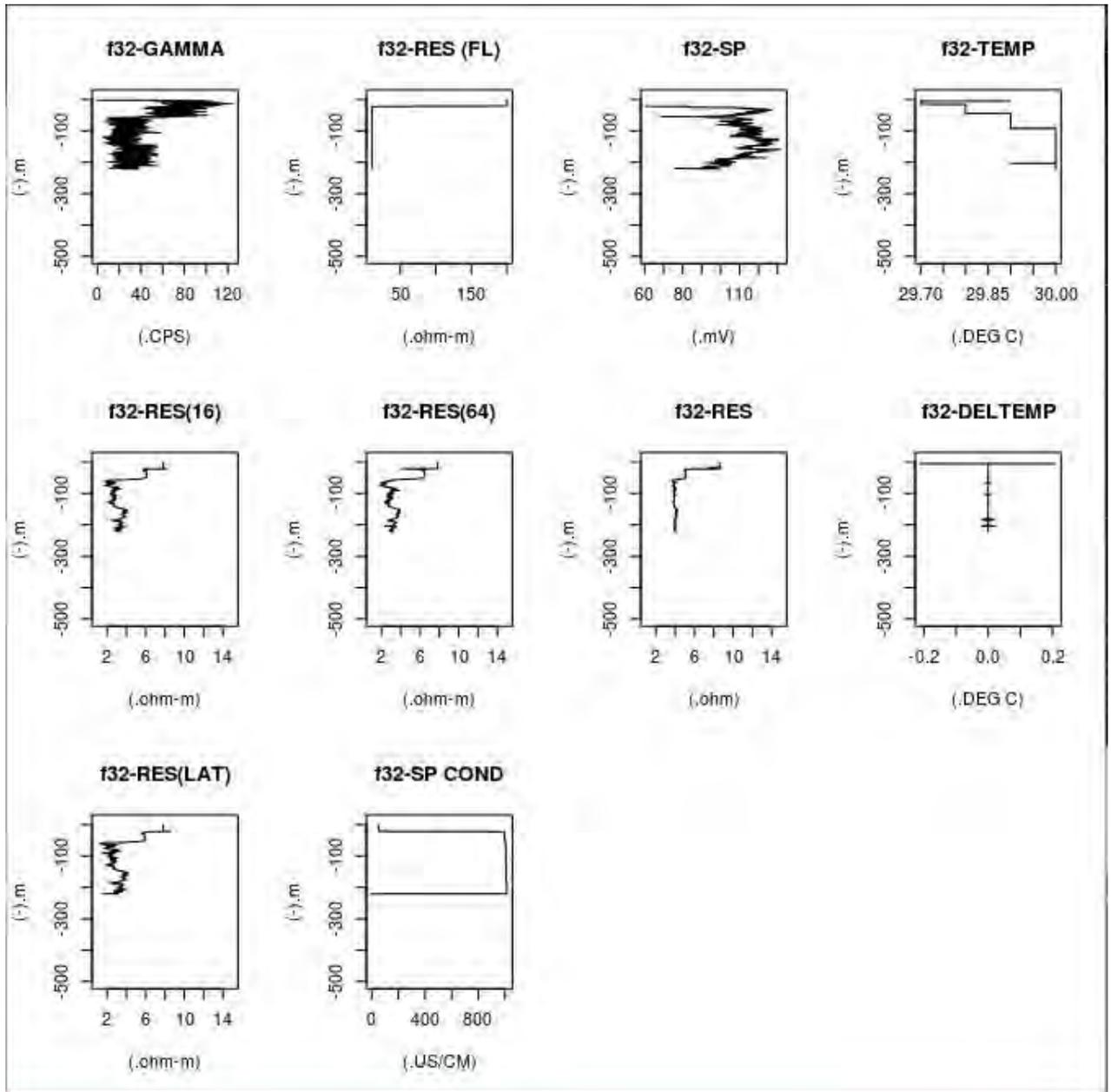


Figura 78: Registros geofísicos del pozo (f-32) El paraíso.

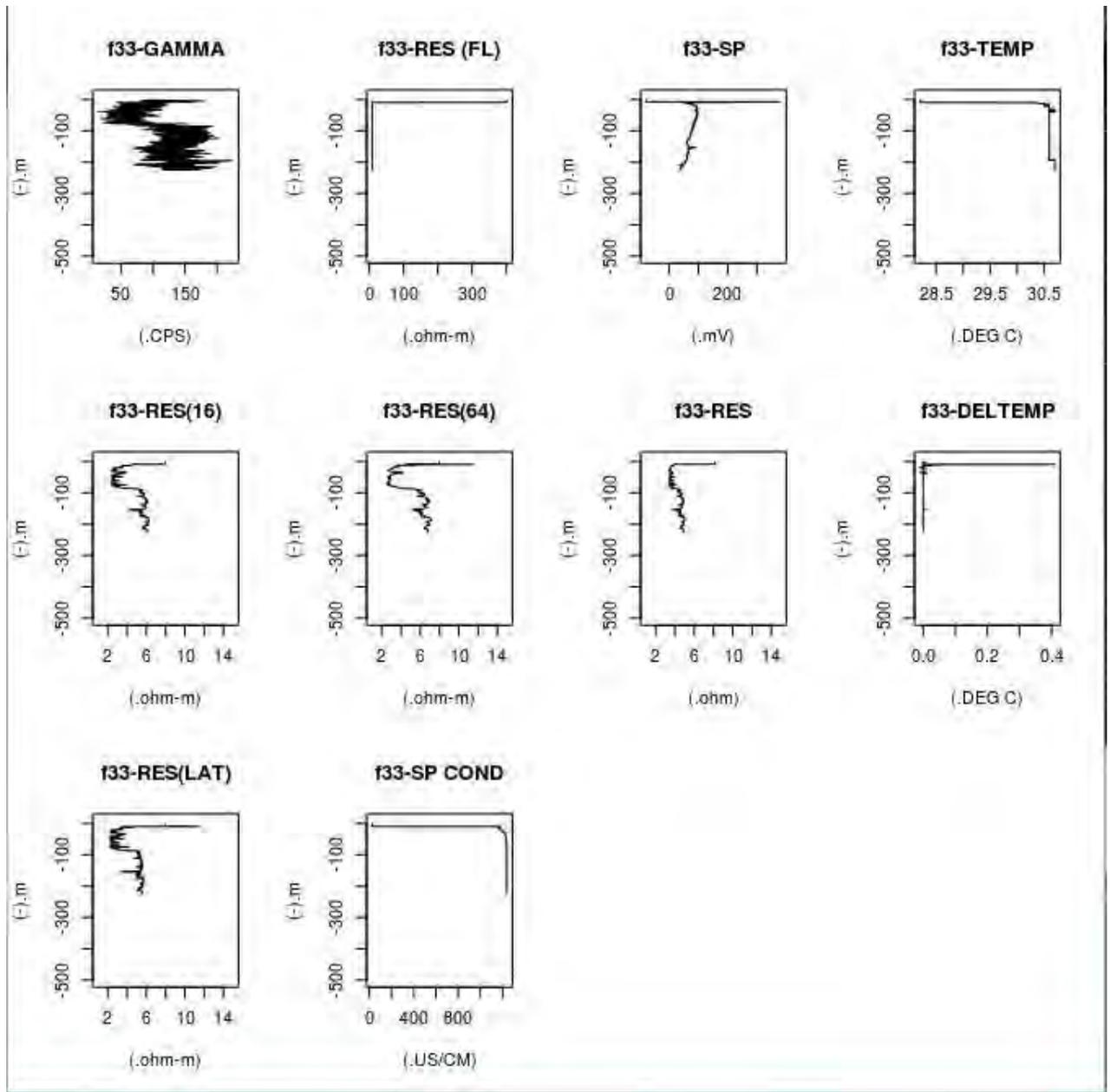


Figura 79: Registros geofísicos del pozo (f-33) Montelongo.

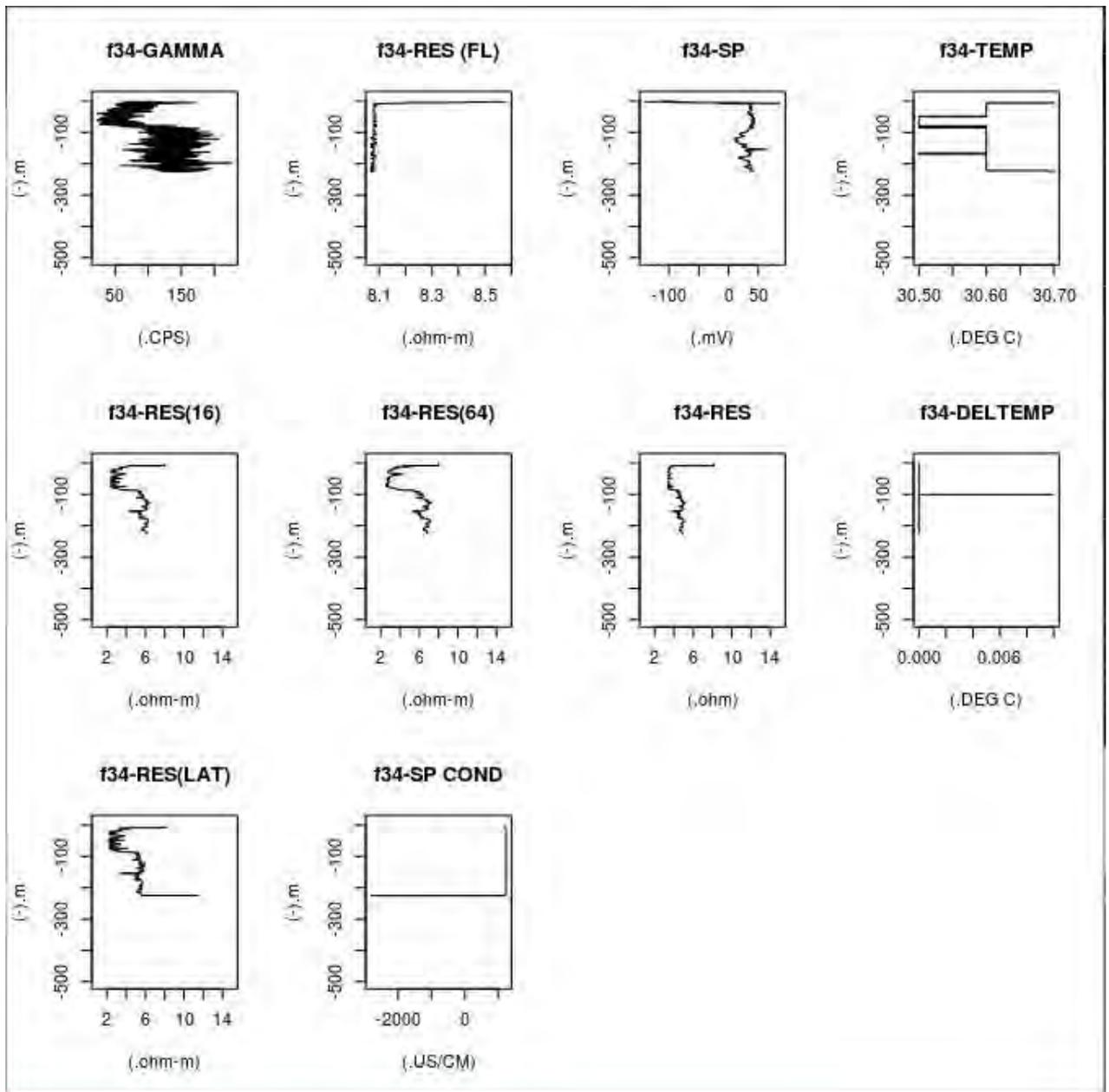


Figura 80: Registros geofísicos del pozo (f-34) Montelongo.

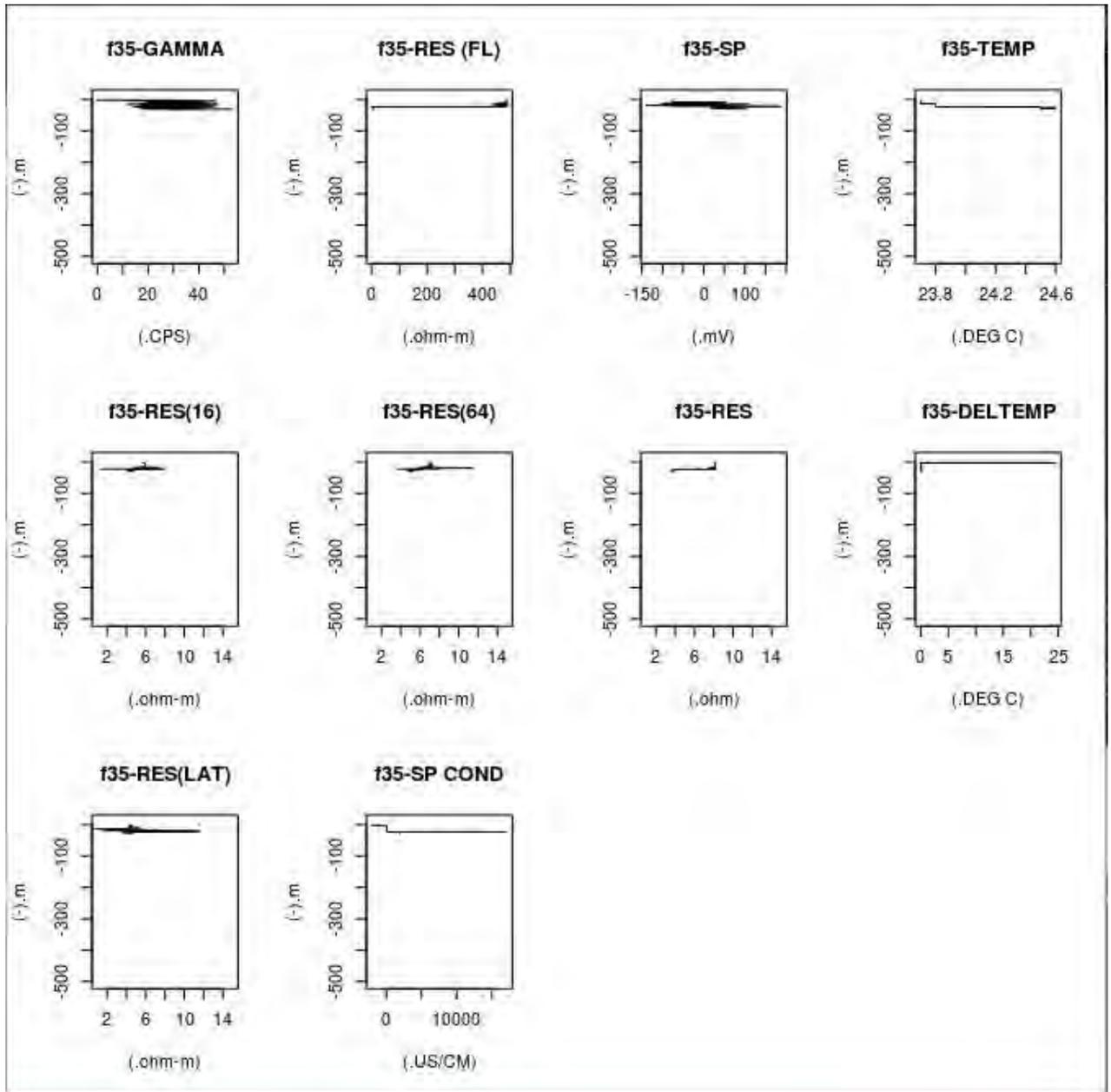


Figura 81: Registros geofísicos del pozo (f-35) Tezontel.

