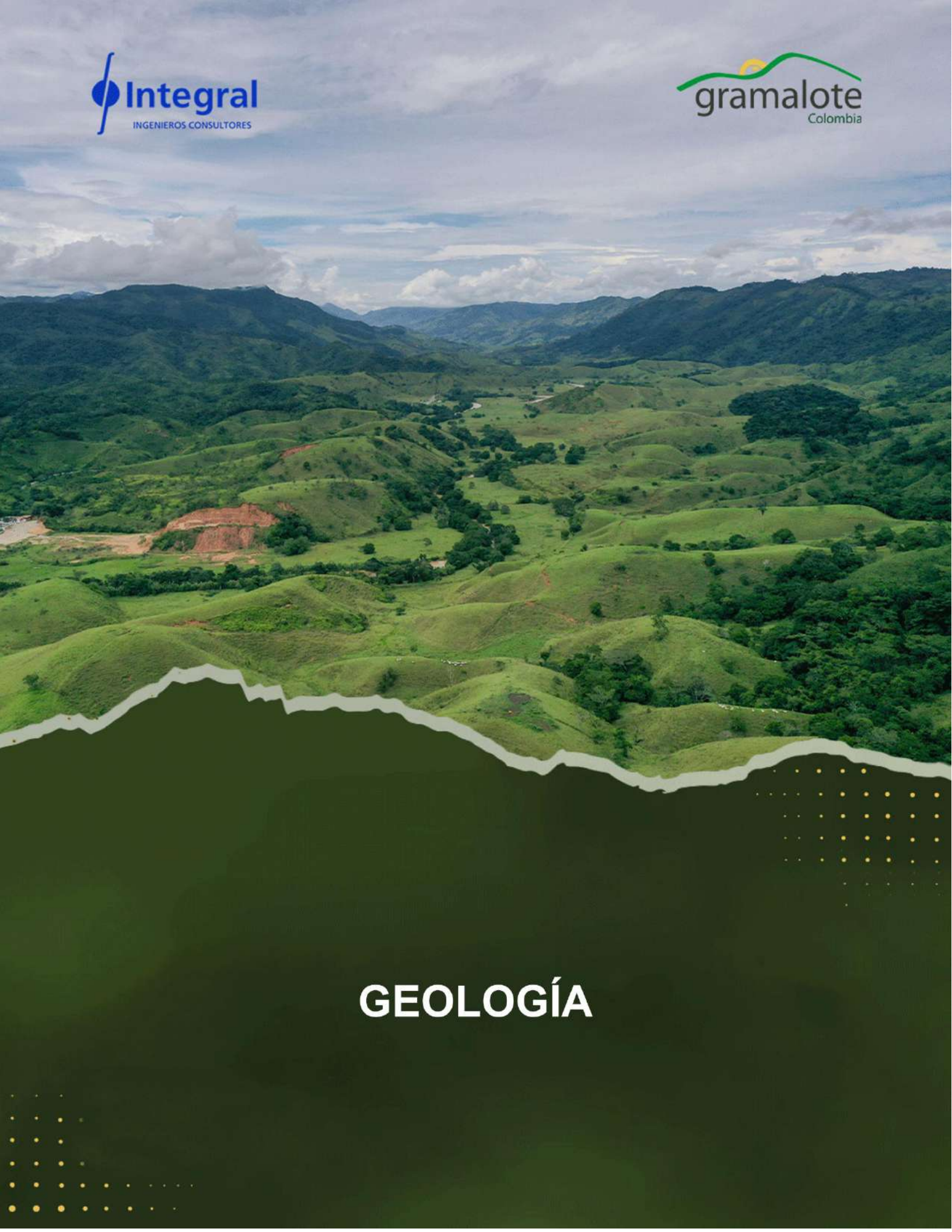




GEOLOGÍA

TABLA DE CONTENIDO

5	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA	1
5.1	MEDIO ABIÓTICO.....	1
5.1.1	GEOLOGÍA	1
5.1.1.1	Geología regional	3
5.1.1.2	Geología del yacimiento	12
5.1.1.3	Geoquímica del yacimiento.....	175
5.1.1.4	Sismicidad	228

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1.1.1	Documentos consultados para la interpretación geológica	2
Tabla 5.1.1.2	Unidades geológicas y sus resistividades.....	13
Tabla 5.1.1.3	Sondeos eléctricos verticales ejecutados en el área de estudio del proyecto	15
Tabla 5.1.1.4	Ubicación de las líneas de geoeléctrica continua	23
Tabla 5.1.1.5	Ubicación de Líneas de refracción sísmica ejecutadas por INTEINSA, 2013	45
Tabla 5.1.1.6	Líneas de refracción sísmica de la campaña de 2020 de INTEINSA	52
Tabla 5.1.1.7	Localización de las líneas de refracción sísmica Inteinsa	105
Tabla 5.1.1.8	Sondeos ejecutados entre los años 2012 y 2025	115
Tabla 5.1.1.9	Porcentajes de las unidades litoestratigráficas en el área para área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote	124
Tabla 5.1.1.10	Perfil de meteorización típico de las rocas del Batolito Antioqueño	125
Tabla 5.1.1.11	Principales tipos de roca	132
Tabla 5.1.1.12	Diagrama de rosas de las direcciones preferenciales de fracturas, diaclasas, fallas, zonas de cizalla y diques a partir de perforaciones.	138
Tabla 5.1.1.13	Clasificación de la calidad de la roca en función del índice RQD.	145
Tabla 5.1.1.14	Datos de perforaciones según la profundidad.....	147
Tabla 5.1.1.15	Principales tipos de roca	155
Tabla 5.1.1.16	Resumen de campañas de perforación	158
Tabla 5.1.1.17	Perforaciones utilizadas para la estimación de recursos	160
Tabla 5.1.1.18	Tipos de vetas	166
Tabla 5.1.1.19	Número de muestras aplicando la ecuación de Price	182
Tabla 5.1.1.20	Ejemplo de aseguramiento de la calidad/control de la calidad (QA/QC)	184
Tabla 5.1.1.21	Resumen de Pruebas Geoquímicas – Roca de Desmonte y Paredes del Tajo.....	193
Tabla 5.1.1.22	Resumen de Pruebas Geoquímicas – Relaves	195
Tabla 5.1.1.23	Resultados del análisis de difracción cuantitativa de rayos X (%) para réplicas de muestras de barriles.....	200

Tabla 5.1.1.24	Resumen de parámetros que exceden diez veces las abundancias corticales	216
Tabla 5.1.1.25	Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).	218
Tabla 5.1.1.26	Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).	219
Tabla 5.1.1.27	Resumen de promedios de pruebas en barril. Concentraciones de lixiviados para parámetros seleccionados.....	221
Tabla 5.1.1.28	Características del modelo de fuente sísmica de las fallas activas mapeadas en un radio de 200 km desde la mina Gramalote.	232
Tabla 5.1.1.29	Características de los eventos sísmicos históricos fuera del área interés	234
Tabla 5.1.1.30	UHRs (5% de amortiguamiento) para las Probabilidades Anuales de Excedencia (PAE) seleccionadas en el sitio del proyecto Gramalote. El valor de Vs30 (1) usado es de 800 m/s	238
Tabla 5.1.1.31	Valores de aceleración para algunos periodos espectrales (PGA, 0,2 y 1,0 s) asociados a un periodo de retorno de 475 años de varios estudios para el sitio de la mina Gramalote.....	239

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1.1.1	Geología regional del proyecto.....	4
Figura 5.1.1.2	Perfil de meteorización típico del Batolito Antioqueño	5
Figura 5.1.1.3	Marco estructural regional de Gramalote.....	8
Figura 5.1.1.4	Estructuras principales identificadas en las aerofotografías (CIG2 INGENIEROS S.A.S., 2017)	10
Figura 5.1.1.5	Lineamientos Fotogeológicos en el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote.....	11
Figura 5.1.1.6	Diagrama de rosas de los lineamientos fotogeológicos	12
Figura 5.1.1.7	Ubicación de los sondeos eléctricos verticales.....	15
Figura 5.1.1.8	Perfil geológico – geoelectrico A-A'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle del río Nus.....	19
Figura 5.1.1.9	Perfil geológico – geoelectrico B-B'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle de la quebrada Guacas.	20
Figura 5.1.1.10	Sensibilidad relativa obtenida para la generación de cada perfil.	22
Figura 5.1.1.11	Ubicación en planta de los perfiles geoelectricos verticales	25
Figura 5.1.1.12	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-1 (A-A')	27
Figura 5.1.1.13	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-2 (B-B')	28
Figura 5.1.1.14	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-3 (C-C')	30
Figura 5.1.1.15	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-4 (D-D')	32
Figura 5.1.1.16	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-5 (E-E')	33
Figura 5.1.1.17	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-6 (F-F')	34
Figura 5.1.1.18	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-7 (G-G')	36
Figura 5.1.1.19	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-8 (H-H')	37
Figura 5.1.1.20	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-11 (K-K')	38

Figura 5.1.1.21	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-12 (L-L')	39
Figura 5.1.1.22	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-13 (M-M')	41
Figura 5.1.1.23	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-14 (N-N')	42
Figura 5.1.1.24	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-15 (O-O')	43
Figura 5.1.1.25	Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-17 (Q-Q')	44
Figura 5.1.1.26	Bloque diagrama geológico	45
Figura 5.1.1.27	Localización en planta de ensayos de refracción sísmica INTEINSA 2013	46
Figura 5.1.1.28	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LP-01	47
Figura 5.1.1.29	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LP-02	47
Figura 5.1.1.30	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LT-01	48
Figura 5.1.1.31	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LT-02	48
Figura 5.1.1.32	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-01	49
Figura 5.1.1.33	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-02	49
Figura 5.1.1.34	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-03	50
Figura 5.1.1.35	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-04	50
Figura 5.1.1.36	Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-05	51
Figura 5.1.1.37	Tomografía Suavizada de onda de corte (S) Línea GG-LC-06	51
Figura 5.1.1.38	Localización en planta de ensayos de refracción sísmica INTEINSA 2020	53
Figura 5.1.1.39	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-001 ..	54
Figura 5.1.1.40	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00155	
Figura 5.1.1.41	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-002 ..	56

Figura 5.1.1.42	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00256
Figura 5.1.1.43	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-003 .. 57
Figura 5.1.1.44	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00358
Figura 5.1.1.45	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-004 .. 59
Figura 5.1.1.46	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00459
Figura 5.1.1.47	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-005 .. 60
Figura 5.1.1.48	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00561
Figura 5.1.1.49	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-006 .. 62
Figura 5.1.1.50	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00662
Figura 5.1.1.51	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-007 .. 63
Figura 5.1.1.52	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00764
Figura 5.1.1.53	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-008 .. 65
Figura 5.1.1.54	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00866
Figura 5.1.1.55	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-009 .. 67
Figura 5.1.1.56	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-00967
Figura 5.1.1.57	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-010 .. 68
Figura 5.1.1.58	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01069
Figura 5.1.1.59	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-011 .. 69
Figura 5.1.1.60	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01170
Figura 5.1.1.61	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-012 .. 71
Figura 5.1.1.62	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01271
Figura 5.1.1.63	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-013 .. 72
Figura 5.1.1.64	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01373
Figura 5.1.1.65	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-014 .. 74
Figura 5.1.1.66	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01475
Figura 5.1.1.67	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-015 .. 76
Figura 5.1.1.68	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01577
Figura 5.1.1.69	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-016 .. 78
Figura 5.1.1.70	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01678
Figura 5.1.1.71	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-017 .. 79
Figura 5.1.1.72	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01779
Figura 5.1.1.73	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-018 .. 80

Figura 5.1.1.74	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01881
Figura 5.1.1.75	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-019 .. 82
Figura 5.1.1.76	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-01983
Figura 5.1.1.77	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-021 .. 83
Figura 5.1.1.78	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-02184
Figura 5.1.1.79	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-022 .. 85
Figura 5.1.1.80	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-02285
Figura 5.1.1.81	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-023 .. 86
Figura 5.1.1.82	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-02387
Figura 5.1.1.83	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-025 .. 87
Figura 5.1.1.84	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-02588
Figura 5.1.1.85	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-026 .. 88
Figura 5.1.1.86	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-02689
Figura 5.1.1.87	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-028 .. 90
Figura 5.1.1.88	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-02891
Figura 5.1.1.89	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-029 .. 92
Figura 5.1.1.90	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-02992
Figura 5.1.1.91	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-030 .. 93
Figura 5.1.1.92	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-03094
Figura 5.1.1.93	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-033 .. 95
Figura 5.1.1.94	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-03395
Figura 5.1.1.95	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-034 .. 96
Figura 5.1.1.96	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-03497
Figura 5.1.1.97	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-035 .. 97
Figura 5.1.1.98	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-03598
Figura 5.1.1.99	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-037 .. 98
Figura 5.1.1.100	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-037 .. 99
Figura 5.1.1.101	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-039 .. 99
Figura 5.1.1.102	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-039 .. 100
Figura 5.1.1.103	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-040100

Figura 5.1.1.104	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-040	101
Figura 5.1.1.105	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-041101	
Figura 5.1.1.106	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-041	102
Figura 5.1.1.107	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-042102	
Figura 5.1.1.108	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-042	103
Figura 5.1.1.109	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-043103	
Figura 5.1.1.110	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-043	104
Figura 5.1.1.111	Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-044105	
Figura 5.1.1.112	Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-044	105
Figura 5.1.1.113	Localización en planta de los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo en el área de interés del proyecto por INTEINSA 2025 ...	106
Figura 5.1.1.114	Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-1 ...	107
Figura 5.1.1.115	Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-1	108
Figura 5.1.1.116	Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-2 ...	109
Figura 5.1.1.117	Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-2	110
Figura 5.1.1.118	Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-3 ...	111
Figura 5.1.1.119	Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-3	112
Figura 5.1.1.120	Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-4 ...	113
Figura 5.1.1.121	Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-4	114
Figura 5.1.1.122	Ubicación de la exploración geológica en la zona de Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote	115
Figura 5.1.1.123	Testigos de perforación mostrando algunos horizontes de meteorización. Perforación PG24-006 (ejecutado 2024) (BS5930) típicos en las rocas del Batolito Antioqueño	123
Figura 5.1.1.124	Geología local de la zona del Proyecto Gramalote	124
Figura 5.1.1.125	Perfil estratigráfico zona de plataforma de Estación Terminal	127
Figura 5.1.1.126	Perfil estratigráfico zona de plataforma La Mayoría	127

Figura 5.1.1.127	Perfil estratigráfico zona de Depósito (ZODME O)	128
Figura 5.1.1.128	Perfil estratigráfico zona de plataforma de trituración	128
Figura 5.1.1.129	Área externa e interna del tajo Gramalote y ubicación de las perforaciones.	136
Figura 5.1.1.130	Metodología para el cálculo del índice RQD.....	145
Figura 5.1.1.131	Frecuencia del RQD registrado en las perforaciones	146
Figura 5.1.1.132	RQD registrado en las perforaciones según la profundidad....	147
Figura 5.1.1.133	Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	149
Figura 5.1.1.134	Dique de microdiorita	155
Figura 5.1.1.135	Aplitas y pegmatitas. A) Dique de pegmatita en contacto con tonalita de grano medio. B) Aplita de textura afanítica y composición félsica	156
Figura 5.1.1.136	Tonalita fresca.....	156
Figura 5.1.1.137	Diorita porfídica	157
Figura 5.1.1.138	Tonalita fresca y ortoclasa. Núcleo de tonalita fresca. A) microfotografía mostrando cuarzo (Orz), plagioclasa (Pl) y ortoclasa (Or). B) Igual que A), con luz polarizada y nicols cruzados	157
Figura 5.1.1.139	Contacto diorita fina/tonalita	158
Figura 5.1.1.140	Localización collar de perforaciones título 14292	160
Figura 5.1.1.141	Ubicación de collares de perforaciones utilizadas para la estimación de recursos	161
Figura 5.1.1.142	Modelo de alteración del depósito - vista en planta	162
Figura 5.1.1.143	Modelo de alteración del depósito – Sección del núcleo del depósito	163
Figura 5.1.1.144	Tipos de alteración	164
Figura 5.1.1.145	Sección transversal -Dominios definidos para el depósito; amarillo (Halo), rosado claro (LG) y rosado oscuro (HG).....	165
Figura 5.1.1.146	Veta Tipo I.....	166
Figura 5.1.1.147	Veta Tipo II.....	166
Figura 5.1.1.148	Veta Tipo III.....	167
Figura 5.1.1.149	Veta Tipo IV	167
Figura 5.1.1.150	Veta Tipo V	167
Figura 5.1.1.151	Muestras de suelo, roca, trinchera y sedimentos activos tomados en el título 14292	170
Figura 5.1.1.152	Muestreo perforaciones Gramalote – vista planta	171

Figura 5.1.1.153	Correlación geoquímica de los elementos asociados a la mineralización del depósito Gramalote	172
Figura 5.1.1.154	Mapa de interpolación de oro para muestras de superficie del depósito Gramalote	173
Figura 5.1.1.155	Secciones de interpolación geoquímica de oro para muestras de perforación del depósito Gramalote	174
Figura 5.1.1.156	Esquema de protocolo de muestreo para análisis de Drenaje ácido	176
Figura 5.1.1.157	Distribución litológica a partir de testigos de exploración tajo Gramalote	177
Figura 5.1.1.158	Modelo de alteración del yacimiento - distribución en planta ..	178
Figura 5.1.1.159	Modelo de alteración del yacimiento – Distribución sección B-B'	178
Figura 5.1.1.160	Representación de mecanismo de formación de drenaje ácido.	181
Figura 5.1.1.161	Paredes y fondo de tajo.....	182
Figura 5.1.1.162	Distribución del porcentaje de muestras ensayos ABA según tipo de roca y suelo.	183
Figura 5.1.1.163	Distribución porcentual de materiales en la zona de explotación	185
Figura 5.1.1.164	Distribución en planta de tipos de alteraciones.....	186
Figura 5.1.1.165	Distribución del tipo de alteraciones sección A-A'.....	186
Figura 5.1.1.166	Distribución del tipo de alteraciones sección B-B'.....	187
Figura 5.1.1.167	Distribución del tipo de alteraciones sección C-C'	187
Figura 5.1.1.168	Distribución del porcentaje de muestras por litología.....	188
Figura 5.1.1.169	Distribución del porcentaje de muestras por alteración (dominios geoquímicos)	189
Figura 5.1.1.170	Distribución del porcentaje de muestras por litología y alteración (dominios geoquímicos).....	190
Figura 5.1.1.171	Distribución de las muestras para caracterización de DAR en zona de explotación.....	191
Figura 5.1.1.172	Discretización de la posición de las muestras (cota en m.s.n.m.).	192
Figura 5.1.1.173	Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de roca (n= 70)	202
Figura 5.1.1.174	Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de alteración (n= 26)	202
Figura 5.1.1.175	Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de roca .	203
Figura 5.1.1.176	Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de alteración	204
Figura 5.1.1.177	NP de carbonato verus potencial ácido por tipo de roca (n=585)	205

Figura 5.1.1.178	Detalle a escala amplia de NP de carbonato versus potencial ácido por tipo de roca (n=585)	205
Figura 5.1.1.179	Azufre total vs CO3-NPR (ABA) Tonalita.....	206
Figura 5.1.1.180	Azufre total vs CO3-NPR (Total Carbono) – Tonalita	206
Figura 5.1.1.181	Azufre total vs CO3-NPR – Saprolito.....	207
Figura 5.1.1.182	Azufre total vs CO3-NPR (Total Carbono) – Saprolito	207
Figura 5.1.1.183	Azufre total vs CO3-NPR – roca saprolítica.....	208
Figura 5.1.1.184	Azufre total vs CO3-NPR (Total Carbono) – roca saprolítica ..	208
Figura 5.1.1.185	Sulfuro de azufre versus pH NAG en réplicas de muestras de barril	209
Figura 5.1.1.186	Distribución en planta y sección de muestras clasificada como no-PAG, PAG y UC.....	212
Figura 5.1.1.187	Clasificación DAR por litologías.....	213
Figura 5.1.1.188	Clasificación DAR por alteraciones.	213
Figura 5.1.1.189	Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en celdas de humedad a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.	220
Figura 5.1.1.190	Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en barriles a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.	222
Figura 5.1.1.191	Distribución en planta de mineralización y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.....	224
Figura 5.1.1.192	Distribución en sección A-A' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.	225
Figura 5.1.1.193	Distribución en sección B-B' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.	226
Figura 5.1.1.194.	Distribución en sección C-C' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.	227
Figura 5.1.1.195	Configuración tectónica y terremotos históricos más importantes	229
Figura 5.1.1.196	Secciones transversales esquemáticas que ilustran las principales características tectónicas y los hipocentros de los sismos históricos ..	230
Figura 5.1.1.197	Análisis localizado en la mina Gramalote	231
Figura 5.1.1.198	Mapa de intensidades EMS-98 para el sismo histórico del 10 de abril de 1911, con área epicentral en Yarumal, Antioquia. El epicentro de este evento se localizó al NW de la mina Gramalote	235
Figura 5.1.1.199	Curvas de amenaza media (5% de amortiguamiento) para los periodos espectrales seleccionados en el sitio de la mina Gramalote. El valor de Vs30 usado es de 800 m/s.....	237

Figura 5.1.1.200 Espectros de Respuesta de Amenaza Uniforme (UHRs) (5% de amortiguamiento) en el sitio de la mina Gramalote. El valor de V_{s30} usado es de 800 m/s 238

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 5.1.1.1	Unidad litológica correspondiente al Batolito Antioqueño. Izquierda: Horizonte de meteorización de suelo residual (VI). Derecha: Horizonte de meteorización de saprolito (V)	122
Fotografía 5.1.1.2	Depósitos aluviales a) generan morfologías planas en un relieve colinado bajo perteneciente a litologías del Batolito Antioqueño b) Depósito aluvial de varios metros	129
Fotografía 5.1.1.3	Depósito coluvial asociado a erosión lateral de quebrada sin nombre al SW de la vereda Guacas	130
Fotografía 5.1.1.4	Llenos antrópicos identificados en la zona de estudio	131
Fotografía 5.1.1.5	Depósitos antrópicos mineros identificados en el área de estudio	132
Fotografía 5.1.1.6	Detalle del material constituyente de los depósitos antrópicos mineros	133
Fotografía 5.1.1.7	Perfil de meteorización de cuarzodiorita del Batolito Antioqueño. A. Horizonte de suelo residual (grado VI) - B Apique, Horizonte del perfil de meteorización (grado VI)	150
Fotografía 5.1.1.8	Perfil de meteorización del Batolito Antioqueño (saprolito). Apique donde se observa el horizonte del grado V del perfil de meteorización	151
Fotografía 5.1.1.9	Suelos transportados coluviales (Stc)	152
Fotografía 5.1.1.10	Suelo transportado de flujo (Stf)	153
Fotografía 5.1.1.11	Suelos transportados de llanura aluvial (Stlla)	154

MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL PROYECTO DE MINERÍA DE ORO A CIELO ABIERTO GRAMALOTE.

ATENCION A REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN ADICIONAL ACTA 30 DE 30 DE JUNIO DE 2026

5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIÓTICO

5.1.1 GEOLOGÍA

El Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote avanzó hacia estudios de línea base para solicitar licencia ambiental en el año 2015, habiendo avanzado previamente en campañas exploratorias desde 2012, en el 2018 se solicitó ante ANLA una modificación de licencia para lo cual se levantó e incorporó nueva información. Entre 2020 y 2022 se avanzó en estudios adicionales para diseño de obras específicas, lo cual requirió refinar la base geológica y geomorfológica del proyecto. Entre 2024 y 2025, Gramalote Colombia Limited realizó perforaciones geotécnicas adicionales y exploración indirecta del subsuelo (geofísica), información necesaria para el diseño de obras del proyecto, como la nueva ubicación de la planta de procesamiento, optimización del tamaño del Tajo Gramalote y nuevas vías, zodmes y plataformas menores, todas, obras necesarias para el desarrollo del proyecto.

La incorporación de todas las perforaciones ha permitido conocer los horizontes de meteorización y el perfil típico que desarrolla el Batolito Antioqueño en este sector. Análisis de fotos aéreas, imágenes satelitales y ortofotos han permitido delimitar con detalle las unidades cuaternarias presentes.

La caracterización de las unidades litológicas del área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote a escala regional es derivada principalmente de los trabajos desarrollados por el Servicio Geológico Colombiano – SGC (antes INGEOMINAS) ejecutados en distintas escalas de trabajo.

Ahora bien, para el análisis a escala local se consideraron estudios primarios y secundarios, de carácter técnico y académico, elaborados en el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de la Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote. Estos estudios incluyen la ejecución de sondeos exploratorios mediante perforaciones, como método directo para la caracterización detallada de las

condiciones geológicas y estructurales de los terrenos en estudio. En Tabla 5.1.1.1 se listan los documentos consultados para la interpretación geológica del área de influencia.

Tabla 5.1.1.1 Documentos consultados para la interpretación geológica

Autor	Año	Nombre del estudio	Observaciones
INGEOMINAS	1975	Geología de Plancha 132 Yolombó	Mapa Geológico Regional. Escala 1:100.000.
Feininger, y otros	1970	Memoria Explicativa de la Geología del oriente de Antioquia, cuadrángulo I-9 y parte de los cuadrángulos H-9, H-10, I-10, J-9 y J-10. Planchas 132 Yolombó - 148 San Carlos - 168 Argelia (Aquitania) - 188 La Dorada - 117 Amalfi.	Información relevante sobre las características de las Unidades geológicas a nivel regional. Así mismo presenta información estructural.
Integral S.A.	2015	Estudio de Impacto Ambiental proyecto Gramalote.	Estudio de impacto ambiental de Gramalote, específicamente los capítulos de descripción y caracterización ambiental del área de estudio y caracterización abiótica.
Duque-Trujillo J Bustamante, C, Solari L, Gómez-Mafla A, Toro- Villegas G, Hoyos S	2019	Reviewing the Antioquia batholith and satellite bodies: a record of Late Cretaceous to Eocene syn- to post-collisional arc mag. Andean Geology 46 (1): 82-101.	Revisión sobre el Batolito Antioqueño y sus cuerpos satélites: registro del magmatismo syn- a poscolisional entre el Cretácico tardío y Eoceno en la cordillera Central de Colombia.
B2Gold Corp	2019	NI 43-101 Reporte Técnico	Información con aspectos técnicos, mineralógicos, climáticos, exploración y perforaciones ejecutadas en el área del proyecto.
Integral S.A.	2021	Estudios de predios para proceso de reasentamiento de las unidades sociales - Informe I-I-0010490-VI-GN-Abcde	Zonificación geológica – geotécnica de los predios seleccionados para el reasentamiento colectivo asociados el Proyecto Gramalote. Presenta información geológica y geomorfológica a nivel regional y local, además de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa.

Autor	Año	Nombre del estudio	Observaciones
Integral S.A.	2021	Estudios de Factibilidad	Información de la caracterización geoambiental, que incluye estudios del territorio municipal de San Roque. Presenta información geológica, geomorfológica a escala regional. Así como inventario de procesos morfodinámicos, coberturas de tierra, análisis de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa.

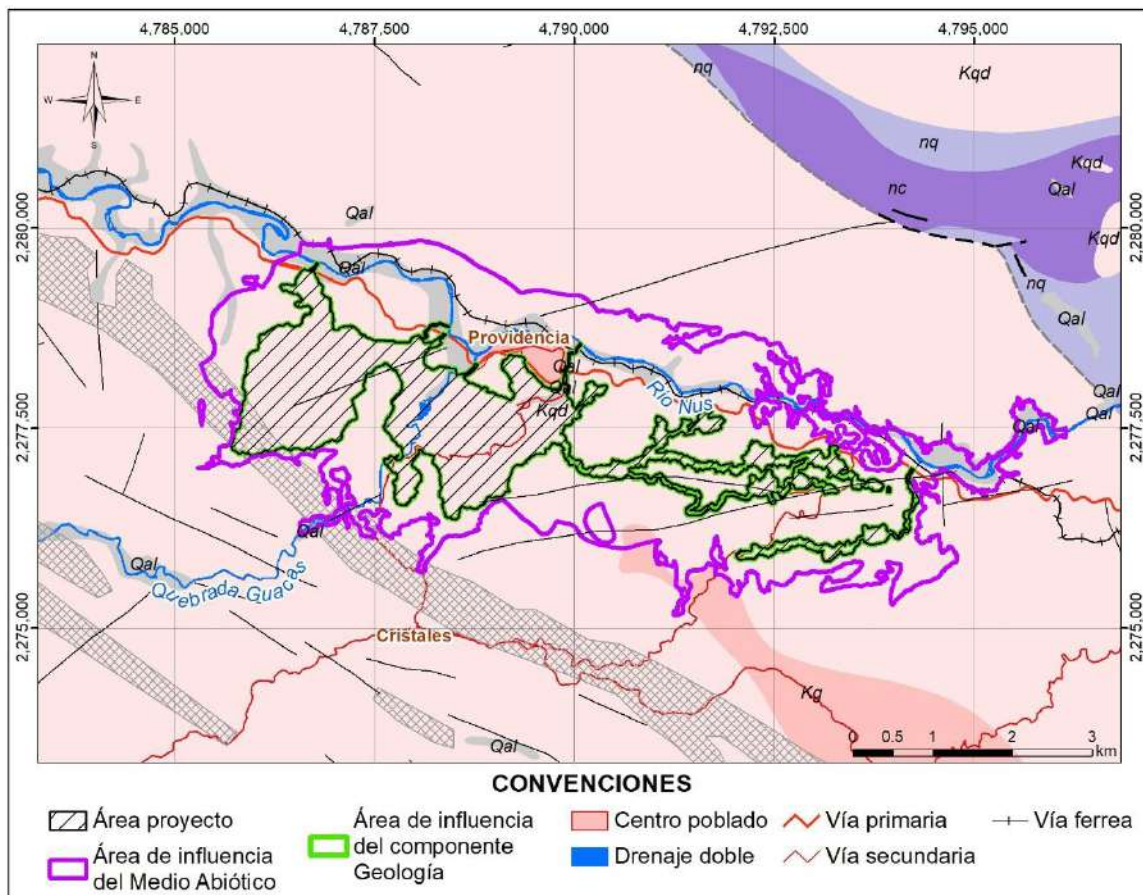
Fuente: Integral S.A, 2025

5.1.1.1 Geología regional

El área de influencia abiótica para la modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote está localizada en el extremo norte de la cordillera Central al nordeste del departamento de Antioquia. Esta zona está constituida en su mayoría por rocas pertenecientes a la unidad geológica del Batolito Antioqueño, cuerpo intrusivo que conforma el núcleo de la cordillera Central de los Andes colombianos.

El Batolito Antioqueño (cuarzodiorita (Kqd) y gabros (Kg)) tuvo origen durante el periodo Cretácico, donde ocurrieron eventos de intensa actividad magmática que dieron origen a cuerpos plutónicos de gran importancia. El Batolito Antioqueño presenta variadas facies composicionales con predominio de rocas tipo cuarzodioritas, que varían localmente desde gabros a granodioritas (González I, 2001) y que cubren gran parte del departamento de Antioquia. Adicionalmente, se evidencian unidades de coberturas recientes del Cuaternario; estas se definen en depósitos no consolidados de tipo aluviales.

A continuación, se describen las unidades geológicas que afloran en el área de influencia a nivel regional, con base en la información bibliográfica de INGEOMINAS (actualmente Servicio Geológico Colombiano, SGC), donde se consultaron la Geología de la Plancha 132 - Yolombó, correspondiente al cuadrángulo I-9 (INGEOMINAS, 1975) y la respectiva Memoria explicativa de la Geología del Oriente de Antioquia del año 1970 (Feininger, y otros, 1970; Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972), así como el mapa geológico de Antioquia (González I, 2001). También se consultaron documentos de estudios anteriores realizados por Integral S.A. que relacionan el área de influencia. En la Figura 5.1.1.1 se presentan las unidades geológicas anteriormente mencionadas y que representan un contexto regional del área de influencia.



Unidad Geológica

Qal - Aluvión	
Kqd - Cuarzodiorita	Batolito Antioqueño
Kg - Gabro	
nq - Cuarcita, cuarcita biotítica oscura y neis cuarzoso	Rocas Metamórficas de la Cordillera Central
nc - Neis calco-silicatado, incluye algo de mármol	

Estructuras

Falla definida con indicación de movimiento
Falla normal inferida
Falla inferida
Lineamiento fotogeológico
Zona de cizalla

Figura 5.1.1.1 Geología regional del proyecto

Fuente: Modificado de INGEOMINAS, 1975

5.1.1.1.1 Batolito Antioqueño

Cuerpo plutónico de extensión regional, de forma trapezoidal y que cubre un área de 7.221 km² aproximadamente en la parte central del departamento de Antioquia (Feininger, T.; Botero, G., 1982). Este cuerpo intruye rocas metamórficas circundantes del Complejo Cajamarca de edad paleozoica, con aureolas de contacto de varios metros de espesor. En algunos sectores el contacto es discordante y tajante, y presenta zonas de mezcla definidas por la ocurrencia de rocas híbridas (Feininger, T.; Botero, G., 1982).

Dataciones realizadas por varios autores ubican la edad de la intrusión del Batolito entre 90 Ma y 100 Ma (Botero A. , 1963), (Pérez , 1967), (Feininger, T.; Botero, G., 1982) y (Ordóñez & Pimentel, 2001).

Es una roca de tipo ígneo, masiva, de textura fanerítica, equigranular con variaciones locales en el tamaño de grano. La roca fresca tiene la apariencia de un granito macizo de color moteado con textura hipidiomórfica equigranular de grano medio. El saprolito conserva en gran parte la estructura ígnea de la roca original, con un color de moteado blanco a amarillo claro de cuarzo – feldespato y rojizo en diferentes tonalidades. Un perfil característico del Batolito Antioqueño se aprecia en la Figura 5.1.1.2.

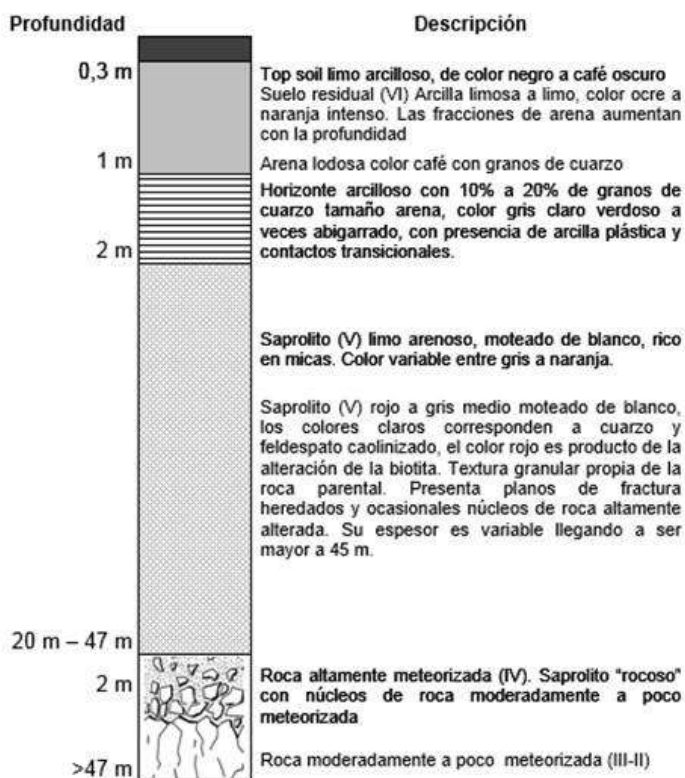


Figura 5.1.1.2

Perfil de meteorización típico del Batolito Antioqueño

Fuente: Feininger, y otros, 1970

En el Batolito antioqueño se diferencian dos facies principales en la región; cuarzodiorita y gabro (Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972), (González I, 2001) e (Integral S.A, 2015).

A. Cuarzodiorita Batolito Antioqueño (Kqd)

Roca masiva de color gris, de grano medio equigranular e hipidiomórfica, de textura moteada y compuesta por cuarzo, feldespato, hornblenda, biotita y minerales accesorios como apatito, magnetita y zircón, entre los más comunes. Las inclusiones en esta unidad son escasas, aunque esporádicamente aparecen manchas de minerales máficos, finogranulares, de color gris oscuro, masivos y de diámetros entre 5-50 cm, cuya composición es más rica en minerales máficos, los cuales en su momento fueron denominados “gabaros”. Diques de esta cuarzodiorita ocurren algunas veces en la roca encajante y también es cortada por otros de composición variable que varía de alaskita y felsita a andesita; cuando está cizallada es similar a los esquistos biotíticos (Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972)

B. Gabros del Batolito Antioqueño (Kg)

Los gabros son pequeños cuerpos que en conjunto representan 12 km² del Batolito Antioqueño. Regionalmente, los afloramientos se encuentran muy meteorizados y en ocasiones los gabros fueron cartografiados con base en bloques residuales, por lo que el área real de estos cuerpos sea mucho menor. Son rocas de coloración variada que va desde negro o gris a verde o café oscuro, de grano medio a grueso, hipidiomórfico a idiomórfico, equigranulares, aunque puede presentar fenocristales y su composición varía de piroxenita a gabro hornbléndico. El contacto con la unidad de cuarzodiorita se presume que es gradacional (Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972).

5.1.1.1.2 Cuarcita de la Cordillera Central (nq)

La cuarcita es la segunda roca metamórfica más abundante en la región. Al ser bastante resistentes a la meteorización, los afloramientos son abundantes. Estas rocas abundantes en cuarzo no reflejan cambios apreciables cuando se pasa de un grado de metamorfismo a otro. La roca predominantemente es una cuarcita biotítica de grano fino, laminada y de color canela claro y oscuro. Las láminas están compuestas por cuarzo fino y sacaroidal y separadas entre sí por bandas micáceas de espesor menor a 1 mm compuestas por biotita y moscovita. El contenido de cuarzo varía desde 80% a 95%. Los sedimentos originales son una mezcla de arena cuarzosa y shale limoso (Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972).

La edad de estas rocas metamórficas está bastante debatida, pero se correlaciona con la edad de otras rocas como las del Grupo Valdivia (Paleozoico) (Hall, Alvarez, & Rico, 1972), el Grupo Ayurá-Montebello (Pérmico) (Vargas & Amaya, 1990).

5.1.1.1.3 Neis de la Cordillera Central (nc)

Son una mezcla de neises de silicatos de calcio, cuarcitas con silicatos de calcio, mármoles y skarn. Estas rocas se caracterizan por su contenido de calcio y silicatos, y están asociadas a la actividad tectónica y a la exposición del batolito. Son rocas de tamaño fino a medio, ligeramente laminadas y teniendo como diópsido principal silicato de calcio, y se caracterizan por su contenido de minerales ricos en calcio y silicio, como feldespatos, piroxenos, anfíboles y granates. Los mármoles están intercalados y son masivos de color

gris claro a blanco de grano grueso. En cuanto al skarn, estas se componen principalmente por wollastonita y como minerales accesorios diópsido, vesubianita verde y esfena rosada (Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972). Al igual que la cuarcita, este cuerpo metamórfico tiene una edad presumiblemente paleozoica relacionándose con otras unidades geológicas.

5.1.1.1.4 Depósitos aluviales

Corresponden a materiales no consolidados asociados a los cuerpos fluviales principales como el río Nus y sus tributarios y además se incluyen aquellos depósitos generados durante eventos aluviotorrenciales.

Estos depósitos están conformados por cantos en una matriz de granulometría arenosa a gravosa. Son materiales que presentan espesores variables, de superficies planas a suavemente inclinadas, permeables y poca a nula consolidación, que se forman en zonas donde las pendientes disminuyen y favorecen los procesos de depositación (Integral S.A., 2020) (Cornare, 2012).

5.1.1.1.5 Geología estructural regional

Estructuralmente, el Batolito Antioqueño está limitado por dos grandes sistemas estructurales; hacia el oeste por el Sistema de Fallas Romeral y hacia el este, por el Sistema de fallas de Palestina. Otras estructuras se encuentran limitadas por el Batolito Antioqueño, la mayoría producidas por esfuerzos termal y presiones magmáticas debido a la contracción durante el enfriamiento del cuerpo, las cuales exhiben patrones estructurales semicirculares (Gerla, 1988), de pocos metros de espesor y varios kilómetros de longitud (Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972).

El marco estructural del área comprende así mismo, lineamientos a gran escala de dirección preferencial E-W a NW-SE. Estas estructuras regionales extensionales incluyen las fallas, Cisneros, Nare, las zonas de cizalla Cristales y Sofía Figura 5.1.1.3.

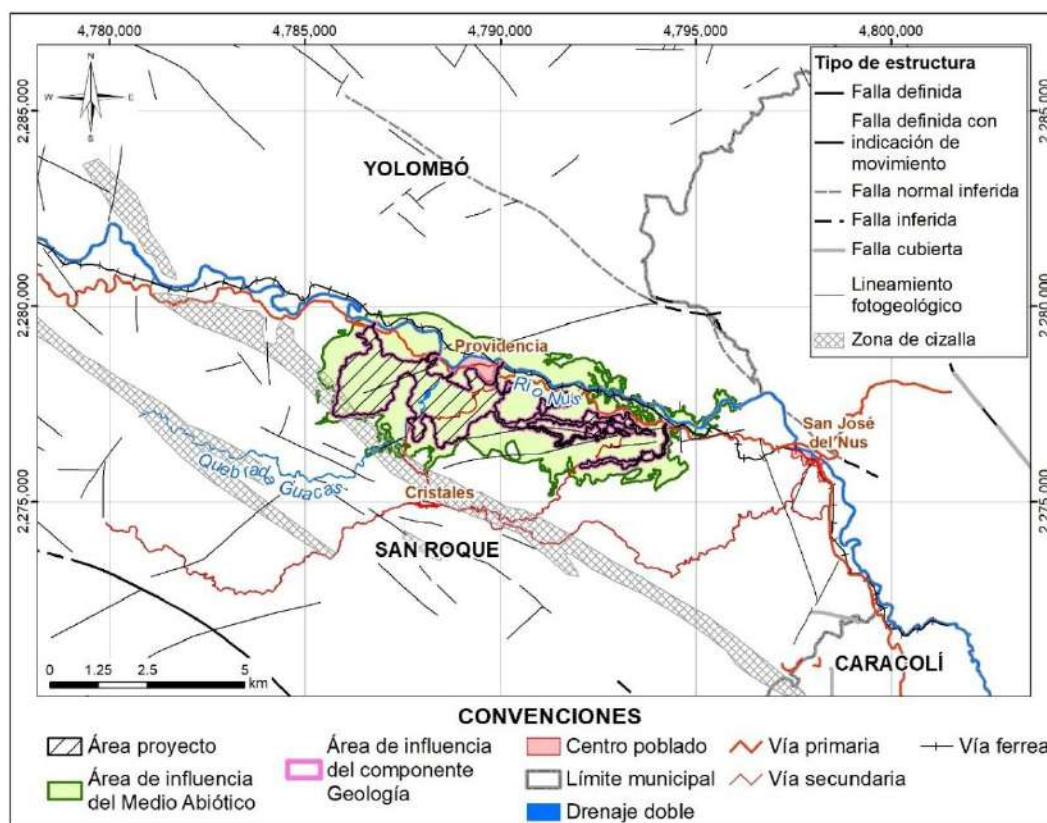


Figura 5.1.1.3 Marco estructural regional de Gramalote

Fuente: Feininger, Barrero L, & Castro Q, 1972

5.1.1.1.6 Fallas

A continuación, se hace una descripción generalizada de las fallas o estilos estructurales principales más representativos a nivel regional que enmarcan el área de influencia:

A. Falla Cisneros

La Falla Cisneros es una estructura geológica que se encuentra ubicada en el oriente de Antioquia, tiene una longitud de 70 km aproximadamente y su trazo se extiende hasta inmediaciones de la localidad de San José del Nus, en donde se ve interrumpido por un lineamiento NW (Integral S.A., 2020). Según Page (1986), esta falla tiene una cinemática inversa-dextral, presenta una actitud general de $N70^{\circ} - 90^{\circ}W/63^{\circ}SW$ y su actividad es baja ($0,01 \text{ mm/año} - 0,1 \text{ mm/año}$) con una máxima magnitud probable de 6,5 a 7 y un intervalo de frecuencia de 3.000 años a 15.000 años.

De acuerdo con el trabajo de Woodward Clyde Consultants (1980), al oriente de la población de Cisneros, vertiente sur del río, se encuentran depósitos aluviales y/o flujos de lodos aparentemente desplazados. Cerca del caserío de Providencia, en el lado norte del valle, se reportan lomos y drenajes deflectados y un abanico aluvial desplazado y con mayor incisión que los abanicos de la zona. Para Woodward Clyde, estas características son

indicio de actividad tectónica en el Cuaternario con posible desplazamiento inverso y un componente en rumbo lateral derecho, calificada con actividad tectónica baja.

Los estudios desarrollados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Modelo de Amenaza Sísmica de Colombia (Arcila, 2020), la base de datos del Proyecto de Evaluación de Riesgos de América del Sur (SARA, 2016) y la base de datos de fallas cuaternarias desarrollado por el USGS para Colombia (Paris, 2000), no presentan la falla Cisneros como una falla activa.

B. Zona de Cizalla Cristales

Su trazo se encuentra localizado entre las fallas Nare y Cisneros. Controla un tramo del río Nus hacia el sur de La Gitana, presenta una dirección principal NW-SE. En la zona de estudio su línea de trazo pasa cerca y hacia el noreste del corregimiento de Cristales. Hacia el este y sureste del río El Socorro, controla el curso de las quebradas La Chinca y Palomanchado, terminado en una falla con el mismo rumbo NW-SE, que pasa hacia el sur de Caracolí, que a su vez corresponde a una falla antitética de la Falla Palestina (Gómez Londoño & Catillo López, 2011). Su trazo en campo se evidencia por una clara alineación E-W del cerro Cristales que contrasta con la tendencia NW-SE del cerro Manizales, paralela a la zona de cizalla Cristales.

C. Zona de Cizalla Sofia

La zona de cizalla Sofia se encuentra al suroeste de la zona de cizalla Cristales. Está confinada al batolito antioqueño, con una expresión topográfica pobre, pero con espesores de las rocas cizalladas grandes de hasta 750 m en algunos puntos (Botero & Feininger, 1982). Tiene un rumbo NW-SE al igual que la zona de cizalla de cristales.

D. Falla Nare

Falla normal en dirección Noroeste con cerca de 40 km de longitud, corta rocas del Batolito Antioqueño en toda su longitud, controla gran parte del cauce del río Nare y afecta la Superficie de Erosión Río Negro. La falla de Nare se traza a lo largo del cauce del río Nare, en el oriente antioqueño, y presenta una orientación NW-SE, marcando un control estructural evidente en el paisaje regional. Está asociada a materiales cataclásticos, lo que indica que hubo una deformación dominante de tipo frágil (punto más cercano al municipio de Caracolí, aunque sin penetrar su territorio). Se interpreta como una falla de intrusión, vinculada al enfriamiento del magmatismo del Batolito Antioqueño, afectando principalmente rocas plutónicas del Cretácico y delimitando el contacto con la roca metamórfica paleozoica (Administración Municipal de Caracoli, 2012).

Desde el punto de vista tectónico, la falla Nare forma parte de un conjunto de estructuras orientadas NW-SE relacionadas con el emplazamiento y enfriamiento del batolito, como las fallas Balseadero, Monteloro, Bizcocho y Caldera (Antioquia Gold LTD, 2017). No muestra evidencia de actividad reciente—no desplaza depósitos cuaternarios—lo que la distingue de otras fallas de mayor urgencia como la Palestina (Administración Municipal de Caracoli, 2012).

5.1.1.1.7 Lineamientos

Tras el estudio estructural de Chica (2012), en 2017 CIG2 INGENIEROS S.A.S. actualizó el modelo estructural del Proyecto Minero Gramalote. Usando 62 aerofotografías (escala 1:12.000) y cartografía del IGAC (escalas 1:25.000 y 1:10.000), se generaron modelos digitales de elevación que permitieron identificar bloques estructurales limitados por fallas regionales y patrones de fracturamiento internos (Figura 5.1.1.4).

El análisis de la red de drenaje mostró que los ríos principales siguen fallas, y las corrientes menores, fracturas, lo que validó direcciones estructurales clave. La actualización reveló una mayor densidad de lineamientos estructurales, en concordancia con las fallas que controlan los ríos Nus y Guacas. Se definieron dos bloques estructurales principales que cruzan el Tajo Gramalote. Se identificaron cuatro tendencias estructurales dominantes: N10°E, N30°E, N15°W y N65°W.

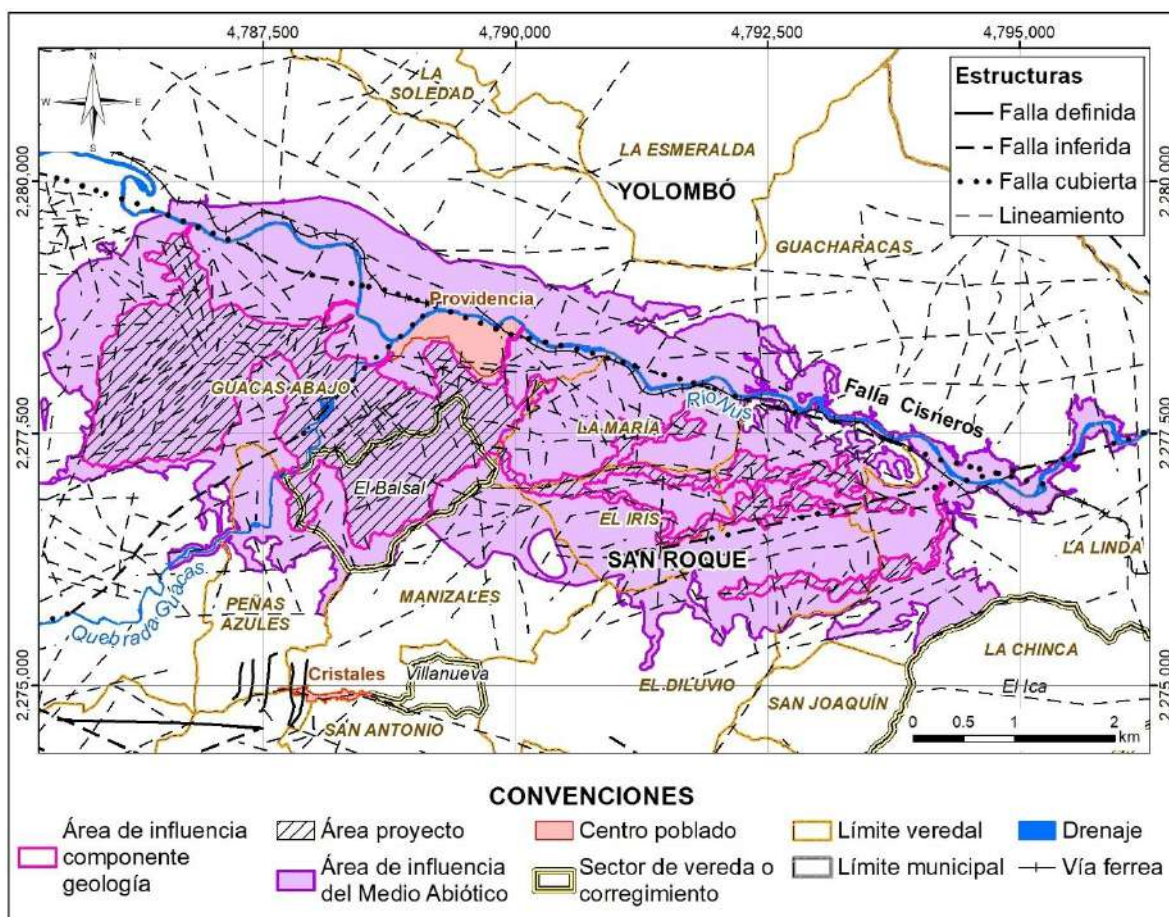


Figura 5.1.1.4 Estructuras principales identificadas en las aerofotografías (CIG2 INGENIEROS S.A.S., 2017)

Fuente: CIG2 INGENIEROS S.A.S., 2017 y Chica 2012

Con base en la cartografía geológica publicada, como también a análisis de modelos digitales del terreno con resolución de 1 m, se identificaron tres sistemas estructurales principales (Figura 5.1.1.5).

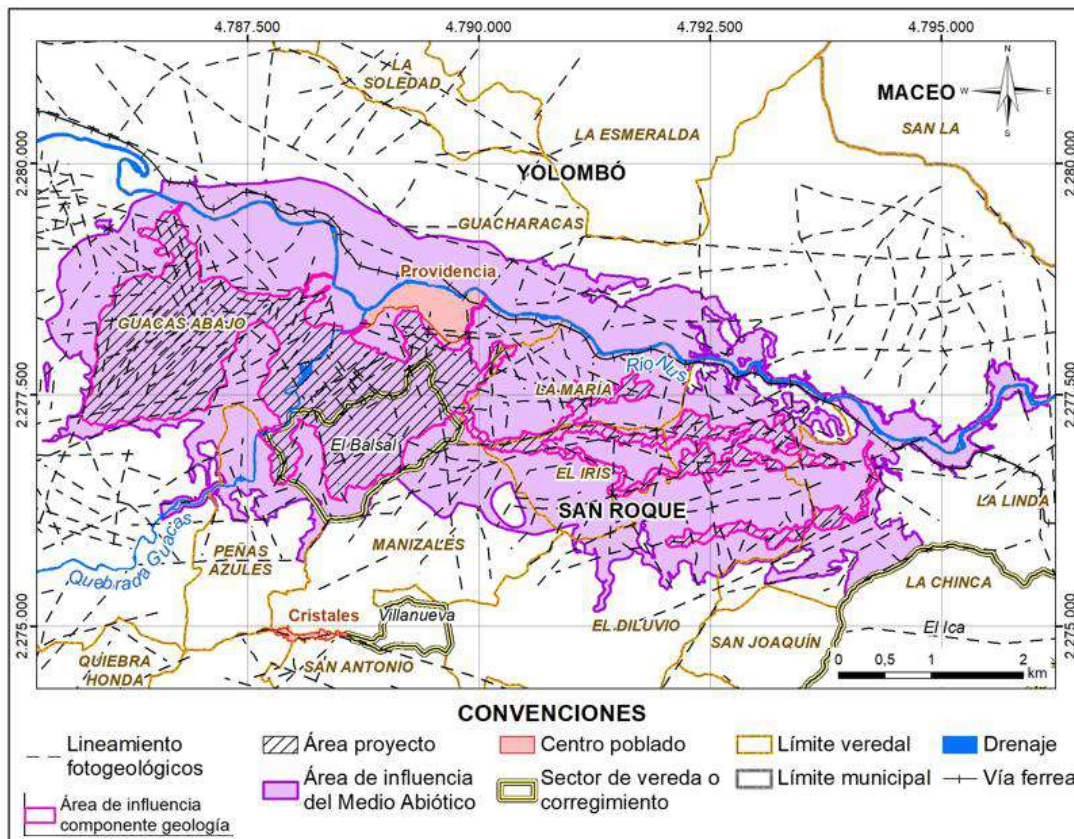


Figura 5.1.1.5 Lineamientos Fotogeológicos en el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote

Fuente: Integral S.A., 2025

Estos sistemas estructurales están representados por tendencias en dirección NW-SE y NE-SW (Figura 5.1.1.6), lo cual sugiere una fuerte influencia tectónica con orientación conjugada, posiblemente asociada a esfuerzos compresivos regionales. La concentración de lineamientos en estas direcciones podría estar vinculada a sistemas de fracturamiento asociados al emplazamiento del Batolito Antioqueño y/o a fases tectónicas posteriores.

Es importante mencionar, que muchas de las estructuras definidas en todos los sistemas estructurales identificados en el área de influencia, están cubiertas parcialmente por los diferentes depósitos cuaternarios o no consolidados.

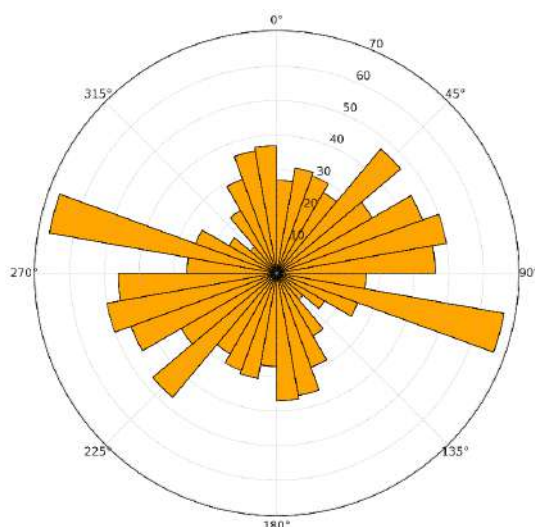


Figura 5.1.1.6 Diagrama de rosas de los lineamientos fotogeológicos
Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.1.2 Geología del yacimiento

Geológicamente el área donde se desarrolla el Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote objeto de Modificación de Licencia Ambiental se encuentra en dominios del Batolito Antioqueño. Este se compone de múltiples fases donde predomina la granodiorita, diorita y tonalita. La tonalita es el tipo de roca en que se aloja la mineralización del yacimiento aurífero.

Estas rocas están cubiertas por una gruesa capa de suelo residual y saprolito, producto de la alta meteorización y alteración del macizo rocoso ígneo. Son suelos de grano fino, de color rojizo a marrón amarillento, plasticidad media a baja. Son susceptibles a erosión superficial como cárcavas, surcos, deslizamientos rotacionales y socavación lateral de drenajes (Hidrogeocol, 2012).

En una proporción menor, se encuentran los depósitos de terraza aluvial en los valles del río Nus y de las quebradas, compuestos de grava, arena, limo y arcilla con espesores entre 3 y 15 m. También han sido identificados depósitos aislados aluvio-torrenciales, asociados a corrientes de agua y coluviones en las laderas de algunas colinas.

A continuación, se presenta la información geológica local del área de influencia para la modificación de licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote.

5.1.1.2.1 Estratigrafía/ Caracterización litológica local

Para realizar la caracterización geológica local de la zona de interés, se han realizado varias campañas de exploración directa e indirecta, que incluye sondeos eléctricos verticales realizados en el año 2012, 2018 y 2025. También se han realizado perforaciones geotécnicas durante los años 2012, 2013, 2020, 2021, 2024 y 2025, a continuación, se detallan las campañas ejecutadas.

A. Campañas de exploración indirecta

El método geofísico empleado en la zona de interés en donde se desarrollará el proyecto objeto de modificación de licencia corresponde a la ejecución de sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografías eléctricas.

La información geofísica empleada fue levantada desde 2012 en un área mucho más amplia que la actual área de influencia abiótica, debido a que las condiciones del subsuelo no han cambiado, es válido emplear esta información, además que con dicha información se complementa la interpretación de las características geológicas del área de influencia.

La incertidumbre asociada a la interpretación de los SEV y las tomografías eléctricas se minimizó utilizando la información del logueo o descripción geológica de las perforaciones exploratorias y de las perforaciones hidrogeológicas para la instalación de piezómetros que se realizaron cerca de los sitios donde se ejecutaron los diferentes sondeos y líneas geoelectricas. Es decir, se correlacionó cada unidad litológica, con un rango de valores de resistividad eléctrica interpretada, haciendo una “calibración” directa de la geología de la zona con los valores de resistividad medidos. En esta “calibración” se tuvo en cuenta si los suelos y rocas estaban secos, saturados y grado de fracturamiento.

Otra consideración que minimizó la incertidumbre en la interpretación geoelectrica, es la geología misma de la zona del proyecto, que, por su homogeneidad, obedece simplemente al perfil de meteorización del batolito antioqueño sin cambios sustanciales en composición geológica, sin presencia de estratos con salinidad detectada u otras condiciones específicas identificadas, como variables que puedan afectar o agregar condicionantes en dicha interpretación. La correlación de la información litológica de los cientos de metros perforados durante la exploración del proyecto, teniendo como soporte los respectivos núcleos, con las resistividades de los sondeos geoelectricos y tomografías ejecutadas en sus cercanías, permitió definir los siguientes rangos de resistividad para la interpretación y análisis de la campaña geofísica Tabla 5.1.1.2.

Tabla 5.1.1.2 Unidades geológicas y sus resistividades

Formación geológica	Valores de resistividad (Ohm-m)	Características hidrogeológicas
Unidad cuaternario no consolidada a poco consolidada		
Suelos	15 – 20	Suelo limos arcillosos, seco
Suelos	40 – 70	Suelo limo-arenoso, seco
Suelos	80 – 160	Suelo areno-limoso, seco
Suelos	260 - 510	Suelo gravoso, seco
Depósito de Terraza (Qt)	40 - 50	Limo y arena de grano fino. Capa permeable, saturada
Depósito de Terraza (Qt)	70 – 100	Arena de grano fino a medio. Capa permeable, saturada

Formación geológica	Valores de resistividad (Ohm-m)	Características hidrogeológicas
Depósito de Terraza (Qt)	120 – 830	Arena gruesa y grava fina a muy gruesa. Capa permeable, saturada
Saprolito del Batolito Antioqueño	100 - 150	Compuesto por arcilla y limo arcillosos, seco. Capa poco permeable, saturada
Saprolito del Batolito Antioqueño	1.000 – 1.700	Compuesto por arena de grano fino a grueso y limo. Capa poco permeable. Seca
Unidad Cretácica consolidada		
Roca ígnea del Batolito Antioqueño	2.900 – 8.700	Rocas ígneas parcialmente meteorizadas. Capa impermeable.
Roca ígnea del Batolito Antioqueño	10.000 – 11.000	Roca ígnea fresca. Capa impermeable.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited, 2015) en (Integral S.A., 2018)

a. Sondeos eléctricos verticales (Prospección geoelectrónica puntual)

En total fueron realizados 16 sondeos eléctricos verticales (SEV's) Tabla 5.1.1.3, con el objetivo de evaluar las condiciones geométricas en superficie y profundidad de los cuerpos aluviales potencialmente acuíferos. En la Figura 5.1.1.7 se puede observar la ubicación de los sondeos con respecto al área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote.

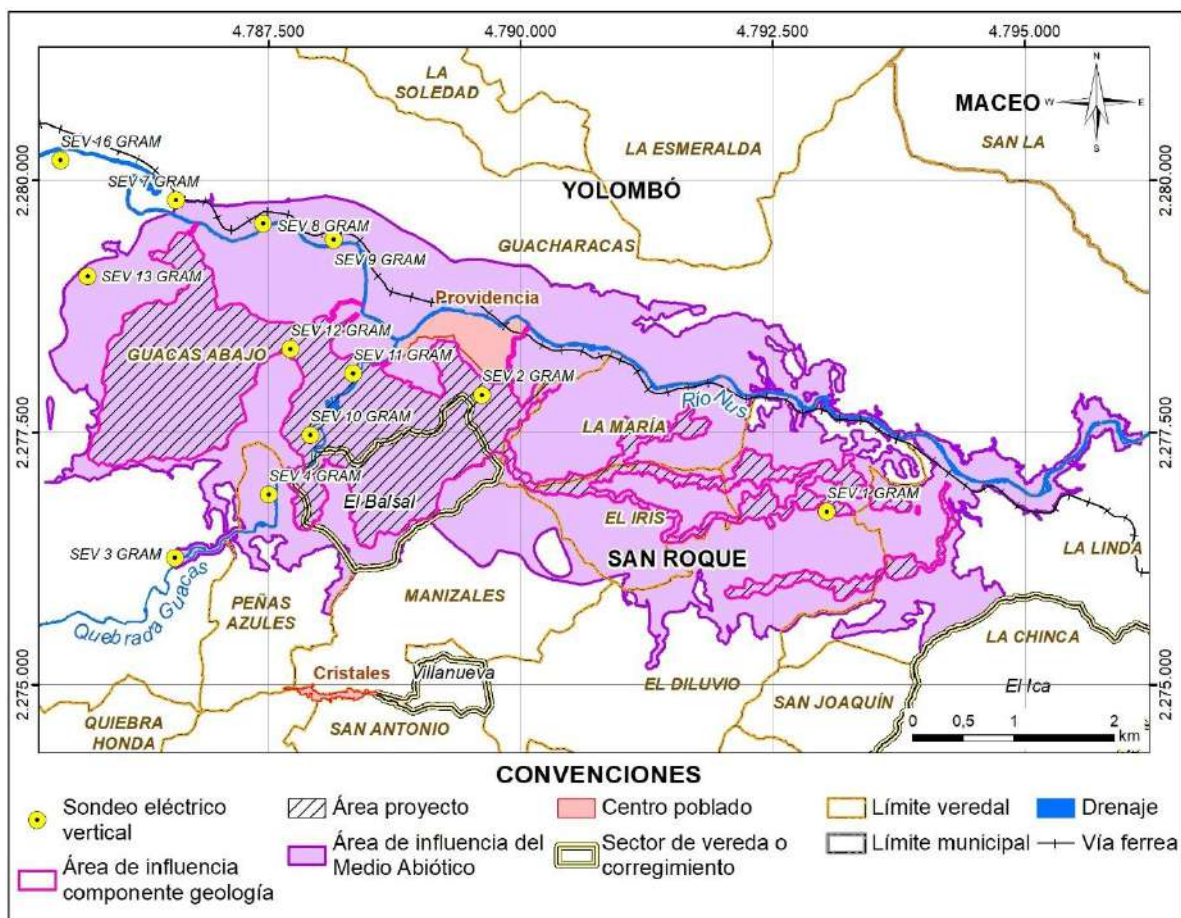


Figura 5.1.1.7 Ubicación de los sondeos eléctricos verticales

Fuente: Integral S.A. 2025 a partir de Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.1.3 Sondeos eléctricos verticales ejecutados en el área de estudio del proyecto

Identificar sondeo	Coordenadas			AB/2 (m)	Rumbo	Localización
	Este (m)	Norte (m)	Z			
SEV 1 GRAM	4.793.036,21	2.276.709,16	835	300	N87°E	Depósito de Terraza de la Q. La Palestina en la Y del carretable que une a las poblaciones de Cristales con el Iris
SEV 2 GRAM	4.789.617,29	2.277.867,86	851	300	N88°W	Al Norte del carretable que conduce al cerro Gramalote, sobre el depósito de la Q. La Colorada

Identificar sondeo	Coordenadas			AB/2 (m)	Rumbo	Localización
	Este (m)	Norte (m)	Z			
SEV 3 GRAM	4.786.567,41	2.276.251,65	950	250	N62°E	Depósito de Terraza de la Quebrada Guacas.
SEV 4 GRAM	4.787.498,05	2.276.879,09	958	250	N15°E	Deposito Quebrada Guacas en la Finca Los Cachos
SEV 5 GRAM	4.782.965,26	2.280.668,73	830	300	N62°W	Depósito de Terraza del Río Nus, por la entrada a las fincas La Gitana y Guacharaca, costado Occidental del puente.
SEV 6 GRAM	4.783.867,82	2.280.614,15	846	300	N87°E	Al sur de la antigua carrilera en la finca Guacharaca, 400 m adelante del puente; sobre depósitos del Río Nus
SEV 7 GRAM	4.786.582,46	2.279.797,20	836	300	N45°W	Depósito de Terraza del Río Nus, costado Sur de la antigua carrilera vía Guacharaca - Providencia 800 m aproximadamente delante de la casa-finca.
SEV 8 GRAM	4.787.447,30	2.279.569,71	836	300	N80°E	Al sur de la carrilera vía Guacharaca-Providencia, sobre Depósitos de Terrazas del Río Nus.
SEV 9 GRAM	4.788.141,92	2.279.405,53	839	300	N85°E	Depósitos del Río Nus, al Sur de la carrilera vía Guacharaca - Providencia
SEV 10 GRAM	4.787.915,79	2.277.467,53	915	125	N45°W	Margen Izquierda de la Q. Guacas en el sector de la Garrucha, frente a la casa abandonada.
SEV 11 GRAM	4.788.335,99	2.278.080,14	836	300	E W	Depósito de la Q. Guacas, en el sector de la hidroeléctrica y la Finca La Bateíta
SEV 12 GRAM	4.787.715,79	2.278.320,46	842	200	N45°W	Sector de San Antonio, depósitos de la Q. La Batea

Identificar sondeo	Coordenadas			AB/2 (m)	Rumbo	Localización
	Este (m)	Norte (m)	Z			
SEV 13 GRAM	4.785.704,17	2.279.045,00	850	300	N S	Finca El Topacio, depósito de la Q. El Topacio
SEV 14 GRAM	4.784.605,85	2.275.857,77	985	200	N73°E	Aguas arriba de la Quebrada Guacas, en su margen izquierda.
SEV 15 GRAM	4.783.540,07	2.276.304,62	889	250	E W	En la cancha de futbol que existe aguas arriba de la Quebrada Guacas, en su margen izquierda.
SEV 16 GRAM	4.785.435,83	2.280.194,82	834	300	E W	Costado izquierdo vía Cisneros-San José de Nus, frente a la entrada de la Finca El Topacio, en la cancha de futbol, depósitos del Rio Nus y la Q. El Topacio

Fuente: Integral S.A., 2018

I. Interpretación de los sondeos eléctricos verticales

A partir de la interpretación matemática empleando el programa computacional EarthImager 1D v.1.0.2 (2007), se genera para cada uno de los SEV's, un perfil geológico-geoeléctrico, en el que se correlacionan los valores obtenidos de resistividad verdadera y su variación con la profundidad, con la litología de las diferentes capas de las unidades geológicas sondeadas. Se determinan varios tipos de SEV's, según el número de capas de estos, obteniéndose sondeos de cuatro y cinco capas, debido a delgadas y gruesas intercalaciones litológicas que conforman las capas que constituyen principalmente los depósitos Cuaternarios. La interpretación de los SEV's se presenta en el ANEXOS_CHARACTERIZACIÓN_GEOLOGIA_GEOFISICA_PERFIL_GEOELEC.

- Suelos: La mayoría de los SEV's levantados sobre el Depósito de Terrazas, muestran una capa superficial menor de 1,0 m de espesor correspondiente a varios tipos de material seco, desde limo arcillosos con resistividades entre 15,0 y 20,0 Ohm-m los cuales se encuentran en baja proporción, siendo más frecuentes los tipos limo arenoso con resistividades entre 40,0 y 70,0 Ohm-m y los areno limosos con resistividades desde 80,0 hasta 160,0 Ohm-m. En algunos lugares se desarrollan suelos constituidos por arenas y gravas donde la resistividad aumenta de 260 a 510 Ohm-m. Esta situación permite inferir que las capas de suelo funcionan como una zona de tránsito del agua infiltrada proveniente la precipitación y del agua superficial y por ello permanecen secos.
- Depósitos aluviales de terraza: En los depósitos de terrazas asociados a los valles de las principales corrientes superficiales, a partir de la base de la capa de suelos, desde los 0,50 y 1,0 m de profundidad, hasta profundidades que comúnmente varían de 5,0 a los 10,0 m, los perfiles de los SEV's muestran capas intercaladas y saturadas con agua

representadas por limo arenoso que reflejan valores de resistividad entre 40 y 50 Ohm-m, arenas finas a media con resistividades desde 70 hasta 100 Ohm-m, y capas de gravas finas a gruesas y muy gruesas, que reflejan valores de resistividad entre 120 y 830 Ohm-m. En algunos sectores este depósito cuaternario adelgaza su espesor, fluctuando entre 3,0 y 6,0 m, como respuesta a la deposición discordante de las terrazas sobre una paleo topografía irregular constituida por material saprolitizado de las rocas ígneas del Batolito Antioqueño.

- Sapolito del Batolito Antioqueño: En la sub-cuenca de la quebrada Guacas, algunos SEV's levantados sobre depósitos de terraza producto de la erosión del saprolito, reflejan valores de resistividad desde 100 hasta 150 Ohm-m en su parte superior, como respuesta a la presencia de limo, limos arcillosos y arenas finas saturadas y entre 1000 y 1700 Ohm-m cuando el Sapolito contiene arena fina a gruesa parcialmente saturada.
- Rocas Ígneas del Batolito Antioqueño: Las rocas ígneas del Batolito Antioqueño que infrayacen al saprolito, se caracterizan por contener un grado moderado de meteorización al reflejar valores de resistividad desde 2900 hasta 8700 Ohm-m, indicando que generalmente se encuentran secas. Cuando desaparece ésta delgada capa, la resistividad aumenta hasta 11000 Ohm-m.

II. Perfiles geológicos – geoeléctricos

A partir de la interpretación matemática de cada SEV's y su ubicación, se elaboran dos perfiles esquemáticos geológicos-geoeléctricos, empleando el programa Hidrogeoanalysis v.1 (2009). Los perfiles se obtienen con los sondeos levantados sobre niveles de terrazas cuaternarias asociadas a los valles del Río Nus y la Quebrada Guacas, en los cuales se correlacionan la litología de las diferentes capas de las unidades geológicas sondeadas y los valores obtenidos de resistividad verdadera y su variación con la profundidad. La topografía de la línea de los perfiles no se ajusta al relieve existente porque no todos los SEV's empleados para la interpretación se encuentran sobre la línea del perfil, ni a la misma altura y por ello al extrapolarse se produce la irregularidad topográfica.

i. Perfil geológico geoeléctrico A-A'

Se elabora con una dirección NW-SE a lo largo del depósito de terraza del río Nus, conformado por los SEV's 5, 6, 16, 7, 8 y 9, donde el primero (SEV-5) se ubica aguas arriba cerca a la entrada a las fincas La Gitana y Guacharacas, y el último (SEV-9) aguas abajo, en la parte posterior del poblado Providencia. El perfil se muestra en la Figura 5.1.1.8. La parte superior del perfil entre los SEV 5 y 6, señala la presencia de una capa con espesor no mayor de 1,0 m compuesta aguas arriba por limos y arenas finas permeables que reflejan valores de resistividad entre 17 y 144 Ohm-m, representadas por el color azul intenso. Desde el SEV-7 hasta la parte final del perfil (SEV-9), esta capa superior corresponde a suelos desde limo-arenosos hasta gravosos muy permeables, representados por el tono grisáceo. Debajo de las dos capas anteriores, aparece una tercera constituida por arenas de grano fino a muy grueso saturadas con agua, representada por un color amarillento. Refleja valores de resistividad desde 66 hasta 175 Ohm-m, variando su espesor desde los 3,0 hasta aproximadamente los 6,0 m: Debajo aparece una secuencia de gravas finas a muy gruesa, incluyendo la presencia de cantos embebidos en matriz arenosa, igualmente saturada (de color verde en el perfil), la cual desarrolla espesores desde 4,0 hasta 12,0 m,

reflejando resistividades entre 296 y 1013 Ohm-m. Los mayores espesores de ésta última capa ocurren en y cercanías al SEV-6.

Las capas de gravas cubren discordantemente al Saprolito de las rocas ígneas del Batolito Antioqueño (en tono morado), no saturadas, al reflejar valores de resistividad desde 1.480 hasta 8.700 Ohm-m, conformando la gruesa capa meteorizada que cubre al basamento impermeable del perfil. La paleo topografía conformada por el Saprolito controla el espesor del Depósito de Terraza disminuyéndolo entre los SEV 7 y 8, haciendo desaparecer la capa arenosa por cambios laterales de facies. Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones geológicas-geoeléctricas, se infiere que la zona para perforación de piezómetros exploratorios con profundidades entre 5,0 y 10,0 m es aquella situada en y alrededores del SEV-6.

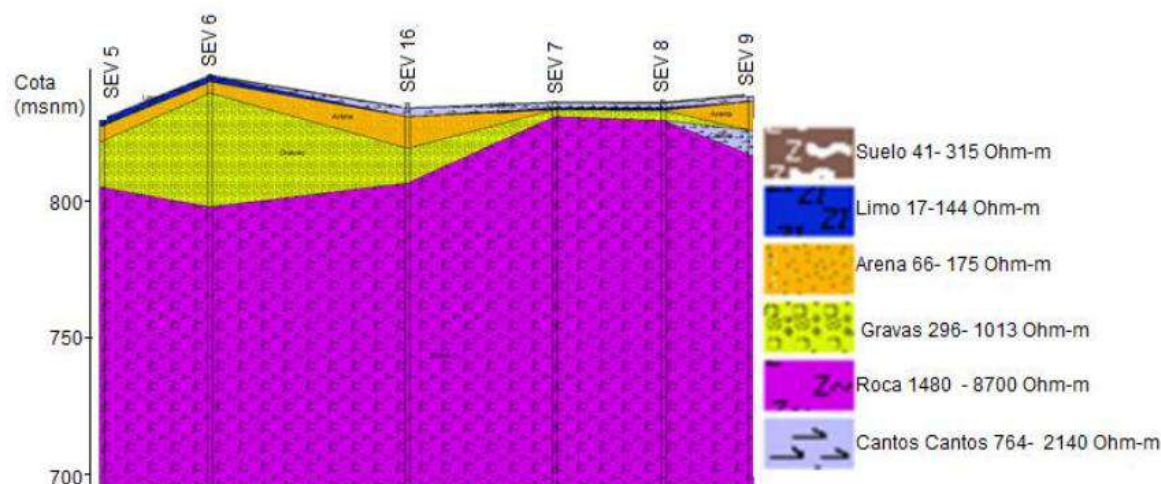


Figura 5.1.1.8 Perfil geológico – geoeléctrico A-A'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle del río Nus

Fuente: Hidrogeocol, 2012 en Integral S.A., 2018

ii. Perfil geológico geoeléctrico B-B'

Este perfil de corta longitud presentado en la Figura 5.1.1.9 conformado por los SEV's 3, 4, 10 y 11, se ha elaborado sobre el depósito de terraza asociado al estrecho valle de la quebrada Guacas, extendido en dirección SW-NE, desde la parte media de la quebrada, aguas arriba de la hidroeléctrica, hasta el sector de la finca La Bateíta, aguas abajo.

Se caracteriza por contener delgados niveles de terraza, prevaleciendo hacia la parte alta en el sector SW, entre los SEV's -3, 4 y 10, niveles de gravas saturadas con espesores promedios de 4,0 m que reflejan resistividades entre 296 y 1.013 Ohm-m. A partir del SEV-10 hacia aguas abajo donde se levanta el SEV-11, las gravas gradan a arenas de grano fino a medio e igualmente saturadas, con resistividades entre 66 y 175 Ohm-m, donde el espesor aumenta hasta aproximadamente los 10,0 m. Ambas litologías están cubriendo discordantemente al material saprolítico que cubre a las rocas ígneas del Batolito Antioqueño. El escaso espesor del depósito cuaternario en la quebrada Guacas solo permite la construcción de piezómetros hasta los 8,0 m de profundidad.

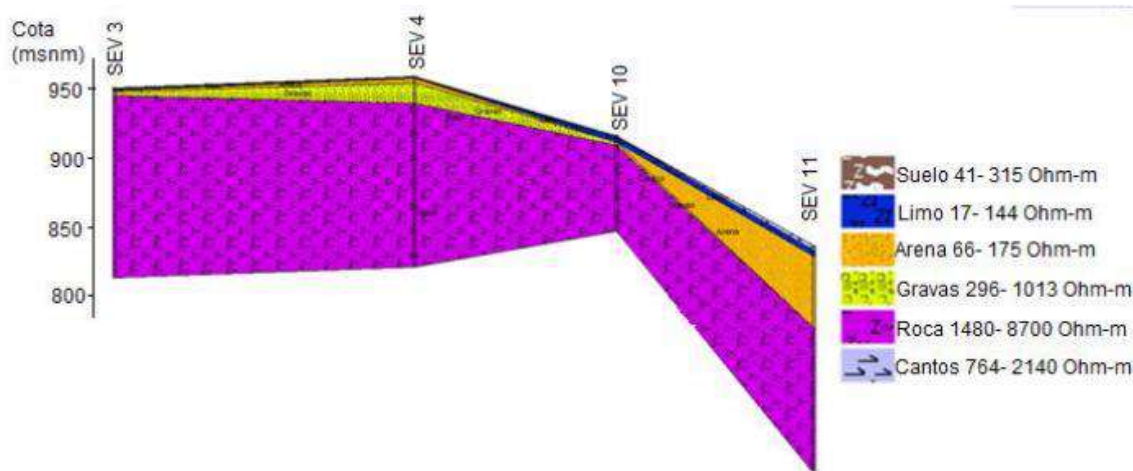


Figura 5.1.1.9 Perfil geológico – geoeléctrico B-B'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle de la quebrada Guacas.

Fuente: Hidrogeocol, 2012 en Integral S.A., 2018

b. Prospección geoeléctrica continua

En la determinación de la profundidad y espesor del material saprolítico producto de la meteorización de la roca ígnea asociada al Batolito Antioqueño y de los depósitos Cuaternarios representados por terrazas relacionadas con las principales corrientes superficiales, se ejecuta el levantamiento de 17 líneas de geoeléctrica continua con longitud que varía de 550 m a 670 m y separación de electrodos de corriente de 10,0 m y 12,0 m. Esta disposición permite alcanzar una profundidad de investigación de aproximadamente 100 m, a partir del contraste de los valores de resistividad reflejadas por las unidades geológicas subyacentes.