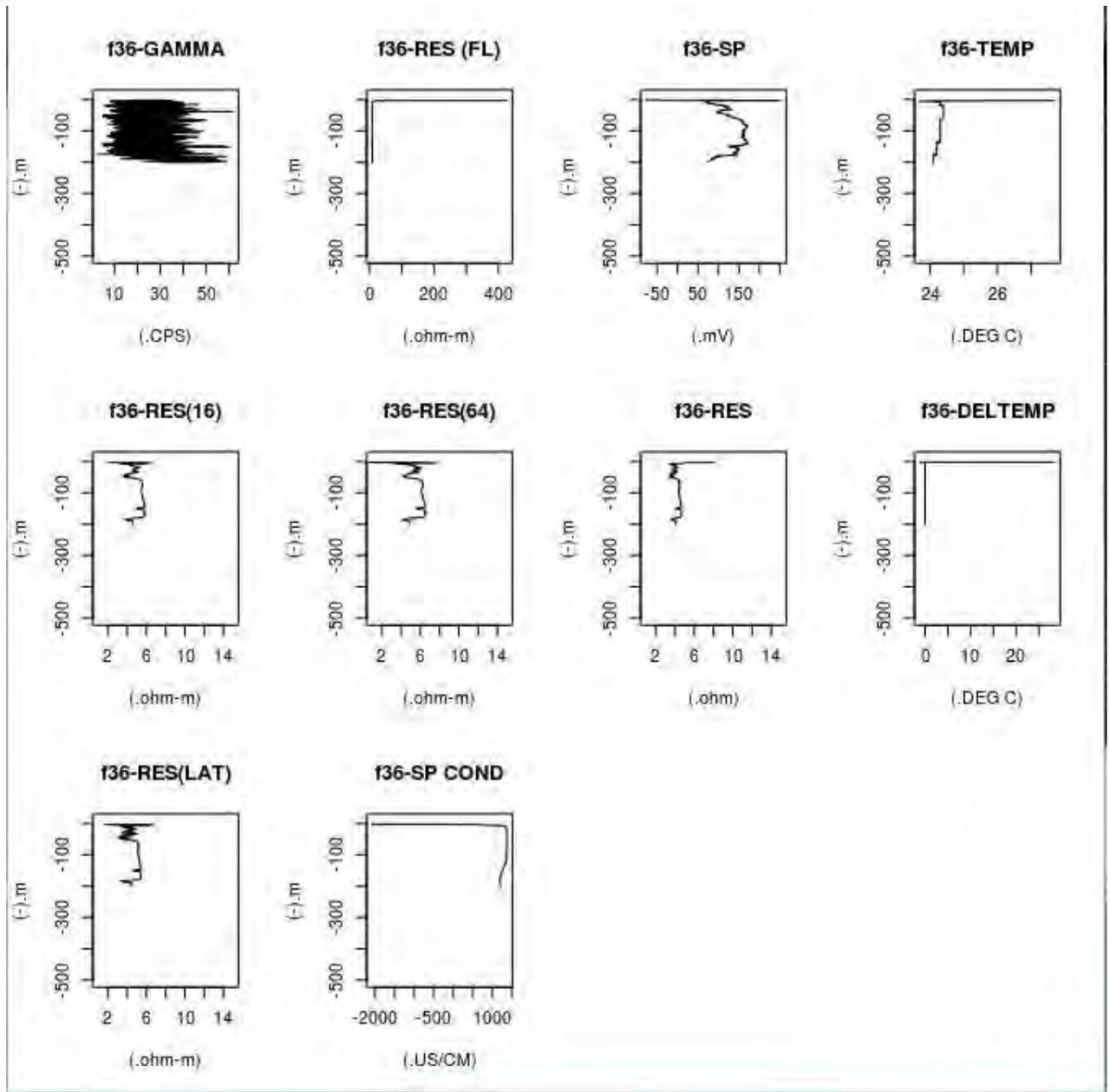


Figura 82: Registros geofísicos del pozo (f-36) Tezontel.

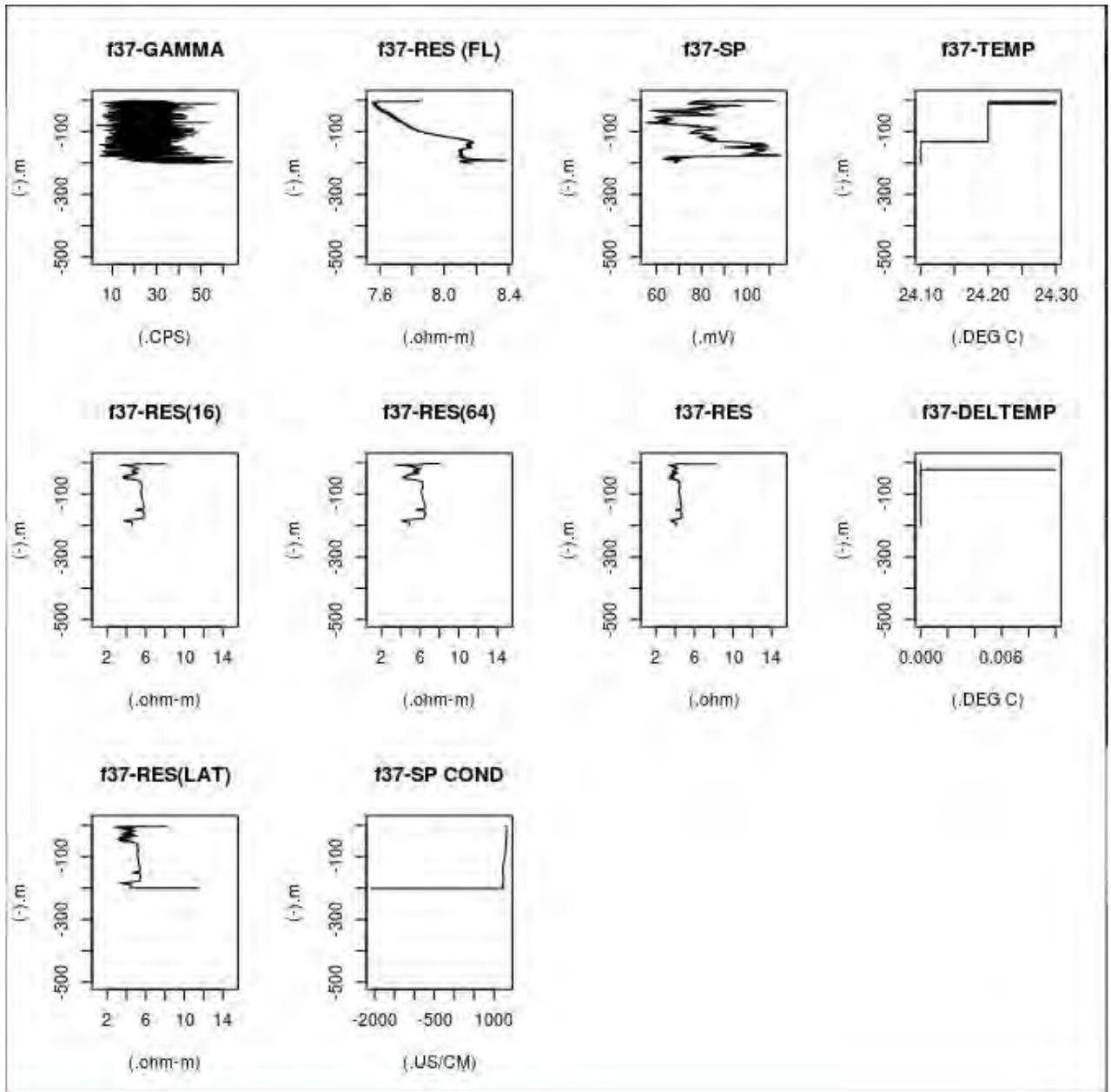


Figura 83: Registros geofísicos del pozo (f-37) Tezontel.

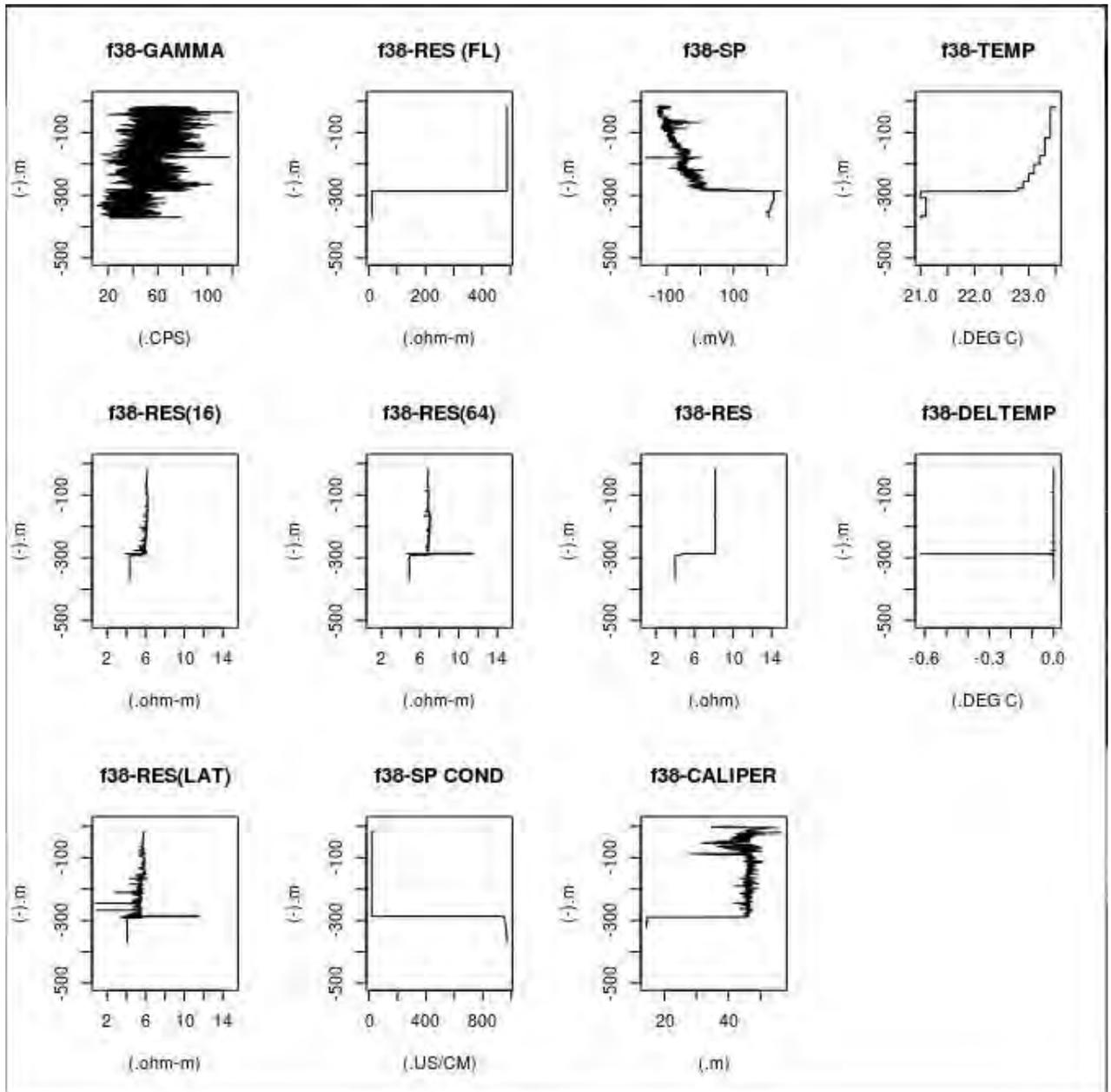


Figura 84: Registros geofísicos del pozo (f-38) Canoas 2.

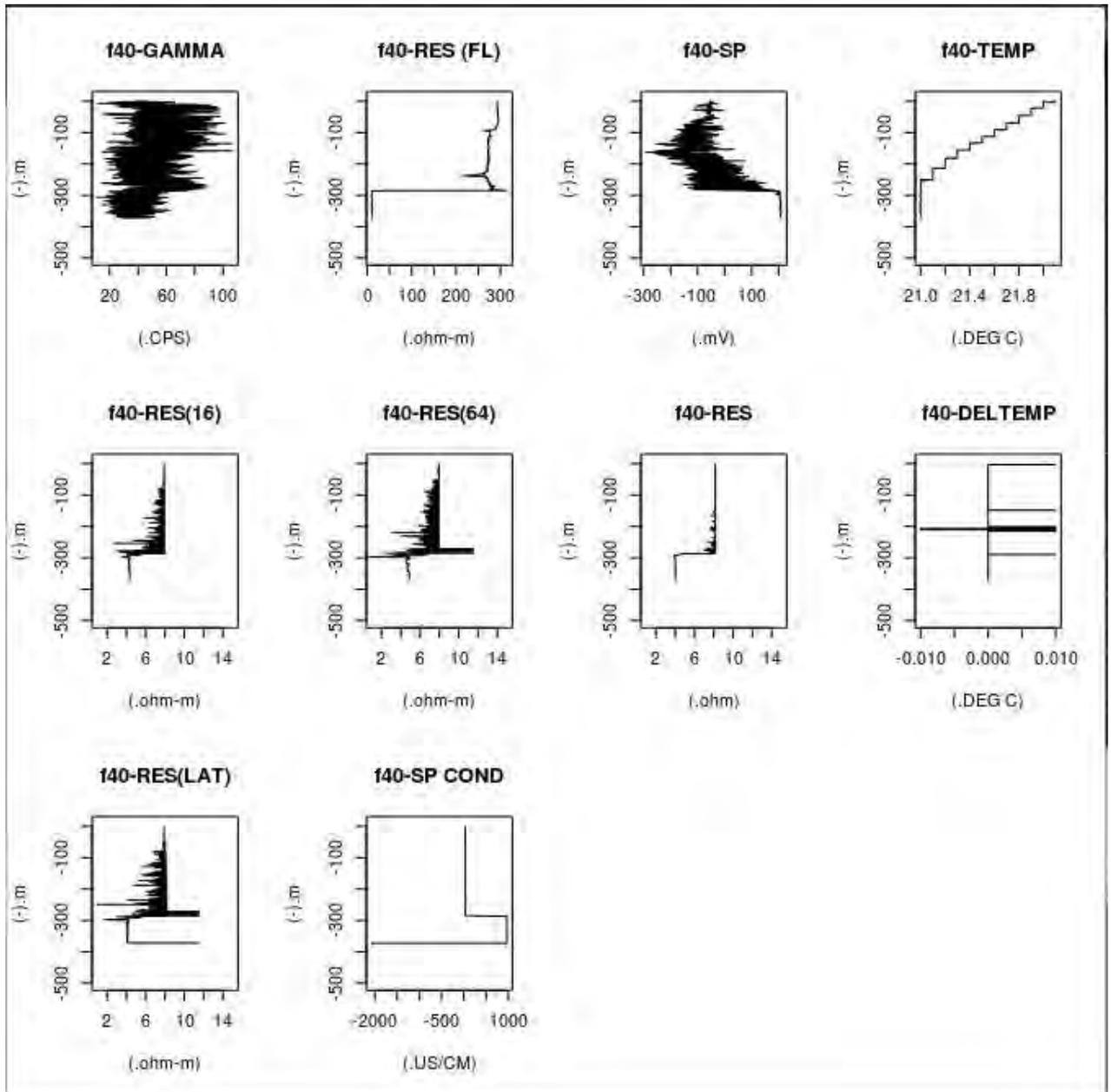


Figura 85: Registros geofísicos del pozo (f-40) Canoas 2.