Con el fin de elegir la mejor disposición electródica que se ajuste a las condiciones topográficas del terreno y a la geología del área versus la relación de afectación por ruido, se realizan varias pruebas antes de la ejecución del primer perfil. Para ello se corrieron en modo prueba los arreglos Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo, concluyendo que los dos primeros poseen menos afectación por ruido y por consiguiente se convierten en los de mejor resolución para las condiciones del área. Para la adquisición de la información de campo igualmente se emplea el equipo de resistividad digital de alta resolución y precisión, marca SuperStingTM R8 IP.

La geoeléctrica continua es una metodología de prospección en la cual, para evaluar la resistividad del subsuelo, tanto en profundidad como lateralmente, se mantienen constantes las separaciones del arreglo de electrodos, dispuestos equidistantemente a lo largo del perfil de investigación. Una vez disparada la corriente desde el punto central del perfil, en cada punto de medida (electrodo) se registra el gradiente de voltaje y la corriente a una distancia conocida y a una profundidad dada desde la superficie del terreno. Este proceso lo lleva a cabo el equipo (SuperStingTM R8 IP) en forma automática, después de procesar la información obtenida durante aproximadamente una hora, según el arreglo electródico seleccionado (Wenner, Schlumberger, o Dipolo-Dipolo).

Para la realización del levantamiento geoeléctrico se utiliza el equipo de resistividad SuperSting® R8 IP con salida de 8 canales y medición continua de resistividades mediante el uso de 8 cables con 56 electrodos en total.

Para lograr dicho objetivo, la información digital es ingresada al programa EarthImager® 2D vs. 2.2., de propiedad de AGIUSA® y debidamente licenciado para Hidrogeocol Ltda. Cada perfil es procesado individualmente utilizando algoritmos adecuados para la inversión y considerando la técnica y la experiencia del consultor en este tipo de tareas. Las bases de datos generadas del levantamiento fueron ingresadas al Sistema de Información Geográfica GIS, creada para el proyecto (ARCGIS 9.3, ESRI®, licenciado para Hidrogeocol Ltda.).

Las resistividades aparentes medidas en campo y la información topográfica a lo largo de los perfiles de prospección, son los datos de entrada para el algoritmo del programa computacional (EarthImager 2D). Con las mediciones de campo, se obtiene una imagen del subsuelo de la distribución de los valores de resistividad aparente en el terreno, imagen que elabora el programa con base en la interpolación lineal de los valores de resistividad aparente registrados en campo. A cada uno de estos valores le corresponde un punto de ubicación que está referenciado por la profundidad, desde la superficie del terreno y la distancia de separación desde el punto de inicio de las medidas de resistividad.

Para el proceso de interpretación, el programa dispone de diversas opciones que van desde la edición de los datos de campo, para la eliminación y ajuste de datos anómalos, hasta la selección de alternativas de operación para el proceso matemático de inversión y modelación (ya sea por elementos finitos o diferencias finitas). La selección adecuada de las diferentes opciones que el programa presenta depende en gran medida del conocimiento de las condiciones geológicas (estratigrafía y tectónica) del terreno, del factor topográfico que imprime el relieve del terreno y de las características y comportamiento de los datos de resistividad aparente tomados en campo.

El proceso de interpretación es iterativo por ensayo y error, en el cual se busca que el modelo de interpretación matemática (modelo de resistividades reales) genere una imagen de resistividades aparentes calculadas, similar a la obtenida en campo con RMS (Root Mean Square) equivalente a la Raíz de la sumatoria de los mínimos cuadrados, indicando el grado de certidumbre de los resultados reportados. Se elige como valor máximo de RMS $\leq 10\%$ para el post-procesamiento de acuerdo con la experiencia del consultor, a las bases teóricas y al ruido de fondo existente en el sitio de estudio.

Cuando el RMS es menor a 5%, se considera que matemáticamente el modelo de resistividad real se aproxima con buena precisión a las condiciones de campo. En segunda instancia, se verifica que el modelo de resistividad real resultante tenga similitud con la interpretación geológica, para lo cual se requiere tener conocimiento de las condiciones y características geológicas presentes en el subsuelo, a fin de tener criterios de clasificación claros para seleccionar la respuesta que se aproxime con mejor detalle a las condiciones naturales presentes.

En la Figura 5.1.1.10 se muestra la sensibilidad relativa obtenida para la generación de cada perfil.

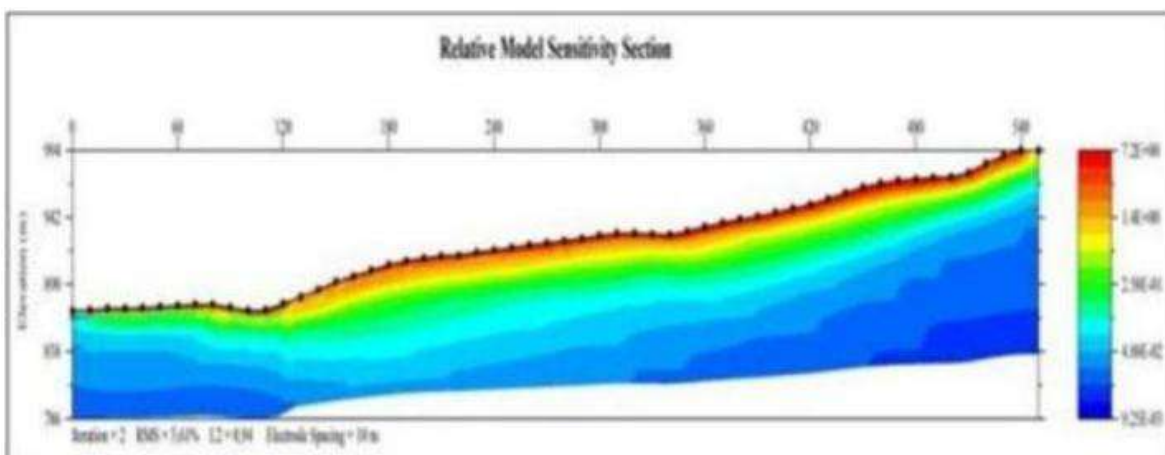


Figura 5.1.1.10 Sensibilidad relativa obtenida para la generación de cada perfil

Fuente: Hidrogeocol, 2012 en Integral S.A., 2018

I. Localización de los perfiles de geoelectrica continua

La ubicación de los perfiles geoelectricos se realiza tomando en cuenta un arreglo geométrico y espacial que permita cubrir la mayor parte del área posible y que a su vez admita establecer la correlación de las unidades geoelectricas presentes obtenidos en cada uno de los perfiles.

Los perfiles PG-2 y PG-15, se sitúan sobre un depósito de terraza aluvial aledaña al río Nus, en la margen izquierda de la confluencia de la quebrada Guacas con el citado río, de tal manera que permita identificar los espesores del depósito sedimentario y las estructuras asociadas a la tectónica local.

Los perfiles PG-3, PG-5, PG-9, PG-10, PG-11 y PG-12 se ubican en las colinas de los sectores de la quebrada Guacas abajo, Guacas arriba y Monjas, para conocer los espesores del saprolito. Los demás perfiles están distribuidos por toda el área de influencia indirecta del proyecto.

La Tabla 5.1.1.4 muestra las localizaciones y características de cada perfil ejecutado y en la Figura 5.1.1.11 se muestra el respectivo trazado con respecto al área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote.

En ANEXOS_CARACTERIZACIÓN_GEOLOGIA_GEOFISICA_PERFIL_GEOELEC se presenta la interpretación de cada perfil de geoelectrica continua levantado.

Tabla 5.1.1.4 Ubicación de las líneas de geoelectrica continua

Identificación	Ubicación	Electrodo de inicio			Electrodo final			Rumbo	Longitud* (m)	Máxima profundidad(m)
		Coordenadas		Cota	Coordenadas		Cota			
		X	Y	Z	X	Y	Z			
Perfil geoelectrico 1	Finca El Topacio	4.785.155,40	2.279.090,75	847	4.784.648,42	2.279.118,76	972	266	560	112
Perfil geoelectrico 2	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.789.134,83	2.278.778,91	820	4.788.517,39	2.278.944,39	843	290	672	126
Perfil geoelectrico 3	Finca San Antonio, al occidente de la Hidroeléctrica	4.788.322,71	2.278.528,09	824	4.787.862,88	2.278.084,84	839	224	672	123
Perfil geoelectrico 4	Gramalote, al Occidente del Campamento	4.789.052,74	2.278.254,16	827	4.788.723,16	2.277.870,40	855	209	560	103
Perfil geoelectrico 5	Cerro Gramalote parte alta	4.788.472,27	2.277.147,27	917	4.788.110,98	2.277.594,78	926	321	672	105
Perfil geoelectrico 6	Vereda el Iris, al norte del trapiche	4.790.581,12	2.277.028,92	952	4.789.968,40	2.276.871,31	942	232	672	89
Perfil geoelectrico 7	Vereda el Iris, frente a la casa de la Estrella	4.791.536,79	2.276.151,02	899	4.791.216,87	2.276.688,36	860	327	672	123
Perfil geoelectrico 8	Vereda el Iris, entre la Quebrada Palestina y el carreteable del Iris	4.792.872,21	2.276.968,85	859	4.792.939,93	2.276.390,50	837	180	560	135
Perfil geoelectrico 11	Guacas Abajo	4.784.435,67	2.275.653,97	1.006	4.784.468,06	2.276.256,95	1.070	19	672	135
Perfil geoelectrico 12	Guacas Arriba	4.782.823,85	2.276.282,45	987	4.782.919,74	2.276.757,16	1.105	18	560	112
Perfil geoelectrico 13	Finca Guacharaca,	4.788.721,61	2.278.486,50	816	4.789.078,23	2.278.883,15	818	44	560	112

Identificación	Ubicación	Electrodo de inicio			Electrodo final			Rumbo	Longitud* (m)	Máxima profundidad(m)
		Coordenadas		Cota	Coordenadas		Cota			
		X	Y	Z	X	Y	Z			
	Norte del Rio Nus									
Perfil geoelectrico 14	Sector San Antonio al Nor-Occidente del Campamento del Obras Públicas	4.786.724,51	2.278.291,39	846	4.786.871,50	2.278.787,88	832	17	550	110
Perfil geoelectrico 15	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.789.554,60	2.275.921,81	1.025	4.789.814,76	2.276.406,47	957	28	550	110
Perfil geoelectrico 17	Sector de la Hidroeléctrica, cruzando la Quebrada Guacas hacia el cerro Gramalote	4.788.261,47	2.277.964,24	819	4.788.778,19	2.277.875,19	889	100	550	110

*Longitud tomada en el terreno

Fuente: Integral S.A., 2018

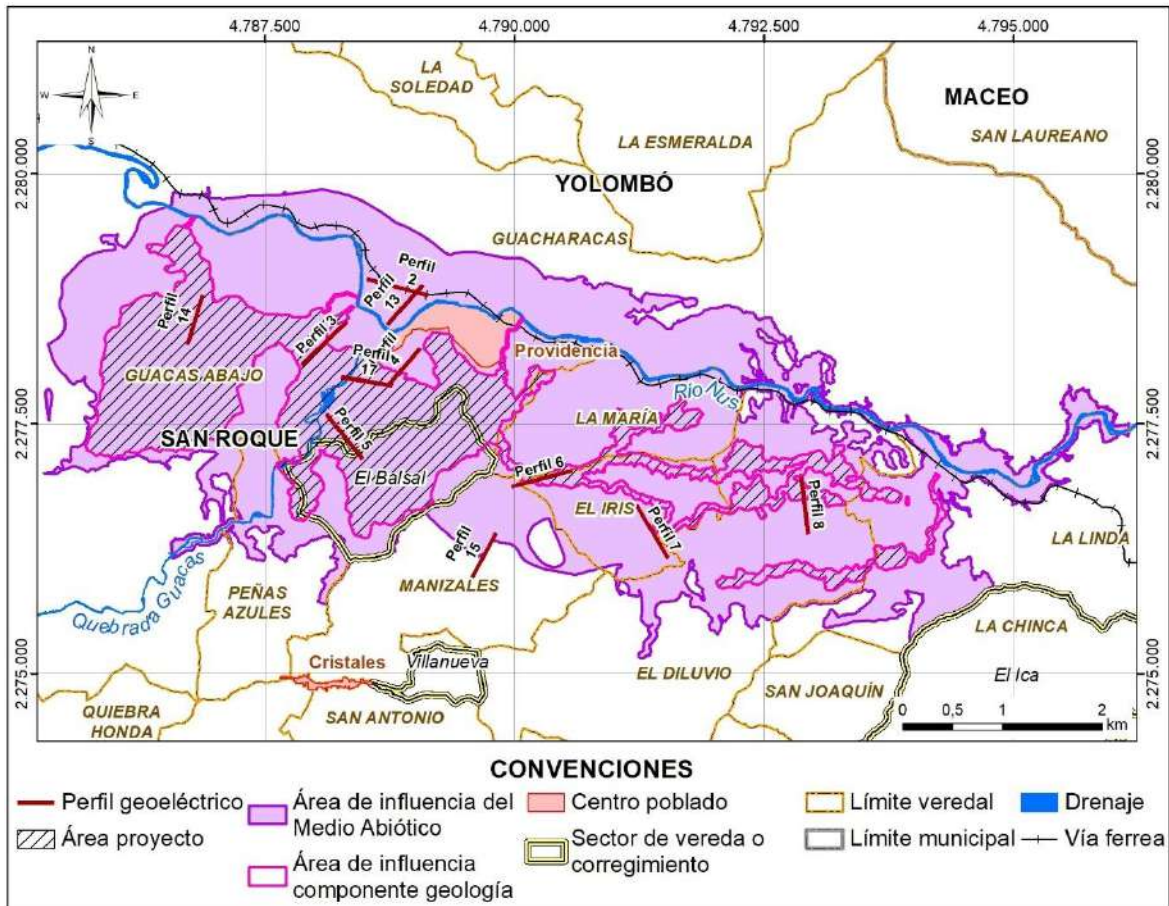


Figura 5.1.1.11 Ubicación en planta de los perfiles geoelectrónicos verticales

Fuente: Integral S.A. 2025 a partir de Integral S.A., 2018

II. Interpretación de los perfiles de prospección de geoelectrónica continua

Una vez obtenida la información de campo, se procede a organizar y filtrar los datos para su posterior procesamiento, de tal manera que la interpretación de los perfiles levantados en el área permita evaluar las condiciones en profundidad de las unidades geológicas presentes.

En el modelo de resistividad real que se genera con base en la información de campo, se aprecian las diferentes unidades geoelectrónicas presentes en el terreno (diferenciadas de acuerdo con los intervalos de resistividad real), condiciones estructurales, espesores, profundidades, etc., características que, al correlacionarlas con la información existente y la geología de campo, permiten obtener un modelo de la situación geológica en el subsuelo evaluado bajo la línea de prospección o pseudosección.

Cada imagen muestra la resistividad aparente medida en campo (imagen superior) y la imagen de la resistividad aparente calculada, resultante de simular en el programa computacional el proceso de campo con base en el modelo de resistividad real (imagen intermedia). En la medida que las dos anteriores imágenes muestren distribuciones de los valores de resistividad similares, es decir que haya una clara relación de correspondencia

mutua entre los valores medidos en campo y los simulados o calculados, (RMS menor a 5%), se le da validez al modelo de resistividad real, desde el punto de vista matemático.

Con base en el modelo de resistividad real resultante y teniendo en cuenta la topografía de superficie (integración y corrección que efectúa directamente el programa de interpretación), se elabora el modelo final de interpretación geológica, en el cual se definen las diferentes formaciones geológicas y las estructuras que conforman el subsuelo, hasta la profundidad de investigación estipulada.

Los diferentes valores de resistividad reflejados están asociados a las diferentes gamas de colores, y son producto de las condiciones matemáticas del modelo de interpretación. Es indispensable que la información de campo sea filtrada y corroborada utilizando técnicas geoestadísticas comúnmente aceptadas como parte del QA/QC para la presentación de datos y del modelo geoeléctrico.

i. Interpretación del perfil geoeléctrica continua PG-1 (A-A')

Está ubicado hacia el sector de la finca El Topacio en la parte alta del cerro, aproximadamente un kilómetro al Sur del Río Nus, con un rumbo de N5°W y una longitud de 560 m., logrando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m., para alcanzar una profundidad aproximada a los 131,0 m en las partes topográficamente más altas. Se utilizó el arreglo Schlumberger Figura

En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente tres (3) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del orden de 3,61%.

Desde el electrodo No.14 hasta el electrodo No. 50 (representados por los puntos negros ubicados en la parte superficial de la imagen inferior), se puede observar que en la parte superior aflora una unidad geoeléctrica caracterizada por resistividades que van desde 1.050 hasta los 2.700 Ohm-m, representada por las tonalidades verdes y cuyos espesores promedios varía desde 52,0 m en la parte alta y va decreciendo hacia las partes más bajas (26,0 m.). Esta unidad geoeléctrica es correlacionable a una secuencia geológica dominada por material saprolitizado, cuyo protolito ígneo corresponde a la unidad geoeléctrica más inferior reconocida en la imagen.

Una segunda unidad ocurre hacia el sector del Río Nus, reflejando las resistividades más bajas del orden de 229 Ohm-m hasta los 1.050 Ohm-m, representados en la figura por las tonalidades que van desde el azul hasta el celeste. Se presenta desde el electrodo No. 1 hasta el No. 13 y su espesor no excede los 12,0 m en profundidad. Esta unidad corresponde a materiales de terrazas constituidos por arenas, cantos y bloques que cubren delgadas capas producto de la meteorización de las rocas ígneas (color celeste), posiblemente relacionada con terrazas de la Quebrada El Topacio.

La tercera unidad geoeléctrica está representada por la variación de las tonalidades amarillas hasta las rojas con resistividades entre los 2.700 Ohm-m y superiores a los 10.000 Ohm-m, la cual no aflora, presentando una continuidad lateral con espesores que sobrepasan a la profundidad de estudio (mayores a 100 m.). Dicha unidad geoeléctrica se correlaciona con el basamento ígneo, constituido por tonalitas, cuarzodioritas muy poco o no meteorizados.

En general la imagen representa con claridad la respuesta de las secuencias geológicas presentes en donde no se observan discontinuidades asociadas a la presencia de fallamientos locales o regionales. Las coberturas relacionadas con el material saprolítico

en general tienen espesores máximos de 50,0 m en las partes altas, observándose una disposición concordante de este material con el basamento ígneo. En la Figura 5.1.1.12 se muestra la imagen de resistividad generada, también en el ANEXOS_CARACTERIZACIÓN_GEOLOGIA_GEOFISICA_PERFIL_GEOELEC.

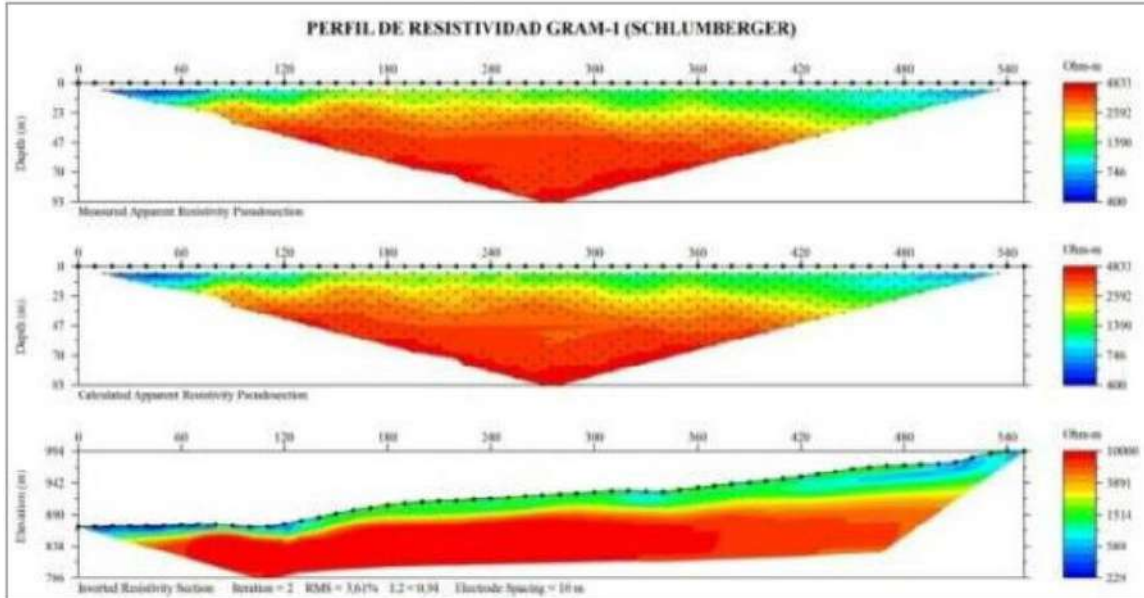


Figura 5.1.1.12 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-1 (A-A')

Fuente: Integral S.A., 2018

ii. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-2 (B-B')

El perfil tiene una longitud de 550,0 m., en sentido SE-NW, a lo largo del cual se instalan 56 electrodos separados una distancia de 10,0 m. La profundidad de estudio alcanza los 150,0 m., aproximadamente a lo largo de todo el perfil.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado utilizando la configuración Schlumberger se diferencian principalmente tres (3) unidades geoelectricas, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, de 4,82%.

La primera unidad geoelectrica corresponde a las resistividades que varían en el rango de 21,7 Ohm-m hasta los 200 Ohm-m, representados en la Figura 5.1.1.13 y por los matices azules hasta celestes. Se encuentra prácticamente aflorando en todo el perfil hacia la parte superficial desde el electrodo No. 1 hasta el electrodo No. 44 con espesores máximos de 15 m hacia el Oriente, disminuyendo hacia el Occidente en el pie de colina con espesores que no superan los 7,0 m. Esta unidad corresponde a Depósitos de Terrazas de edad Cuaternaria, constituidos por sedimentos poco consolidados, con granulometría de grano medio a muy grueso como arenas limosas y gravas.

La segunda unidad geoelectrica refleja resistividades que van desde los 200 Ohm-m hasta los 1.015 Ohm-m, representados por coloraciones verdes. En general se encuentra subyaciendo a la primera unidad y se observa un aumento de espesor importante (70,0 m.) hacia la parte izquierda del perfil (sector Oriental) por donde se ubican los electrodos No. 27 y No. 28; mientras hacia el lado derecho del perfil (sector Occidental) los espesores no

exceden los 25,0 m. Geológicamente correspondiente al saprolito producto de la meteorización diferencial del basamento ígneo.

La tercera unidad está representada por las tonalidades amarillas hasta rojizas cuyos valores de resistividad aparecen por encima de los 1.000 Ohm-m. Se encuentra cubriendo prácticamente la parte derecha del perfil desde el electrodo No. 28 hasta el electrodo No. 56 y subyaciendo a las unidades anteriormente mencionadas. Los espesores hasta la profundidad de estudio varían desde la parte izquierda del perfil con 32,0 m. hasta los 136,0 m. en la parte derecha. Geológicamente corresponde al basamento ígneo con predominio de granodioritas y granitos altamente compactos especialmente en donde las resistividades superan a los 5.000 Ohm-m.

El contraste lateral en las resistividades que representan la segunda y tercera unidad geoelectrica es evidente en la Figura 5.1.1.13 y permite establecer una serie de hipótesis relacionadas con la presencia de una tectónica activa en el sitio. Al parecer existe una falla de alto ángulo de buzamiento que afecta al sector, provocando que el “bloque” izquierdo (sector Oriental B) haya sufrido un proceso de alteración saprolítica mucho más intenso, mientras hacia el lado derecho del perfil (sector Occidental B') muestre una predominancia absoluta del basamento rocoso hasta la profundidad de estudio. Estas evidencias coinciden con los estudios geológicos superficiales llevados a cabo en el sector que indican la presencia de lineamientos regionales asociados a una tectónica activa post-Cretácica.

En general, la imagen representa con claridad la respuesta de las secuencias geológicas regionales en donde se observan discontinuidades marcadas posiblemente asociadas a la presencia de fallamientos locales o regionales. Las coberturas relacionadas con el material saprolítico son marcadas por el contraste de sus espesores e hidrológicamente solo existirían unidades potencialmente acuíferas de pobre capacidad de almacenamiento hacia el lado izquierdo del perfil, debido a la fina granulometría que prevalece en la matriz del material saprolítico (arcilloso).

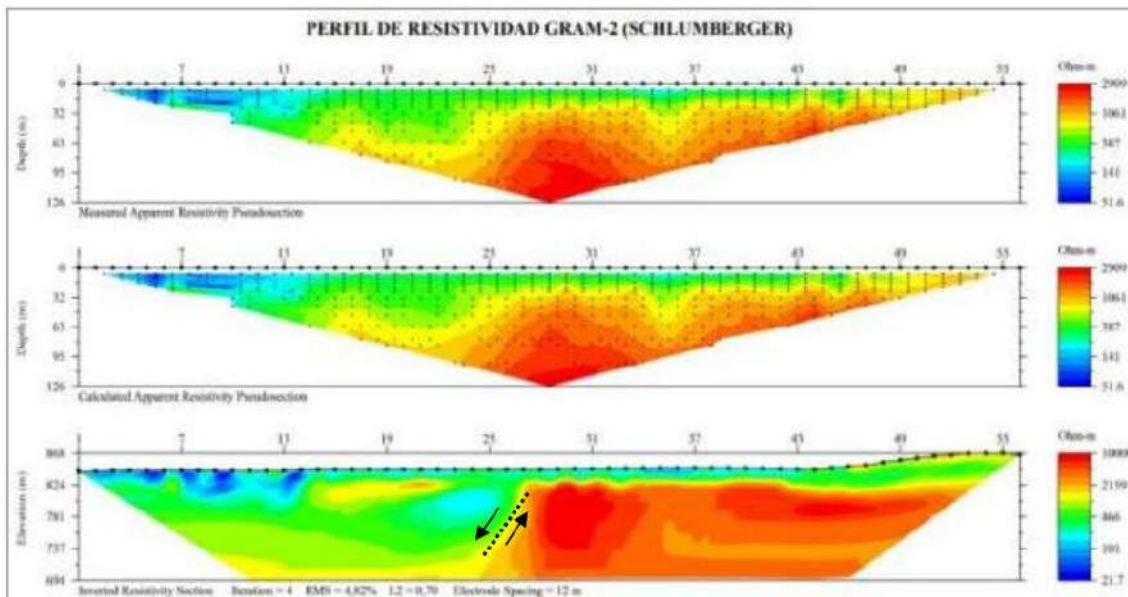


Figura 5.1.1.13 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-2 (B-B')

Fuente: Integral S.A., 2018

iii. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-3 (C-C')

Este perfil fue propuesto para investigar el extremo Nor-Occidental del área de Gramalote en el sector de San Antonio, cerca de la pequeña central hidroeléctrica en un sitio topográficamente compuesto por una zona alta de potreros y de colinas suaves (lado izquierdo del perfil) y una zona pantanosa más baja (lado derecho del perfil) en una altitud promedio de 850 m s.n.m. Se utilizó el arreglo Schlumberger Figura 5.1.1.14.

El espaciamiento entre cada electrodo es de 12,0 m, llegando a alcanzar una longitud total de 660 m lineales con rumbo N46°W. La profundidad máxima de exploración alcanza aproximadamente los 143,0 m. En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,54%.

La primera unidad geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos de resistividad entre 1.500 y 3.000 Ohm-m representados en el perfil por las tonalidades rojizas y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 6, del No. 11 al. 27 y desde el No. 31 hasta el No. 36. Sus espesores son variables, pero se estima que no exceden los 12,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con fragmentos de rocas cuarzodioríticas de tamaños centimétricos embebidos dentro de una matriz limo arenosa que han sido transportados por gravedad, como se puede observar en algunos pequeños afloramientos existentes entre los electrodos No. 20 y 24.

La segunda unidad se caracteriza por aflorar hacia las partes bajas en una zona pantanosa, entre los electrodos No 39 al No. 42 y del. No. 47 al No. 53. En estos sitios se tuvieron que hincar los electrodos a una de 2,0 m. para asegurar una correcta inyección de corriente. Los valores de resistividad son bajos y corresponden a los sedimentos acumulados en el fondo del lecho de la quebrada con rangos que van desde los 70 hasta los 240 Ohm-m, representados en el perfil por las gamas azules y celestes. El espesor promedio no supera los 10,0 m.

La tercera unidad geoelectrica se encuentra representada por el rango de resistividades que va desde los 250 hasta los 800 Ohm-m (rango de tonalidades verdes en la imagen), distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores entre 22,0 m. y 36,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito que va alterando su textura conforme alcanza la superficie del terreno, el cual al compactarse alcanza rangos de resistividad desde 800 Ohm-m hasta 1200 Ohm-m.

La cuarta unidad geoelectrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho. El rango de resistividad se encuentra entre los 1.200 y los 3.500 Ohm-m y simbolizado por las tonalidades rojizas. Dicha unidad es correlacionable con rocas meteorizadas del Batolito Antioqueño. Con base en los valores de resistividad y en el reconocimiento de campo, se nota una predominancia de rocas tipo cuarzodioríticas y dioríticas cuyos espesores promedios a lo largo del perfil son de 100 m hasta la profundidad de estudio.

A lo largo del perfil C-C' se presentan las unidades expuestas casi periclinamente aproximándose a las formas del terreno y en donde no se evidencian estructuras asociadas a la tectónica predominante de la región, pero se observa un mecanismo de alteración diferencial marcado por las variaciones progresivas en resistividad de las unidades (saprolitización). El espesor total aproximado que conforman las unidades poco consolidadas que se encuentran por encima del macizo rocoso es de 30,0 a 47,0 m., y

corresponden a una unidad hidrogeológica de muy baja capacidad de almacenamiento de agua.

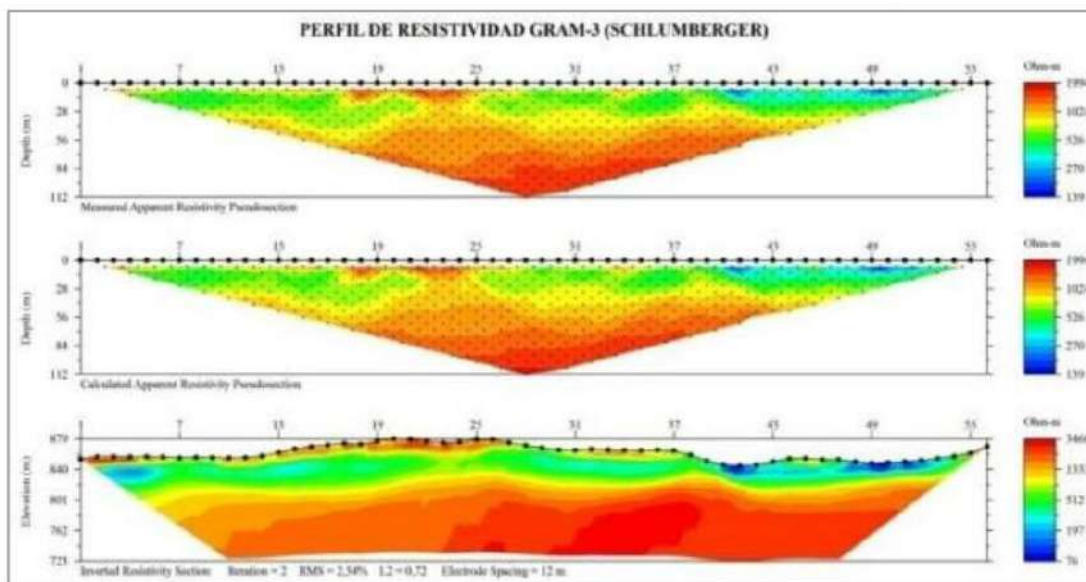


Figura 5.1.1.14 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-3 (C-C')

Fuente: Integral S.A., 2018

iv. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-4 (D-D')

El perfil tiene una longitud de 550,0 m en dirección N40°W, a lo largo del cual se instalaron 56 electrodos separados una distancia de 10,0 m. La profundidad máxima de estudio utilizando la metodología Schlumberger es de aproximadamente 140 m., medidos desde la cota más alta del terreno (Figura 5.1.1.15).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado (parte inferior de las imágenes) se pueden agrupar principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del 2,42%. Cabe resaltar que, durante la ejecución del perfil en campo, se reporta “ruido de fondo” que afecta parcialmente la calidad de los datos, especialmente hacia la parte baja del cauce de una quebrada que por allí transita, lo cual fue tomado en cuenta al momento de procesar la información para minimizar dichos errores posiblemente de origen natural.

La primera unidad geoelectrica está caracterizada por valores altos de resistividad del orden de 1.600 Ohm-m hasta 2.200 Ohm-m, representados en el perfil por la variación de matices desde amarillo hasta naranjas, restringidas a las partes más superficiales a lo largo de casi todo el perfil (Electrodos No. 5 al No. 14 y No. 26 al No. 52). Los espesores son casi constantes a lo largo del perfil, con promedios que bordean los 13,0 m. y corresponden a depósitos de materiales transportados por gravedad como bloques de rocas dentro de una matriz saprolítica de grano medio como arenas y limos. En el sitio no se divisan afloramientos que permitan corroborar lo señalado, pero morfológicamente se puede apreciar que existen mecanismos asociados a movimientos de masas, derrumbes y deslizamientos.

La segunda unidad interpretada corresponde a las resistividades que se encuentran restringidas a las partes topográficamente más bajas por donde cruza la quebrada y en donde se aprecia una disminución en los valores de resistividad (135 Ohm-m hasta los 220 Ohm-m); representados en el perfil por las gammas azules. El espesor promedio es de 12,0 m. y geológicamente pertenece a depósitos de materiales fluviátiles poco consolidados como limos arenosos y arenas parcialmente saturadas. La configuración mostrada y los espesores asociados generan cierta incertidumbre que es atribuida al “ruido de fondo” del sector.

Una tercera unidad geoelectrica en el rango de resistividades de 220 Ohm-m hasta 1.160 Ohm-m representada por la gama de tonalidades verdes, aparece a lo largo del perfil subyaciendo a la primera unidad y aflorando en varios tramos de este. El espesor es variable de tal manera que en el sector de la mencionada quebrada (electrodos No. 16 al No. 19) alcanza los 11,0 m., mientras hacia el lado derecho de la imagen (sector sur - oeste D') aumenta considerablemente hasta los 70,0 m. Los valores de resistividad y el conocimiento geológico del área permiten asociar estos valores a materiales saprolíticos poco consolidados, producto de la alteración del basamento ígneo.

Una cuarta unidad geoelectrica se presenta en el rango de resistividades superiores a 1.160 Ohm-m, representadas por las tonalidades amarillas hasta el rojo intenso y atribuible geológicamente a la secuencia del Batolito Antioqueño con una predominancia de cuarzodioritas y dioritas. Hacia la parte izquierda de la imagen se observa la forma de un lacolito cuyo espesor hasta la profundidad de estudio es de 70,0 m y va disminuyendo hacia la parte derecha del perfil. En general el trazo de las unidades geológicas-geoelectricas difiere del comportamiento de los perfiles anteriormente mencionados, pero se resalta nuevamente la presencia de una secuencia de materiales poco compactos suprayaciendo al basamento rocoso del Batolito Antioqueño.

Hidrogeológicamente las respuestas de las resistividades no indican la existencia de acuíferos importantes, pero en los sectores donde aparece la segunda unidad con tonos azules y resistividades entre 135 y 220 Ohm-m, reflejadas por materiales de grano medio, podría existir la posibilidad de encontrar cuerpos de agua muy localizados, recargados por la quebrada que por allí transita.

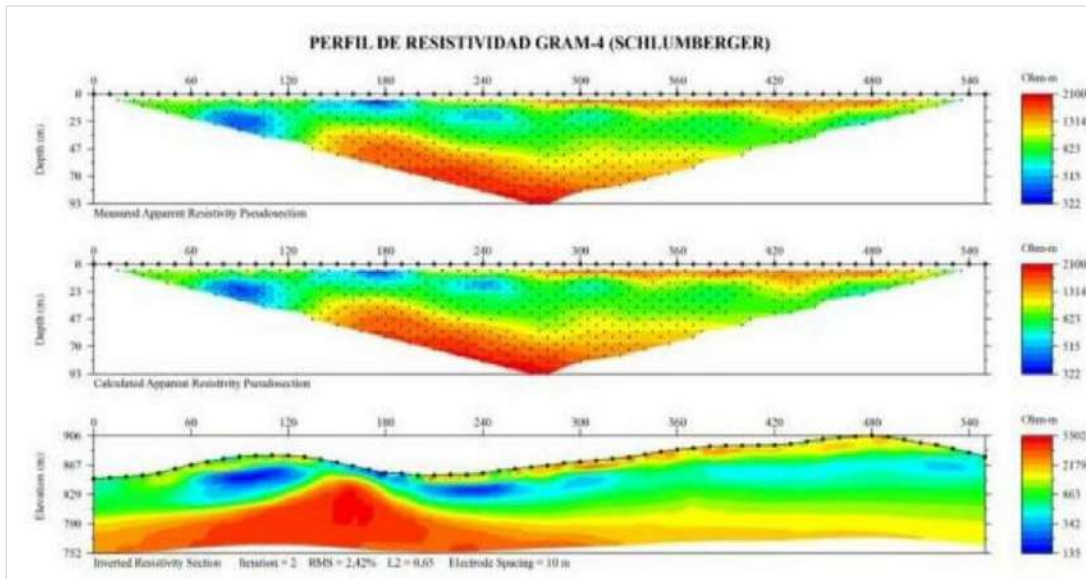


Figura 5.1.1.15 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-4 (D-D')

Fuente: Integral S.A., 2018

v. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-5 (E-E')

Perfil geoelectrico ubicado al oriente de la quebrada Guacas en el sector conocido como El Balsal. Se dispuso un espaciamento medido en terreno entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar una profundidad de 153,0 m. En general el terreno presenta fuertes escarpes con una morfología de colinas abruptas. La longitud total en terreno es de 660 m, con rumbo N39°W y configuración Schlumberger Figura 5.1.1.16.

Se pueden agrupar las resistividades en cuatro rangos principales de acuerdo con los contrastes de las unidades presentes y su disposición a lo largo del perfil.

La primera unidad geológico- geoelectrica corresponde a los materiales que se encuentran en las partes altas de las colinas con rangos de resistividad del orden de 4.000 Ohm-m hasta 5.000 Ohm-m (tonalidades rojizas) pertenecientes a restos de rocas saprolitizadas medianamente compactas con presencia de escasos bloques de carácter diorítico, lo que se puede corroborar al observar algunos pequeños afloramientos encontrados entre los electrodos No. 45 al No. 49. Su ocurrencia es más bien restringida y los espesores asociados no sobrepasan los 12,0 m.

La segunda unidad geológico- geoelectrica corresponde a los materiales de más baja resistividad (menores a 500 Ohm-m), relacionadas a sedimentos de rellenos de cauces y/o paleocauces. Afloran principalmente en la Quebrada Guacas donde se dispusieron los electrodos No. 23 al No. 26. Se presentan en los tonos azules a celestes y los espesores asociados no superan los 7,0 m.

La tercera unidad geológico-geoelectrica se encuentra presente a lo largo de todo el perfil E-E' y está representada por las tonalidades verdes con rangos de resistividad desde los 500 hasta los 2.000 Ohm-m aproximadamente, marcando un contraste definido con el basamento subyacente. Geológicamente estos materiales corresponden al Saprolito muy alterado, con espesores variables entre 20,0 m y 40,0 m.

La cuarta unidad geológico-geoeléctrica aparece representada por las tonalidades amarillas rojizas en rangos de resistividad mayores a los 200 Ohm-m, expuestas a lo largo de todo el perfil subyacentes a las unidades anteriores. Corresponde al basamento de rocas ígneas (granodioritas, cuarzodioritas) con espesores que superan los 100 m. hasta la profundidad de estudio.

En general el perfil presenta el mismo esquema geológico que los perfiles anteriores y no se distinguen discontinuidades marcadas lateralmente que hagan pensar en la presencia de fallamientos en este sector. Hidrogeológicamente no se considera la existencia de unidades potencialmente acuíferas.

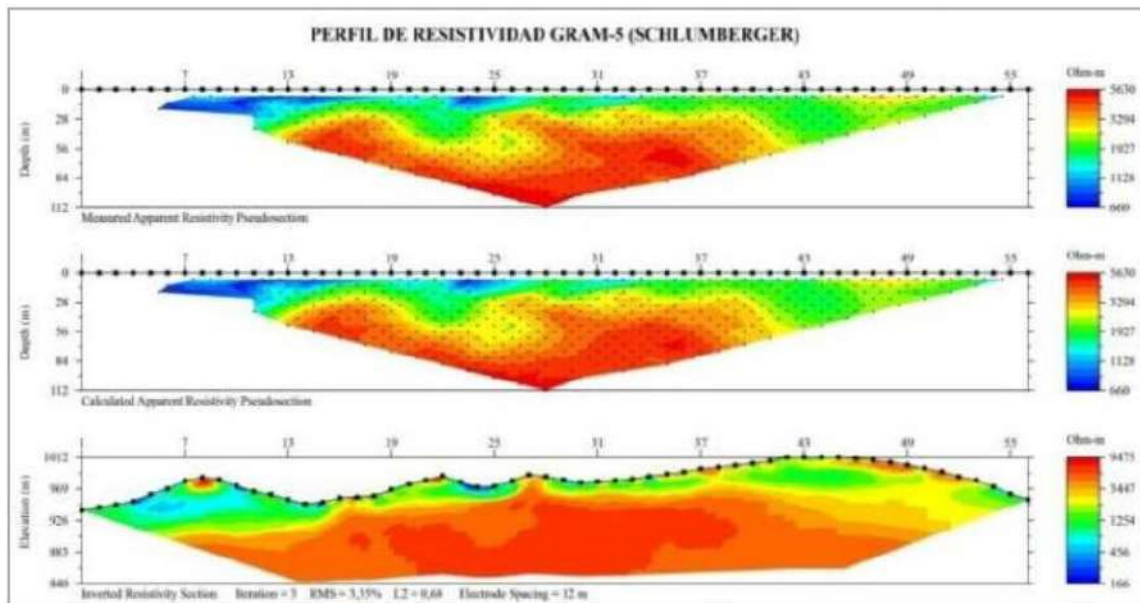


Figura 5.1.1.16 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-5 (E-E')

Fuente: Integral S.A., 2018

vi. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-6 (F-F')

En el sector denominado “Vereda del Iris”, el cual corresponde a una zona de escarpes pronunciados, se dispuso el perfil PG-6 con un espaciamento entre electrodos de 12,0 m., cubriendo una longitud total en terreno de 660 m., en dirección N15°E. La configuración utilizada, Wenner, permite alcanzar profundidades de hasta 100,0 m con respecto a la superficie del terreno Figura 5.1.1.17.

En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente tres (3) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,73%.

La primera unidad de resistividad representa a las gamas azules con resistividades entre 60 Ohm-m y 200 Ohm-m, aflorando en superficie a lo largo del perfil. Estas resistividades están asociadas a materiales poco consolidados del tipo arenas limosas y/o arcillosas que se forman sobre todo en las partes bajas de las quebradas. El espesor no supera los 10,0 m., y se dispone en general de manera concordante con el relieve del terreno.

La segunda unidad aparece representada por matices verdes con rangos de resistividad de 200 Ohm-m hasta 1.100 Ohm-m, aproximadamente. Se encuentra suprayaciendo al

basamento ígneo con espesores de 12,0 m hasta 35,0 m, geológicamente asociada al material Sapolítico del Batolito Antioqueño.

La tercera unidad se encuentra asociada tanto a las rocas ígneas del Batolito propiamente dicho (colores rojizos) como al material saprolitizado (matices amarillos) que caen en los rangos de resistividad desde 1.100 hasta 2.800 Ohm-m. En general se trata de un cuerpo periclinal a la morfología del terreno con espesores que superan la profundidad de estudio (mayores a 70,0 m) que ha sufrido procesos de alteración diferencial hacia las partes más superficiales. Las resistividades no se presentan tan altas como los observados en perfiles anteriores, pero la respuesta es coherente con la geología local en donde se muestra claramente la disposición espacial de las secuencias presentes. Por otra parte, no se evidencian variaciones laterales importantes en los valores de resistividad que indiquen la presencia de estructuras asociadas a la tectónica local.

Las unidades descritas no presentan las condiciones ideales que permitan inferir la existencia de acuíferos importantes a lo largo del perfil.

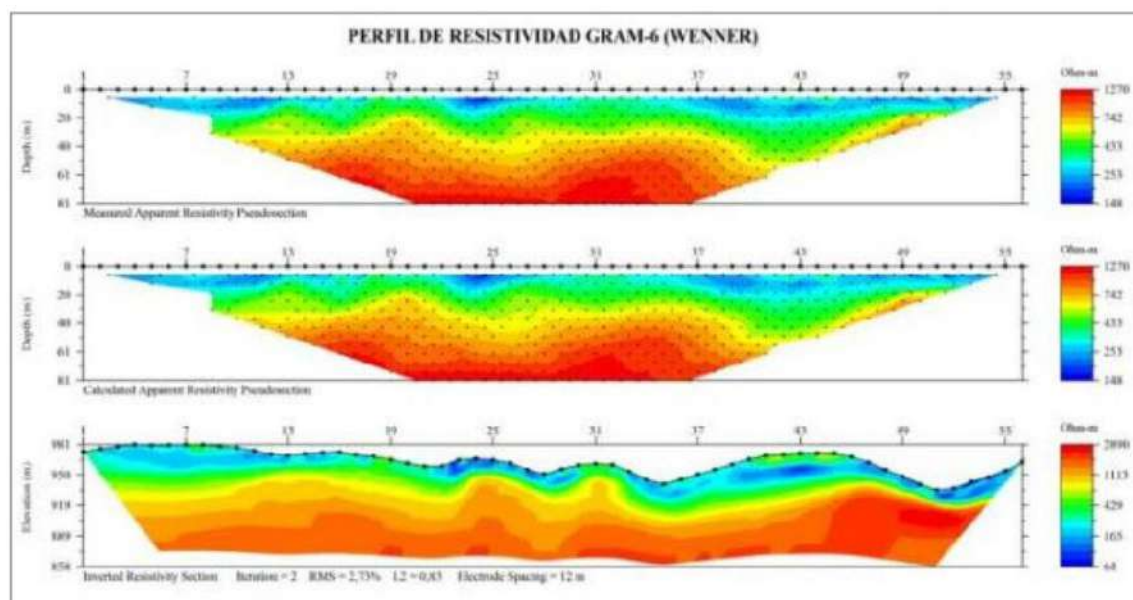


Figura 5.1.1.17 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-6 (F-F')

Fuente: Integral S.A., 2018

vii. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-7 (G-G')

El perfil atraviesa una sección de la quebrada La Palestina situada al suroriente del cerro Gramalote. Morfológicamente el centro del perfil se encuentra sobre una terraza aluvial relativamente plana y hacia los límites laterales se aprecian colinas que sobrepasan los 900 m s.n.m.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cinco (5) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,89% y por su posición espacial en el perfil. Se utilizan configuraciones Schlumberger y Wenner proporcionando similares resultados en ambos casos.

La primera unidad geológico-geoeléctrica corresponde a los materiales presentes en la parte superior de la colina, correspondiente al lado derecho del perfil (sector suroriental) entre los electrodos No. 41 al No. 48, cuyas resistividades caen en el rango de 1.200 Ohm-m hasta los 2.300 Ohm-m, valores reflejados por cantos y bloques caídos, alterados y embebidos en una matriz saprolítica. Su ocurrencia es restringida y su espesor no supera los 11,0 m. En el perfil están representados por las tonalidades amarillas y rojas hacia la parte superior.

La segunda unidad geológica-geoeléctrica se encuentra definida por los rangos de resistividad desde 12 hasta los 130 Ohm-m, expresado por los matices azules hasta celestes y restringidos a las partes bajas en las terrazas aluviales cuaternarias (electrodos No. 20 hasta el No. 35) con un espesor que no excede los 10,0 m.

La tercera unidad agrupa las resistividades del orden de 130 Ohm-m hasta los 1.000 Ohm-m y se representan en el perfil por tonalidades verdes. Se encuentran expuestas a lo largo de todo el perfil y corresponden geológicamente al saprolítico del Batolito Antioqueño, con un alto grado de alteración. Su espesor es variable, aumentando progresivamente desde el lado izquierdo del perfil (G) donde alcanza los 12,0 m hasta los 45,0 m en su parte derecha (G').

La cuarta unidad representa geológicamente al material saprolítico con un grado menor de alteración que la unidad anterior. Está simbolizado por los tonos anaranjados y amarillos con resistividades del orden de 1.000 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m.

La quinta unidad representa el macizo rocoso correlacionable con rocas ígneas fresca del Batolito Antioqueño, el cual muestra valores de resistividad superiores a los 2.000 Ohm-m y representados en el perfil por las tonalidades rojas. Los espesores asociados superan a la profundidad de estudio. El perfil permite observar una discontinuidad lateral en los valores de resistividad, desde su centro hacia la derecha, lo que hace pensar en la existencia de una posible falla asociada a una tectónica post-Cretácica. Posiblemente se trate de una falla de fuerte buzamiento que provoca el desplazamiento de un bloque y su posterior alteración saprolítica diferencial.

Hidrogeológicamente no se presentan unidades interesantes que posean características hidráulicas y dimensiones favorables para el almacenamiento de importantes volúmenes de agua subterránea (Figura 5.1.1.18).

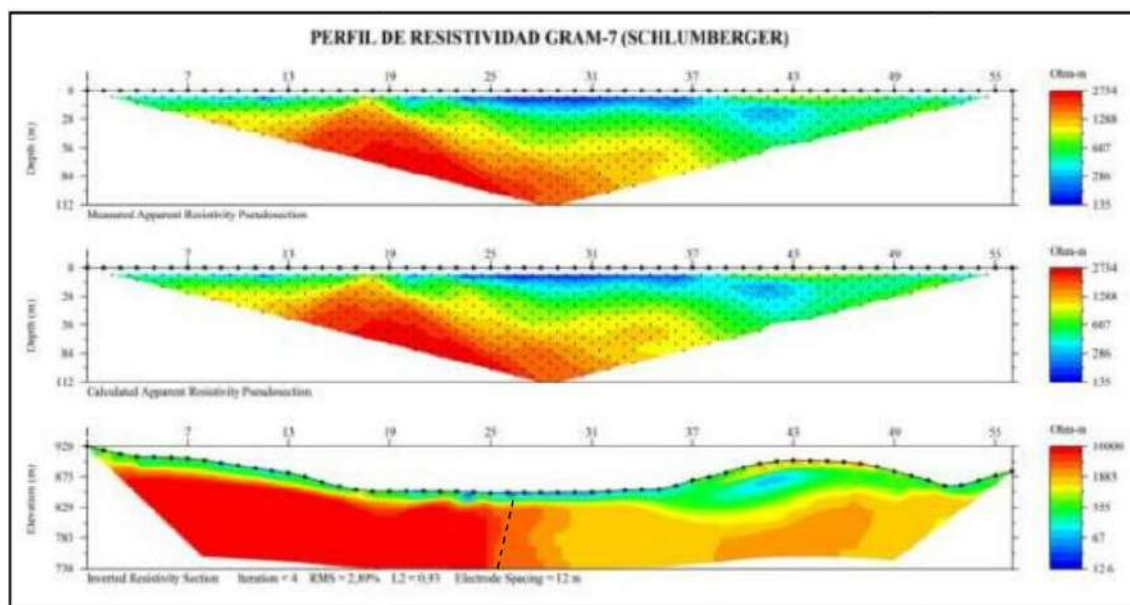


Figura 5.1.1.18 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-7 (G-G')

Fuente: Integral S.A., 2018

viii. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-8 (H-H')

Perfil ubicado en dirección norte-sur, cubriendo una sección de la quebrada Palestina y el carretable a la finca del Iris. La longitud total es de 660 m., con un espaciamiento entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar una profundidad de exploración aproximada de 150,0 m (Figura 5.1.1.19). El modelo geológico – geoelectrico agrupa cuatro (4) unidades basadas en el contraste de las resistividades, en el conocimiento de la geología local y su distribución a lo largo del perfil. Las configuraciones Wenner y Schlumberger arrojaron resultados similares.

La primera unidad corresponde a los materiales aflorantes en las partes superiores del perfil, específicamente entre los electrodos No. 12 al No. 18 y No. 43 al No.56 con resistividades promedio de 2.000 Ohm-m (matices amarillos y rojos). Los pequeños afloramientos presentes en campo corresponden a bloques y cantos de rocas dioríticas caídas y alteradas hasta de tamaños métricos. El espesor de esta unidad no excede los 12,0 m.

La segunda unidad agrupa resistividades desde 32 hasta 180 Ohm-m aproximadamente, las cuales en el perfil están representadas por las gamas azules. Esta unidad aparece restringida hacia las zonas de piedemonte en las quebradas y geológicamente corresponden a sedimentos poco consolidados como arenas y limos que forman la base del lecho de estas y de antiguos paleocauces. El espesor de esta unidad no excede 1,0 m.

La tercera unidad es más continua a lo largo del perfil H-H' y está representada por las tonalidades celestes y verdes. Los valores de resistividades oscilan entre los 180 y los 900 Ohm-m, con espesores muy variables desde los 30,0 m (electrodos No. 32 al No. 35) hasta los 100,0 m. Geológicamente corresponden al Saprolito producto de la alteración del basamento ígneo existente.

La cuarta unidad incumbe a los materiales que aparecen hasta la profundidad de estudio y a lo largo de todo el perfil con resistividades superiores a los 900 Ohm-m, representados por las coloraciones amarillas (Saprolito) y tonalidades rojizas que representan a rocas del Batolito Antioqueño en donde se observa que existen alteraciones diferenciales. Al parecer pueden ocurrir componentes tectónicos locales que provocan las grandes variaciones en espesores de la segunda unidad geológica-geoeléctrica, relacionados a posibles fallamientos, considerando la uniformidad de dicha unidad en varios perfiles interpretados anteriormente.

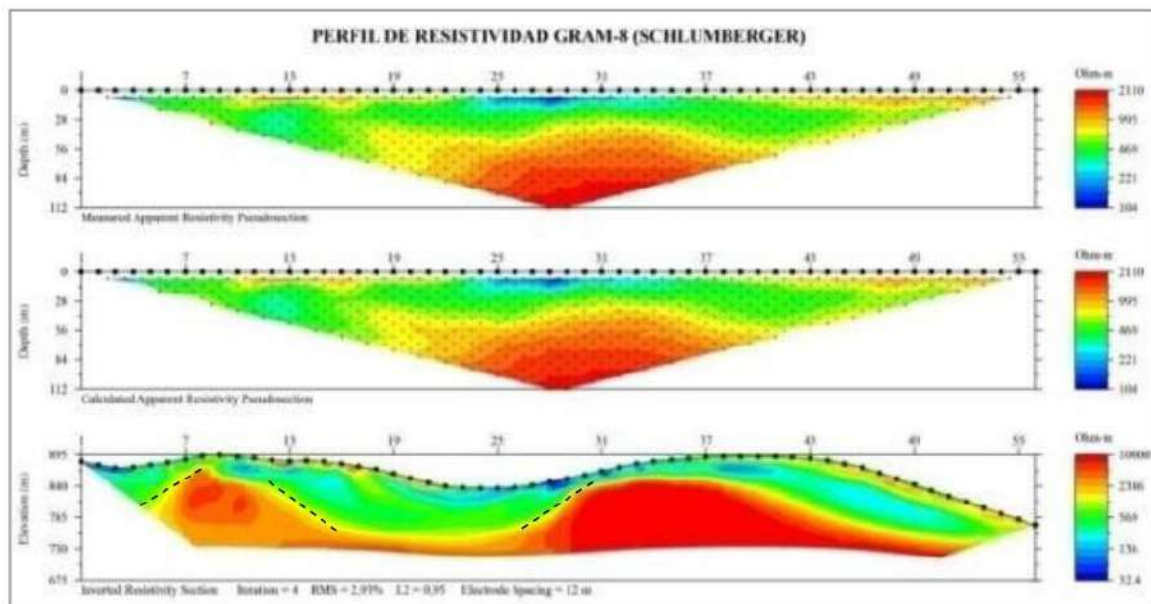


Figura 5.1.1.19 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-8 (H-H')

Fuente: Integral S.A., 2018

ix. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-11 (K-K')

Ubicado sobre una sección de la Quebrada Guacas, al Sur del cerro Gramalote. Se levanta en un sector topográficamente semiplano que supera los 1.000 m s.n.m. (Figura 5.1.1.20). La longitud total de 660 m. El espaciamento entre electrodos se hace cada 12,0 m., logrando alcanzar una máxima profundidad de investigación cercana a los 120,0 m con respecto al nivel de la superficie del terreno. El modelo geológico-geoeléctrico bajo configuración Schlumberger muestra contrastes de resistividades bien marcados que permiten agruparlas en cuatro unidades bien diferenciadas. El RMS es bajo del orden de 2,65% indicando con ello que el tratamiento de los datos tiene un buen grado de confiabilidad.

La primera unidad geológica-geoeléctrica representa los valores de resistividad altos que se encuentran aflorando en la sección derecha del perfil entre los electrodos No. 49 al No. 56, simbolizados por matices rojizos con resistividades de 2.900 Ohm-m hasta 3.500 Ohm-m. Por su ubicación y considerando la presencia de materiales sueltos, esta unidad es correlacionable con bloques y cantos caídos por gravedad embebidos en matriz saprolítica, la cual rellena un flanco de la colina.

Una segunda unidad que exhibe tonalidades celestes y azules (resistividades en el orden de 44 Ohm-m hasta 180 Ohm-m), representa los sedimentos saturados asociados a las terrazas aluviales cuaternarias aflorantes en casi toda la sección. El espesor asociado no sobrepasa los 12,0 m con respecto al nivel circundante.

Una tercera unidad se relaciona con material saprolítico que refleja valores de resistividad entre 180 y 900 Ohm-m (tonos verdes), los cuales subyacen discordantemente a las unidades anteriores. El espesor es variable entre 20,0 m. y 40,0 m.

La cuarta unidad representa tanto el material saprolítico de poco espesor como el basamento constituido por rocas ígneas inalteradas del Batolito Antioqueño. Las resistividades superan los 900 Ohm-m hasta los 4000 Ohm-m y los espesores hasta la profundidad de estudio superan los 80,0 m.

No se observa claramente la existencia de discontinuidades laterales que puedan asociarse a posibles fallamientos tectónicos.

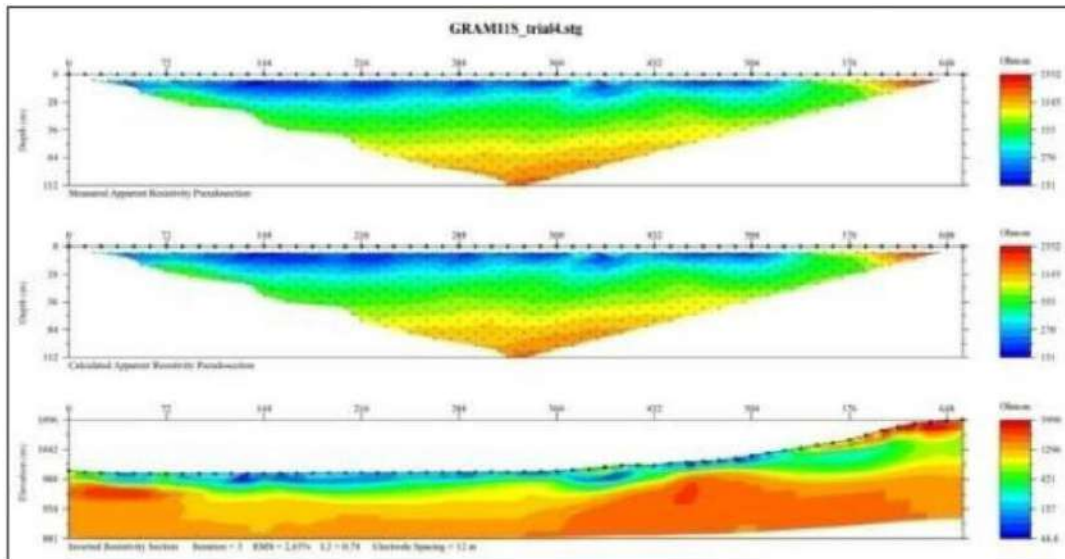


Figura 5.1.1.20 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-11 (K-K')

Fuente: Integral S.A., 2018

x. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-12 (L-L')

Este perfil fue propuesto para investigar el extremo suroccidental del área de influencia de Gramalote, hacia las partes altas de la quebrada Guacas a una altitud superior a los 1.045 m s.n.m. El espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo N18°E. La profundidad máxima de exploración cercana a los 130,0 m, aproximadamente (Figura 5.1.1.21). En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,95%.

La primera unidad geológica-geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos superiores a 4.000 Ohm-m, representados en el perfil por las tonalidades rojizas y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 4 al No. 7 y del No. 49 al No. 53. Sus espesores son variables, pero no

superan los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con bloques de rocas cuarzodioríticas de tamaños métricos embebidos dentro de una matriz saprolítica que han sido trasladados por gravedad, como se puede observar en algunos afloramientos existentes en el sector.

La segunda unidad geológica-geoeléctrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 140 Ohm-m hasta los 500 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde tanto a material saprolítico muy alterado como a depósitos de paleocauces que han sido rellenados por sedimentos areno limosos.

La tercera unidad está representada por el rango de resistividades que va desde los 500 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m (rango de tonalidades verdes), distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores promedios de 40,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie.

La cuarta unidad geológica-geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores. El rango de resistividad supera los 2.000 Ohm-m, representado por las gamas rojizas. Dicha unidad es correlacionable con el Batolito Antioqueño.

A lo largo del perfil L-L' se presentan las unidades expuestas discordante y posiblemente existan fallamientos asociados a la tectónica predominante de la región. Por la litología fina a muy fina predominante en las unidades expuestas, permite colegir que presentan una pobre capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

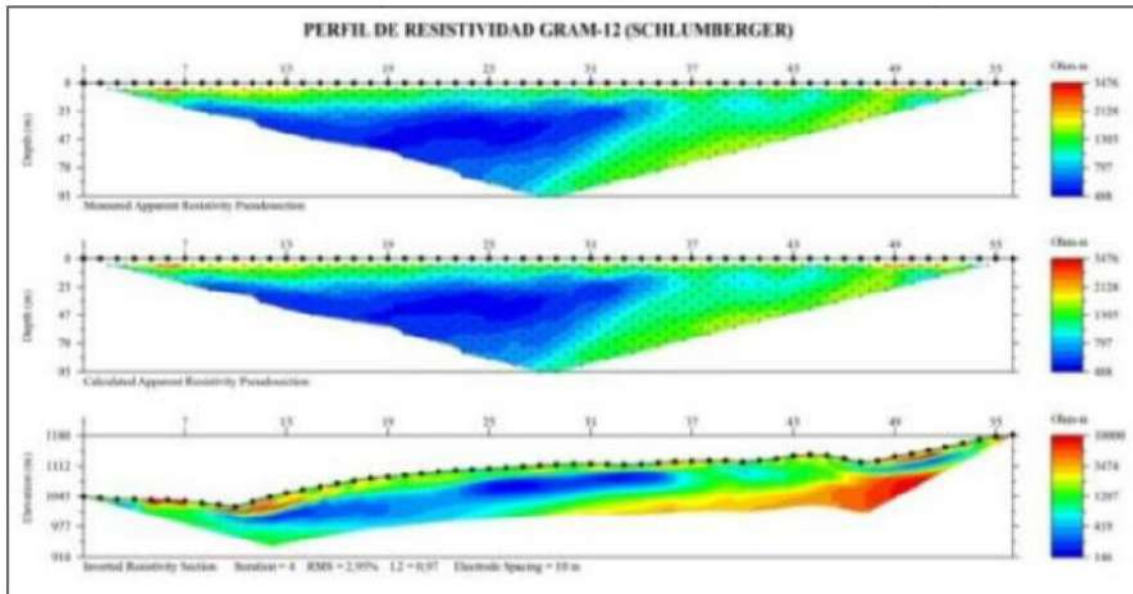


Figura 5.1.1.21 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-12 (L-L')

Fuente: Integral S.A., 2018

xi. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-13 (M-M')

El perfil en general cubre la terraza aluvial del extremo Norte del Río Nus. La profundidad máxima de estudio alcanza los 113,0 m., con respecto al nivel circundante, utilizando un

espaciamiento entre electrodos de 10,0 m bajo configuración Schlumberger. La imagen interpretada Figura permite discriminar las unidades geológico-geoeléctricas por el contraste de resistividades que presentan cada una de estas a lo largo del perfil, que posee un RMS bajo de 2,38% y que asegura que la inversión matemática del modelo sea confiable.

Para corroborar los resultados obtenidos en el perfil PG-2 en el cual se observan variaciones laterales que hacen pensar en posibles fallamientos asociados a una tectónica regional, se localiza el perfil PG-13. Un total de tres (3) unidades geológico-geoeléctricas son reconocidas a lo largo del perfil.

La primera corresponde a sedimentos limo arenosos saturados asociados a las terrazas aluviales formadas a lo largo del Río Nus, con un espesor promedio de 10,0 m, las cuales aparecen a lo largo del perfil desde el electrodo No. 14 hasta el No.19 y del electrodo No. 30 al 56, con resistividades desde 45 Ohm-m hasta 170 Ohm-m, representados por las tonalidades azules.

La segunda unidad aparece relacionada con el material saprolítico producto de la alteración de la roca ígnea del Batolito Antioqueño, y representado en el perfil por las tonalidades desde celestes hasta amarillas, con rango de resistividades entre 170 Ohm-m y 1.100 Ohm-m. Subyace a la unidad anterior, observándose un incremento importante en el espesor a partir del electrodo No. 34, que supera los 70,0 m.

La tercera unidad está representada por las tonalidades naranjas hasta rojizas cuyos valores de resistividad se encuentran por encima de los 1,100 Ohm-m. Aparece cubriendo prácticamente la parte izquierda del perfil desde el electrodo No. 1 hasta el electrodo No. 34 y se encuentra subyaciendo a las unidades anteriormente mencionadas. Los espesores hasta la profundidad de estudio van desde los 100,0 m. (parte izquierda del perfil) hasta los 30,0 m. (parte derecha del perfil). Geológicamente corresponde al basamento ígneo formado en el sector posiblemente con una predominancia de granodioritas y granitos totalmente competentes, especialmente en donde las resistividades superan a los 5.000 Ohm-m, y por material saprolitizado de poco espesor asociadas a las tonalidades naranjas. El contraste lateral en las resistividades que representan la segunda y tercera unidad geológica-geoeléctrica es evidente en la Figura 5.1.1.22, y permite junto con la interpretación del perfil PG-2 asociar la presencia de elementos tectónicos en el sitio. Estas evidencias coinciden con los estudios geológicos superficiales llevados a cabo en el sector que indican la presencia de lineamientos regionales asociados a una tectónica activa post-Cretácica

Hidrológicamente la única unidad que puede considerarse potencialmente acuífera, son los cuerpos aluviales, que, aunque presenta poco espesor, presentan una granulometría y comportamiento apropiado para la acumulación y transmisividad de agua. Las unidades geológicas dos y tres, no se consideran unidades potencialmente acuíferas dado que correspondiente a los materiales saprolíticos, por su fina granulometría, presentan condiciones muy pobres de almacenamiento de aguas subterráneas.

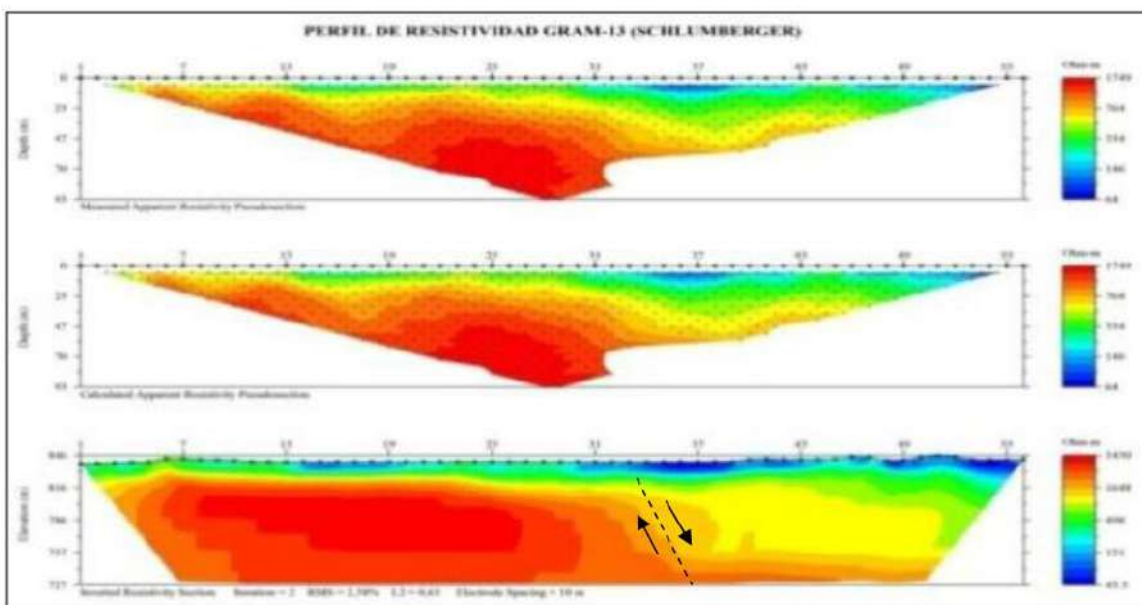


Figura 5.1.1.22 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-13 (M-M')

Fuente: Integral S.A., 2018

xii. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-14 (N-N')

Perfil ubicado en el sector denominado “El Banco” al Occidente de las instalaciones del campamento del proyecto Gramalote. Se levanta sobre potreros en donde no se observan afloramientos de roca. En general la cobertura corresponde a material saprolítico conformado por arena arcillosa seca de color, a una altitud cercana a los 850 m s.n.m. El espaciamento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo casi norte - sur. La profundidad máxima de exploración es cercana a los 110,0 m., aproximadamente (Figura 5.1.1.23). En el modelo geológico-geoelectrico interpretado en comando Dipolo-Dipolo se diferencian principalmente cuatro unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 3,59%.

La primera unidad geológica-geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales muy superficiales que presentan rangos entre 1.550 y 2.350 Ohm-m, representados en el perfil por la tonalidades rojizas y amarillentas que afloran entre los intervalos de electrodos No.16 al No.55. Hacia el lado occidental del perfil, entre los electrodos No.1 al No.15 representada por la gama azul, refleja valores de resistividad de 150 Ohm-m. Sus espesores son variables, pero no superan los 10,0 m. La correlación geológica para esta unidad se asocia con fragmentos de rocas ígneas de poco diámetro embebidos dentro de una matriz saprolítica.

La segunda unidad geológica-geoelectrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m.). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 112 Ohm-m hasta los 350 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde a material saprolítico muy alterado como a depósitos de paleocauces que han sido rellenados por sedimentos areno limosos.

La tercera unidad está representada por el rango de resistividades que va desde los 400 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m (rango de tonalidades verdes y amarillas), distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores promedios de 25,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie, especialmente hacia el lado izquierdo del perfil.

La cuarta unidad geológica-geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores. El rango de resistividad oscila desde los 4.000 hasta los 7.500 Ohm-m, representado por las gammas rojizas. Dicha unidad es correlacionable con el Batolito Antioqueño. A lo largo del perfil N-N' se presentan las unidades expuestas discordantemente. La morfología corresponde a relieves de colinas donde no se evidencian estructuras tectónicas. Por la litología fina a media predominante en las unidades expuestas, permite colegir que presentan una moderada capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

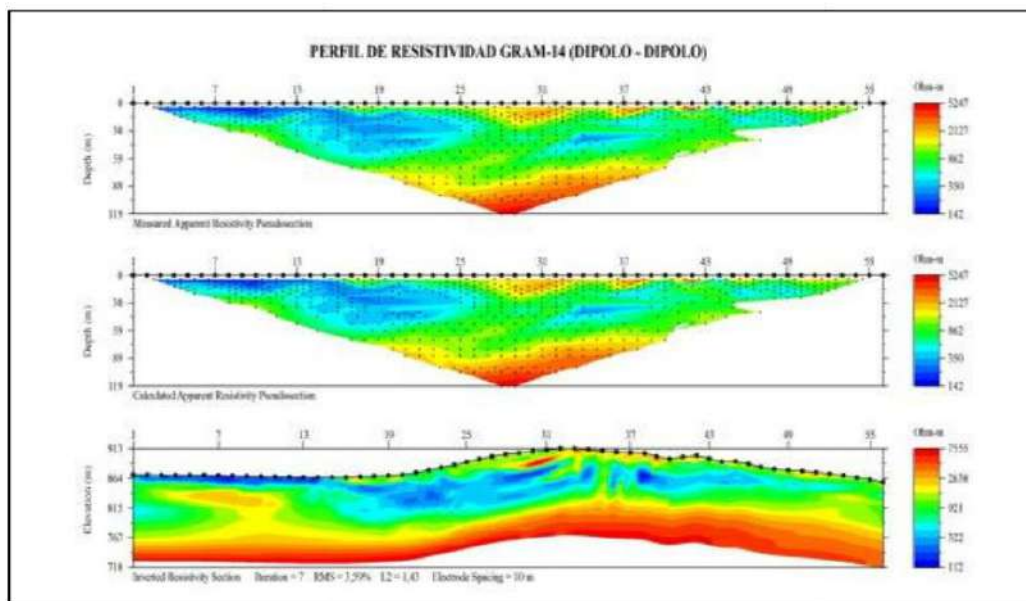


Figura 5.1.1.23 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-14 (N-N')

Fuente: Integral S.A., 2018

xiii. Interpretación del perfil geoelectrica continua PG-15 (O-O')

Está ubicado hacia el sector denominado “Manizales” sobre potreros de pendiente pronunciada en donde no se observan afloramientos de roca. En general corresponden a material saprolítico compuesto por limos arcillosos de color marrón claro. A partir del electrodo No. 47 se aprecian cárcavas de meteorización, reflejadas por matices azules que presentan valores de resistividad bajos, del orden de 65 Ohm-m. El mencionado perfil Figura 5.1.1.24 se dispuso con un rumbo de N 26°E y tiene una longitud de 550 m., logrando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m., para alcanzar una profundidad aproximada a los 110,0 m en las partes topográficamente más altas.

La corrida se realiza bajo el comando Wenner. En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente dos unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del orden de 2,73%.

Se puede observar que en la parte superior de la Figura 5.26 aflora una unidad geoeléctrica caracterizada por resistividades que van desde 480 hasta los 820 Ohm-m, representada por las tonalidades amarillentas y verdes con espesores aproximados a los 30,0 m. Esta unidad geoeléctrica es correlacionable con una secuencia geológica dominada por material saprolitizado, cuyo protolito ígneo corresponde a la unidad geoeléctrica más inferior

La unidad geoeléctrica inferior está representada por la variación de las tonalidades amarillas hasta las rojas con resistividades entre los 850 Ohm-m y los 3.500 Ohm-m, la cual no aflora, presentando una discontinuidad lateral a partir del electrodo No.37 que puede corresponder zona de fracturamiento de dirección N60°E. Dicha unidad geoeléctrica se correlaciona con el basamento ígneo, constituido por tonalitas, y cuarzodioritas poco y no meteorizados.

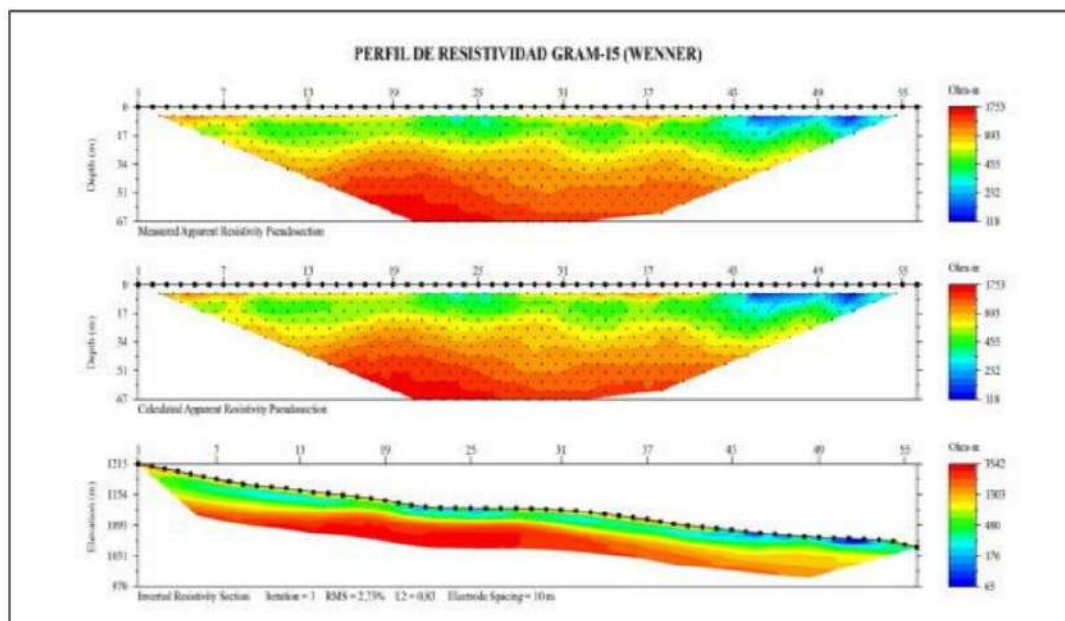


Figura 5.1.1.24 Imagen de resistividad generada del perfil geoeléctrico PG-15 (O-O')

Fuente: Integral S.A., 2018

xiv. Interpretación del perfil geoeléctrica continua PG-17 (Q-Q')

Este perfil se levanta en el sector de la pequeña central Hidroeléctrica, cruzando la Quebrada Guacas hacia el cerro Gramalote. En general se observa hacia la izquierda del perfil las terrazas aluviales y hacia la derecha la cobertura de roca saprolitizada, poco consolidada, con una altitud promedio de 910 m s.n.m. Se utilizó el arreglo de Wenner con un espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total de 550 m lineales con rumbo N80°E (Figura 5.1.1.25).

En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,95%.

La primera unidad geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos de resistividad entre 44 y 170 Ohm-m representados en el perfil por los tonos azul y celeste y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 6 y del No. 20 al No.48. Sus espesores son variables, pero se estima que no exceden los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con material saprolítico de granulometría fina. Entre los electrodos 7 y 19 que corresponde al cruce de la Quebrada Guacas, la resistividad aumenta al rango de 500 Ohm-m, equivalente a sedimentos de arenas y grava de la terraza aluvial, representada por la gama verde claro.

La segunda unidad que infrayace a la anterior, se caracteriza por ocurrir a lo largo de todo el perfil, alcanzando a aflorar entre los electrodos No.49 al No.55, representado por el tono verde que corresponde al material saprolítico más arenoso, reflejando valores de resistividad alrededor de los 650 Ohm-m. El espesor promedio no supera los 20,0 m.

La tercera unidad geológica-geoelectrica se encuentra representada por el rango de resistividades que va desde los 1.900 hasta los 2.580 Ohm-m, representado por las tonalidades amarilla y café-amarillentas, distribuida hacia los bordes del perfil con espesores mayores de 50,0 m. Geológicamente corresponde a la roca ígnea que va alterando su textura conforme alcanza la superficie del terreno.

La cuarta unidad geoelectrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho. El rango de resistividad se encuentra entre los 2.600 y los 10.000 Ohm-m y simbolizado por las tonalidades rojizas.

Dicha unidad es correlacionable con rocas frescas del Batolito Antioqueño. En esta roca posiblemente exista una estructura de falla hacia el sector del electrodo No.37, la cual puede estar asociada al tren de fallas que existe entre las quebradas Guacas y La Colorada.