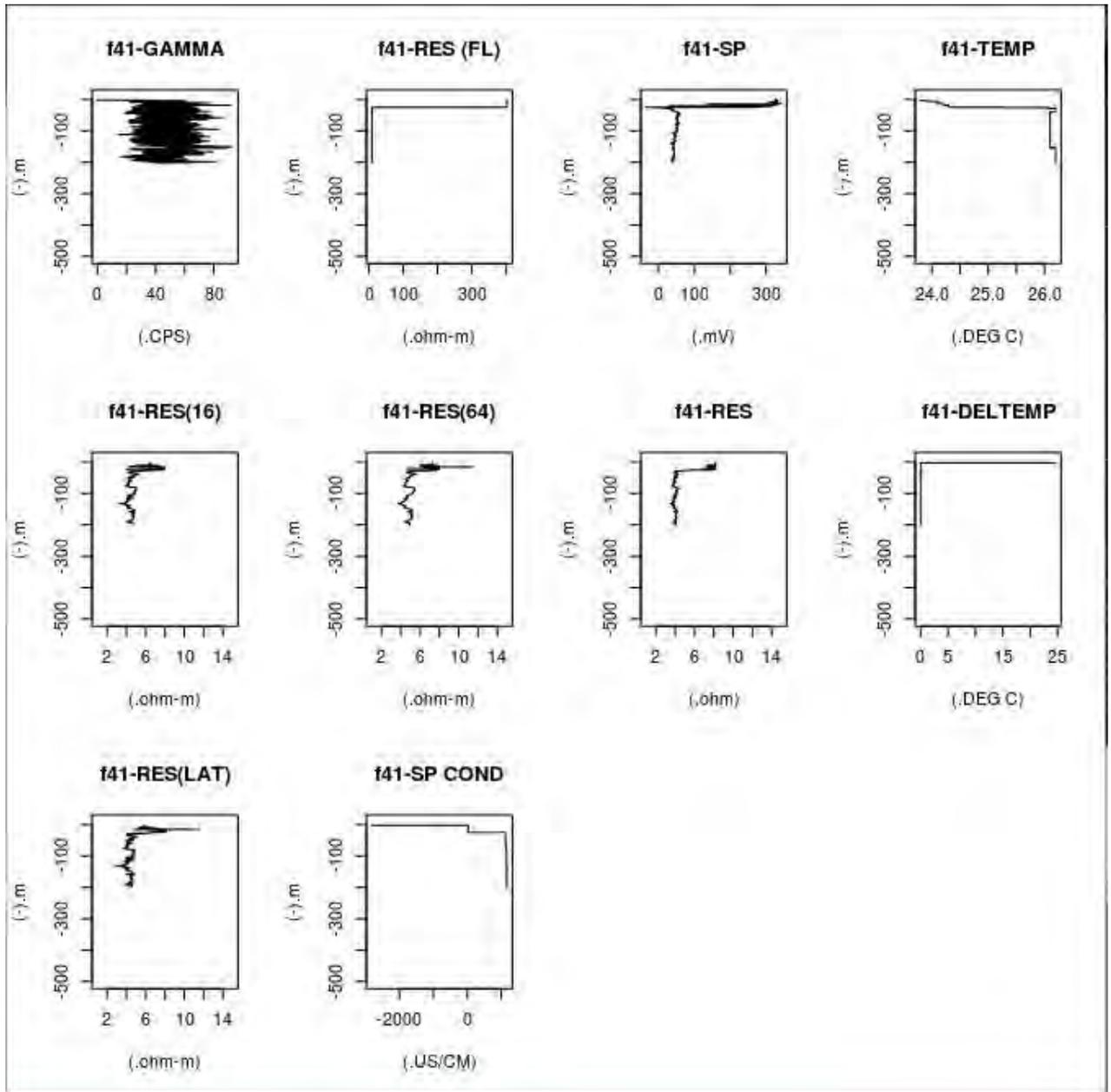


Figura 86: Registros geofísicos del pozo (f-41) Dr. Pedro López.

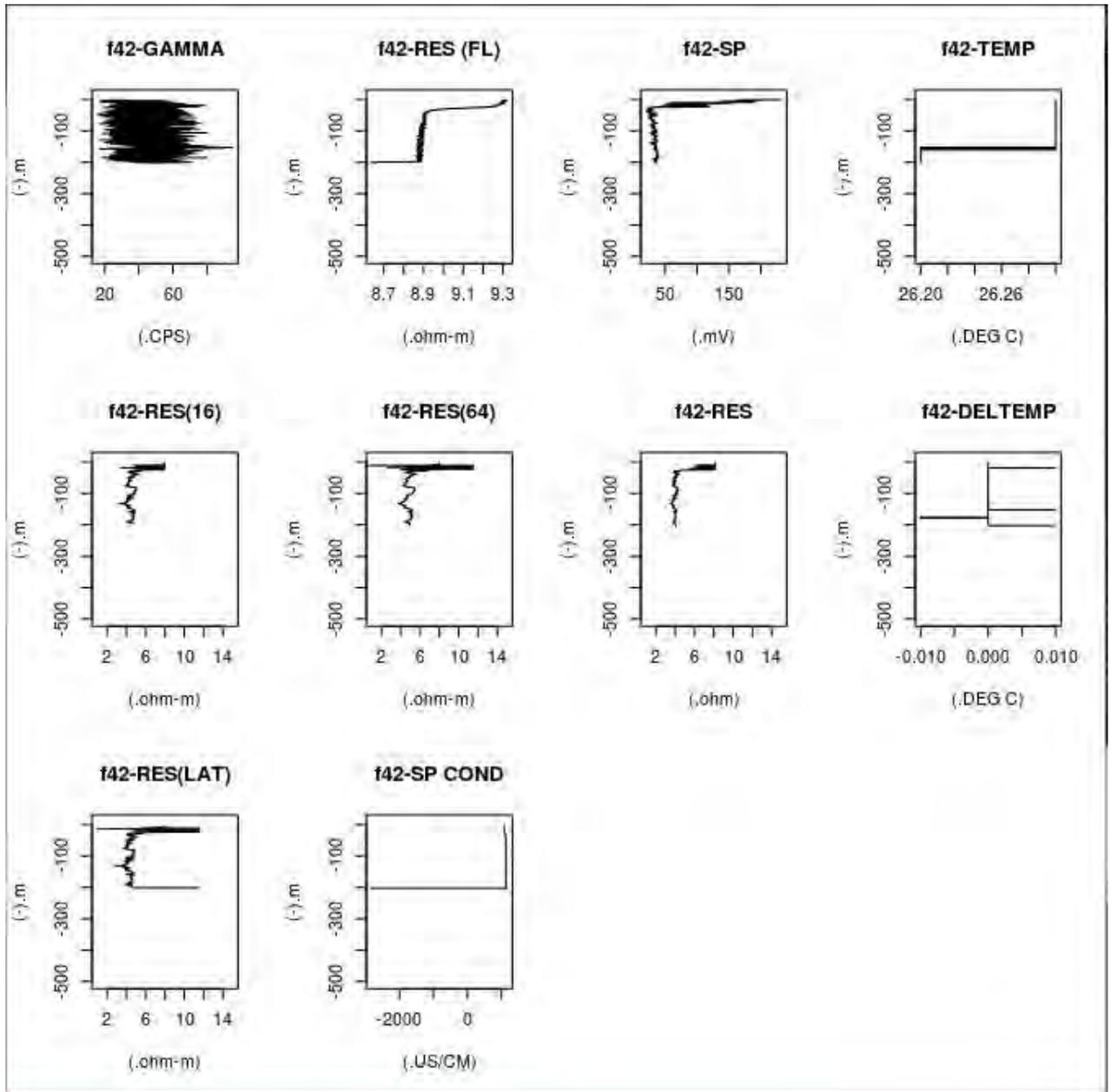


Figura 87: Registros geofísicos del pozo (f-42) Dr. Pedro López.

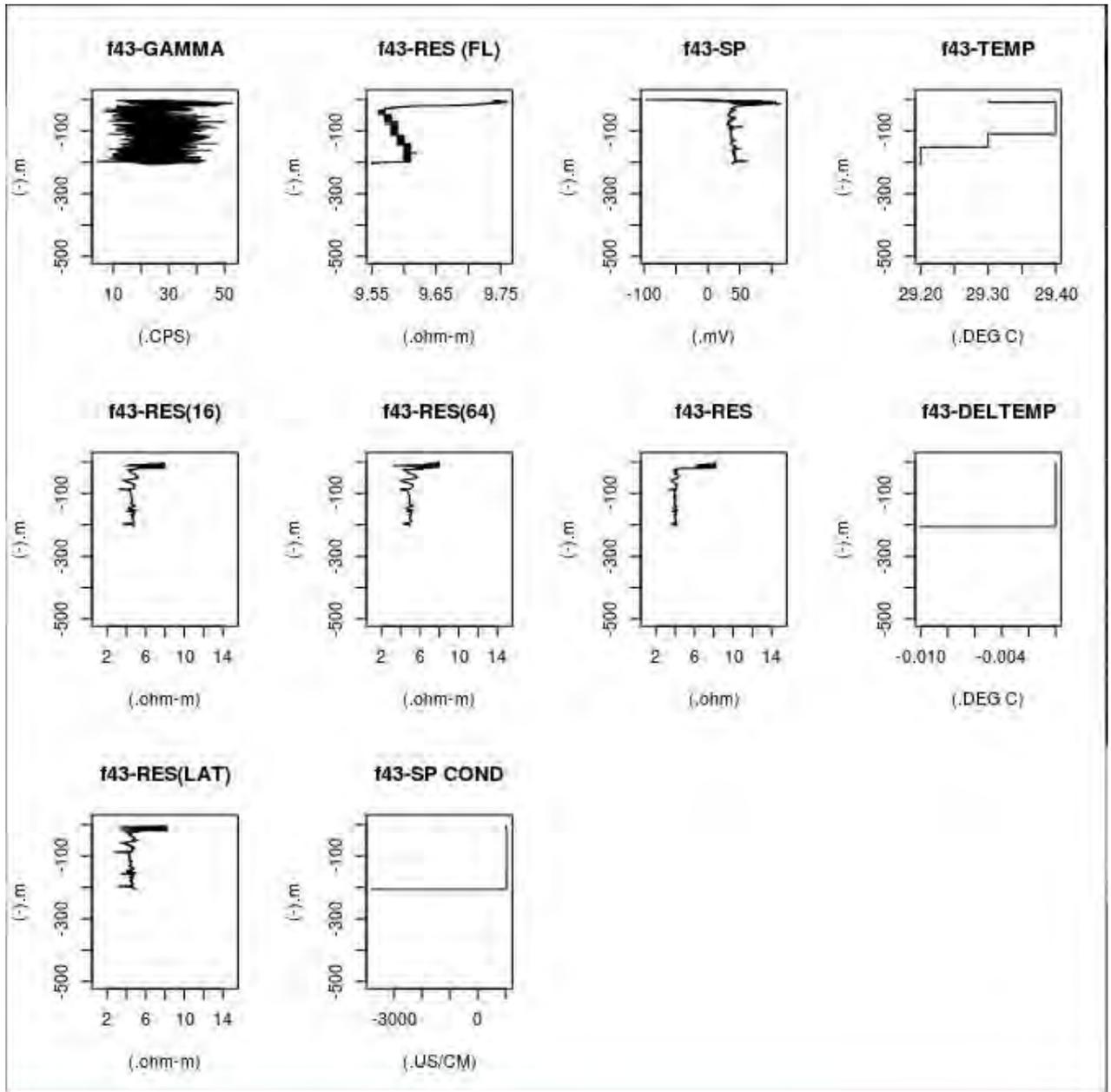


Figura 88: Registros geofísicos del pozo (f-43) La eriza.

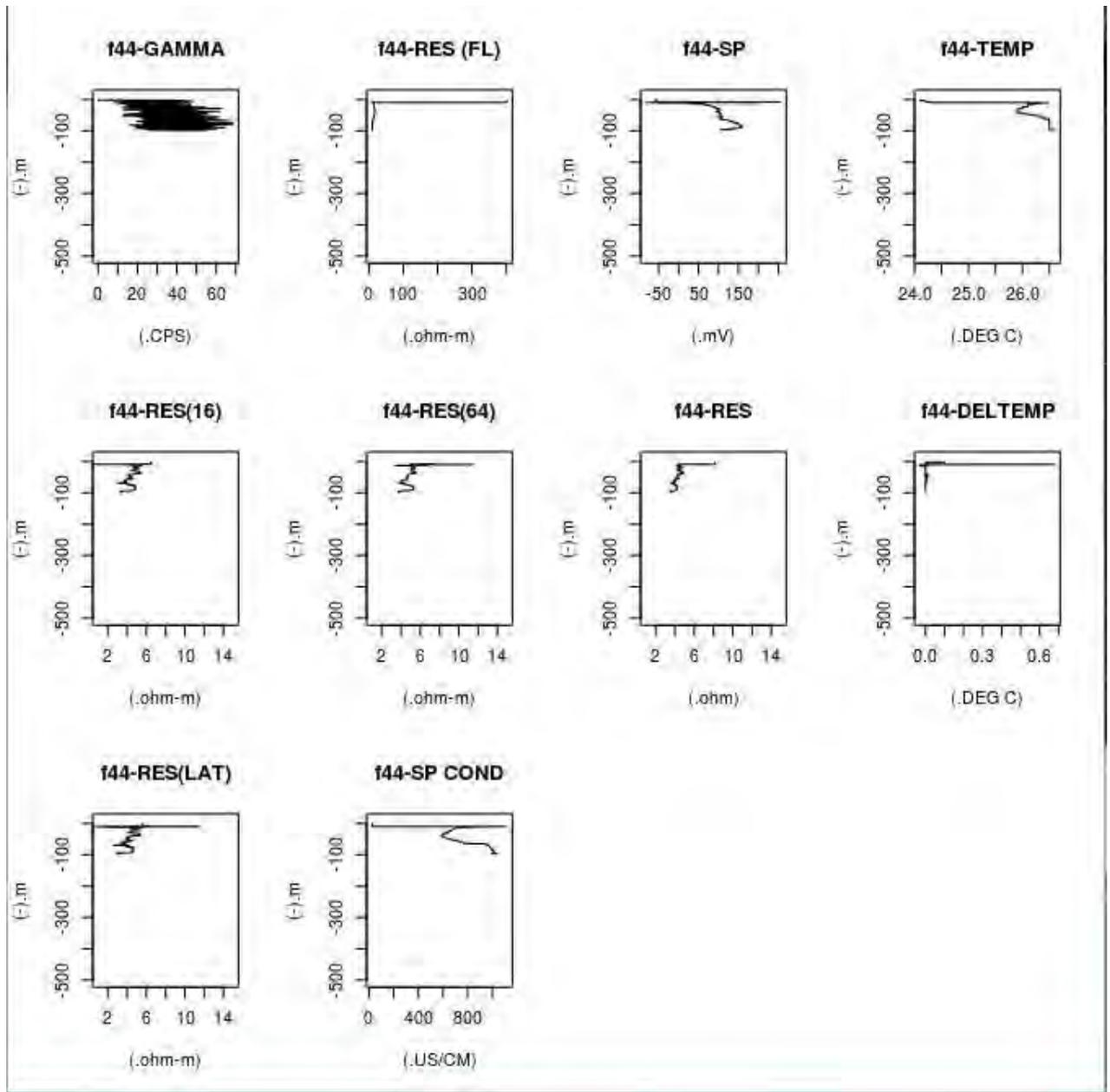


Figura 89: Registros geofísicos del pozo (f-44) Altozano 4.