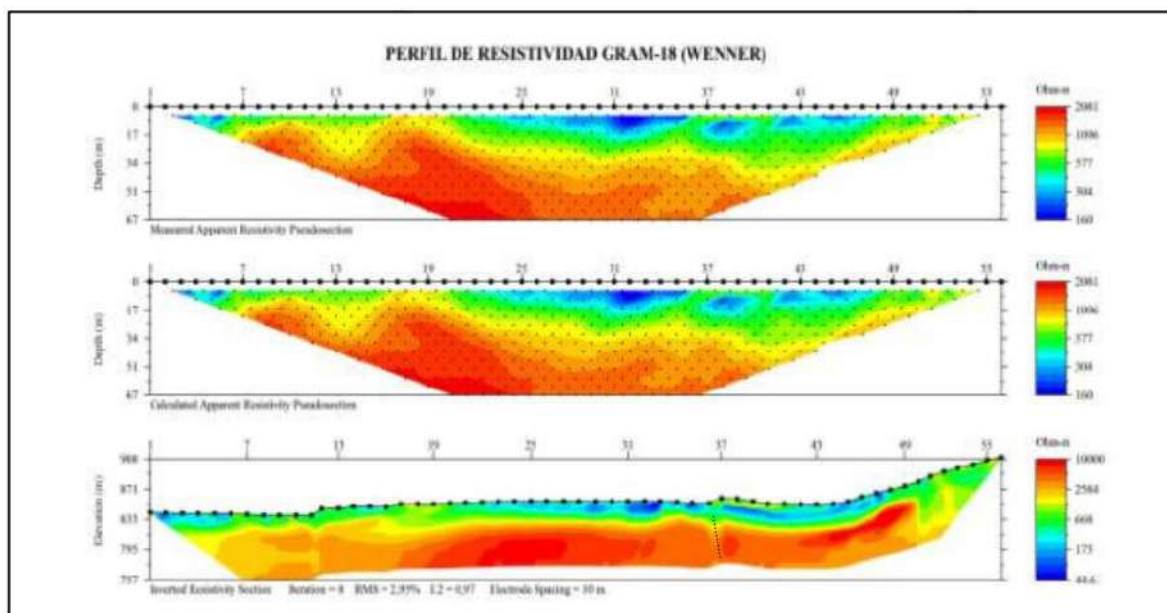
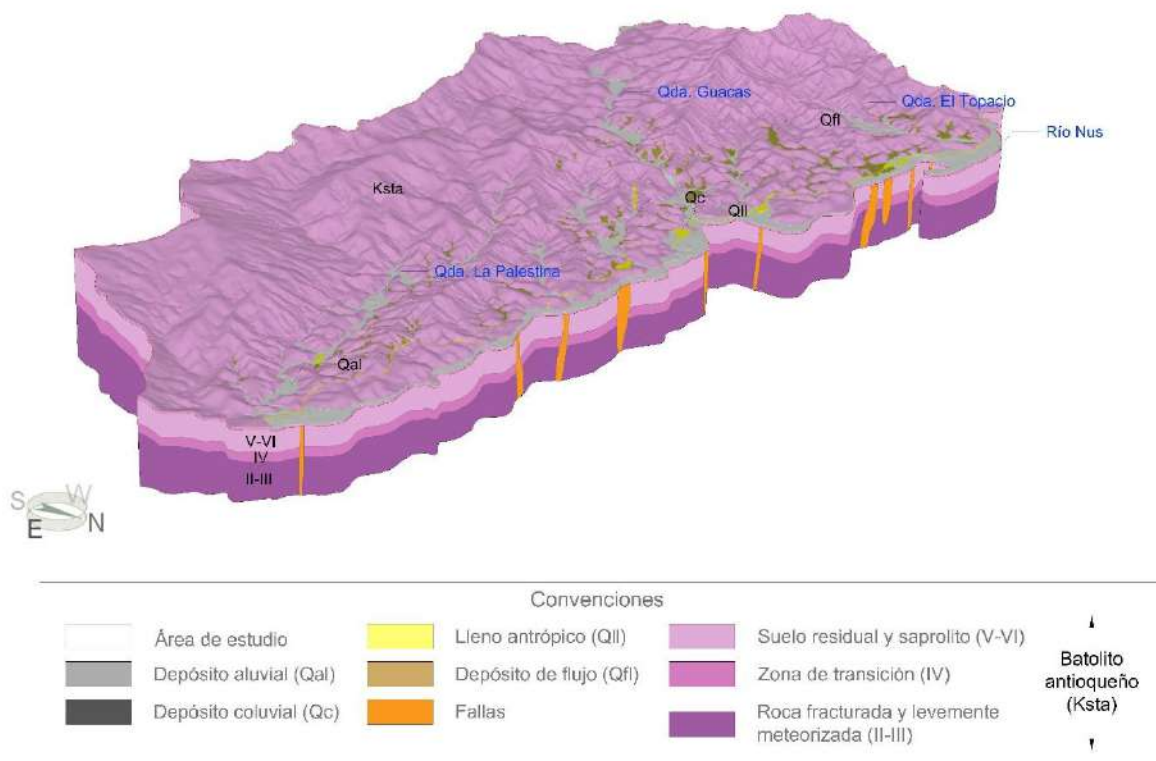


Figura 5.1.1.25 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-17 (Q-Q')

Fuente: Integral S.A., 2018

A partir de la información geofísica, y en correlación con los sondeos directos, en la [Figura 5.1.1.26](#) se presenta el bloque diagrama geológico, integrando ambos conjuntos de datos.



Fuente: GCL, 2026

La firma Ingeniería, Tecnología e Instrumentación S.A. (INTEINSA) fue contratada para la realización de ensayos geofísicos de Refracción Sísmica en el proyecto Desvío de la quebrada Guacas ubicado en el Municipio de San Roque (Antioquia) en el año 2013. La Tabla 5.1.1.5 muestra la ubicación de los ensayos de refracción sísmica del estudio y la Figura 5.1.1.27 su localización en planta.

Tabla 5.1.1.5 Ubicación de Líneas de refracción sísmica ejecutadas por INTEINSA, 2013

Línea	Coordenadas finales				Longitud (m)
	Punto Inicial		Punto final		
	Este	Norte	Este	Norte	
GG-LP-01	2.277.097,95	4.787.793,96	2.277.042,21	4.787.726,73	100
GG-LP-02	2.277.137,99	4.787.786,12	2.277.127,35	4.787.694,06	100
GG-LT-01	2.277.181,65	4.787.621,26	2.277.220,94	4.787.548,41	100
GG-LT-02	2.277.283,86	4.787.570,66	2.277.182,67	4.787.614,27	118

Línea	Coordenadas finales				Longitud (m)
	Punto Inicial		Punto final		
	Este	Norte	Este	Norte	
GG-LC-01	2.277.759,03	4.787.547,54	2.277.817,38	4.787.463,75	100
GG-LC-02	2.277.910,64	4.787.400,11	2.277.826,79	4.787.358,77	100
GG-LC-03	2.278.167,56	4.787.432,13	2.278.103,87	4.787.350,87	100
GG-LC-04	2.278.309,57	4.787.688,74	2.278.364,24	4.787.773,97	100
GG-LC-05	2.278.532,34	4.788.006,67	2.278.596,13	4.788.061,94	100
GG-LC-06	2.278.713,33	4.788.270,43	2.278.674,95	4.788.363,30	65

Fuente: Modificado de (INTEINSA, 2020)

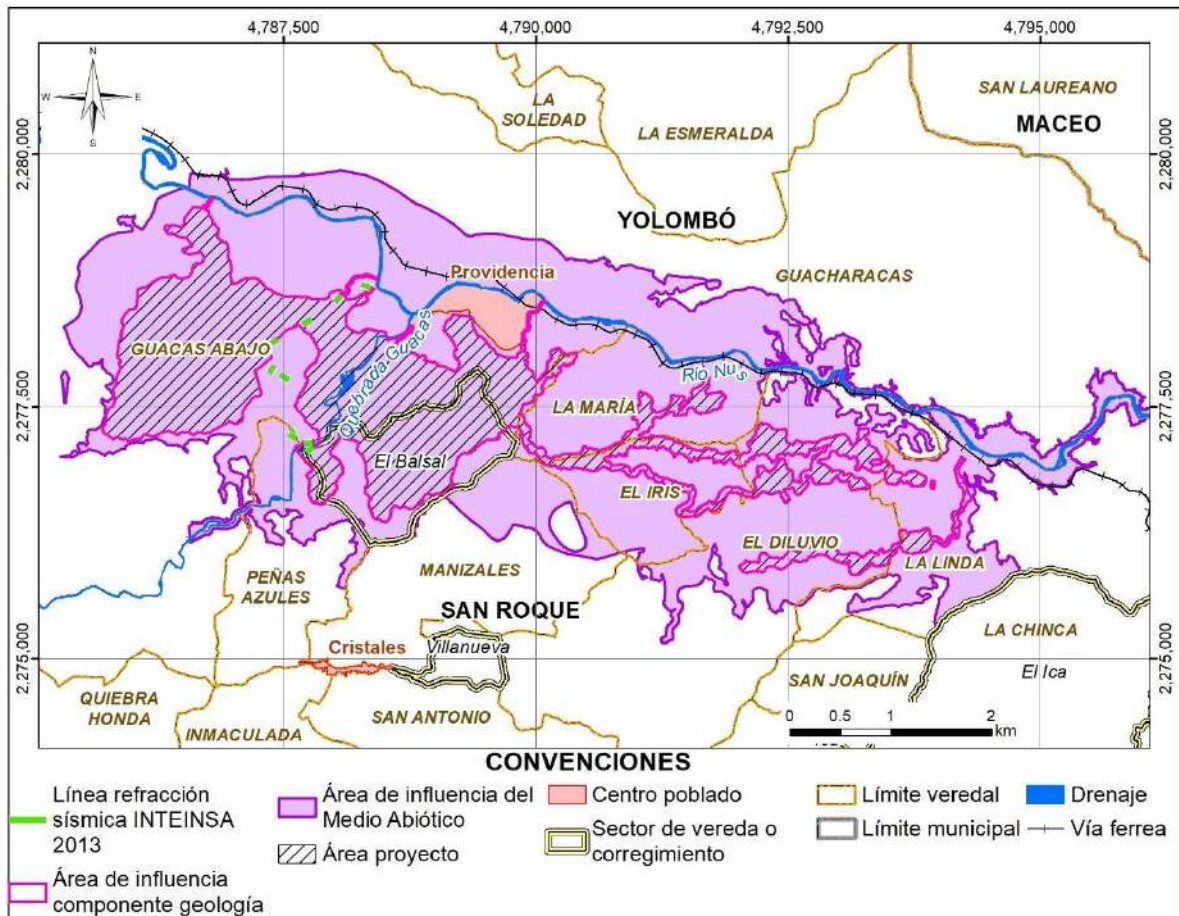


Figura 5.1.1.27 Localización en planta de ensayos de refracción sísmica INTEINSA 2013

Fuente: (INTEINSA, 2013)

I. Línea GG-LP-01

La Figura 5.1.1.28 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LP-01. Los resultados permiten inferir tres estratos principales

en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 374 m/s, y con un espesor variable entre 1 m y 6 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas P de 587 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1340 m/s.

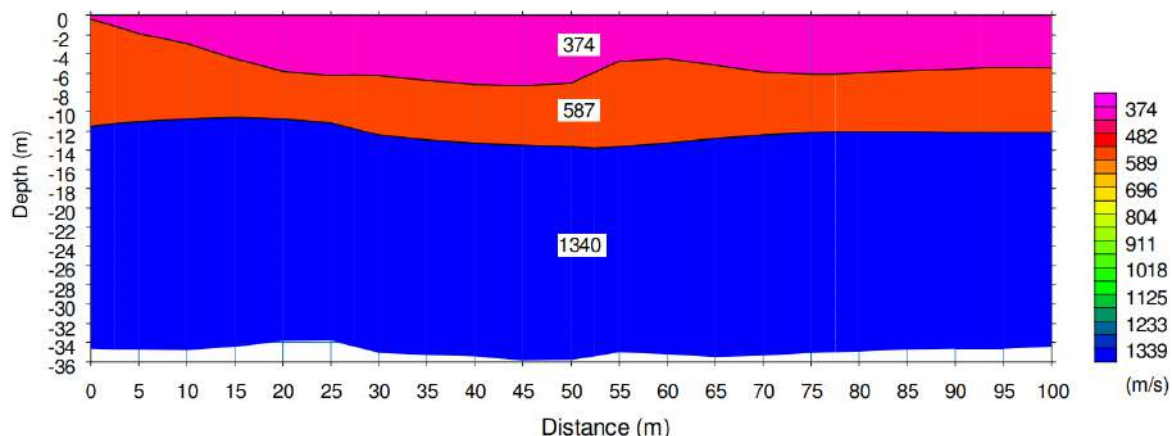


Figura 5.1.1.28 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LP-01

Fuente: (INTEINSA, 2013)

II. Línea GG-LP-02

La Figura 5.1.1.29 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LP-02. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 401 m/s, y con un espesor variable entre 5 m y 10 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas P de 752 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1182 m/s.

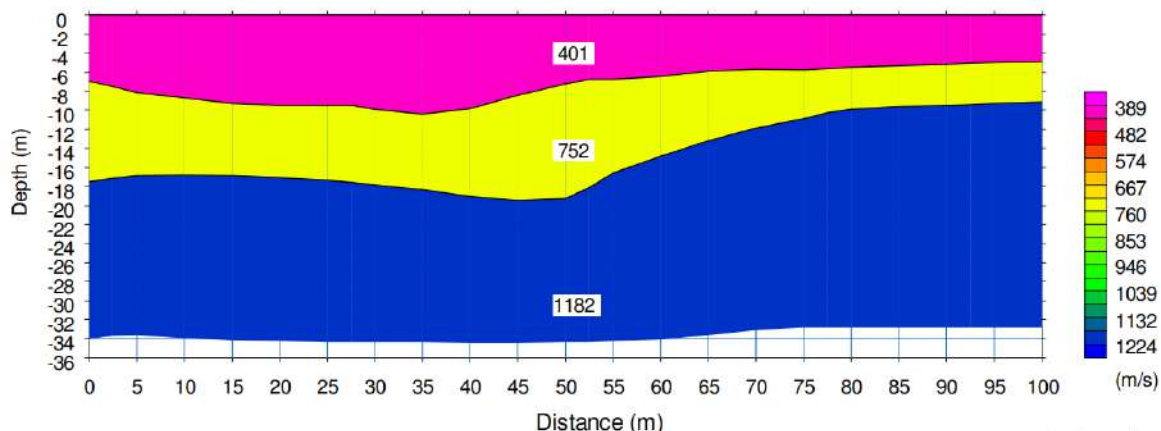


Figura 5.1.1.29 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LP-02

Fuente: (INTEINSA, 2013)

III. Línea GG-LT-01

La Figura 5.1.1.30 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LT-01. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 407 m/s, y con un espesor variable entre 1 m y 6 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas P de 412 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 740 m/s.

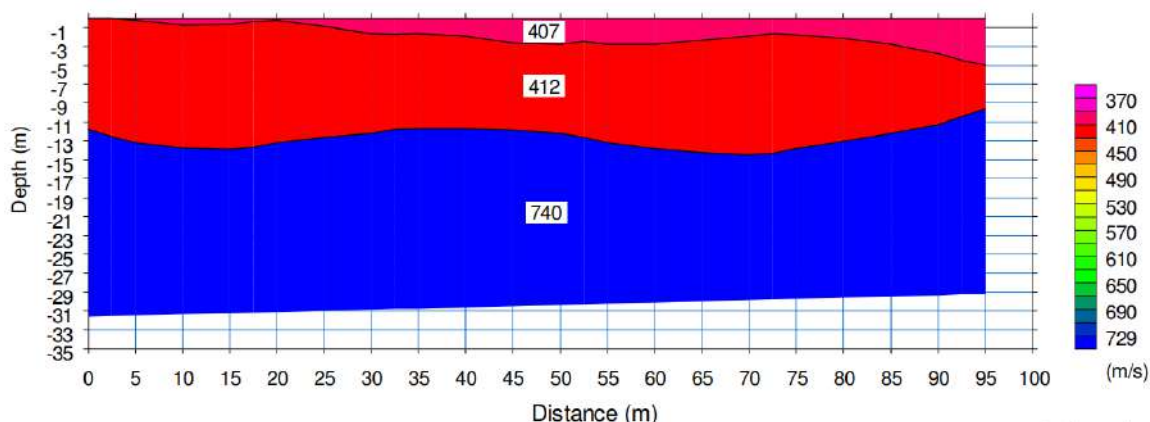


Figura 5.1.1.30 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LT-01

Fuente: (INTEINSA, 2013)

IV. Línea GG-LT-02

La Figura 5.1.1.31 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LT-02. Los resultados permiten inferir dos estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 357 m/s, y con un espesor variable entre 18 m y 26 m y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1251 m/s.

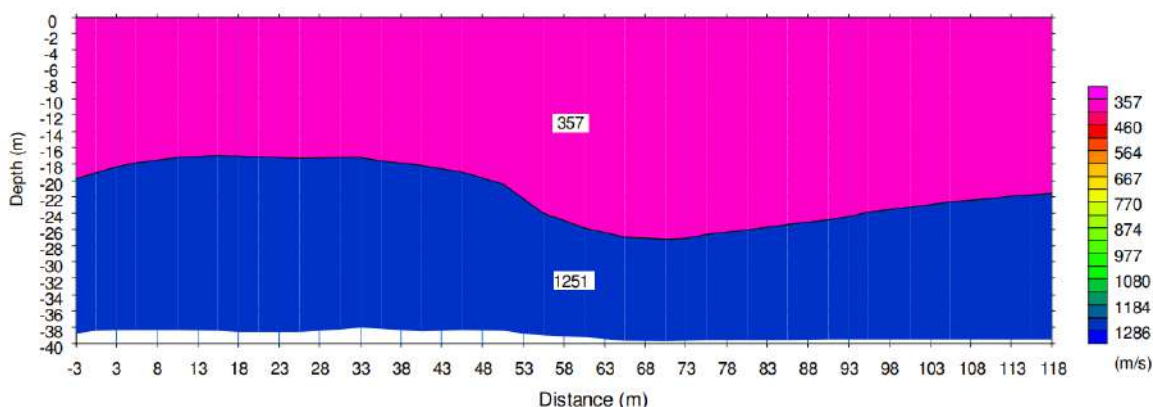


Figura 5.1.1.31 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LT-02

Fuente: (INTEINSA, 2013)

V. Línea GG-LC-01

La Figura 5.1.1.32 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LC-01. Los resultados permiten inferir dos estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 375 m/s, y con un espesor variable entre 12 m y 18 m y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1010 m/s.

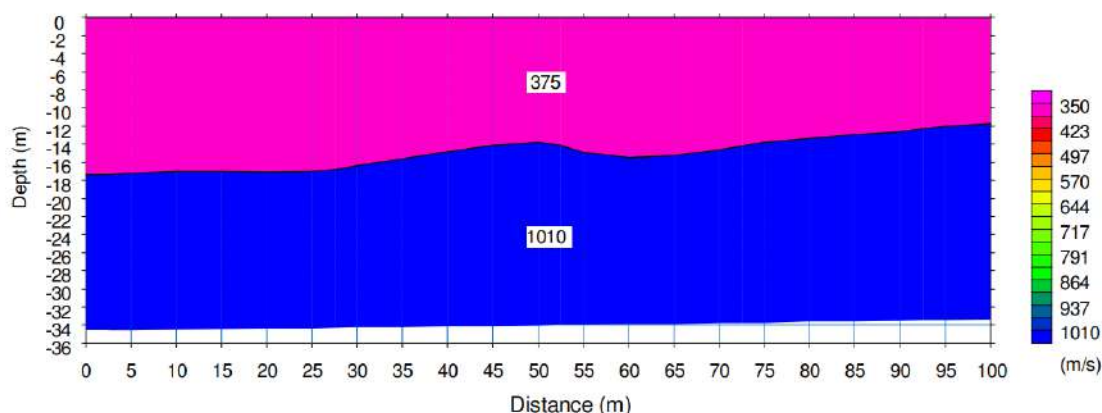


Figura 5.1.1.32 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-01

Fuente: (INTEINSA, 2013)

VI. Línea GG-LC-02

La Figura 18 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LC-02. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 481 m/s, y con un espesor variable entre 1 m y 6 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas P de 513 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1128 m/s.

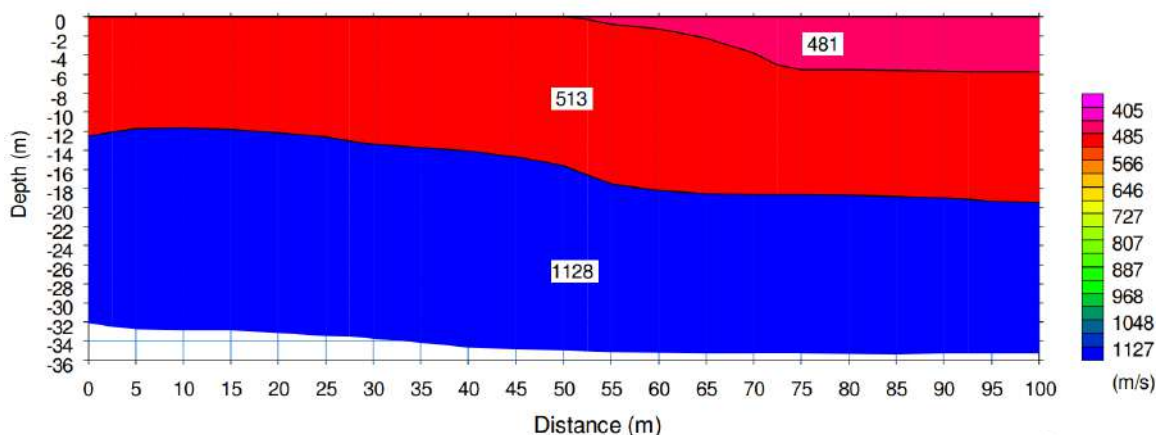


Figura 5.1.1.33 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-02

Fuente: (INTEINSA, 2013)

VII. Línea GG-LC-03

La Figura 5.1.1.34 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LC-03. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 339 m/s, y con un espesor variable entre 1 m y 4 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas P de 453 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1025 m/s.

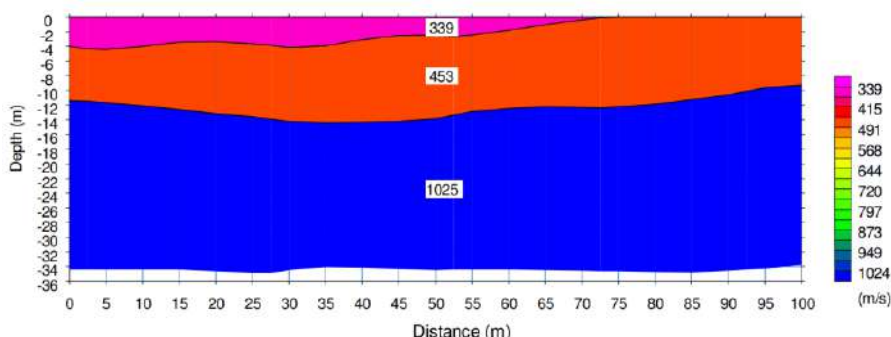


Figura 5.1.1.34 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-03

Fuente: (INTEINSA, 2013)

VIII. Línea GG-LC-04

La Figura 5.1.1.35 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LC-04. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 434 m/s, y con un espesor variable entre 2 m y 4 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1468 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 2515 m/s.

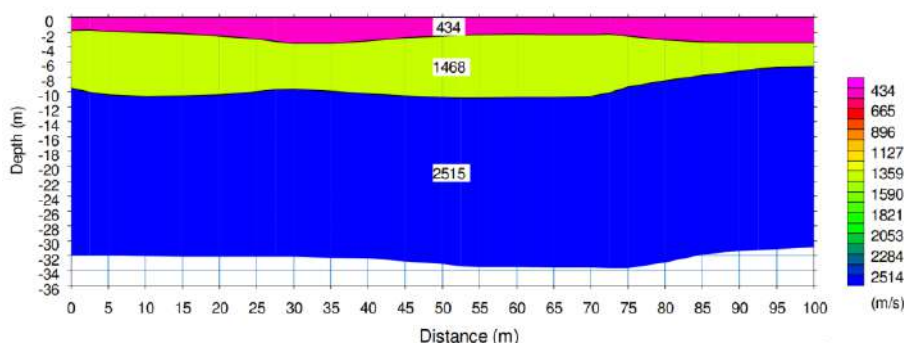


Figura 5.1.1.35 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-04

Fuente: (INTEINSA, 2013)

IX. Línea GG-LC-05

La Figura 5.1.1.36 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea GG-LC-05. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas P de 279 m/s, y con un espesor variable entre 4 m y 7 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas P de 799 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 1575 m/s.

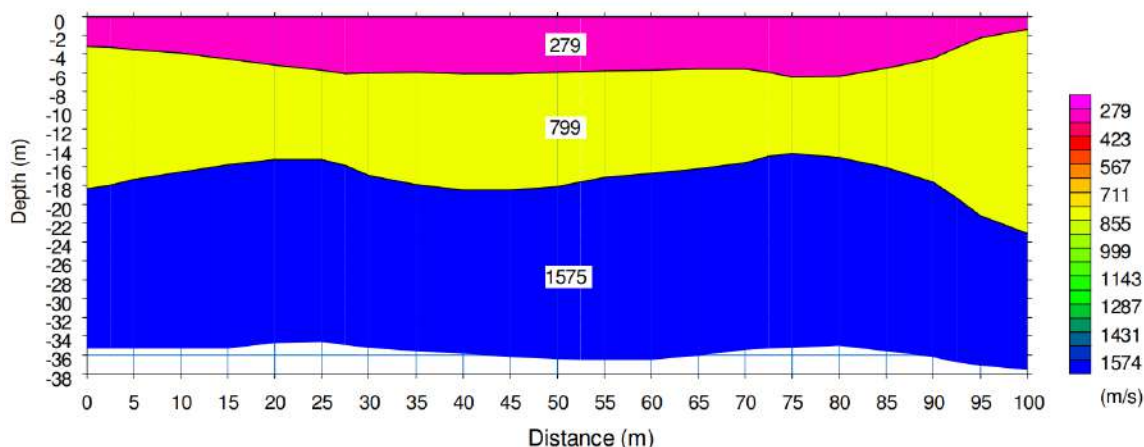


Figura 5.1.1.36 Distribución de velocidad de propagación de las ondas P en la línea GG- LC-05

Fuente: (INTEINSA, 2013)

X. Línea GG-LC-06

La Figura 5.1.1.37 presenta la Tomografía Suavizada de onda de corte (S) de la línea GG-LC-05. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona: Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas S de 192 m/s, y con un espesor variable entre 3,9 m y 9,5 m, una capa intermedia con velocidad promedio de propagación de ondas s de 416 m/s y una capa profunda con velocidad promedio de propagación de ondas P de 790 m/s.

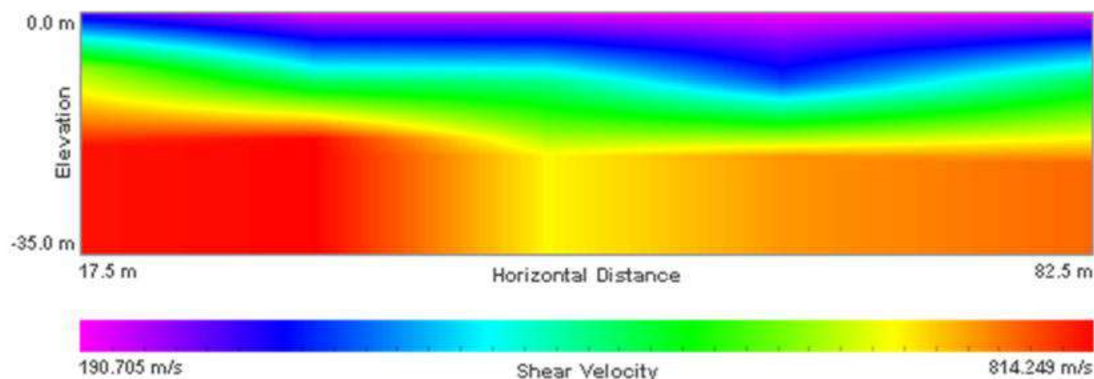


Figura 5.1.1.37 Tomografía Suavizada de onda de corte (S) Línea GG-LC-06

Fuente: (INTEINSA, 2013)

e. Ensayos de refracción sísmica y MASW INTEINSA, 2020

Ingeniería, Tecnología e Instrumentación S.A. (INTEINSA) fue contratada para realizar estudios geofísicos de refracción sísmica y MASW en el Proyecto Gramalote ubicado en el municipio de San Roque (Antioquia) en el año 2020. En la Tabla 5.1.1.6 se detalla la ubicación de los ensayos y la Figura 5.1.1.38 su localización en planta.

Tabla 5.1.1.6 Líneas de refracción sísmica de la campaña de 2020 de INTEINSA

Línea	Punto inicial		Punto final		Longitud (m)
	Este	Norte	Este	Norte	
SRG20-001	4.789.852,13	2.276.805,77	4.789.749,15	2.276.815,17	100
SRG20-002	4.790.246,81	2.277.972,38	4.790.185,46	2.277.887,61	105
SRG20-003	4.794.033,44	2.276.227,16	4.793.930,57	2.276.264,57	110
SRG20-004	4.787.492,99	2.276.864,10	4.787.489,32	2.276.949,13	85
SRG20-005	4.785.404,69	2.279.908,90	4.785.296,60	2.279.890,32	110
SRG20-006	4.787.348,62	2.278.293,91	4.787.238,61	2.278.296,35	100
SRG20-007	4.792.613,71	2.277.103,89	4.792.713,75	2.277.108,49	100
SRG20-008	4.791.419,96	2.277.460,66	4.791.445,46	2.277.335,54	100
SRG20-009	4.791.465,77	2.277.411,47	4.791.371,68	2.277.391,84	95
SRG20-010	4.791.475,68	2.277.388,43	4.791.377,59	2.277.368,82	95
SRG20-011	4.791.605,13	2.276.738,83	4.791.507,03	2.276.718,21	100
SRG20-012	4.791.557,95	2.276.695,01	4.791.557,95	2.276.695,01	300
SRG20-013	4.791.590,43	2.276.816,90	4.791.492,34	2.276.796,28	100
SRG20-014	4.791.563,80	2.276.911,01	4.791.465,71	2.276.891,40	100
SRG20-015	4.791.551,03	2.276.970,07	4.791.452,94	2.276.950,46	100
SRG20-016	4.793.779,53	2.276.764,23	4.793.943,19	2.276.672,57	190
SRG20-017	4.793.935,63	2.276.785,62	4.793.930,63	2.276.785,64	95
SRG20-018	4.794.054,18	2.276.921,17	4.794.162,11	2.276.899,74	65
SRG20-019	4.794.149,35	2.276.958,80	4.794.127,99	2.276.870,87	50
SRG20-021	4.794.232,57	2.276.759,44	4.794.226,97	2.276.860,48	100
SRG20-022	4.785.540,13	2.280.013,38	4.785.339,10	2.280.015,18	200
SRG20-023	4.785.386,81	2.279.938,97	4.785.390,38	2.280.082,99	100
SRG20-025	4.786.750,67	2.279.341,46	4.786.535,64	2.279.341,31	220
SRG20-026	4.786.607,84	2.279.390,03	4.786.605,46	2.279.294,03	95
SRG20-028	4.787.273,82	2.278.095,17	4.787.355,49	2.278.007,84	100
SRG20-029	4.787.353,80	2.278.085,86	4.787.281,51	2.278.015,13	100
SRG20-030	4.787.322,12	2.277.914,95	4.787.336,51	2.278.012,91	95
SRG20-033	4.791.501,48	2.277.590,36	4.791.543,97	2.277.712,21	110
SRG20-034	4.791.544,70	2.277.645,20	4.791.396,81	2.277.677,79	115
SRG20-035	4.789.747,78	2.277.984,36	4.789.939,72	2.277.961,60	195

Línea	Punto inicial		Punto final		Longitud (m)
	Este	Norte	Este	Norte	
SRG20-037	4.789.852,47	2.277.902,93	4.789.867,88	2.278.004,89	115
SRG20-039	4.787.531,86	2.278.850,28	4.787.131,54	2.278.786,85	440
SRG20-040	4.787.432,14	2.278.420,60	4.787.139,23	2.278.455,77	320
SRG20-041	4.787.288,00	2.278.392,17	4.787.158,84	2.278.862,76	520
SRG20-042	4.787.374,26	2.278.957,92	4.787.477,05	2.278.650,46	310
SRG20-043	4.786.183,13	2.279.481,73	4.786.290,07	2.279.462,31	105
SRG20-044	4.787.655,14	2.278.917,80	4.787.739,95	2.278.865,46	100

Fuente: Modificado de (INTEINSA, 2020)

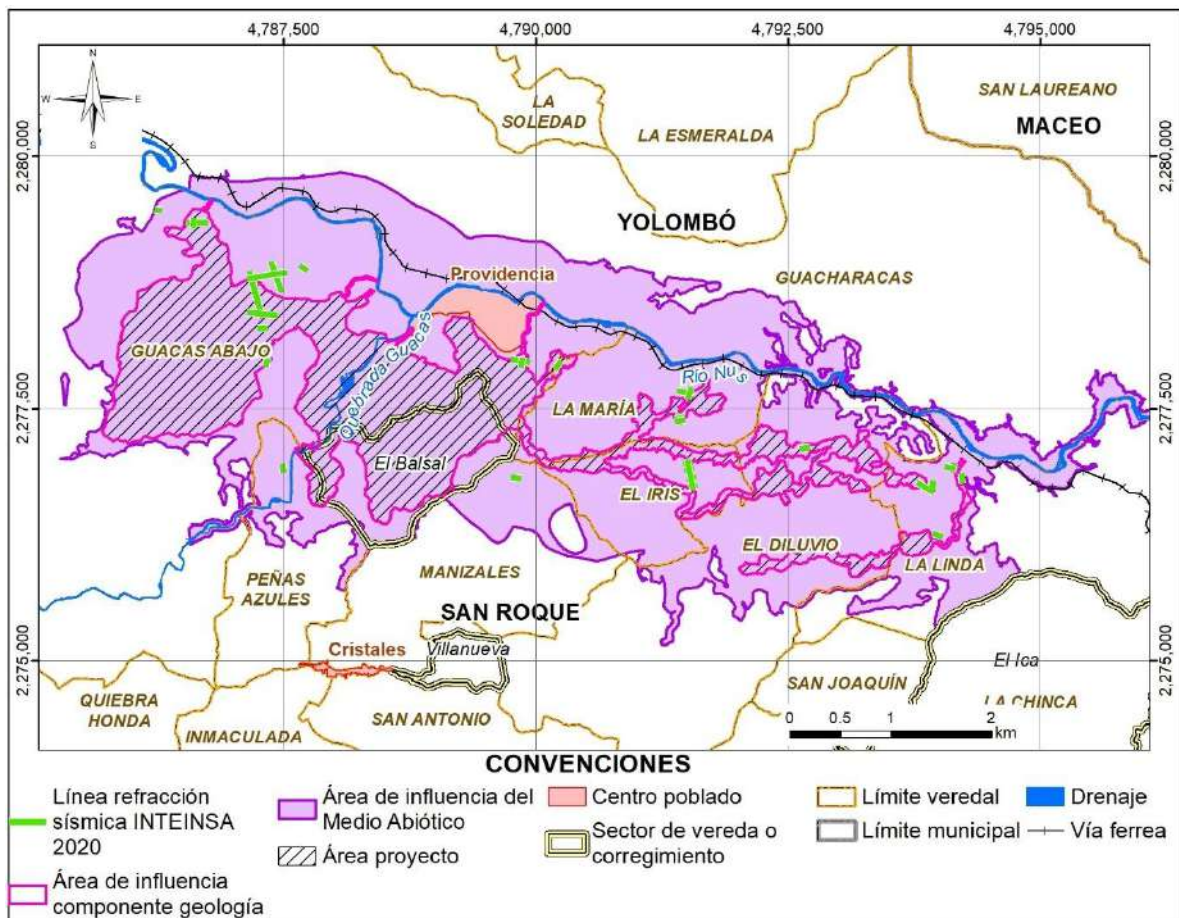


Figura 5.1.1.38 Localización en planta de ensayos de refracción sísmica INTEINSA 2020

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XI. Línea SRG20-001

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.39 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-001. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 530 m/s y un espesor variable entre 0 m y 10 m; una segunda capa con una velocidad promedio de onda P de 780 m/s; una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 1670 m/s; y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 2560 m/s.

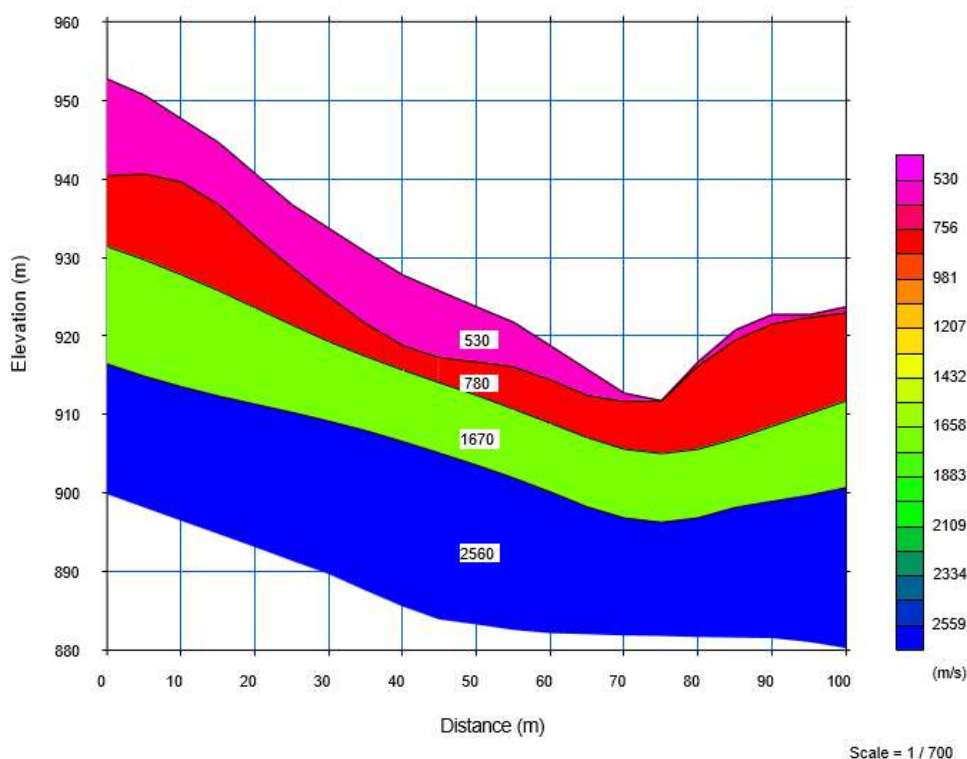


Figura 5.1.1.39 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-001

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.40 presenta el perfil 2D para el levantamiento MASW con exploración de 30 m de profundidad según la recopilación de datos de campo y más de 120 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

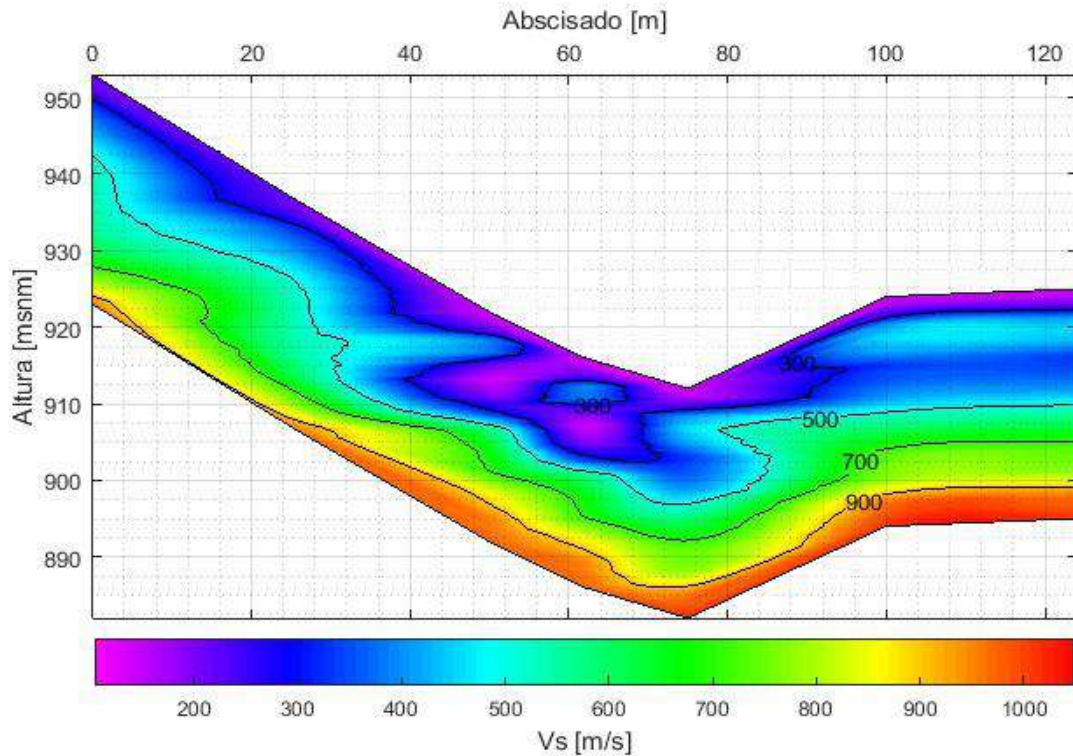


Figura 5.1.1.40 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-001
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XII. Línea SRG20-002

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.41 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-002. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 525 m/s y un espesor variable entre 1 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad promedio de onda P de 930 m/s, una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 1790 m/s y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 2770 m/s.