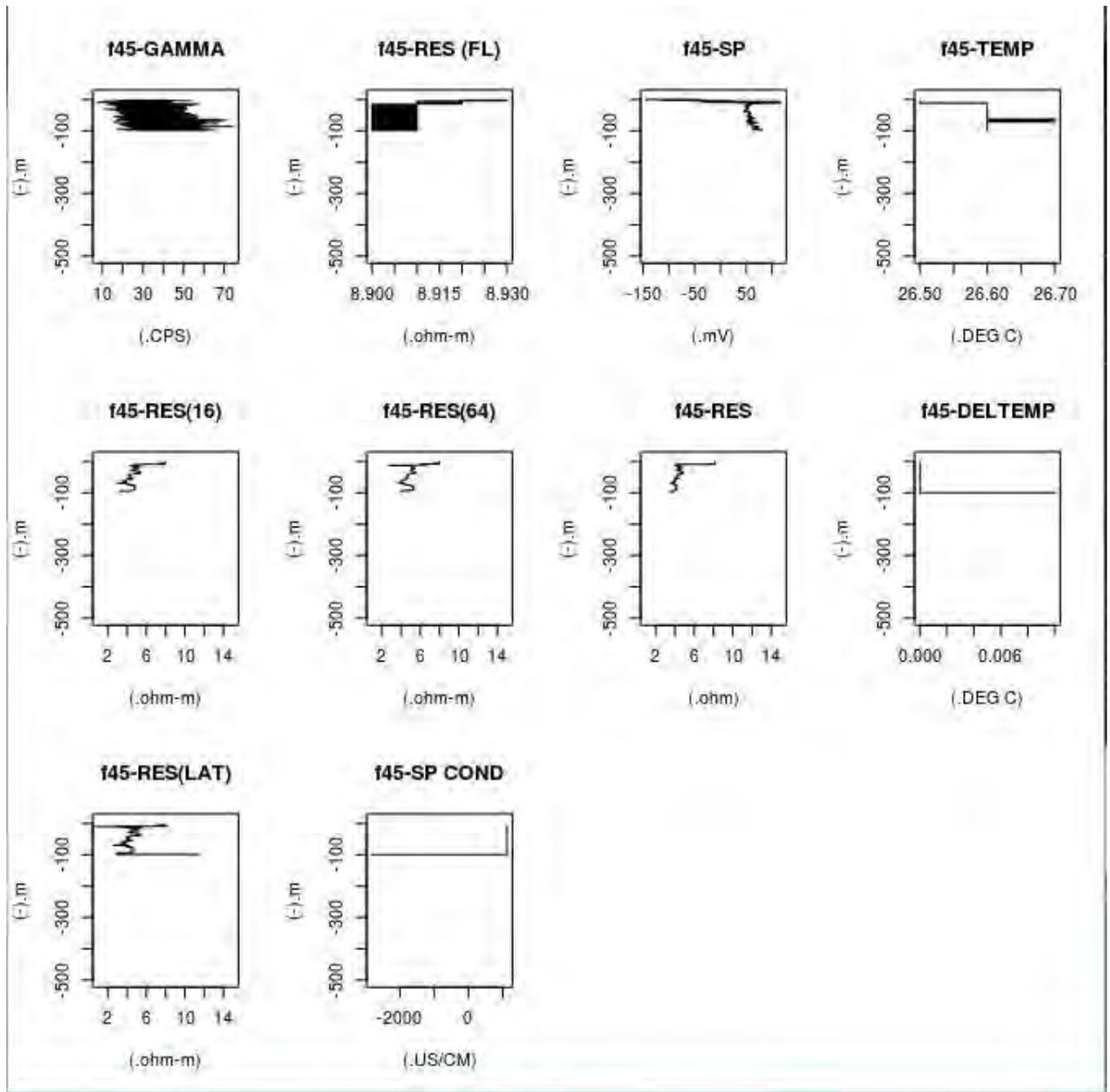


Figura 90: Registros geofísicos del pozo (f-45) Altozano 4.

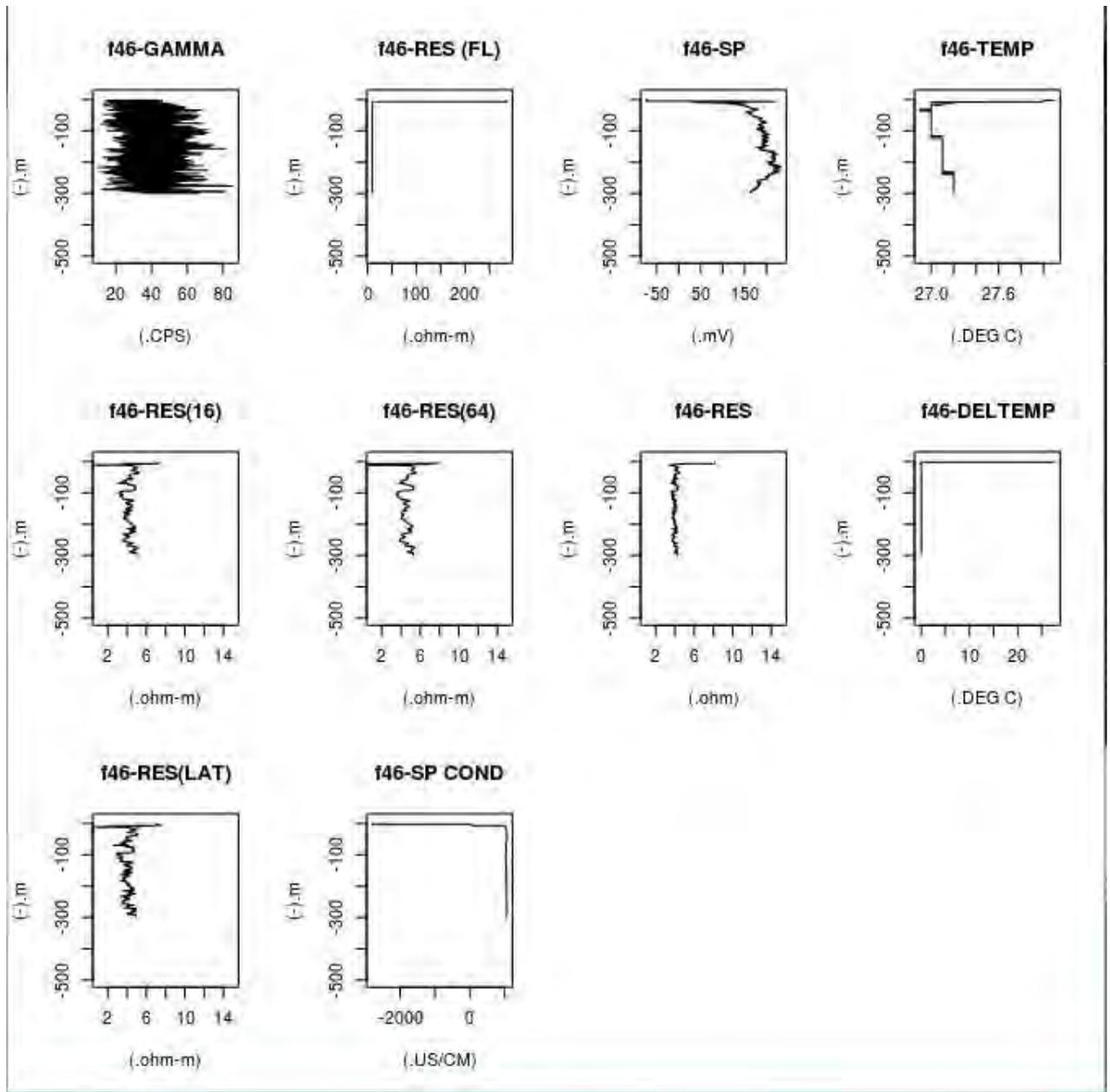


Figura 91: Registros geofísicos del pozo (f-46) Altozano 4.

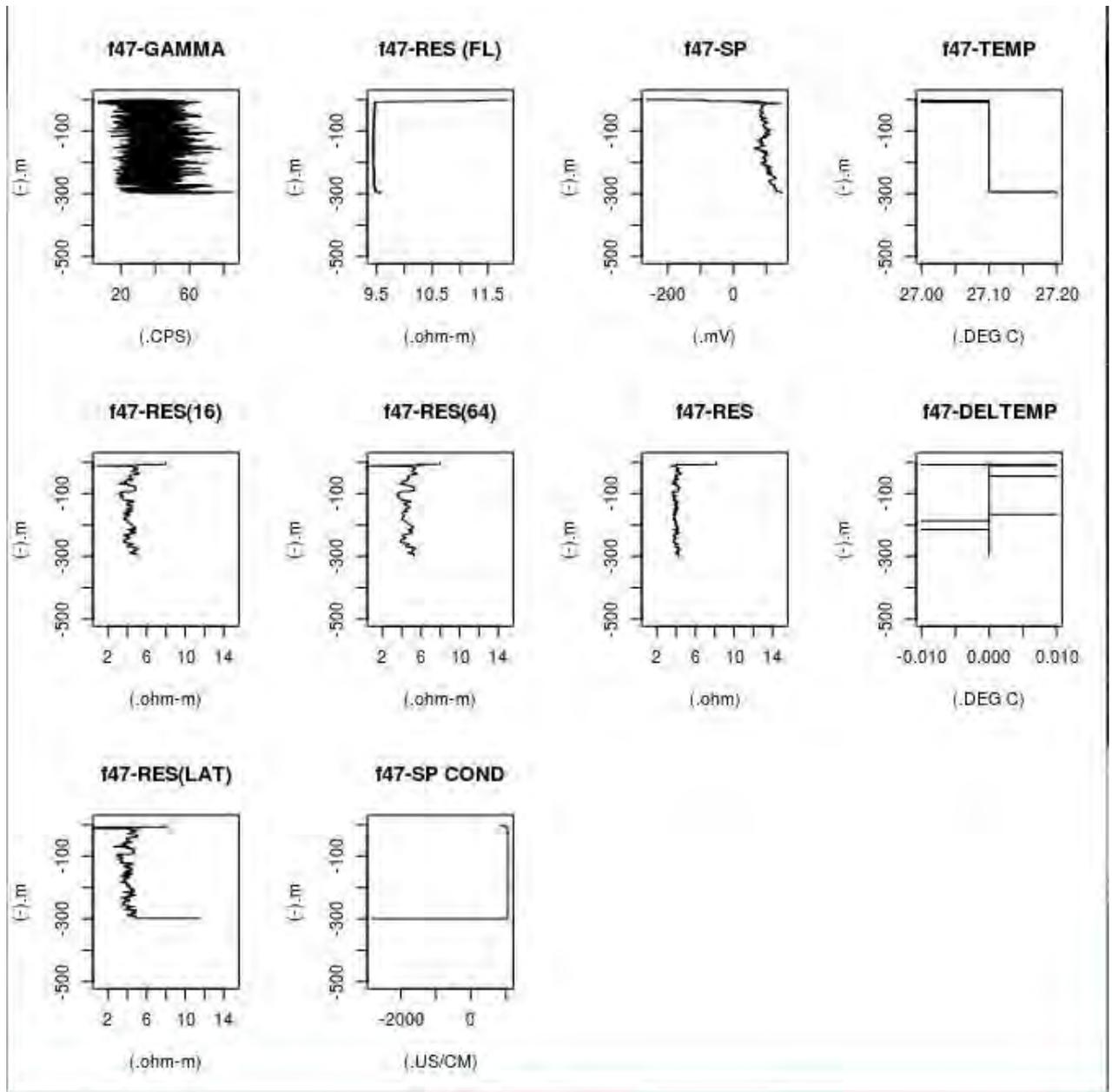


Figura 92: Registros geofísicos del pozo (f-47) Altozano 4.

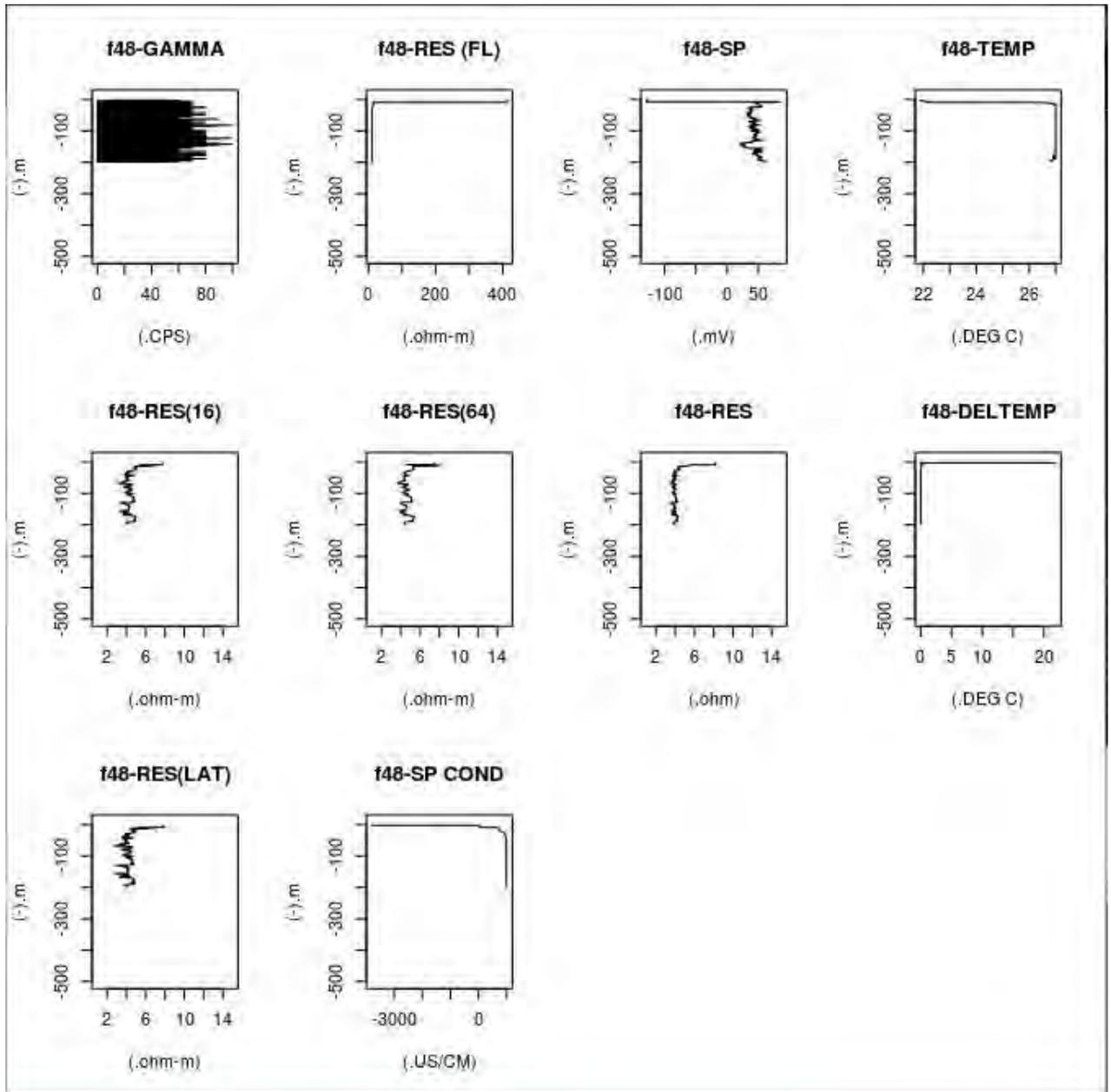


Figura 93: Registros geofísicos del pozo (f-48) Potrero de enmedio.