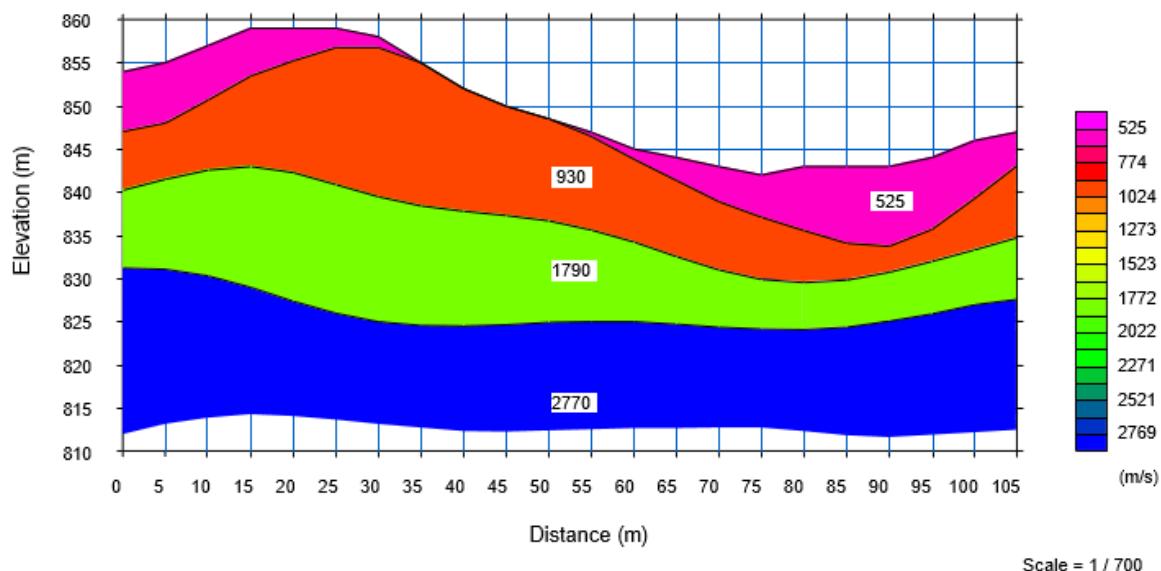


Figura 5.1.1.41 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-002
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.42 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

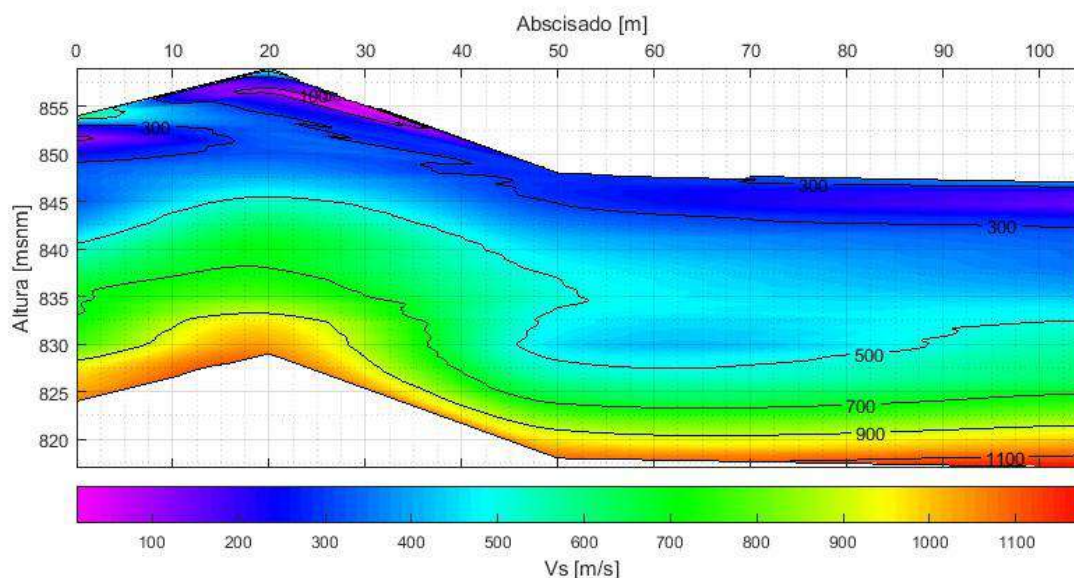


Figura 5.1.1.42 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-002
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XIII. Línea SRG20-003

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.43 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-003. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 580 m/s y un espesor variable entre 1 m y 2 m, una segunda capa con una velocidad promedio de onda P de 790 m/s, una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 1890 m/s y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 3220 m/s.

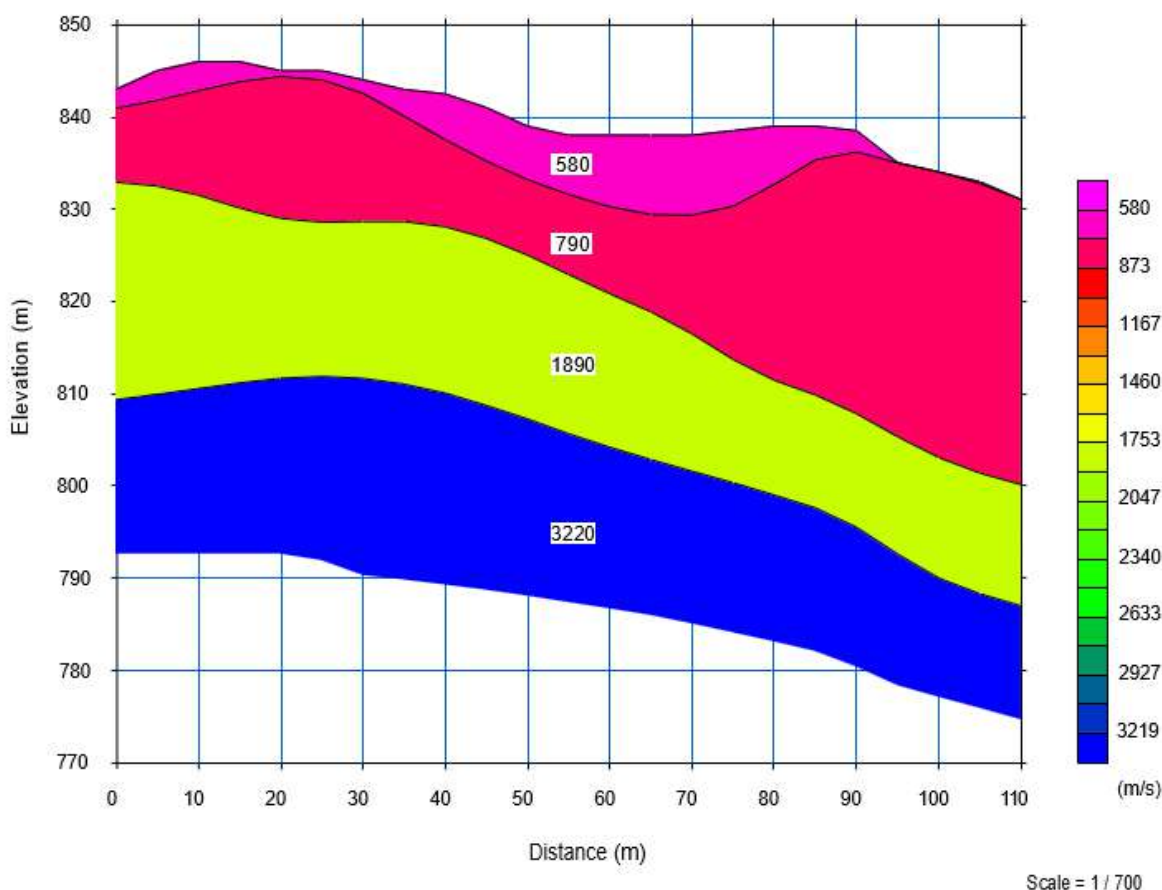


Figura 5.1.1.43 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-003

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.44 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 110 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

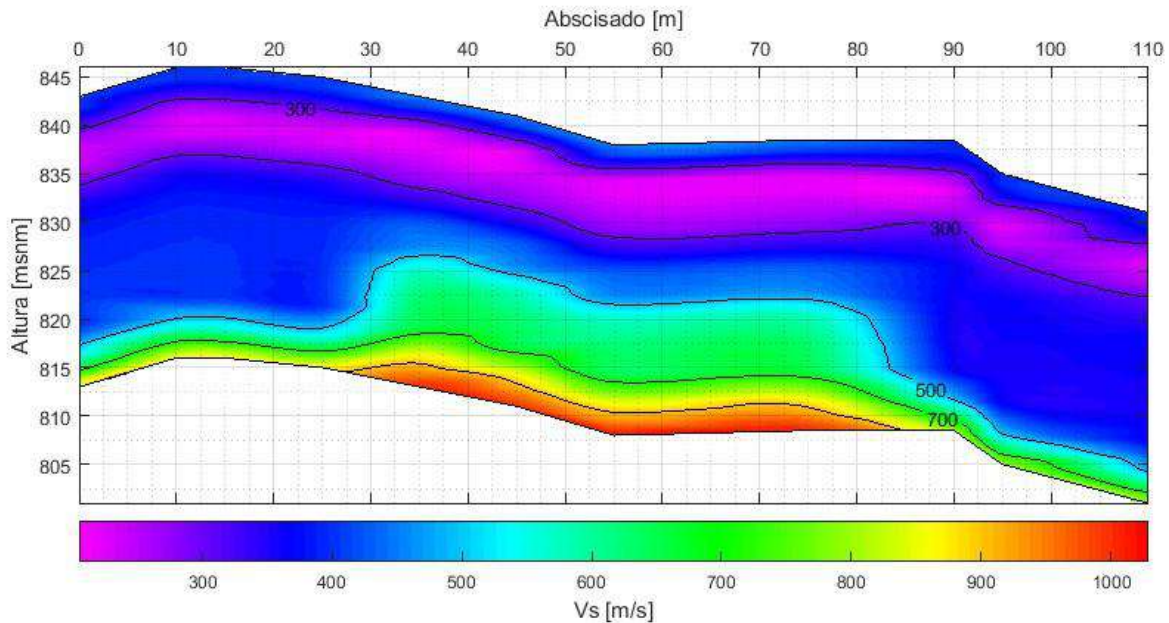


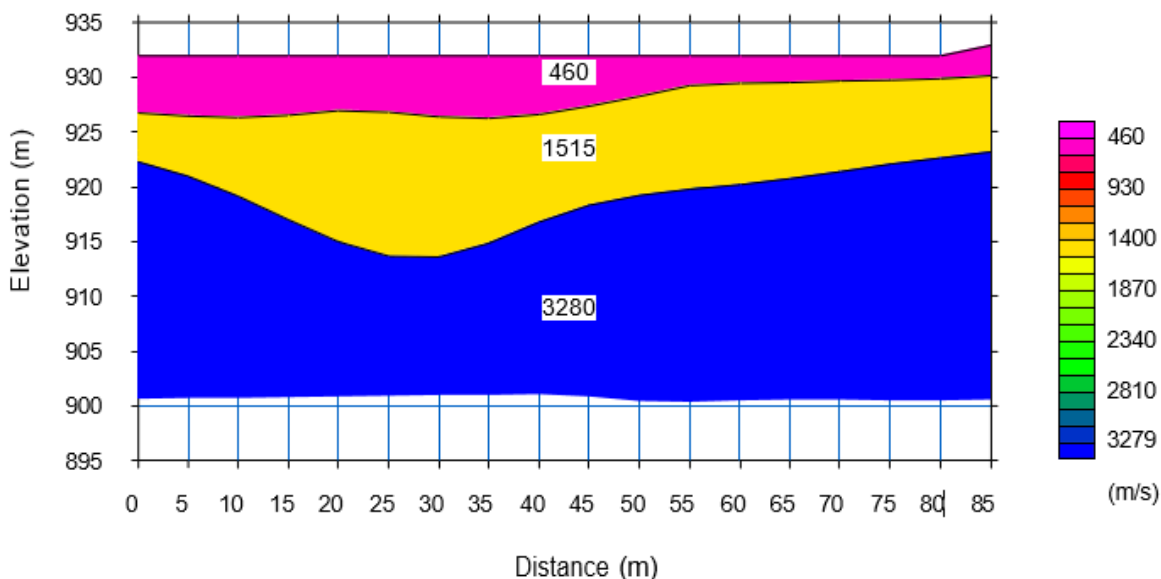
Figura 5.1.1.44 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-003

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XIV. Línea SRG20-004

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.45 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-004. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 460 m/s y un espesor variable entre 1 m y 5 m, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1515 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3280 m/s.



Scale = 1 / 700

Figura 5.1.1.45 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-004

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.46 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 80 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

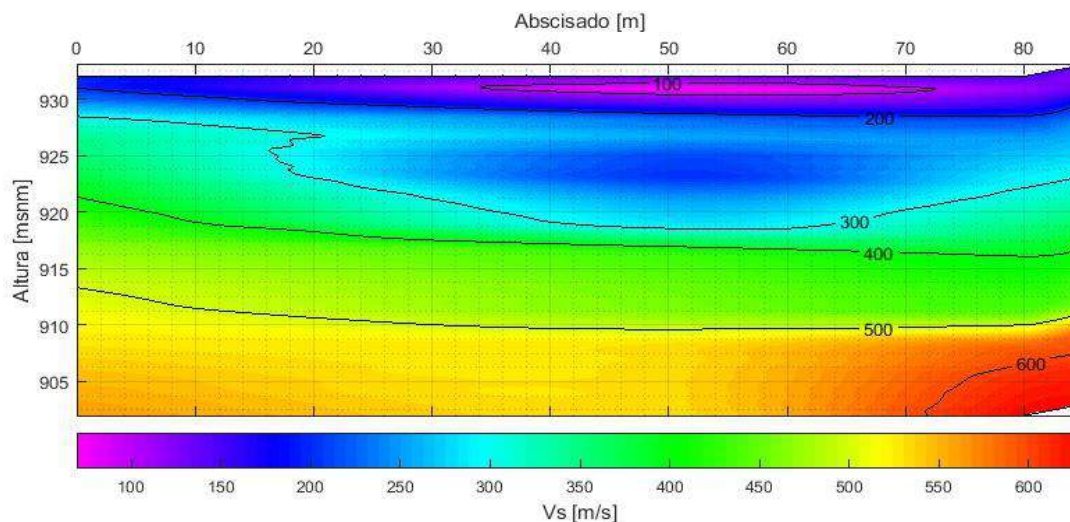


Figura 5.1.1.46 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-004

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XV. Línea SRG20-005

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.47 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-005. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 490 m/s y un espesor variable entre 1 m y 3 m, una segunda capa con una velocidad promedio de onda P de 1150 m/s, una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 2880 m/s y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 3560 m/s.

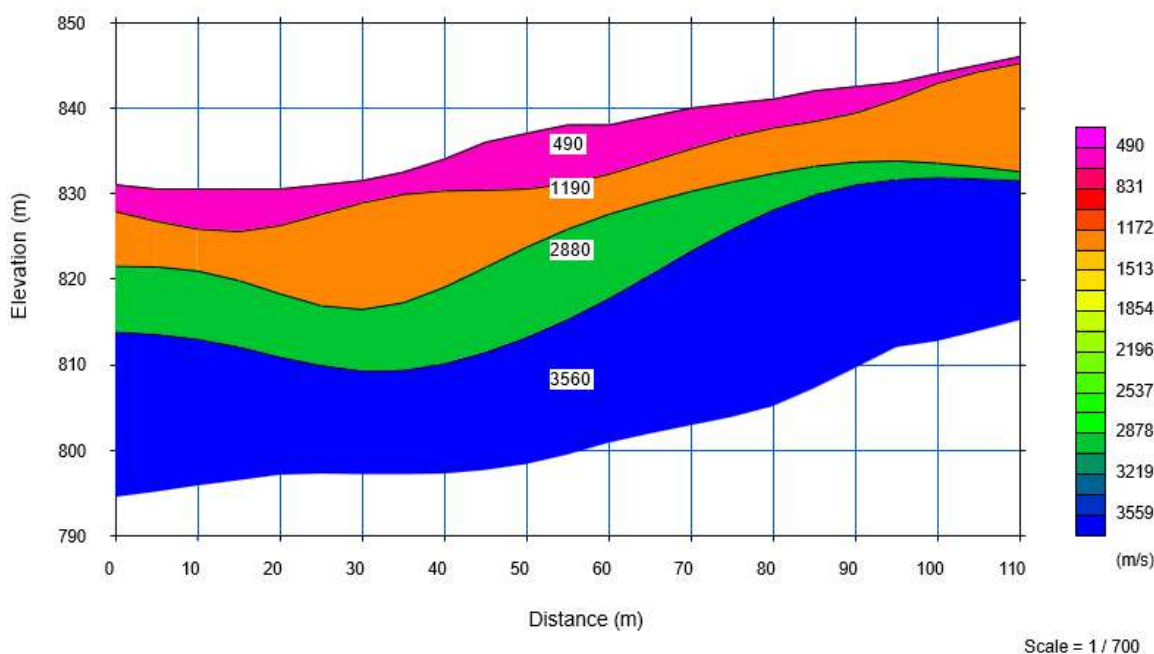


Figura 5.1.1.47 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-005

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.48 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 110 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

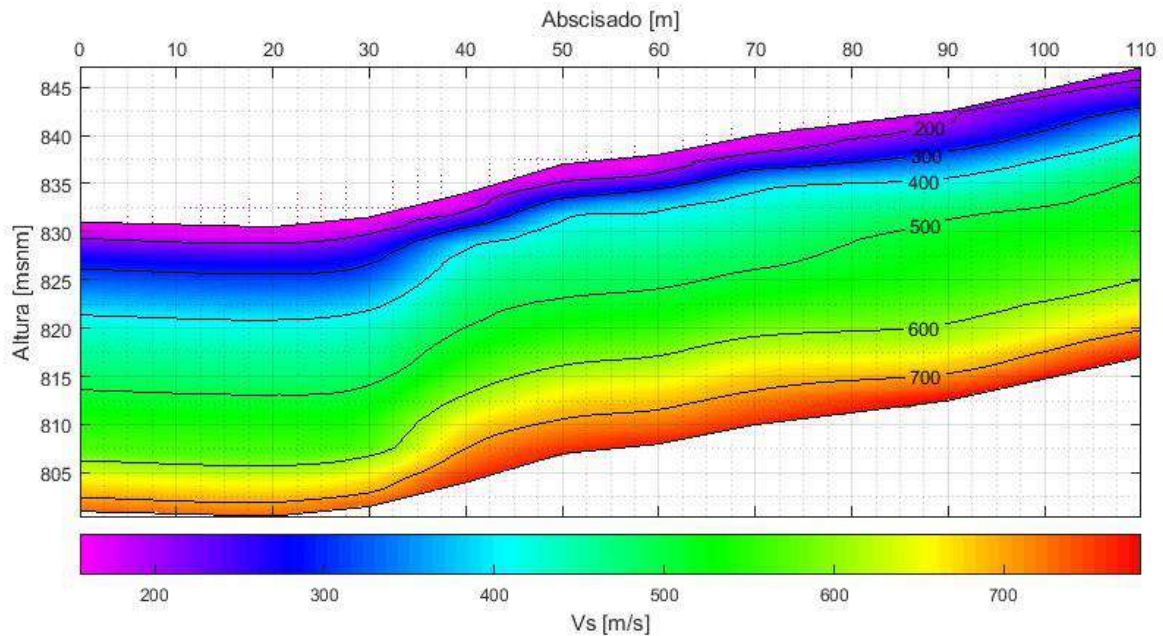


Figura 5.1.1.48 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-005
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XVI. Línea SRG20-006

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.49 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-006. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 455 m/s y un espesor variable entre 1 m y 10 m, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1781 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2970 m/s.

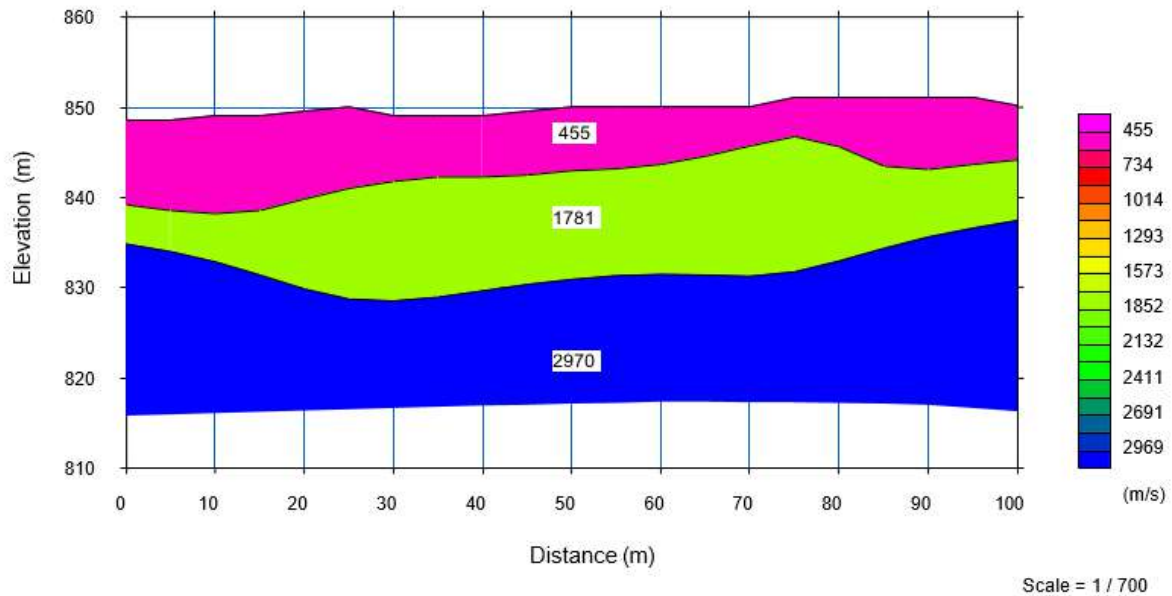


Figura 5.1.1.49 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-006
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.50 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 110 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

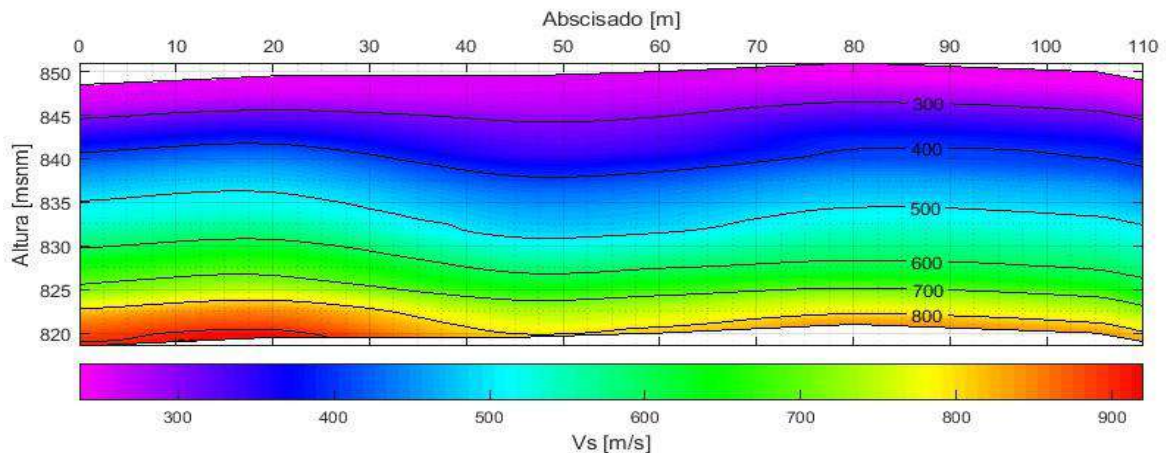


Figura 5.1.1.50 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-006
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XVII. Línea SRG20-007

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.51 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para línea sísmica SRG20-007. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 410 m/s y un espesor variable entre 0 m y 12 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 690 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1900 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3150 m/s.

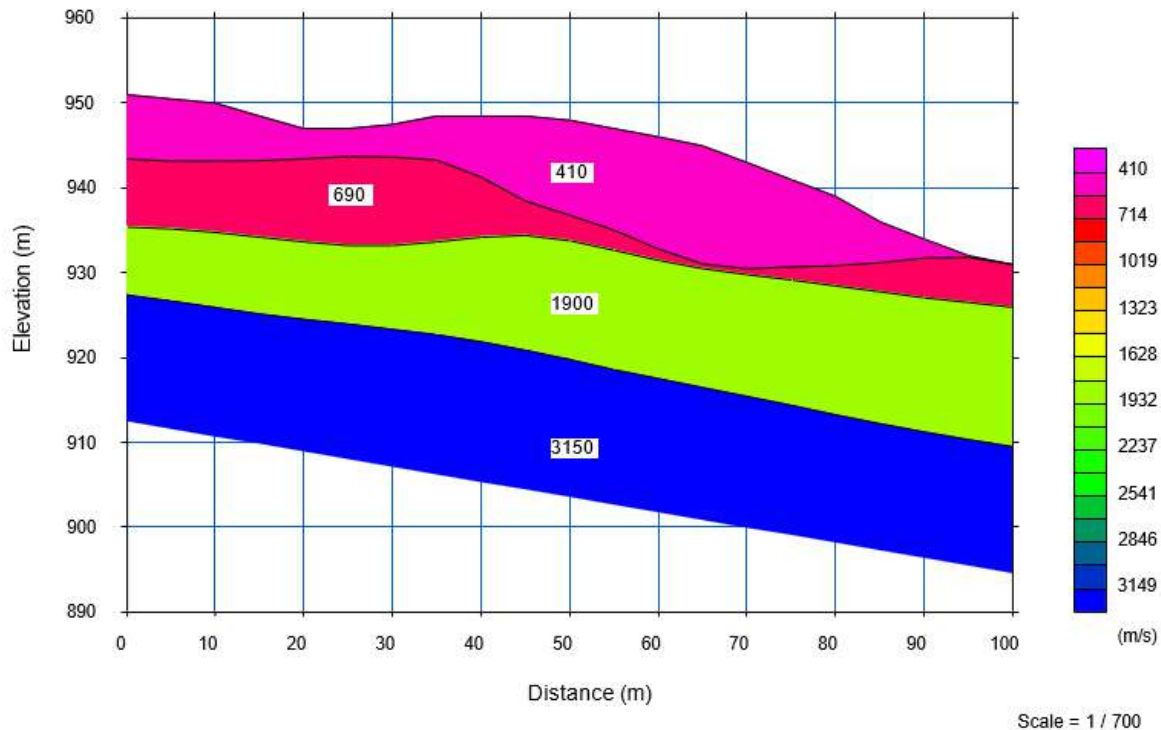


Figura 5.1.1.51 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-007

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.52 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 110 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

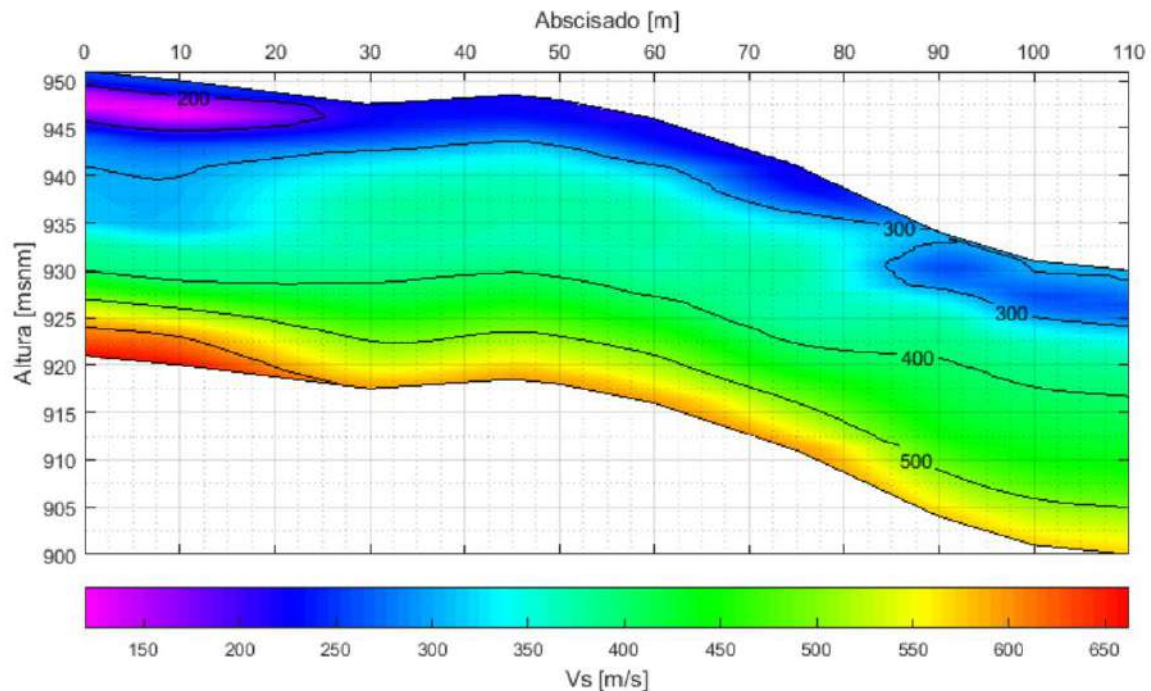


Figura 5.1.1.52 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-007

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XVIII. Línea SRG20-008

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.53 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-008. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 464 m/s y un espesor variable entre 0 m y 3 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 986 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1806 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3040 m/s.

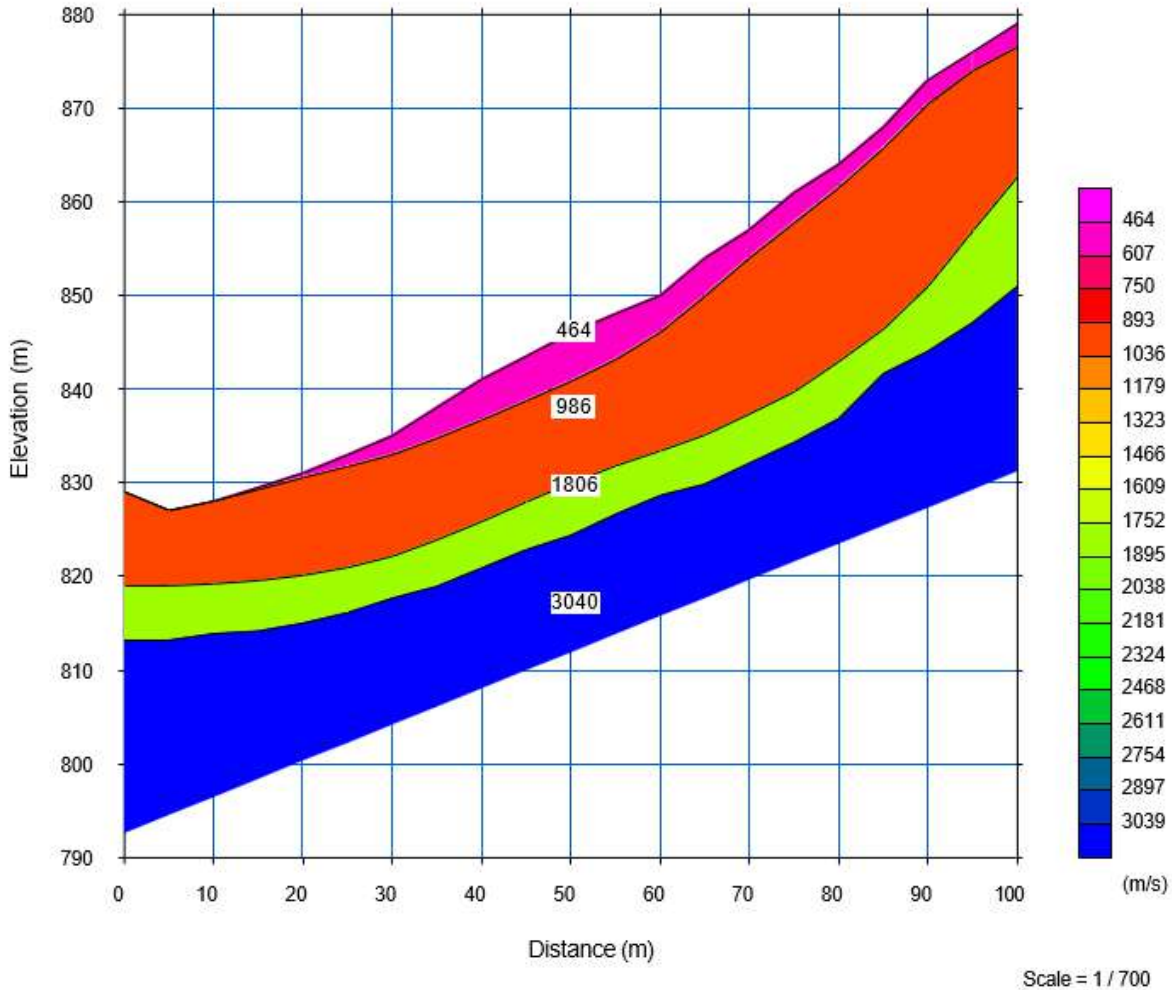


Figura 5.1.1.53 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-008
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.54Figura 5.1.1.52 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 120 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

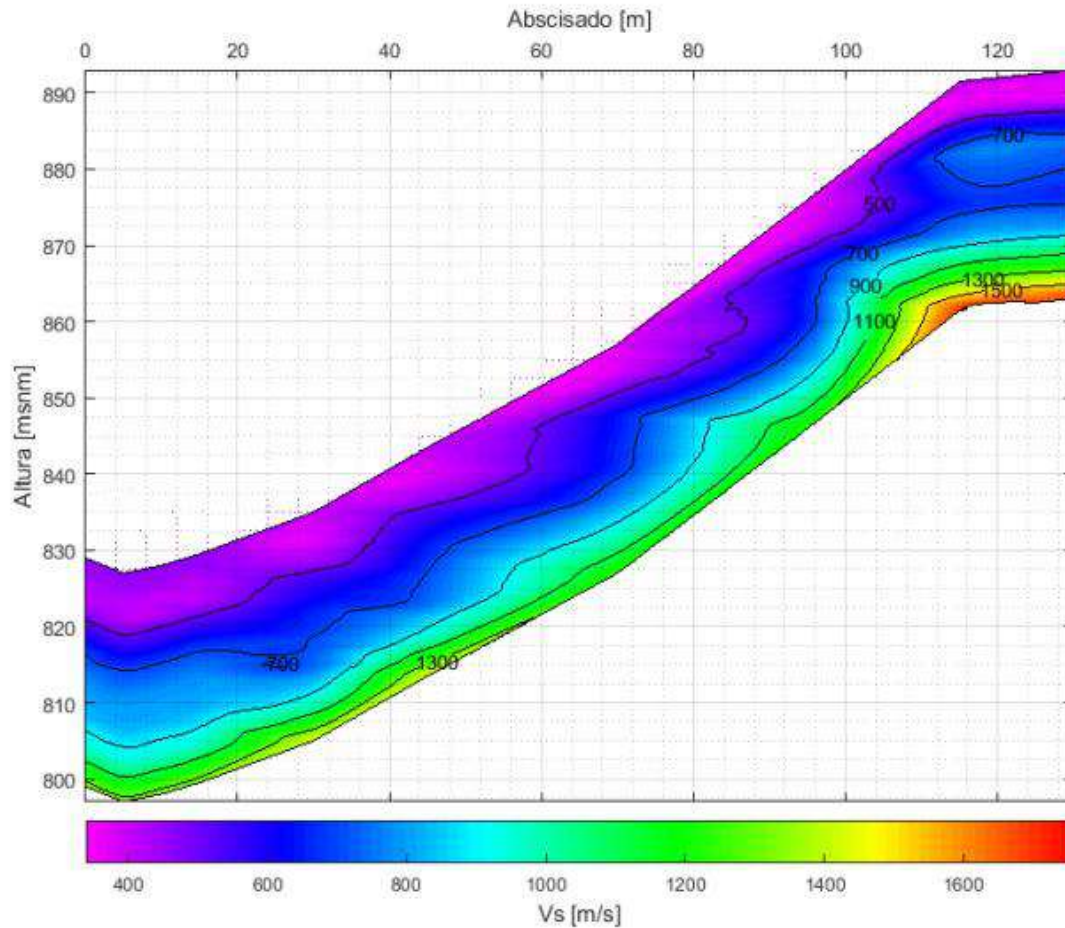


Figura 5.1.1.54 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-008

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XIX. Línea SRG20-009

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.55 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-009. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 457 m/s y un espesor variable entre 0 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1188 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1556 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3110 m/s.

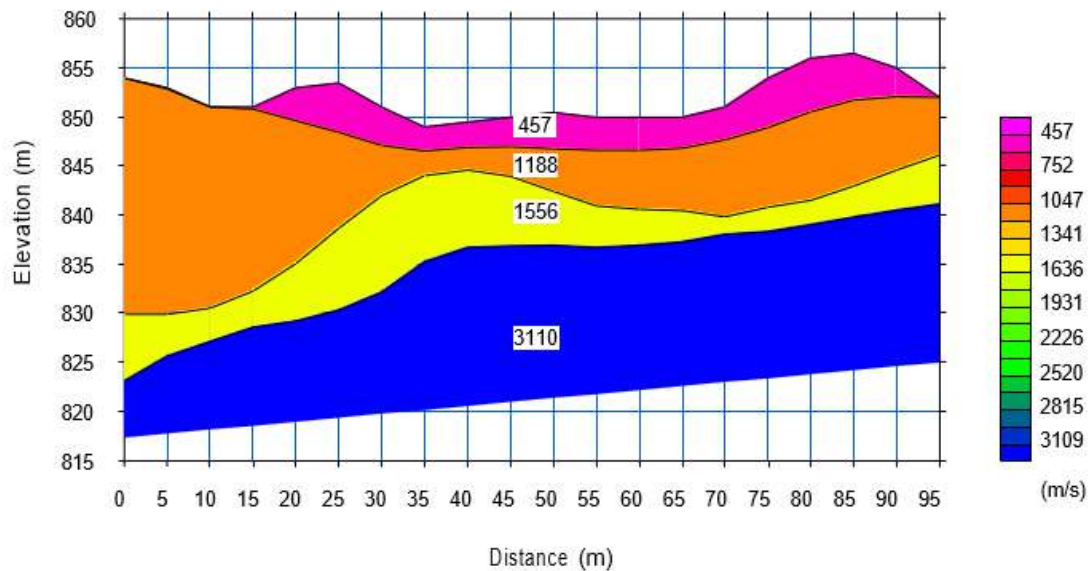


Figura 5.1.1.55 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-009
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.56 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 90 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

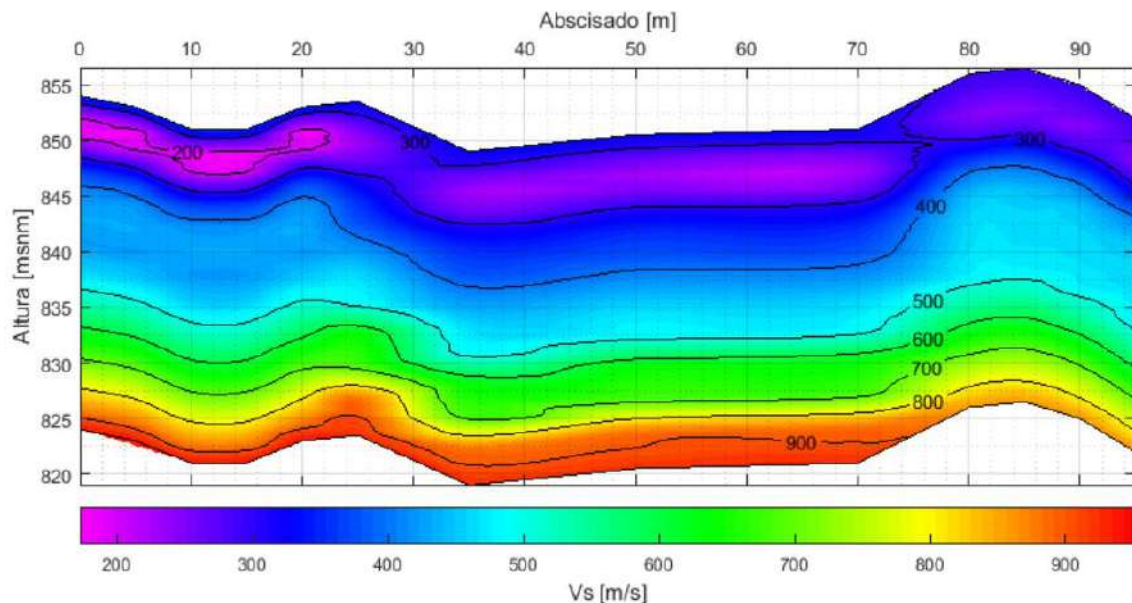


Figura 5.1.1.56 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-009
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XX. Línea SRG20-010

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.57 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-010. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 440 m/s y un espesor variable entre 0 m y 10 m, una segunda capa con una velocidad promedio de onda P de 860 m/s, una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 1720 m/s y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 2980 m/s.

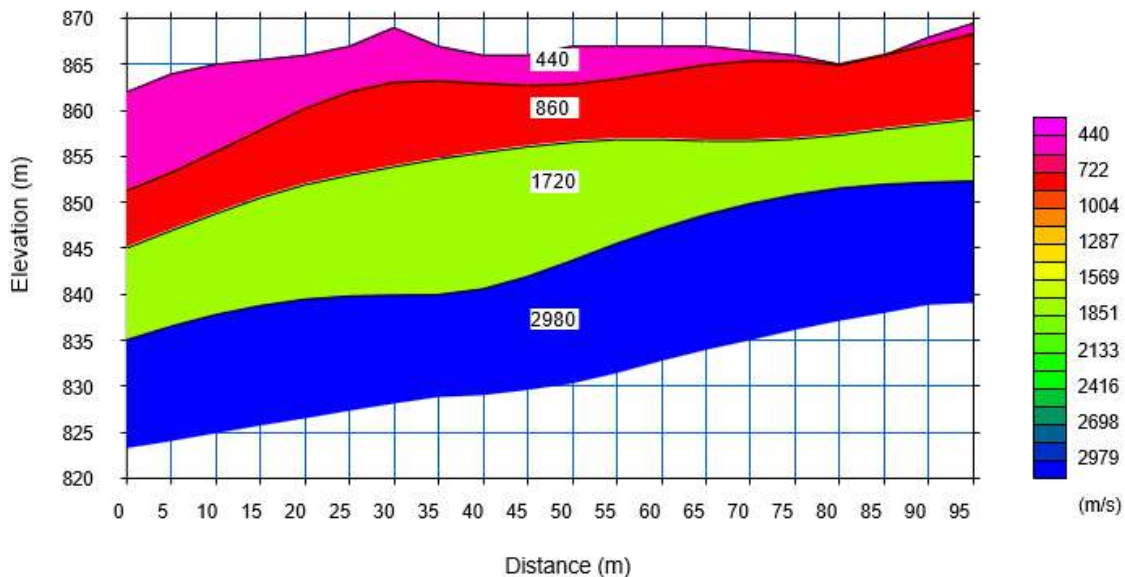


Figura 5.1.1.57 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-010

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.58 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 90 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

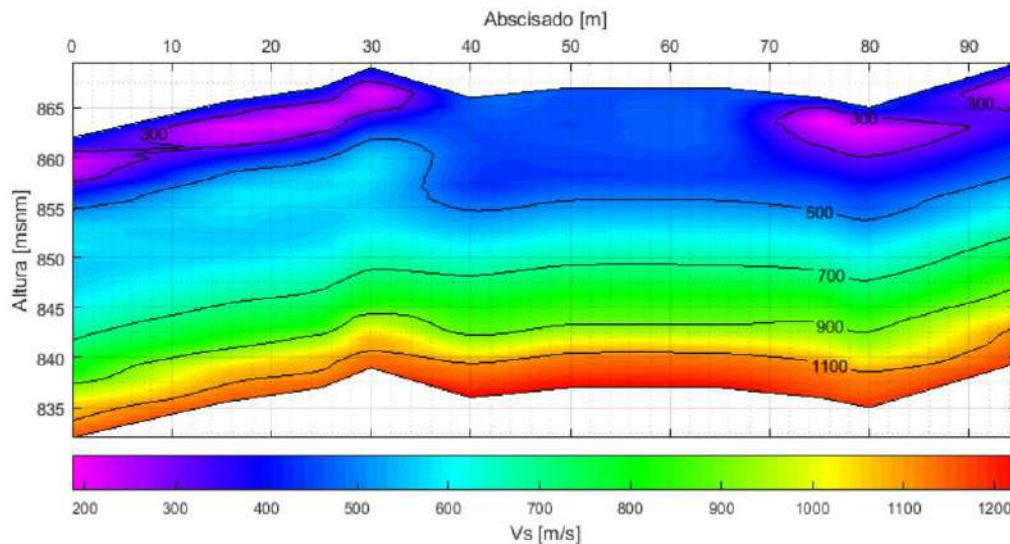


Figura 5.1.1.58 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-010

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXI. Línea SRG20-011

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.59 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-011. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 395 m/s y un espesor variable entre 1 m y 9 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 660 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1680 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3050 m/s.

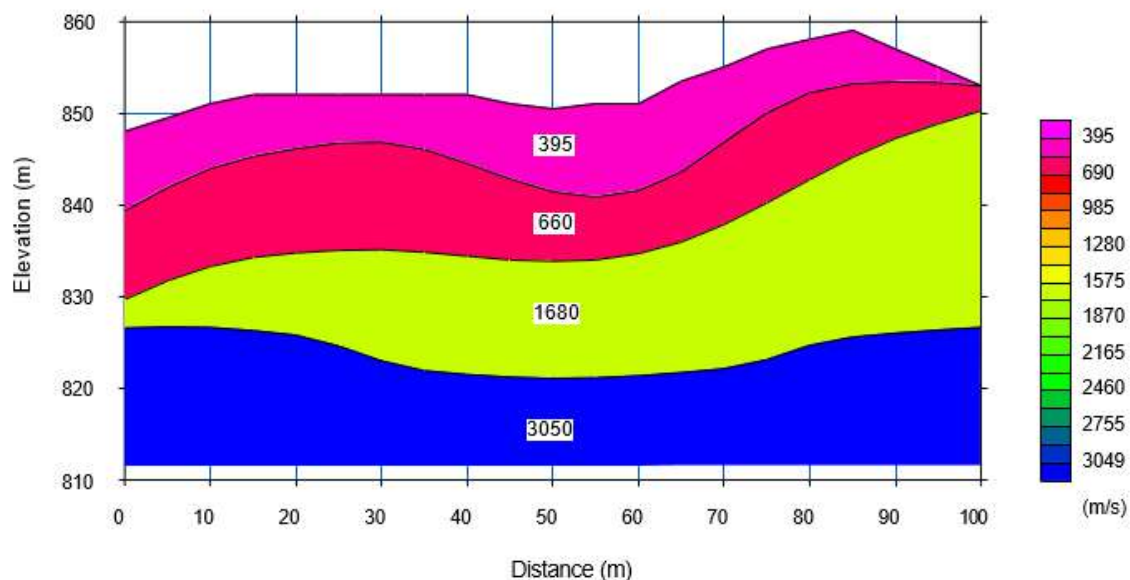


Figura 5.1.1.59 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-011

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.60 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

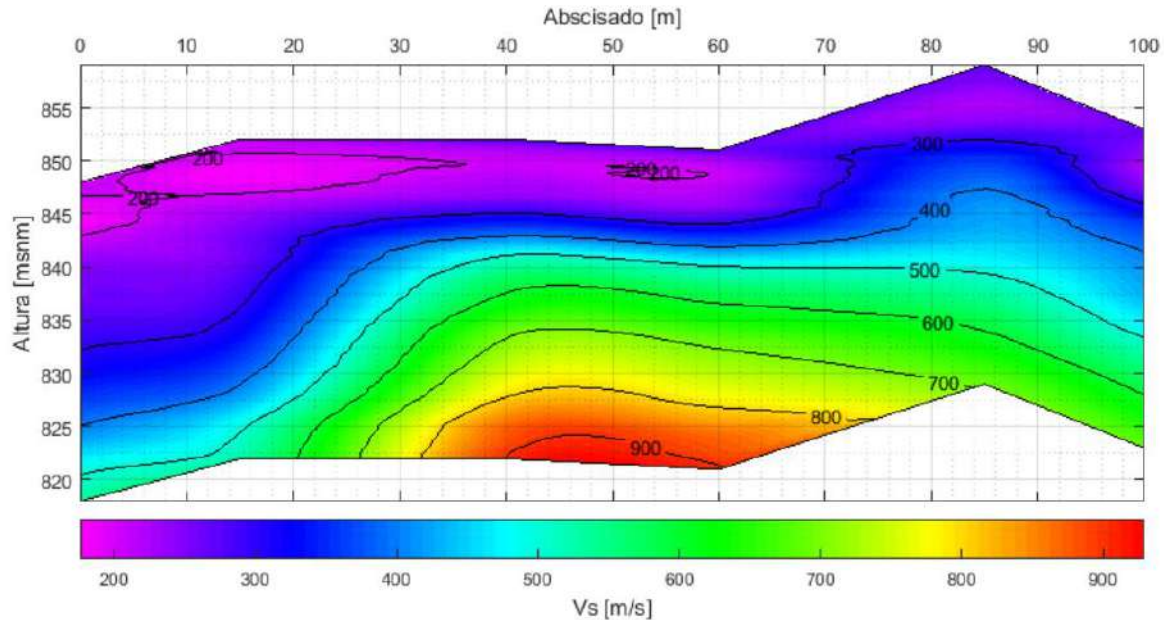


Figura 5.1.1.60 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-011

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXII. Línea SRG20-012

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.61 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-012. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 312 m/s y un espesor variable entre 0 m y 10 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 780 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1740 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3140 m/s.

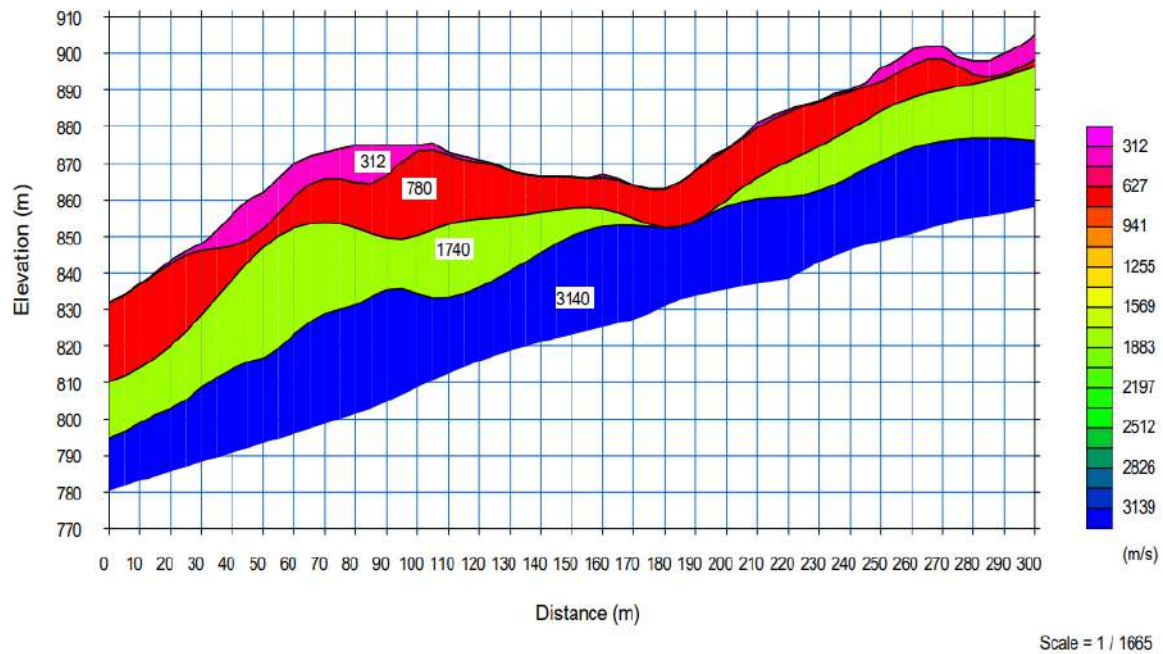


Figura 5.1.1.61 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-012

Fuente: Tomado de (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.62 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 350 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

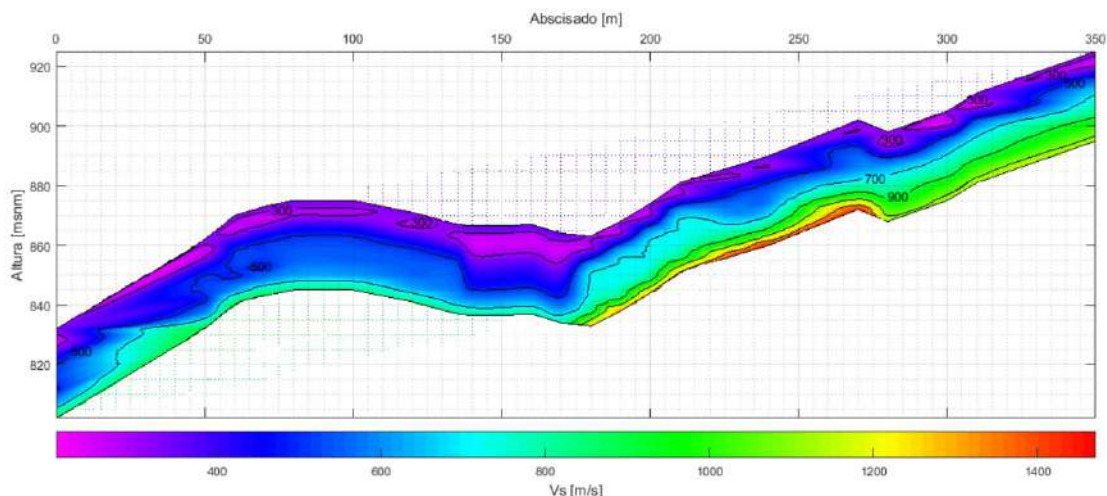


Figura 5.1.1.62 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-012

Fuente: Tomado de (INTEINSA, 2020)

XXIII. Línea SRG20-013

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.63 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-013. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 292 m/s y un espesor variable entre 1 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 493 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1530 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2990 m/s.

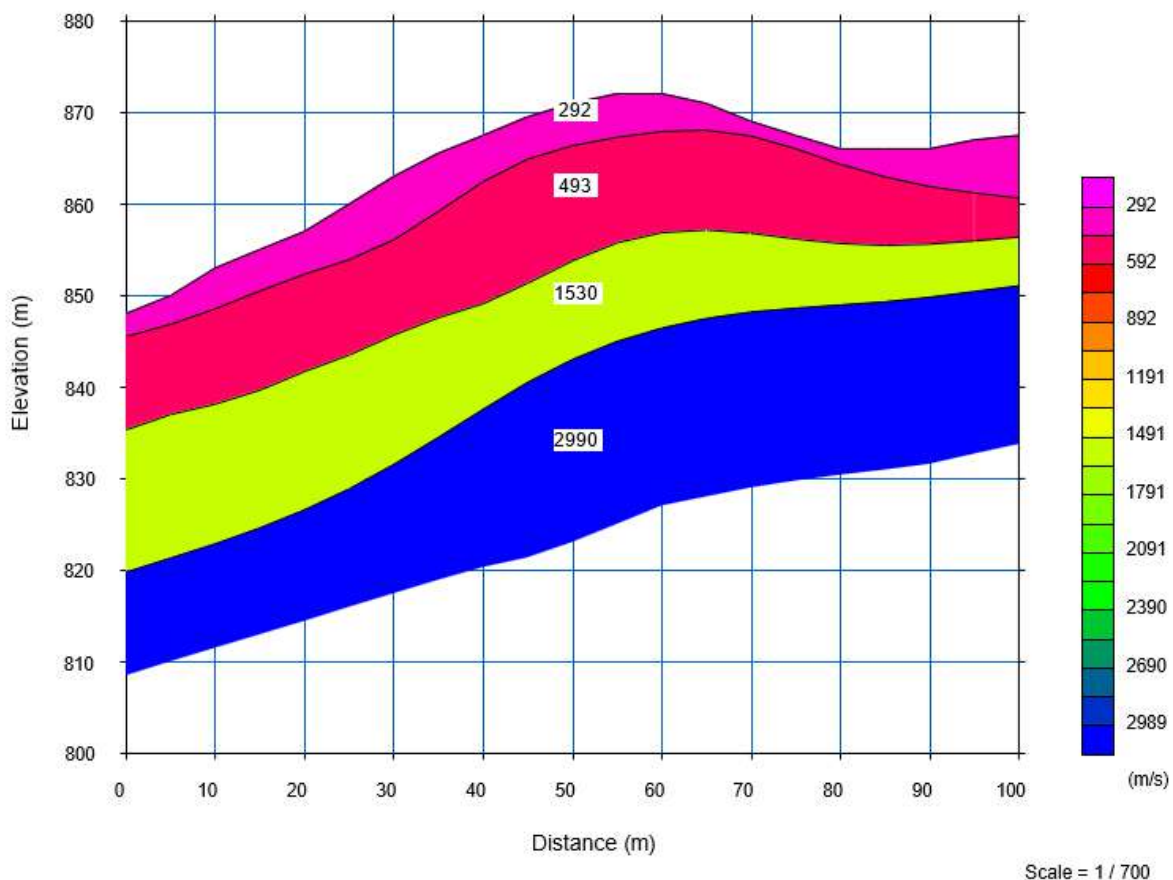


Figura 5.1.1.63 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-013

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.64 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

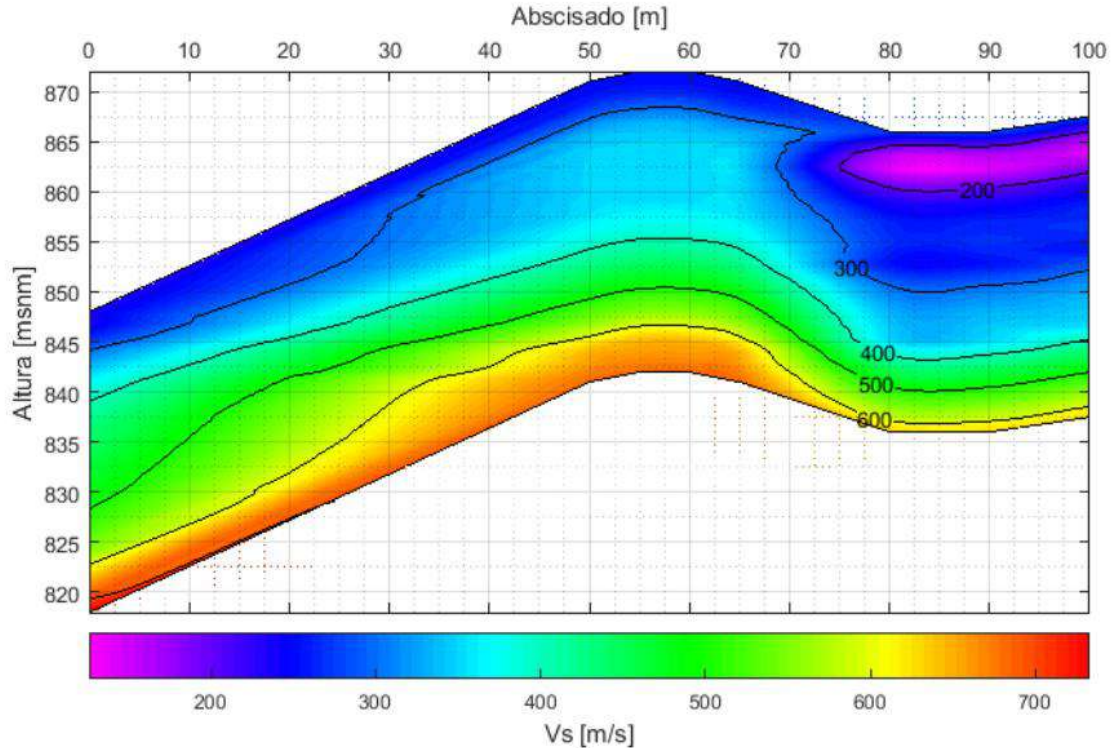


Figura 5.1.1.64 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-013
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXIV. Línea SRG20-014

i. Refracción sísmica

La figura 42 muestra la distribución de las velocidades de las ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-014. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad media de onda P de 710 m/s y un espesor variable entre 5 m y 12 m, una capa intermedia con una velocidad media de onda P de 1650 m/s y una capa más profunda con una velocidad media de propagación de onda P de 2480 m/s.

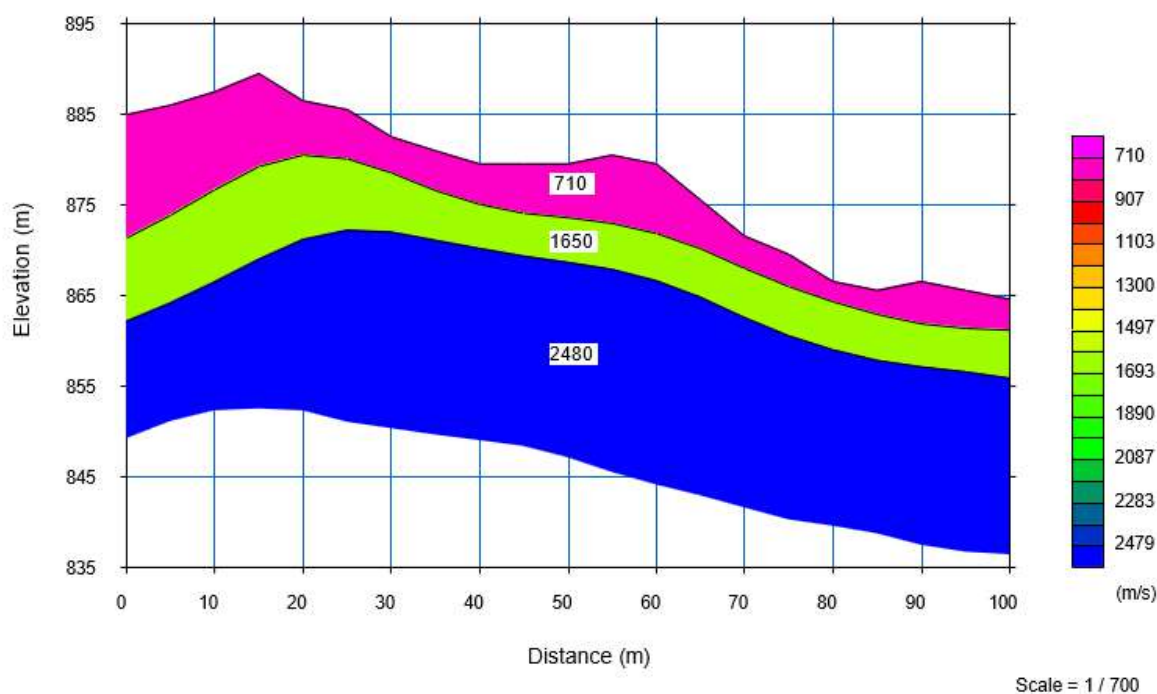


Figura 5.1.1.65 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-014

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.66 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

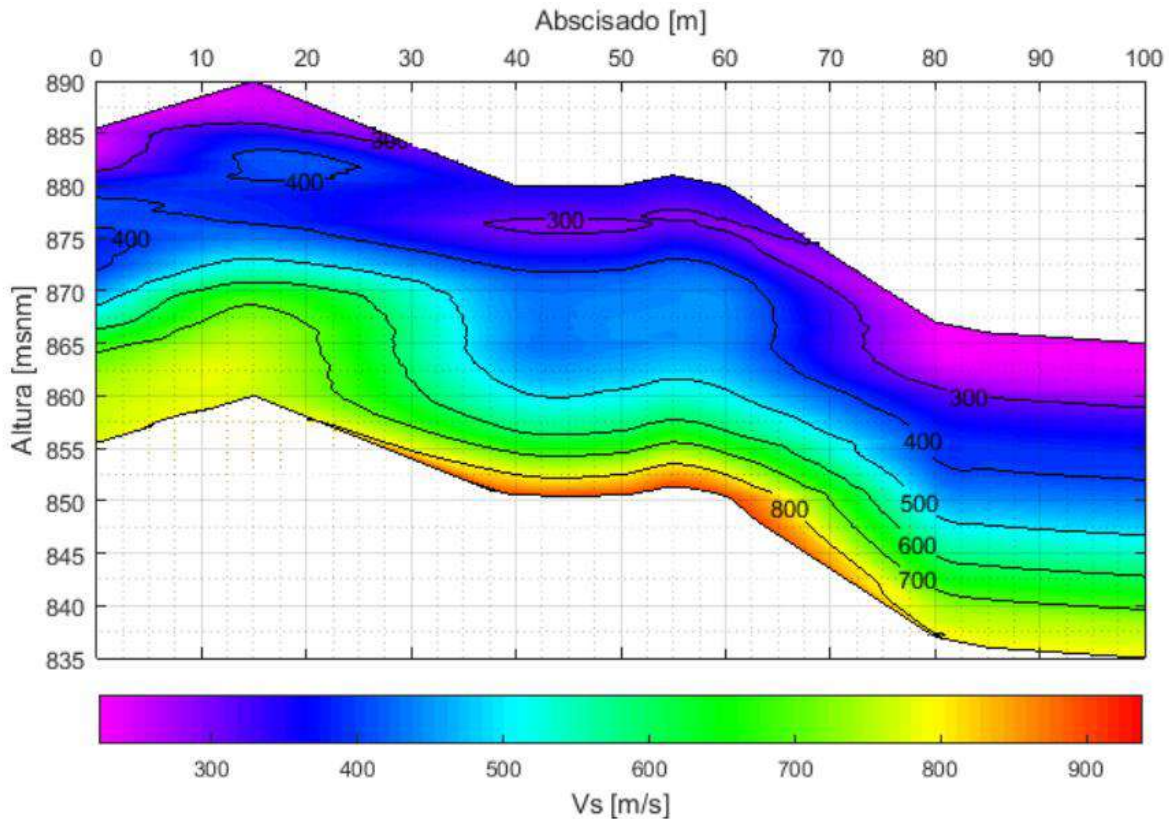


Figura 5.1.1.66 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-014
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXV. Línea SRG20-015

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.67 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-015. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 355 m/s y un espesor variable entre 1 m y 7 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 766 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1650 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2780 m/s.

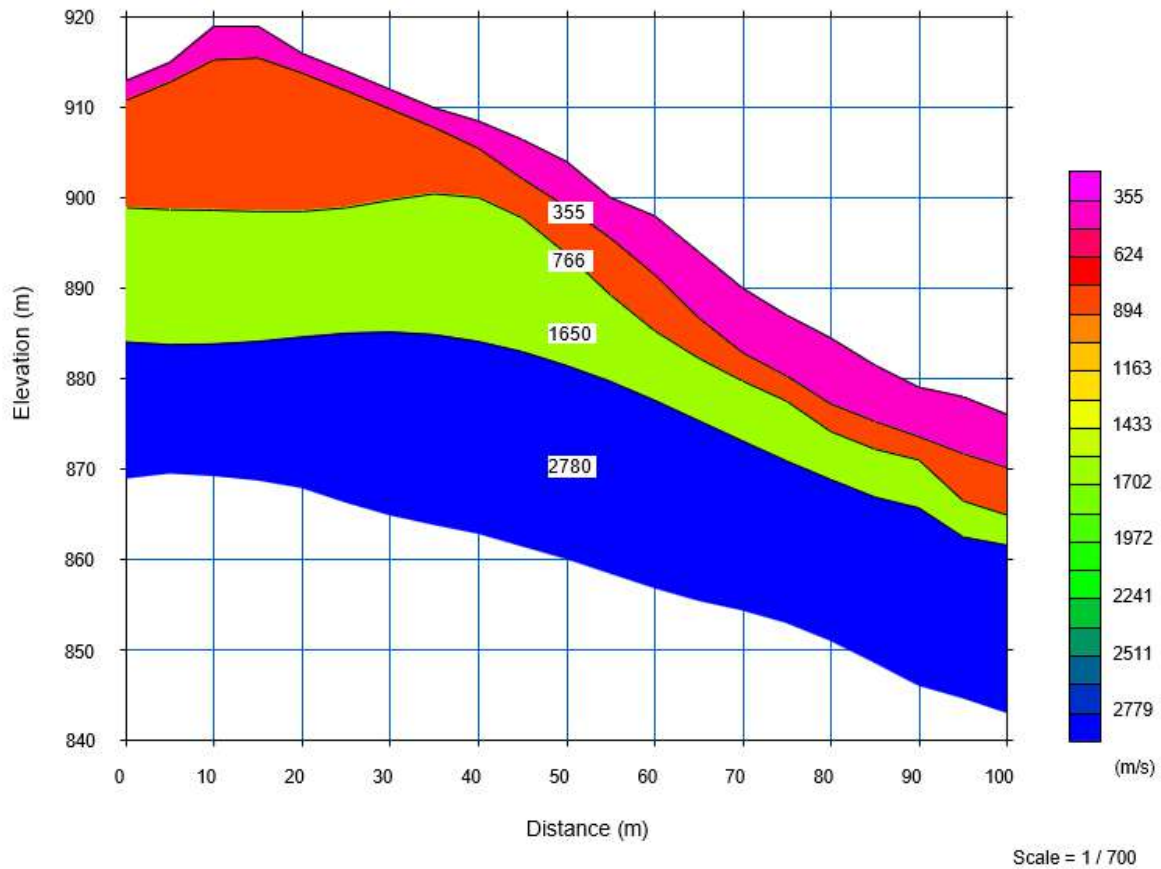


Figura 5.1.1.67 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-015

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.68 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

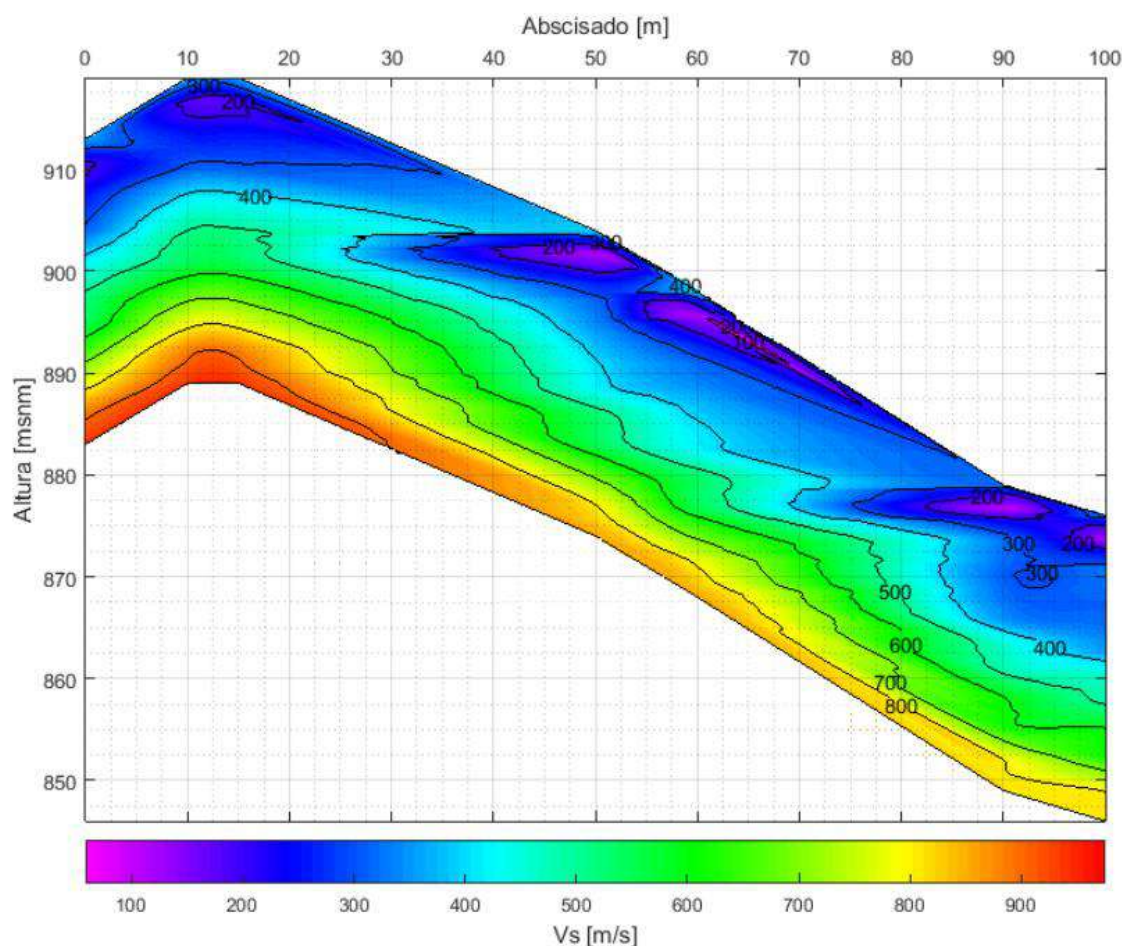


Figura 5.1.1.68 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-015

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXVI. Línea SRG20-016

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.69 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-016. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 460 m/s y un espesor variable entre 1 m y 9 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1680 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 2328 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3420 m/s.

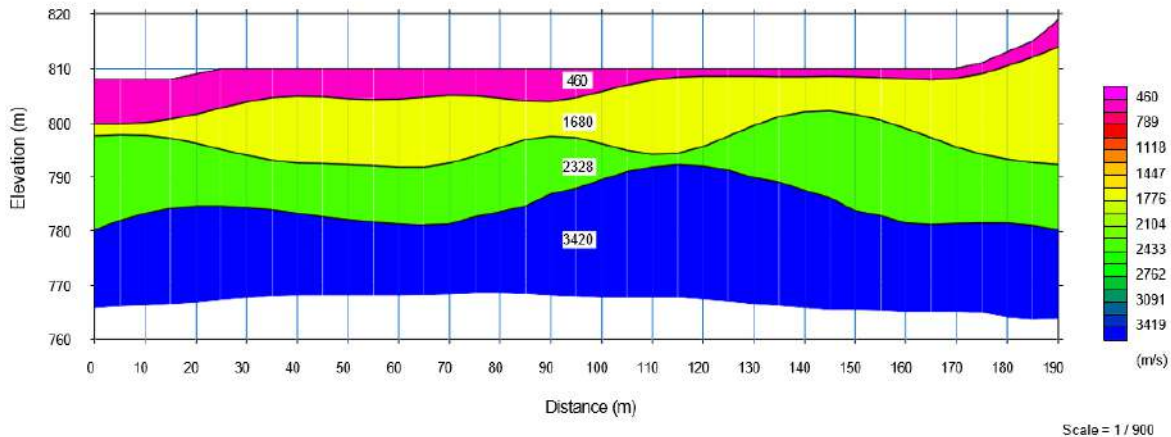


Figura 5.1.1.69 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-016
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.70 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 180 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

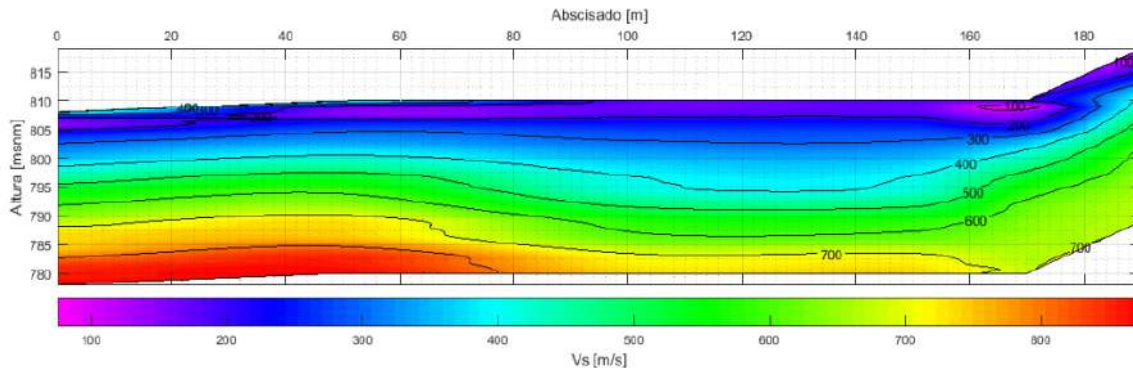


Figura 5.1.1.70 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-016
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXVII. Línea SRG20-017

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.71 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-017. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 438 m/s y un espesor variable entre 2 m y 7 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1530 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 2333 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3540 m/s.

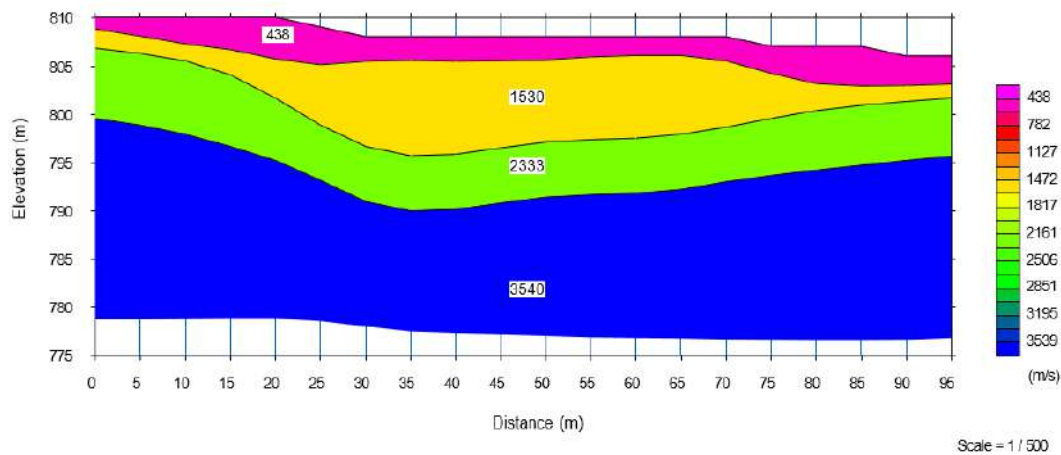


Figura 5.1.1.71 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-017

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.72 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 90 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

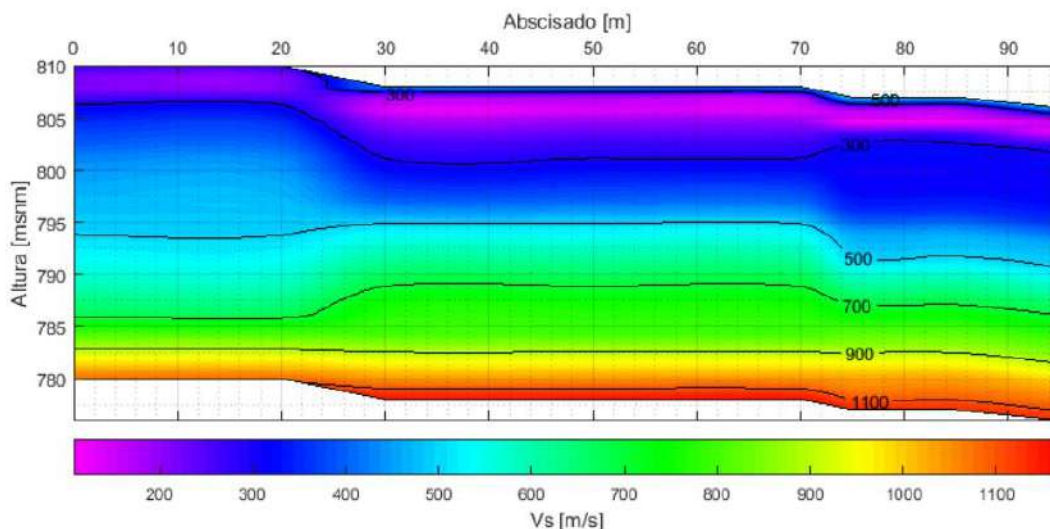


Figura 5.1.1.72 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-017

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXVIII. Línea SRG20-018

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.73 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-018. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 304 m/s y un espesor variable entre

1 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 623 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1270 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2825 m/s.