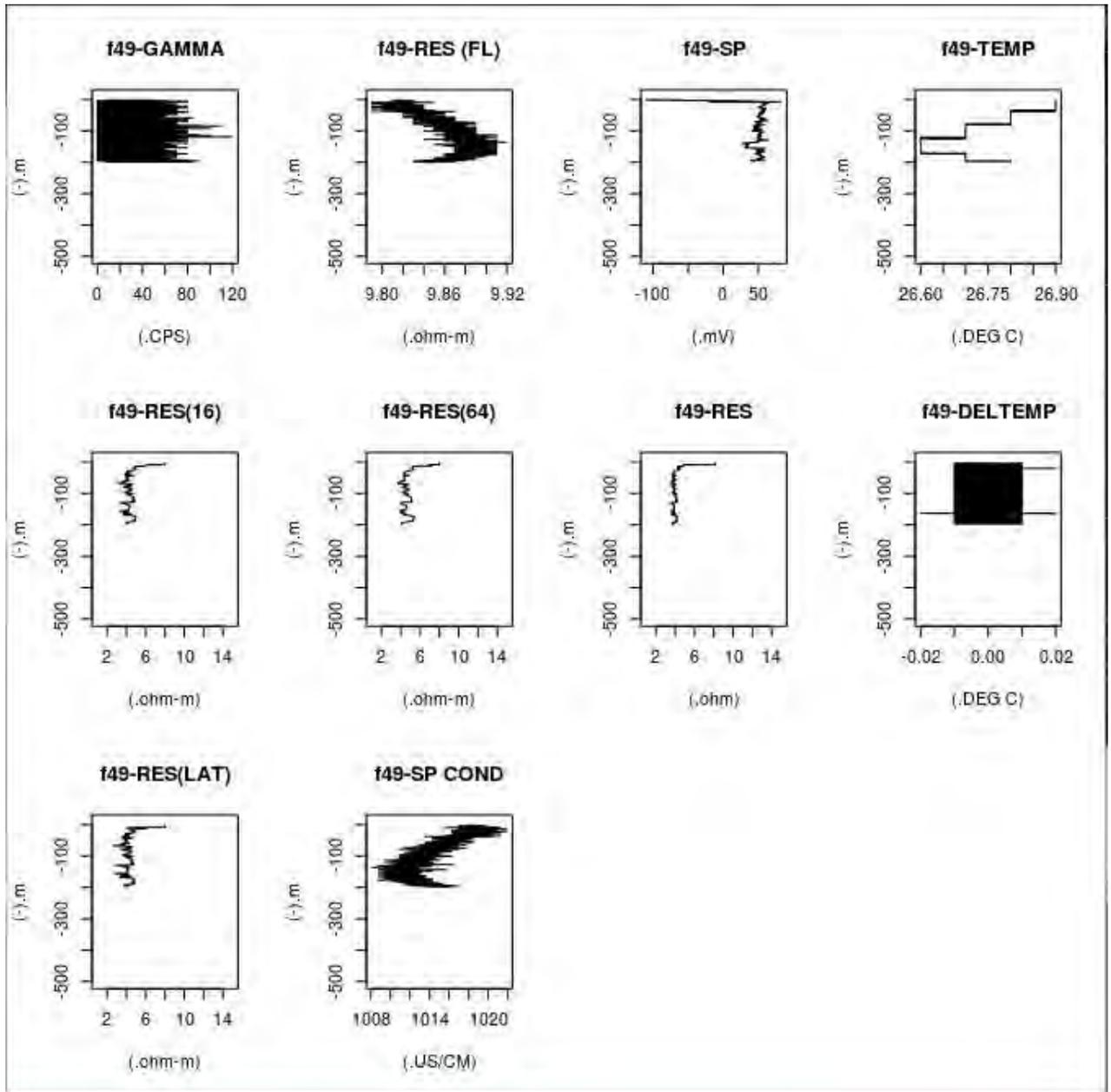


Figura 94: Registros geofísicos del pozo (f-49) Potrero de enmedio.

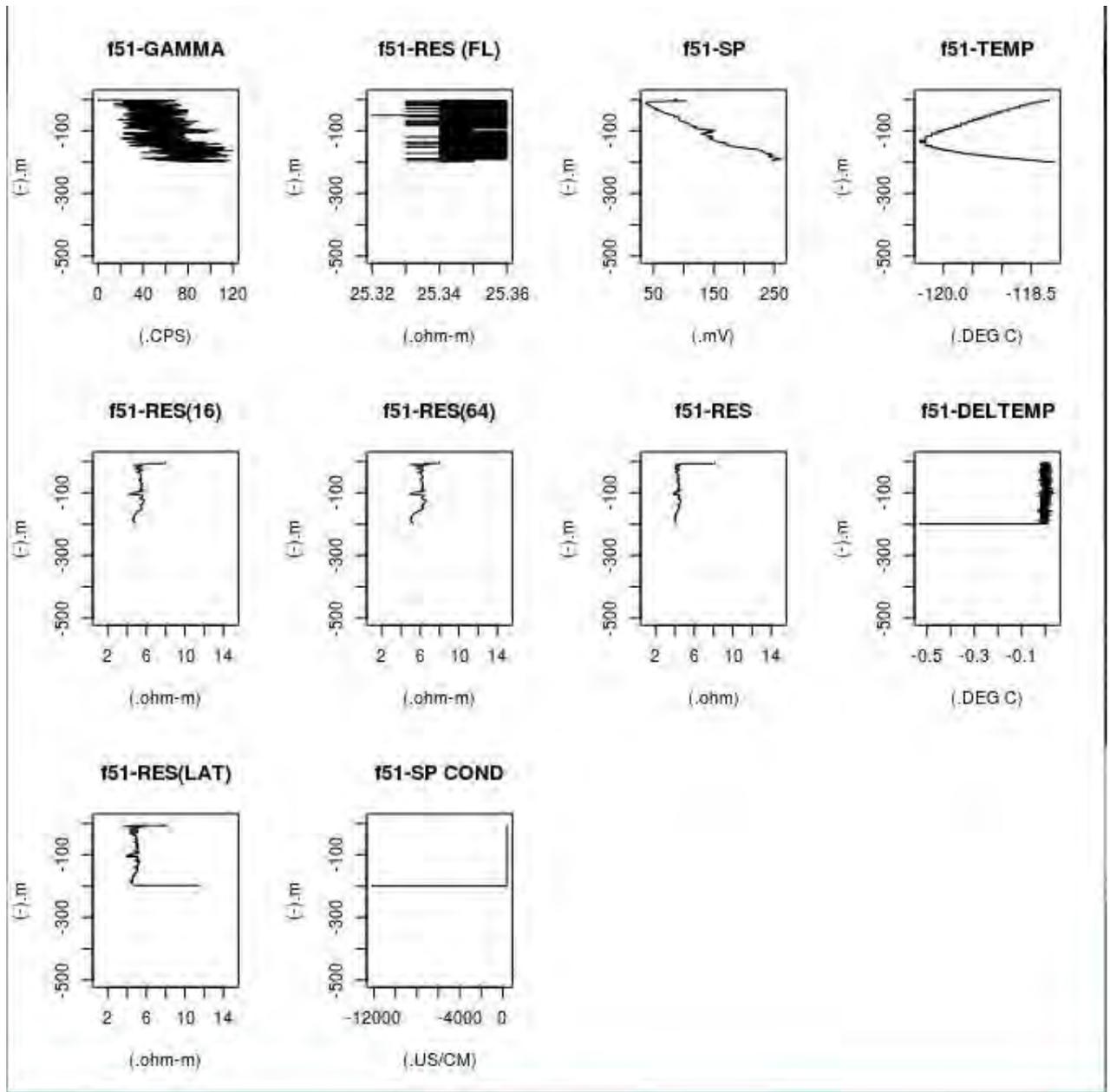


Figura 95: Registros geofísicos del pozo (f-51) La mesa.

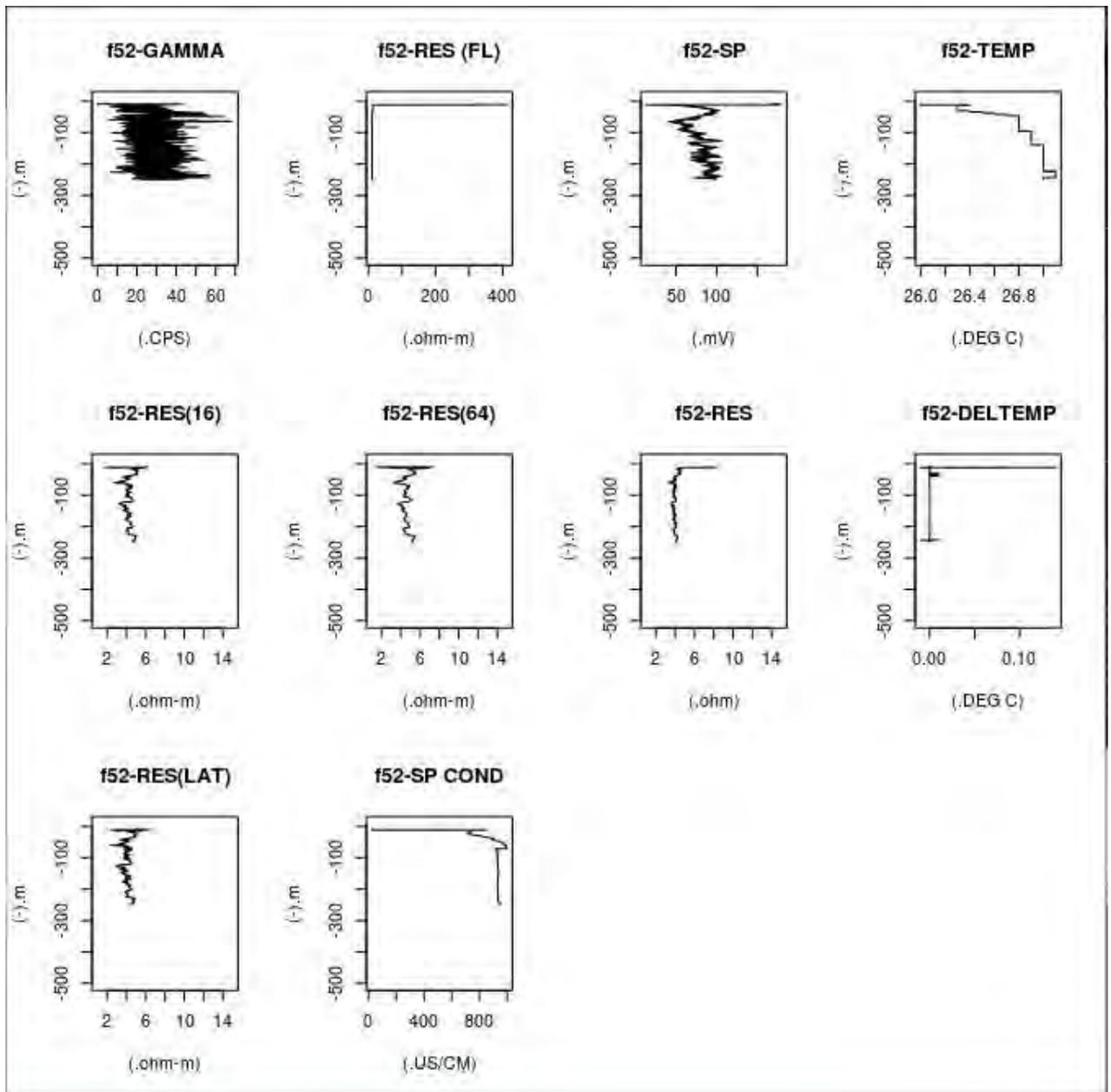


Figura 96: Registros geofísicos del pozo (f-52) El chivato CIAPACOV.

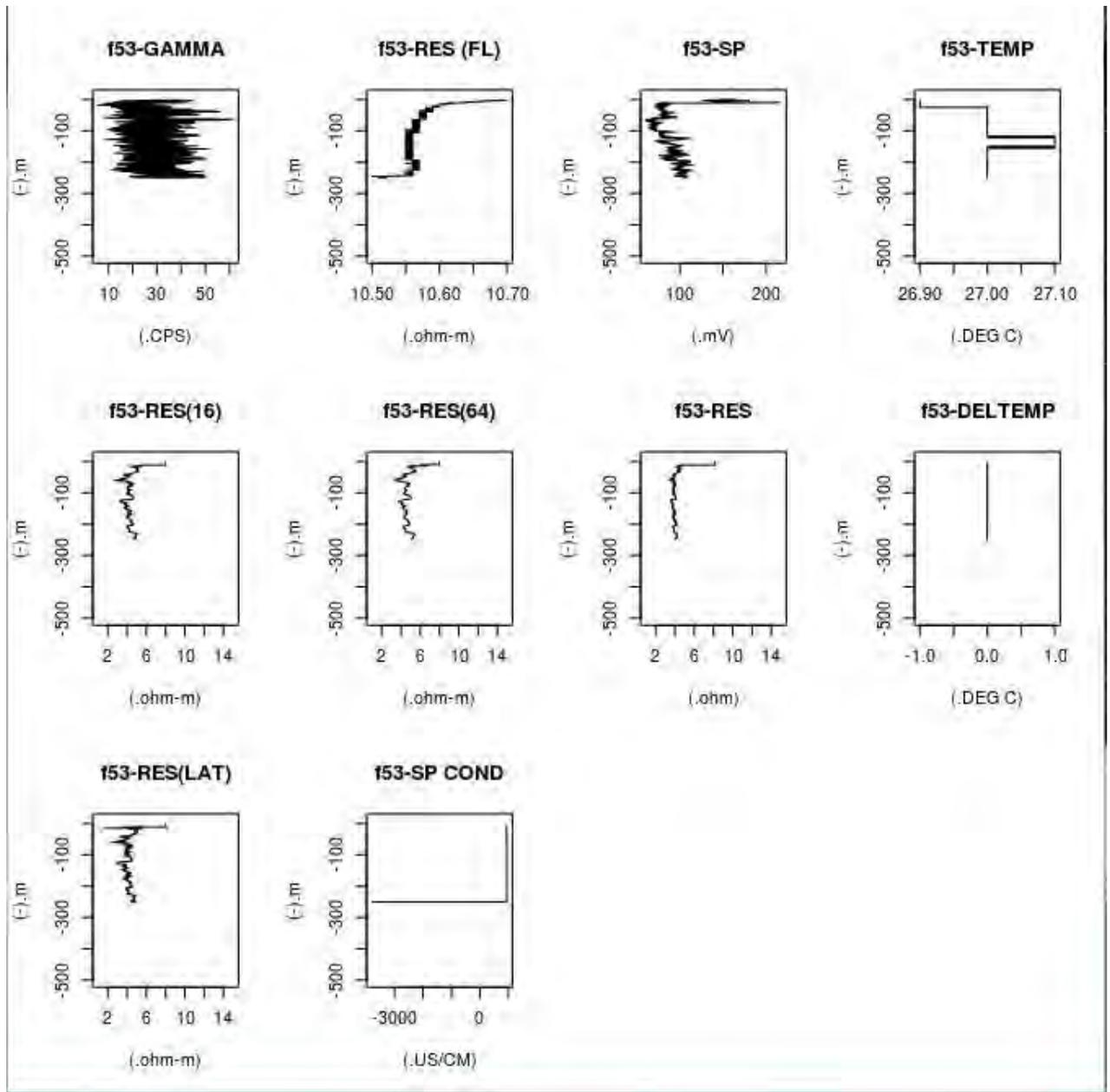


Figura 97: Registros geofísicos del pozo (f-53) El chivato CIAPACOV.

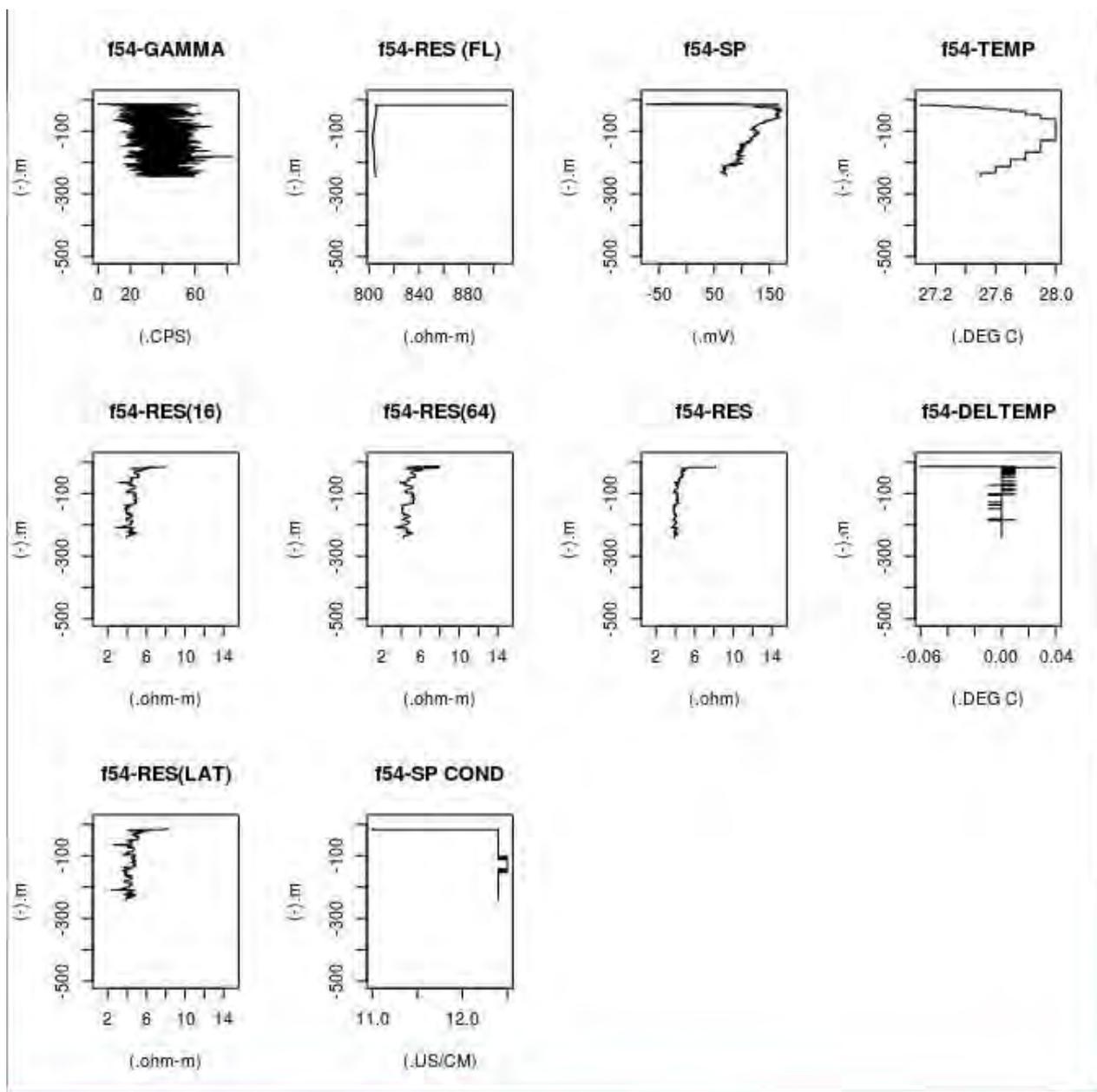


Figura 98: Registros geofísicos del pozo (f-54) CIAPACOV Carlos de la Madrid.

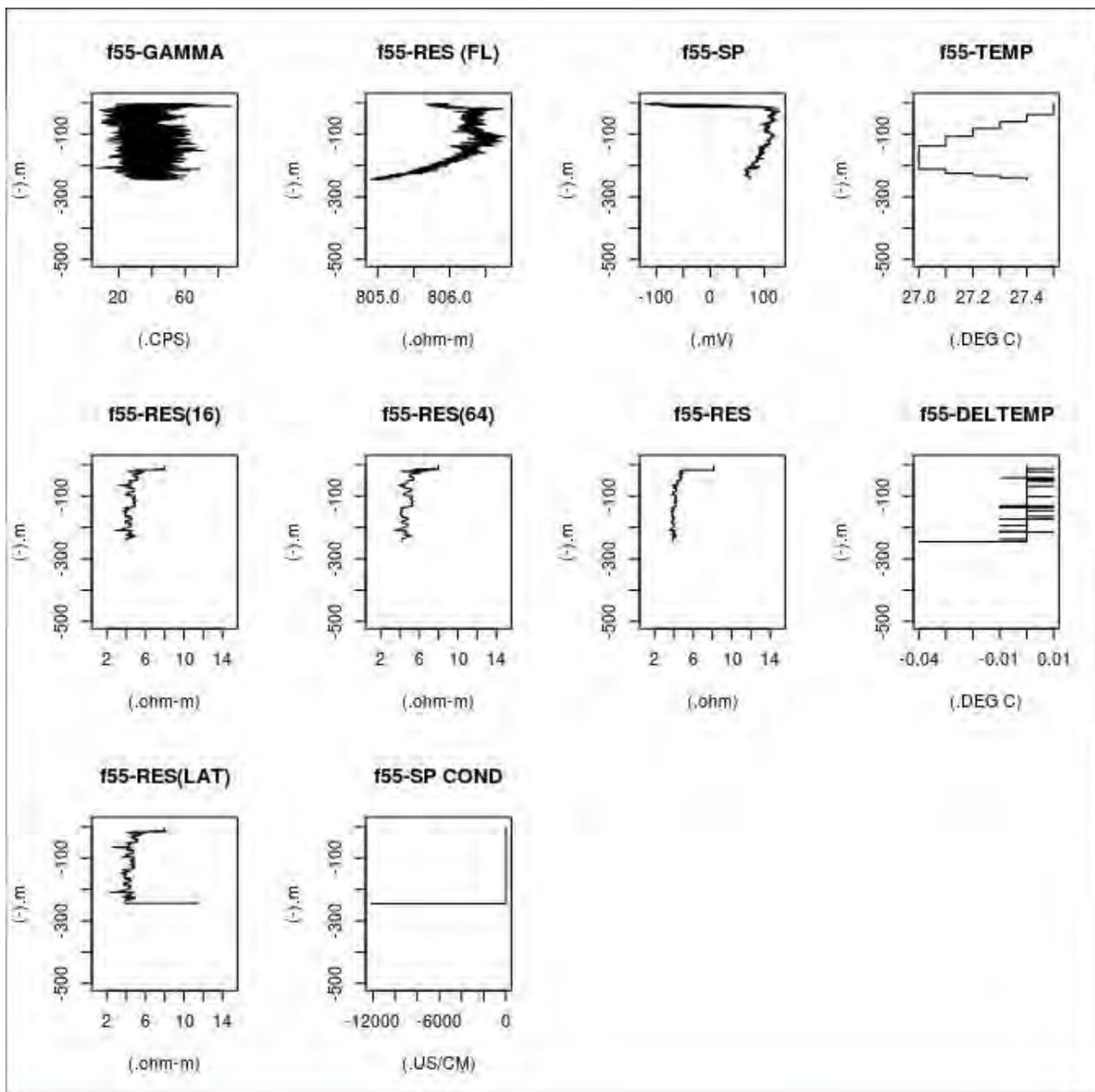


Figura 99: Registros geofísicos del pozo (f-55) CIAPACOV Carlos de la Madrid.

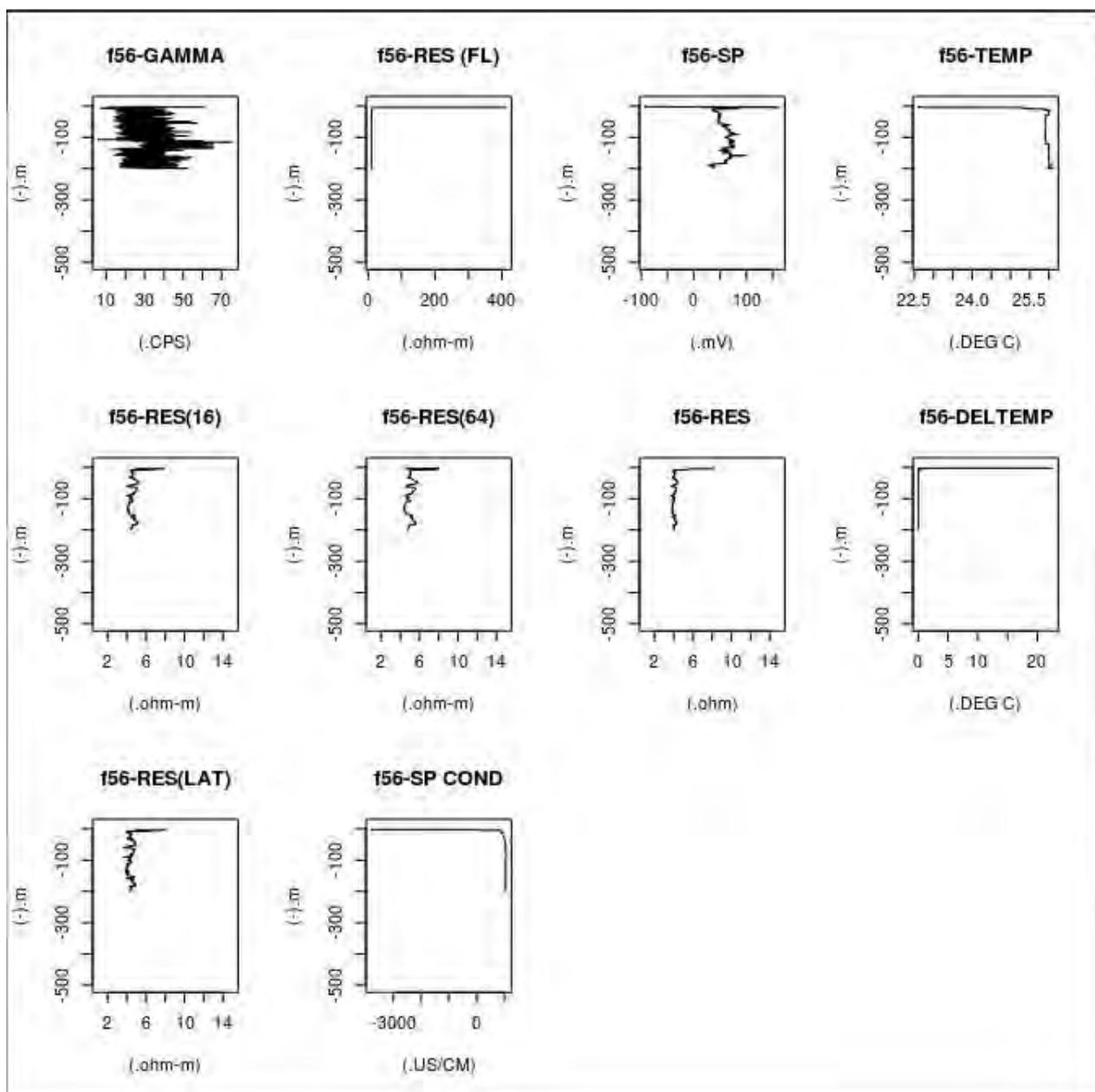


Figura 100: Registros geofísicos del pozo (f-56) Los alcaraces.

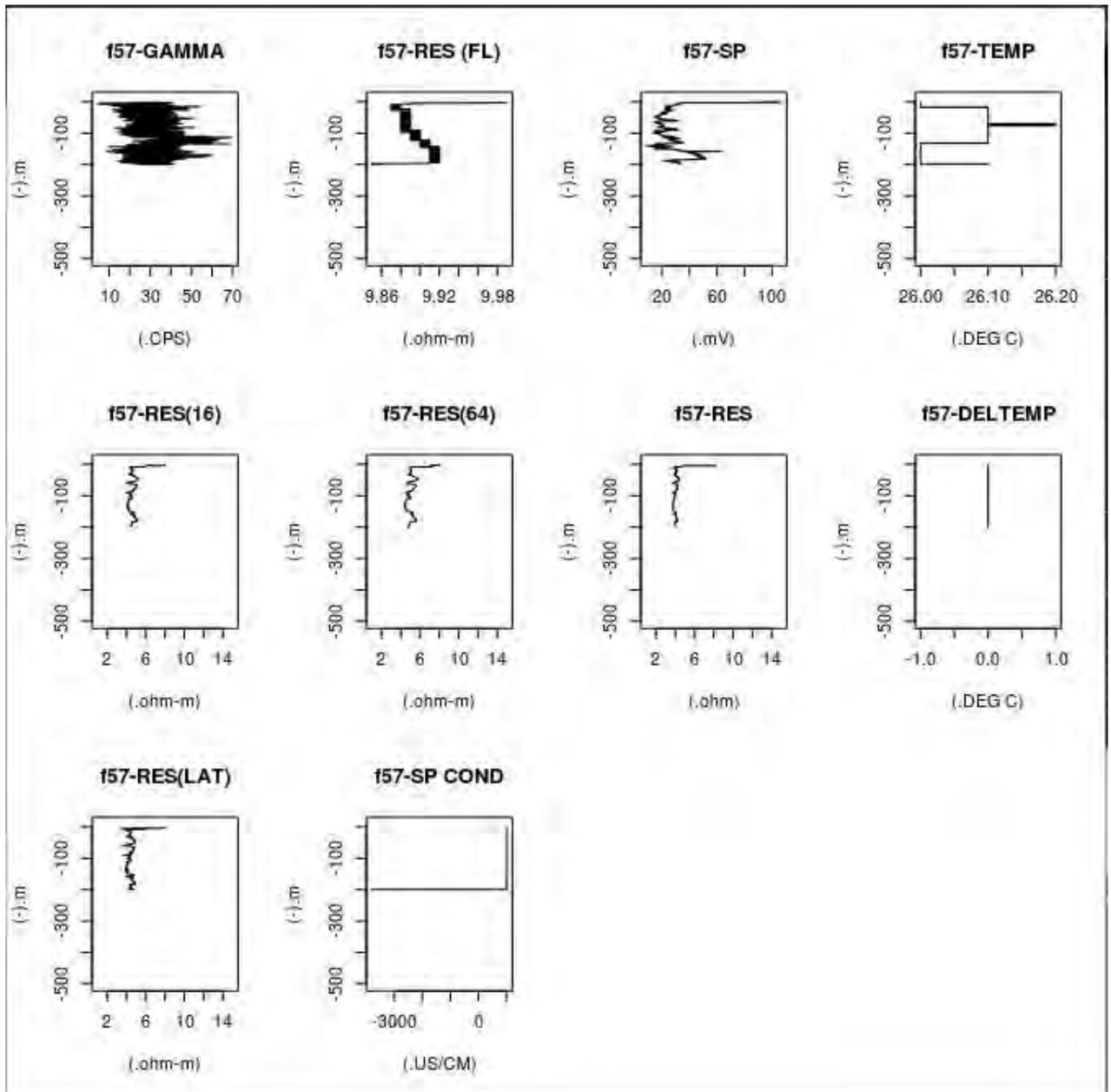


Figura 101: Registros geofísicos del pozo (f-57) Los Alcaraces.

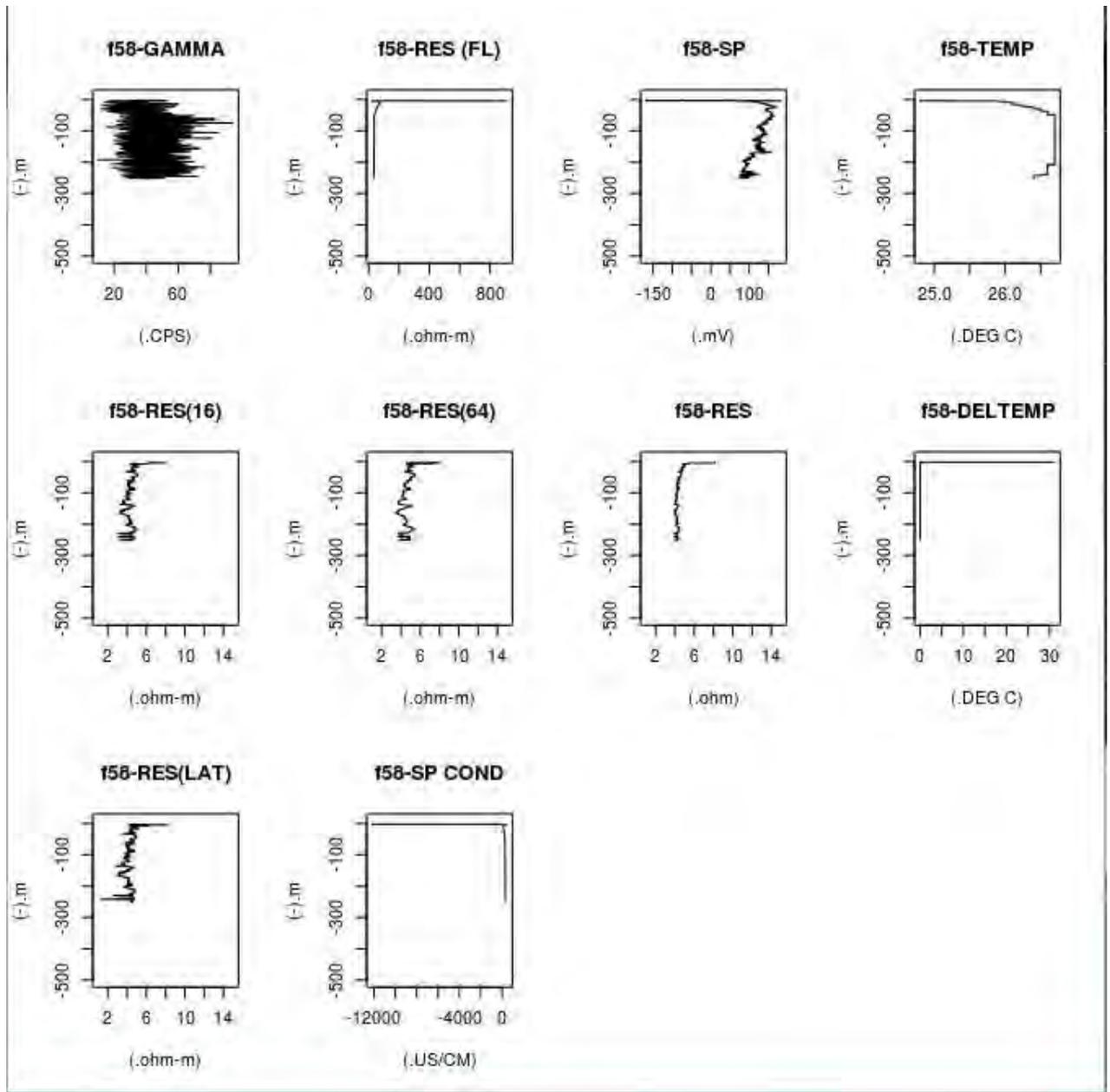


Figura 102: Registros geofísicos del pozo (f-58) El guayabal.

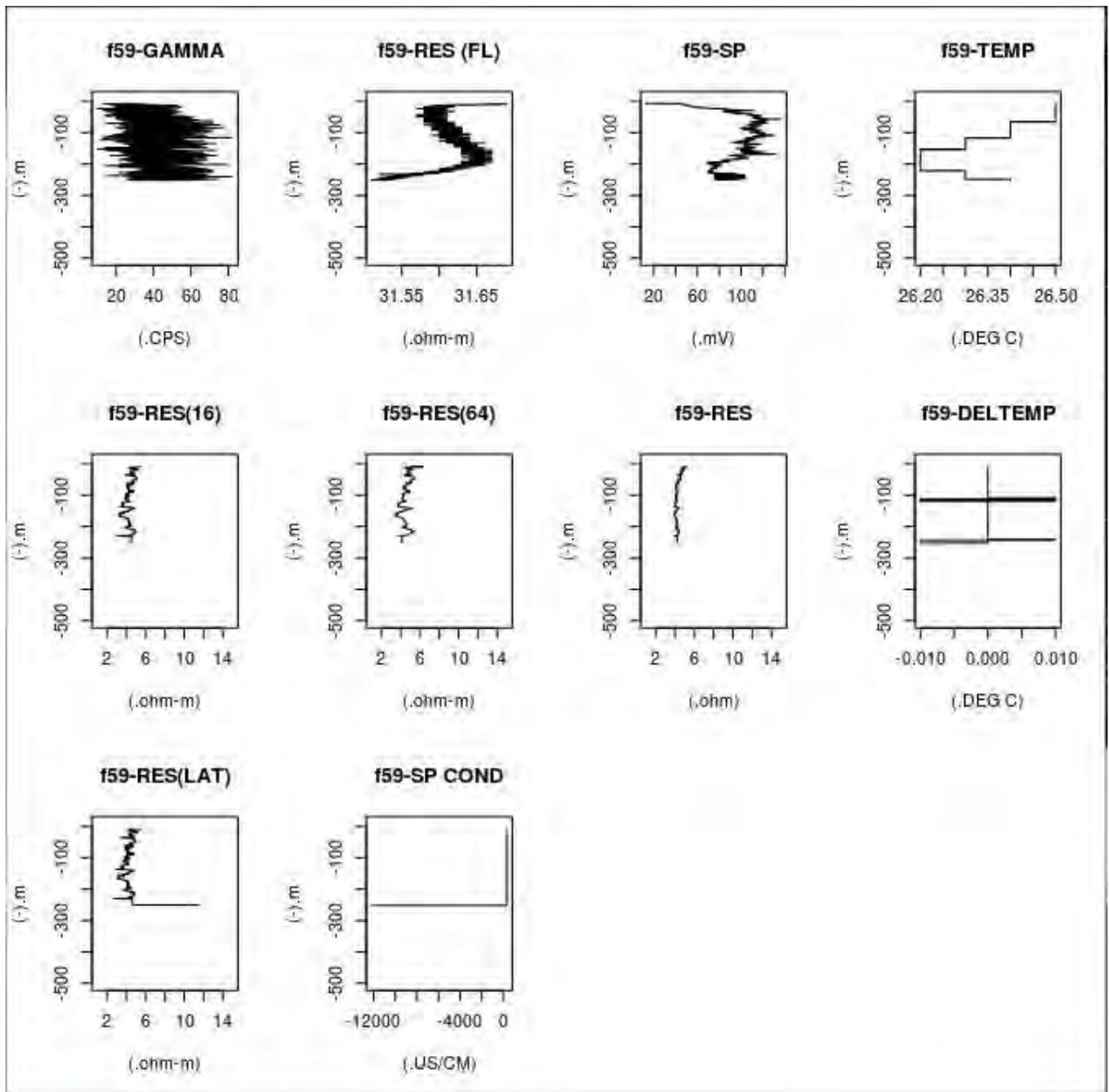


Figura 103: Registros geofísicos del pozo (f-59) El guayabal.

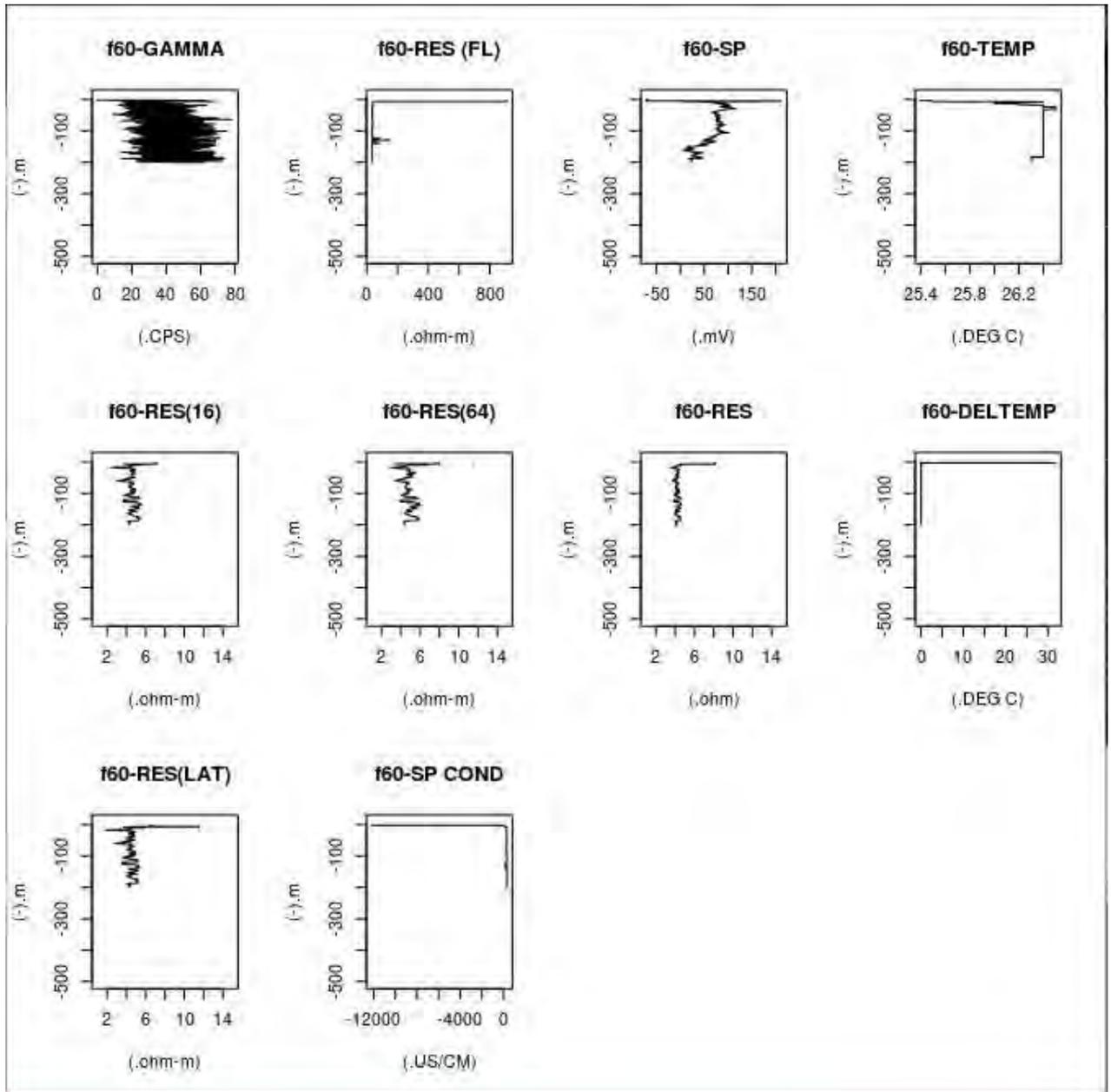


Figura 104: Registros geofísicos del pozo (f-60) Palmillas.

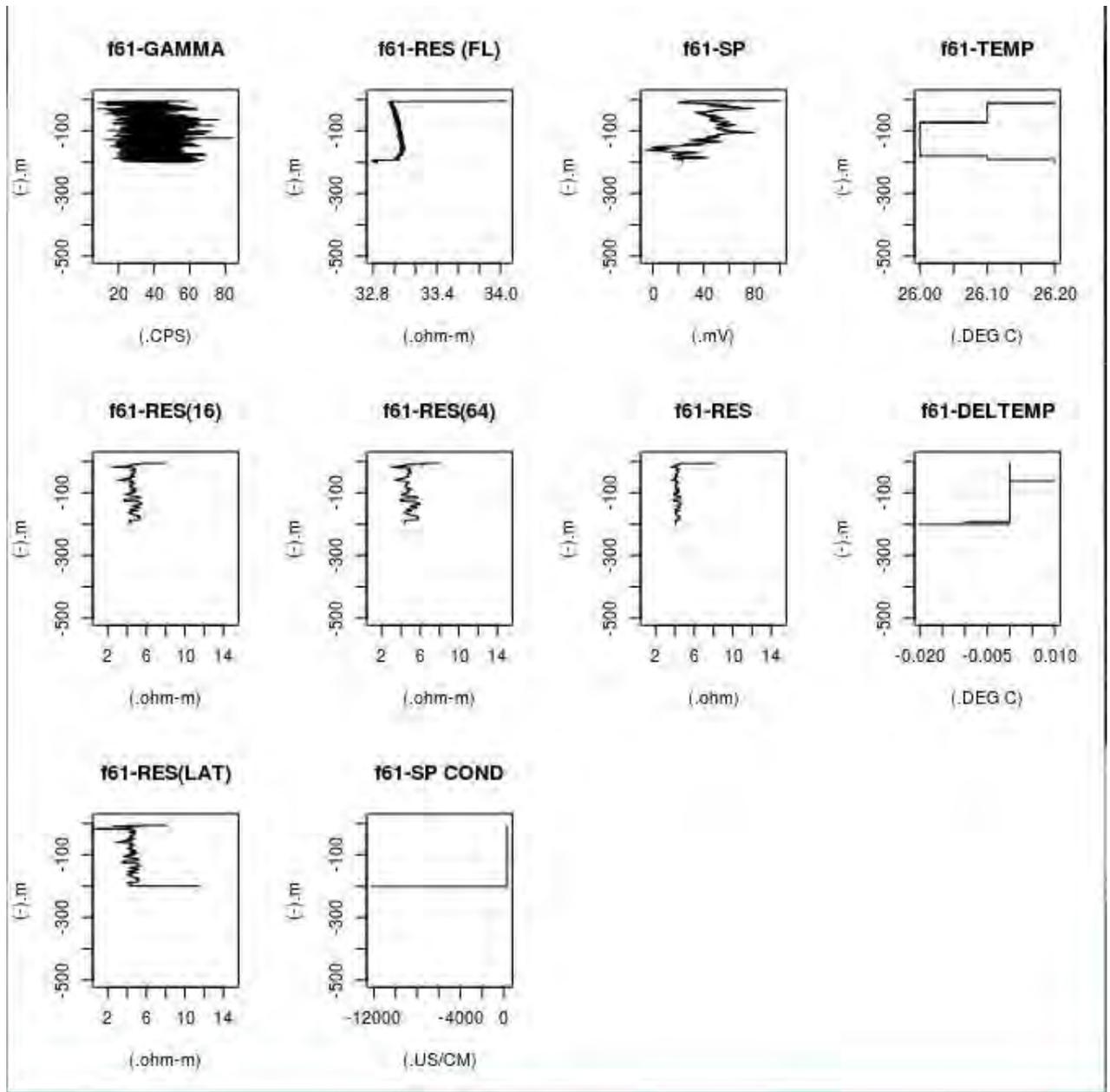


Figura 105: Registros geofísicos del pozo (f-61) Palmillas.

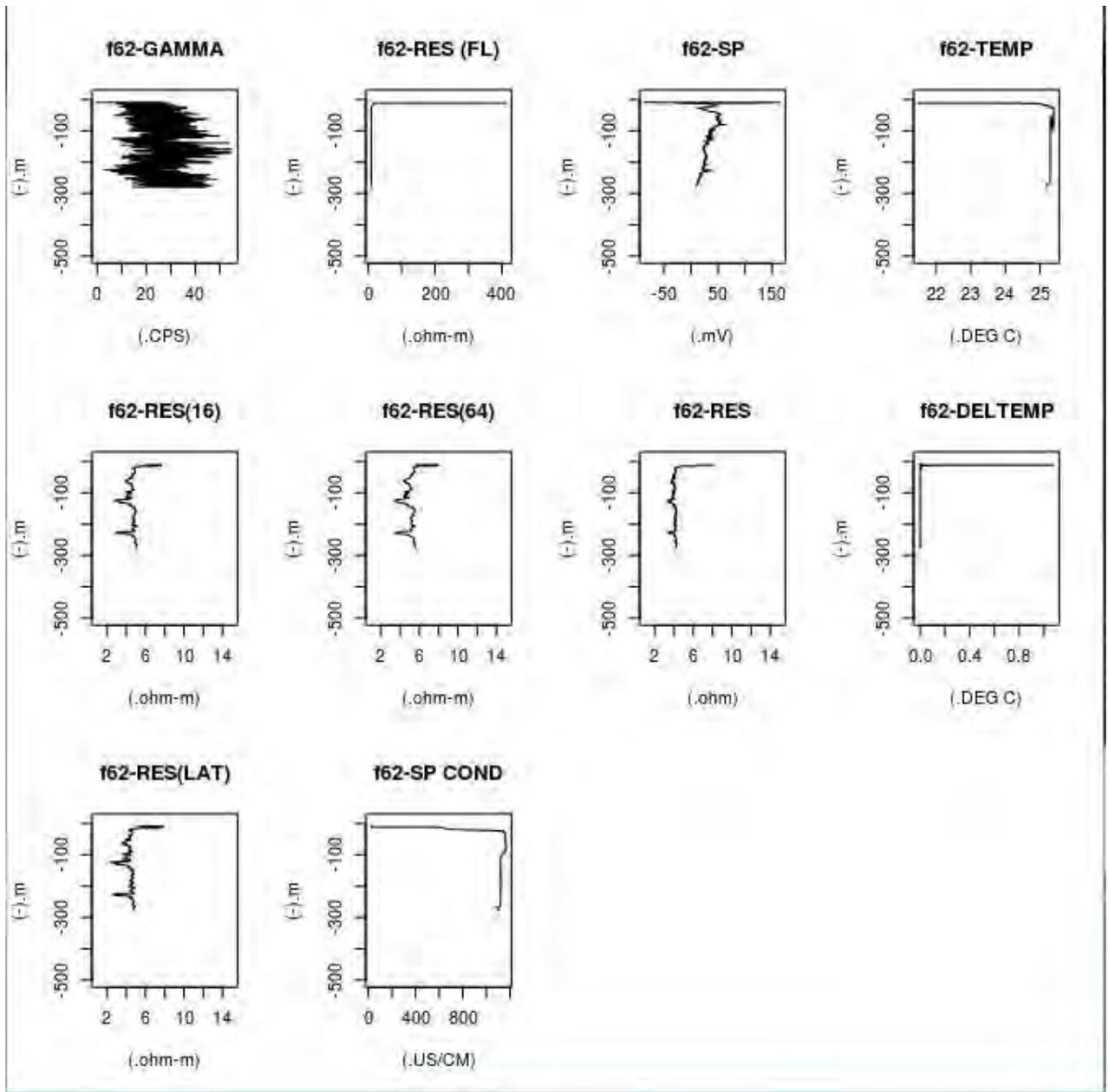


Figura 106: Registros geofísicos del pozo (f-62) Tierra santa.

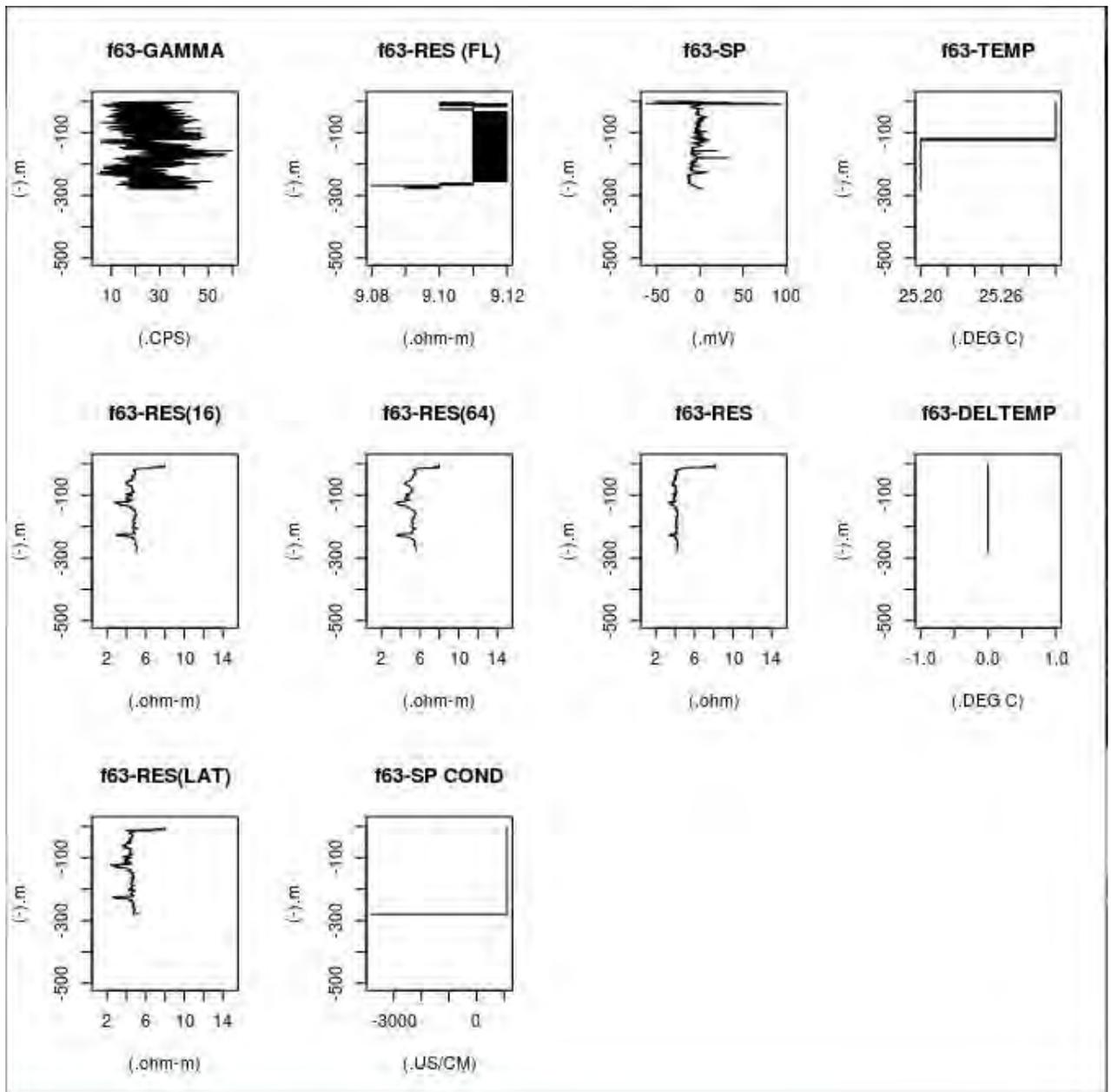


Figura 107: Registros geofísicos del pozo (f-63) Tierra santa.

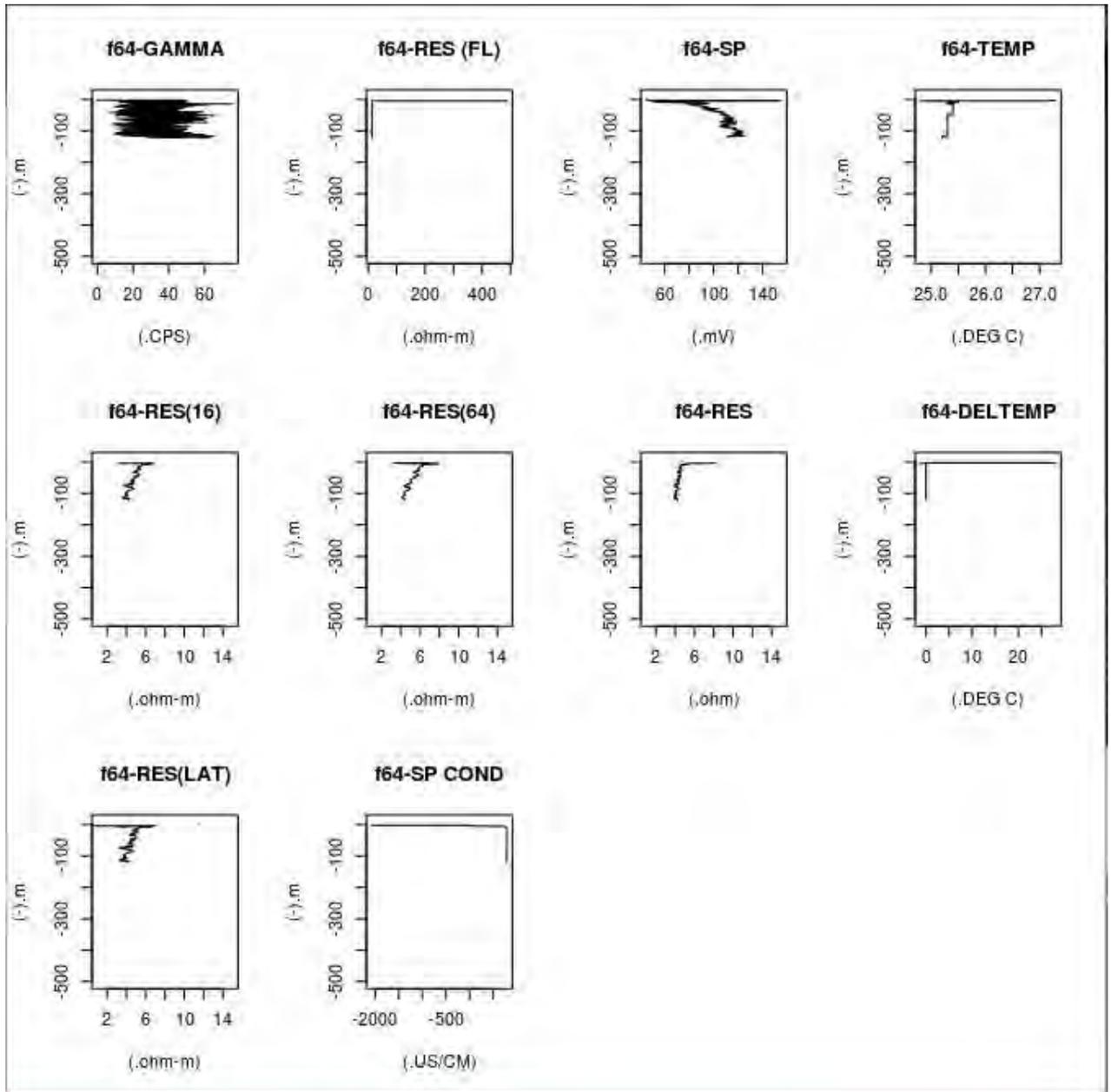


Figura 108: Registros geofísicos del pozo (f-64) Las codornices.

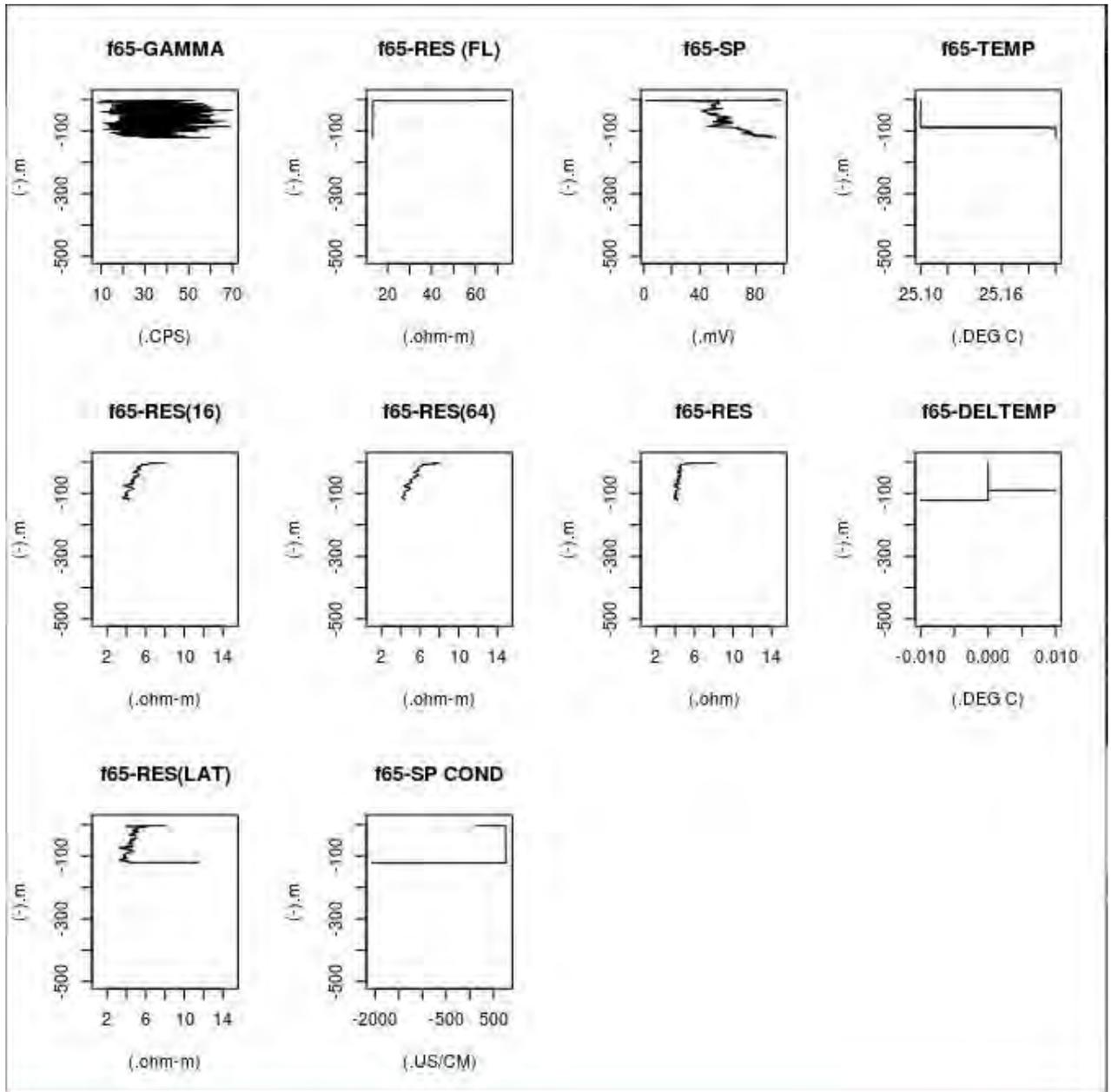


Figura 109: Registros geofísicos del pozo (f-65) Las codornices.