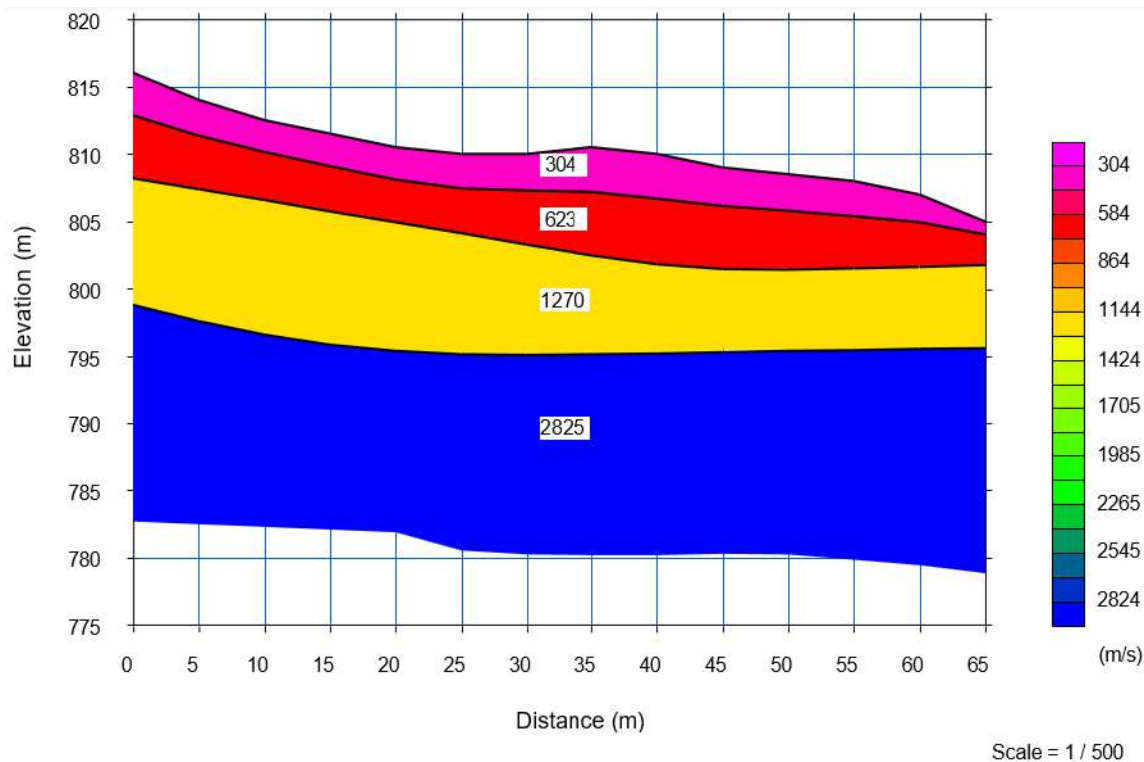


Figura 5.1.1.73 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-018

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.74 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 60 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

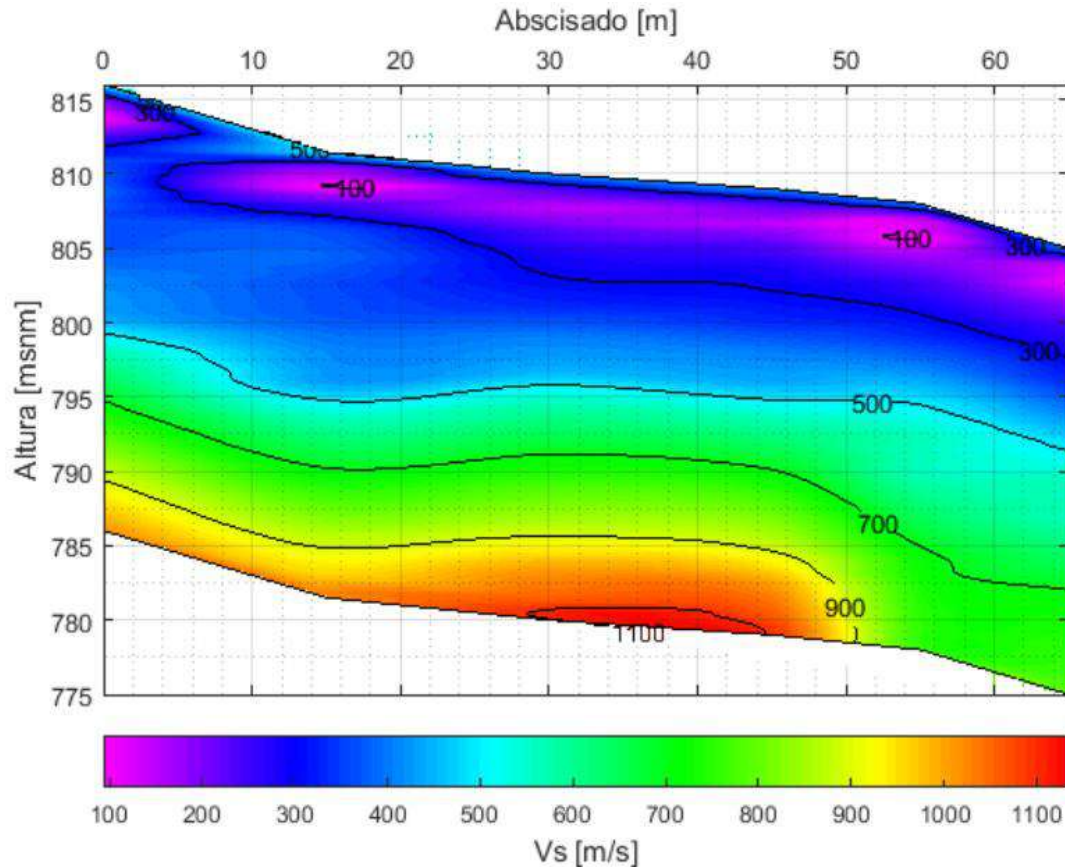


Figura 5.1.1.74 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-018

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXIX. Línea SRG20-019

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.75 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-019. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 350 m/s y un espesor variable entre 1 m y 3 m, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1338 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2940 m/s.

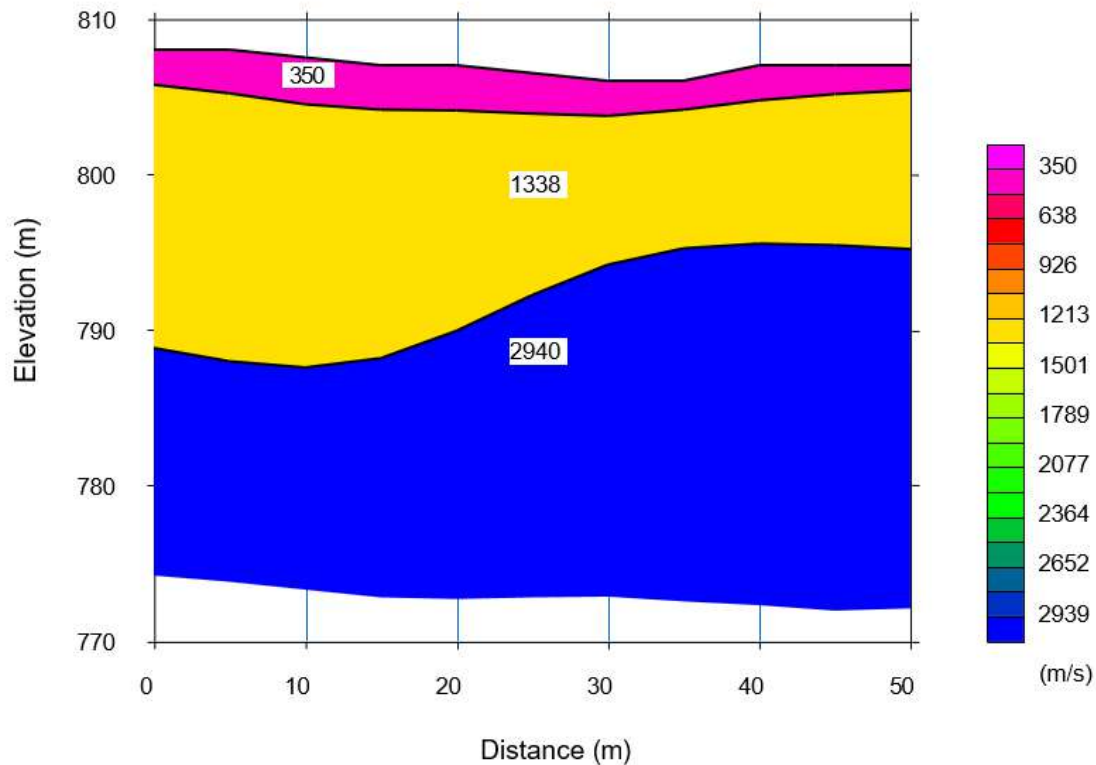


Figura 5.1.1.75 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-019
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.76 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 90 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

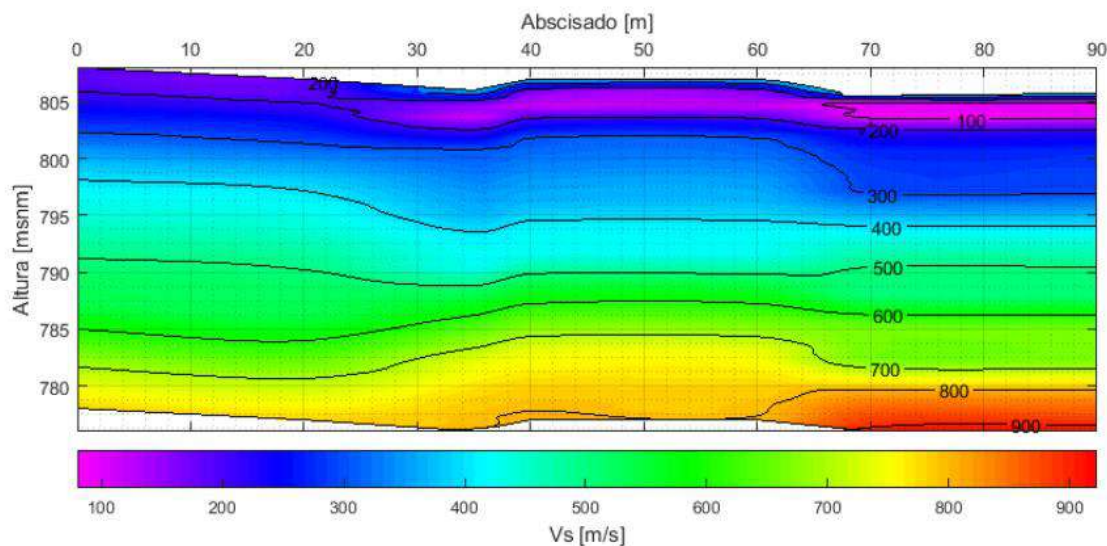


Figura 5.1.1.76 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-019
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXX. Línea SRG20-021

i. Refracción sísmica

La figura 60 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-021. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 359 m/s y un espesor variable entre 0 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 640 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1590 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2305 m/s.

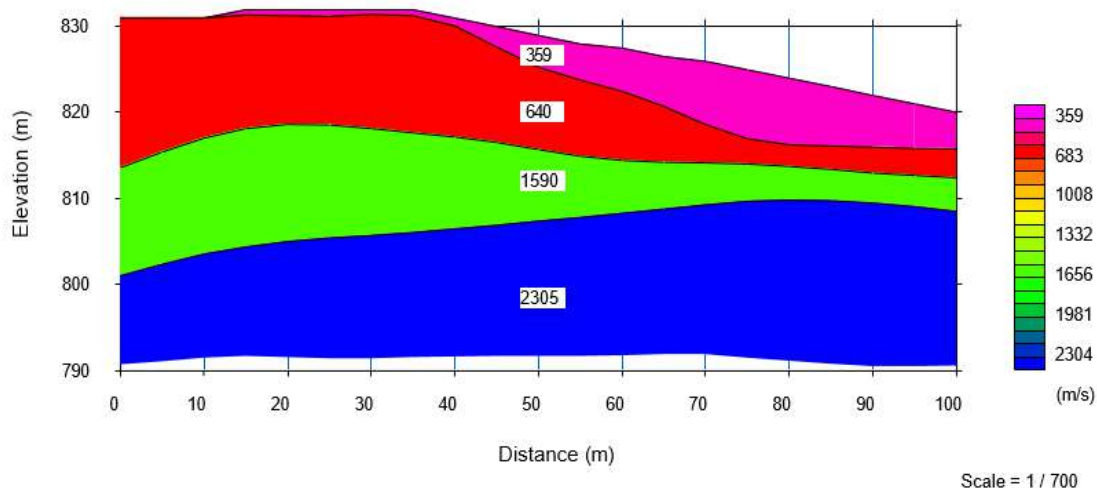


Figura 5.1.1.77 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-021
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.78 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

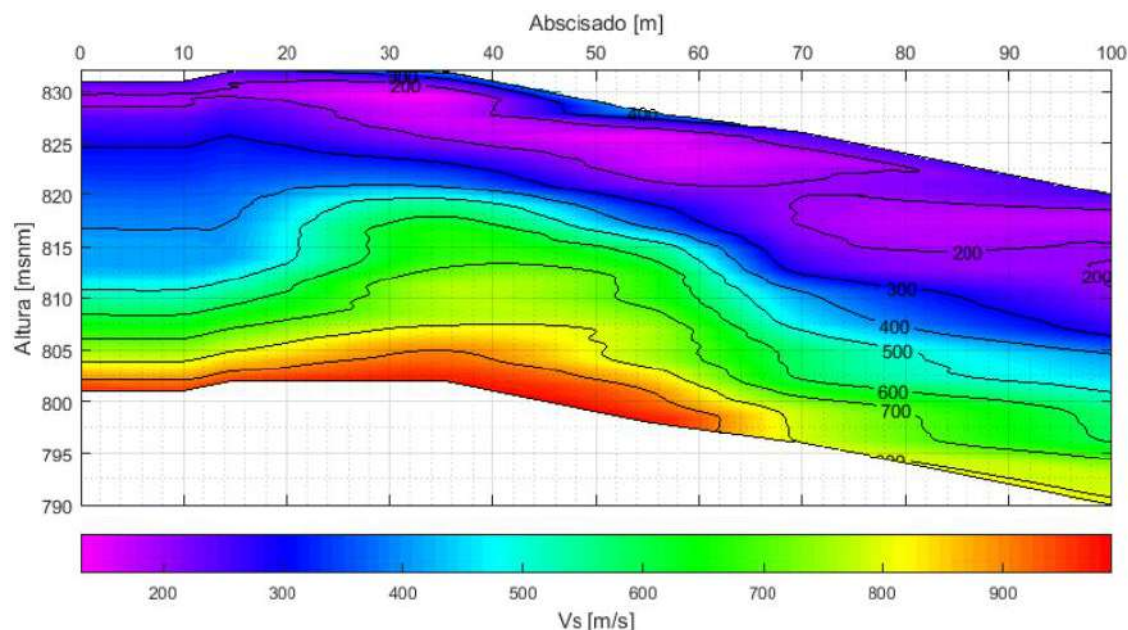


Figura 5.1.1.78 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-021
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXI. Línea SRG20-022

i. Refracción sísmica

La figura 63 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-022. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 362 m/s y un espesor variable entre 1 m y 25 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 890 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1925 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3670 m/s.

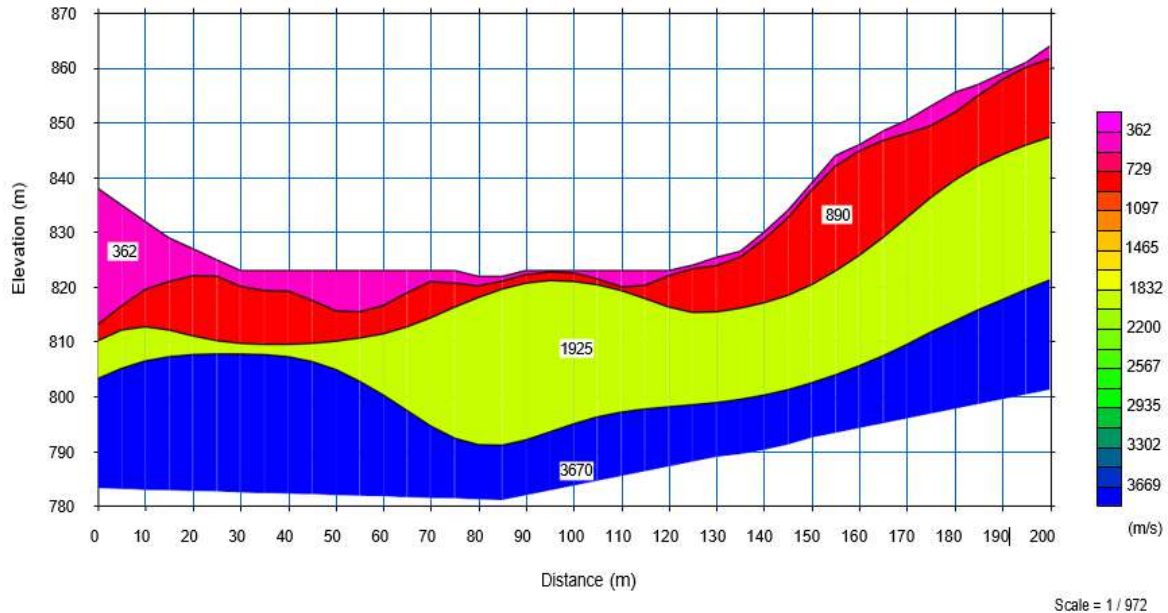


Figura 5.1.1.79 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-022

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.80 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 200 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

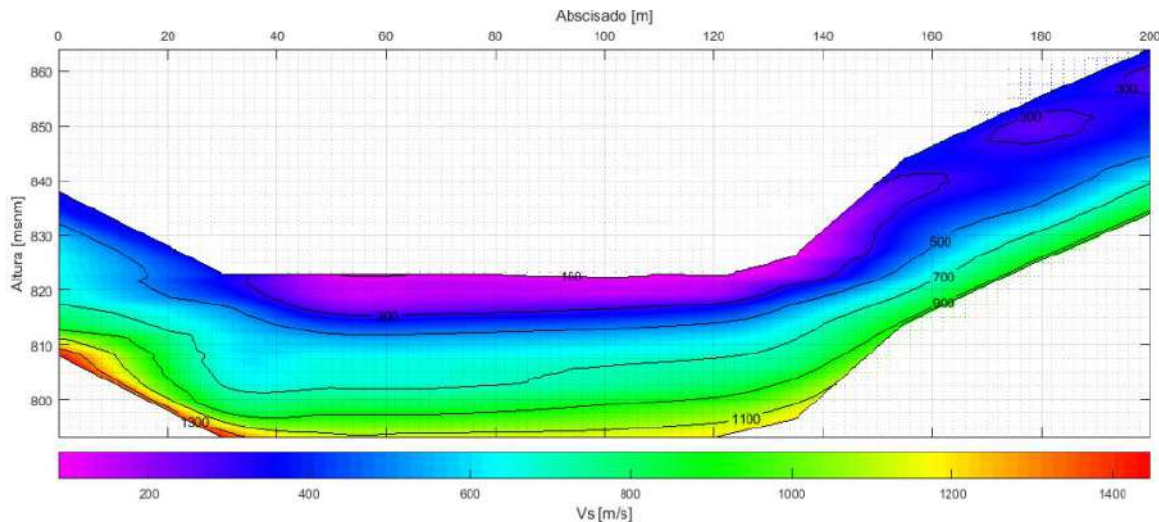


Figura 5.1.1.80 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-022

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXII. Línea SRG20-023

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.81 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-023. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 401 m/s y un espesor variable entre 1 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 790 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1880 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3450 m/s.

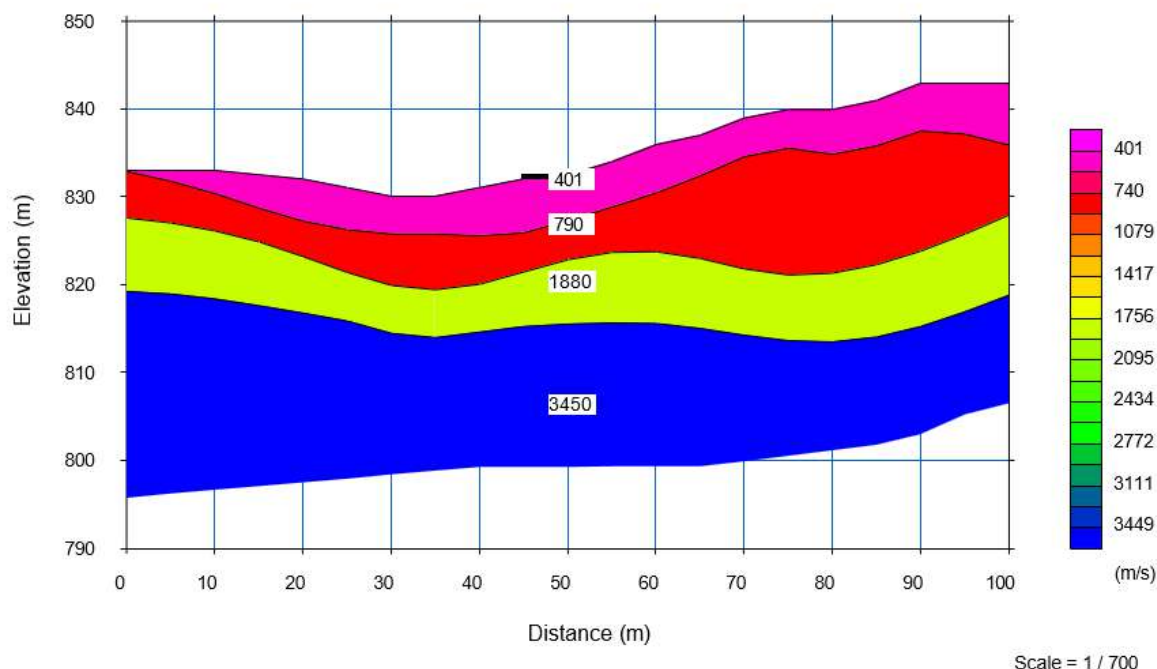


Figura 5.1.1.81 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-023

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.82 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 140 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

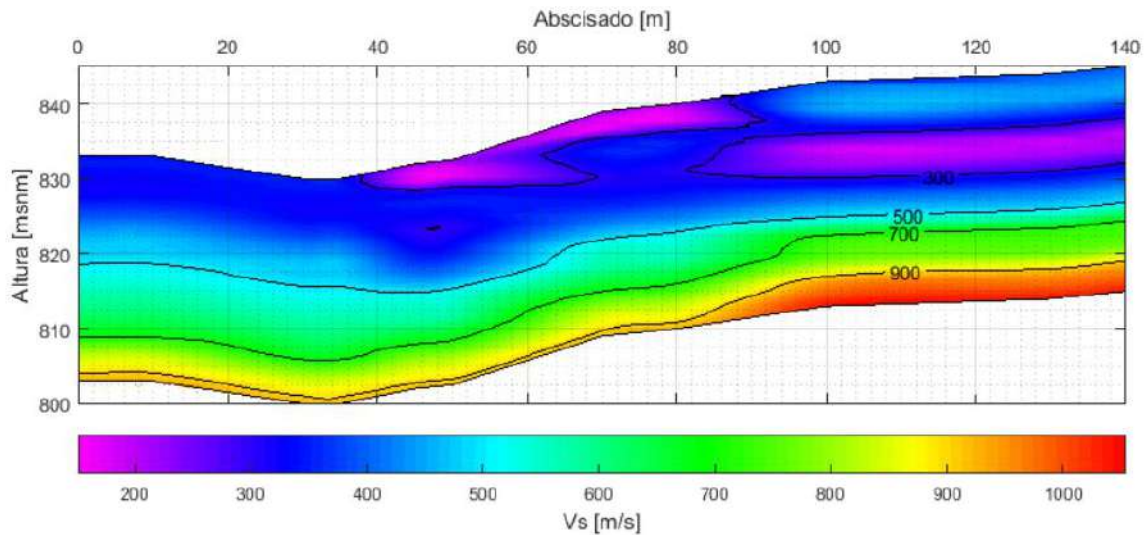


Figura 5.1.1.82 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-023

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXIII. Línea SRG20-025

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.83 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-025. Los resultados indican dos capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 610 m/s y un espesor variable entre 5 m y 20 m y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 1950 m/s.

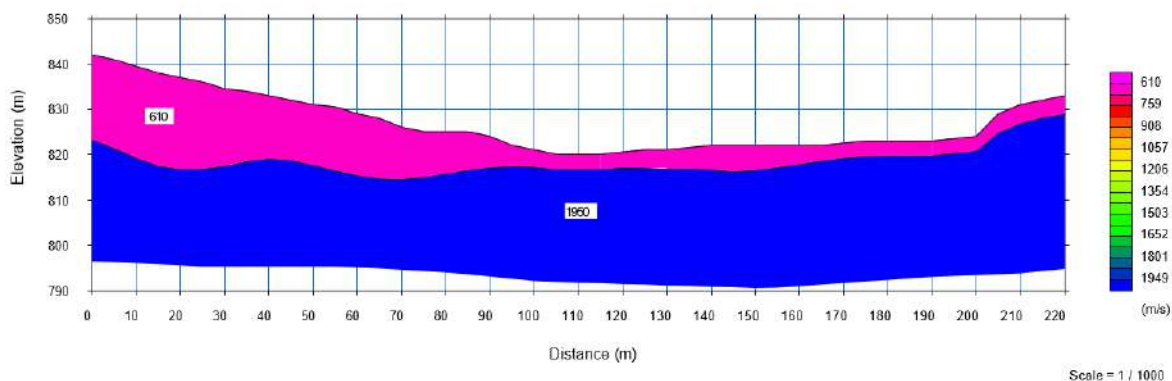


Figura 5.1.1.83 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-025

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.84 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 200 m de longitud. El

análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

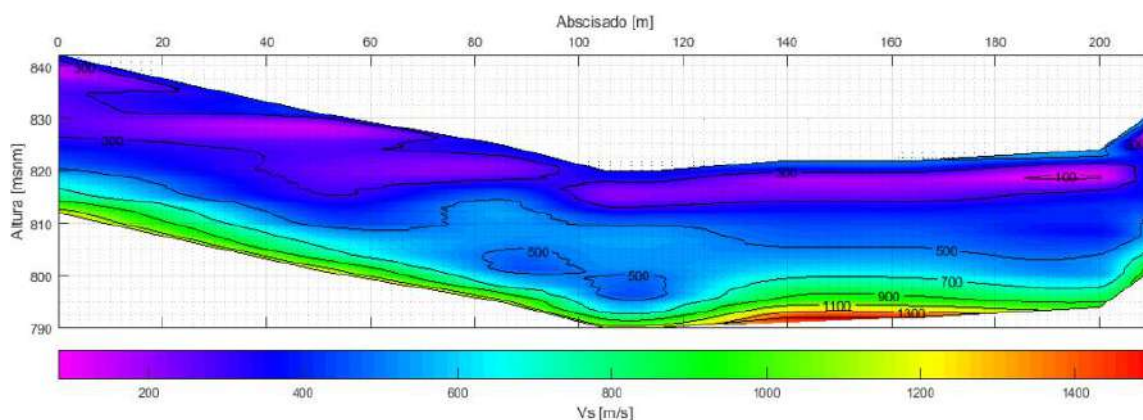


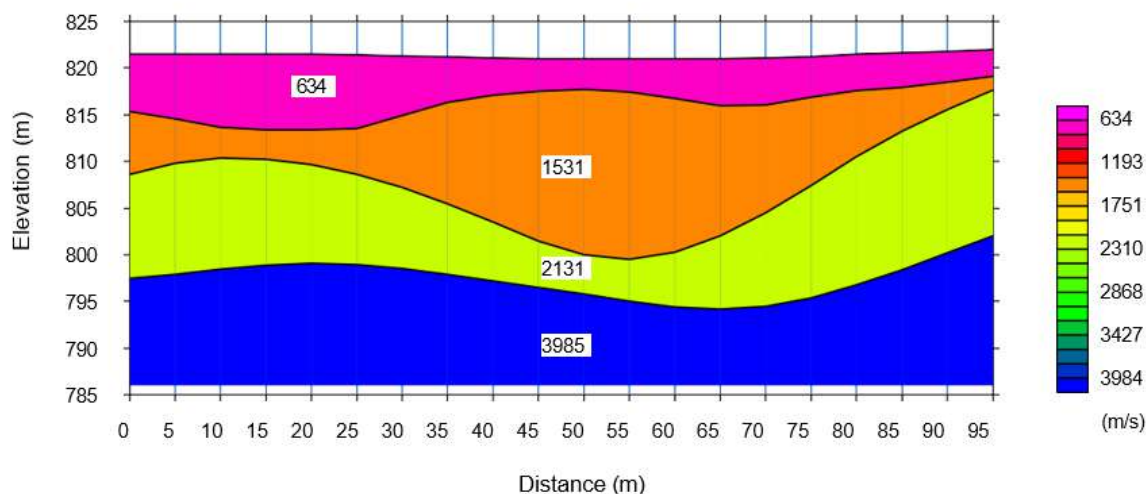
Figura 5.1.1.84 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-025

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXIV. Línea SRG20-026

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.85 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-026. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 634 m/s y un espesor variable entre 5 m y 10 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1531 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 2131 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3985 m/s.



Scale = 1 / 700

Figura 5.1.1.85 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-026

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.86 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 90 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

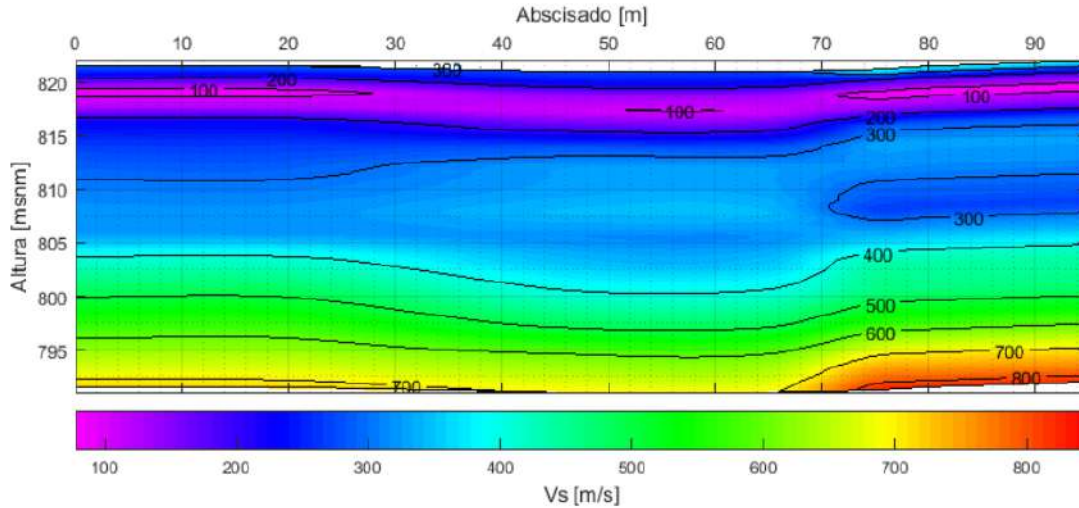


Figura 5.1.1.86 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-026

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXV. Línea SRG20-028

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.87 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-028. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 506 m/s y un espesor variable entre 1 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1979 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 4424 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 5420 m/s.



Figura 5.1.1.87 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-028
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.88 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 120 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

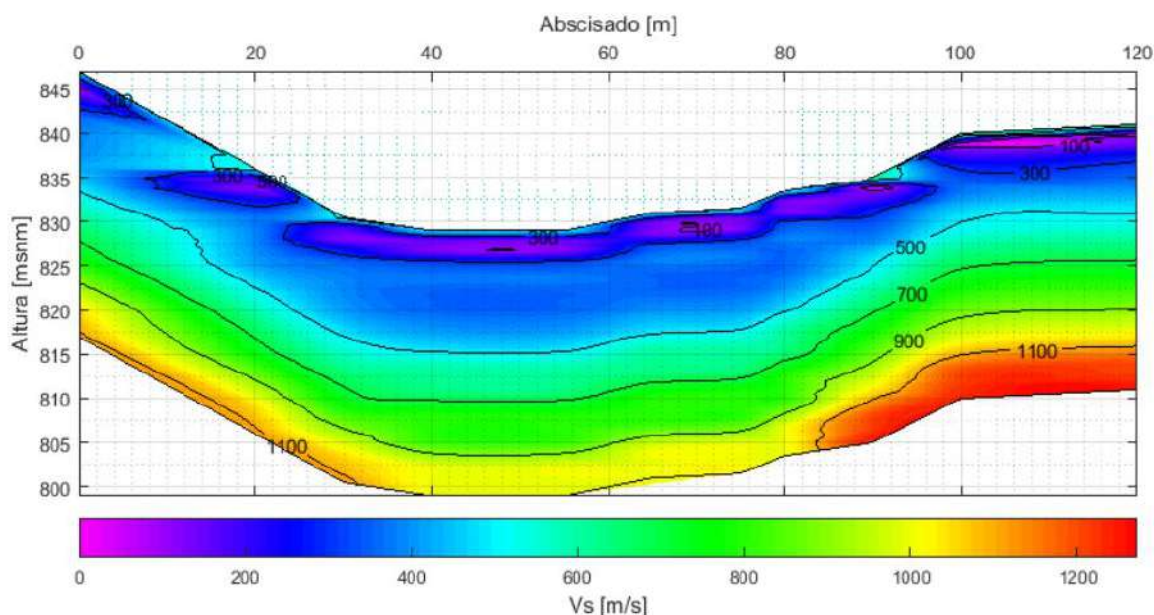


Figura 5.1.1.88 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-028

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXVI. Línea SRG20-029

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.89 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-029. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 520 m/s y un espesor variable entre 1 m y 5 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1830 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 4340 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 5370 m/s.

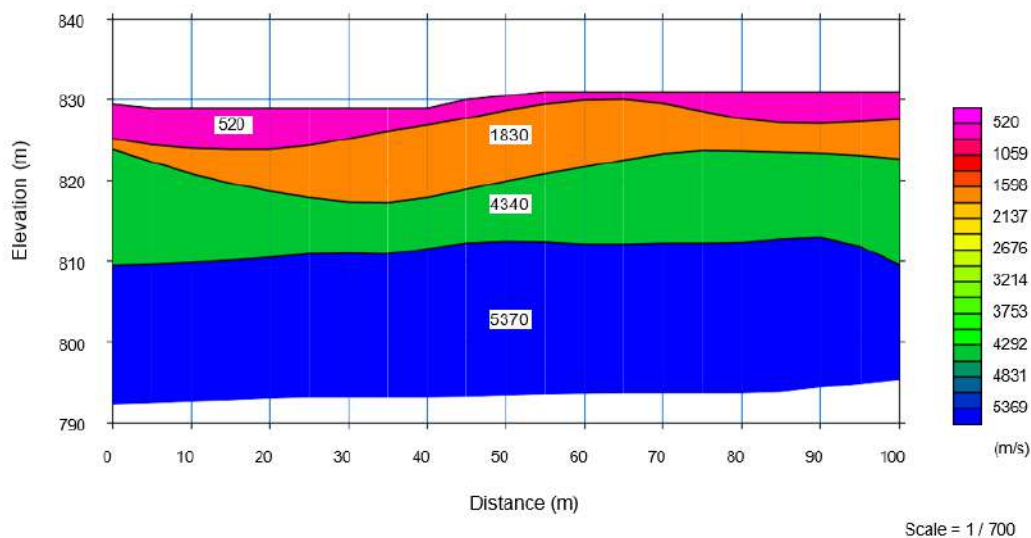


Figura 5.1.1.89 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-029
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.90 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

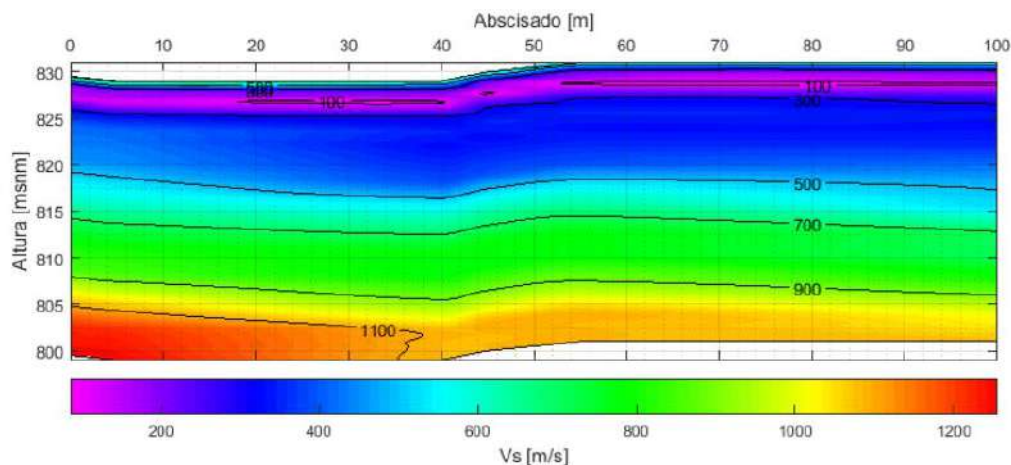


Figura 5.1.1.90 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-029
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXVII. Línea SRG20-030

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.91 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-030. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 500 m/s y un espesor variable entre 1 m y 4 m, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1300 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2540 m/s.

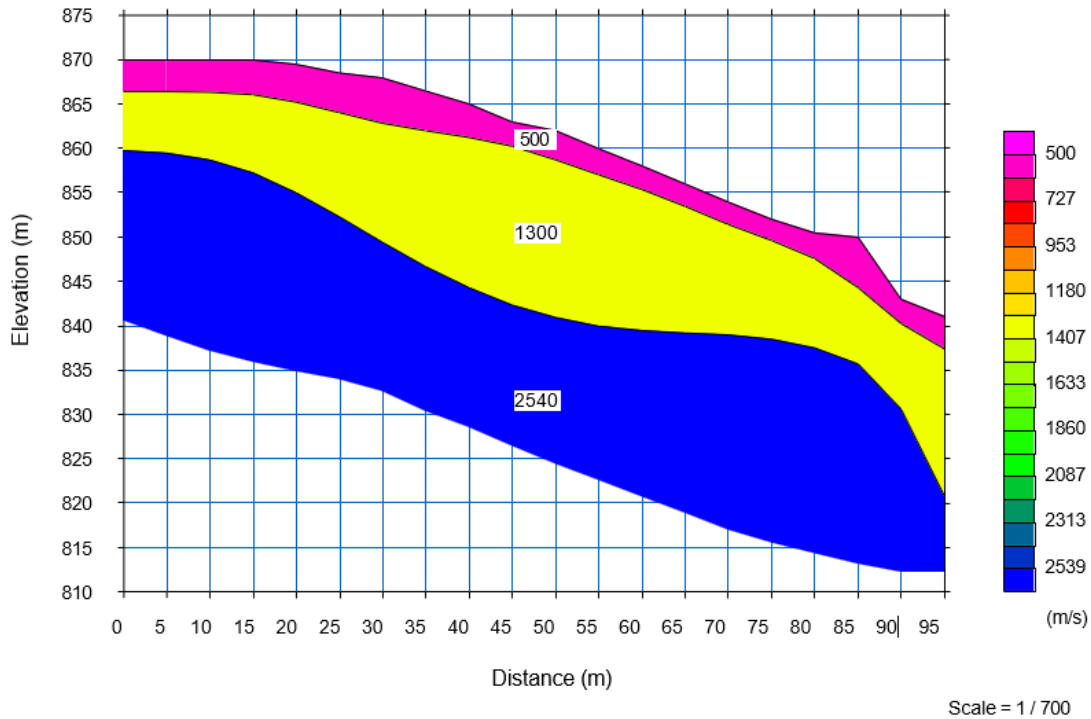


Figura 5.1.1.91 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-030

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.92 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

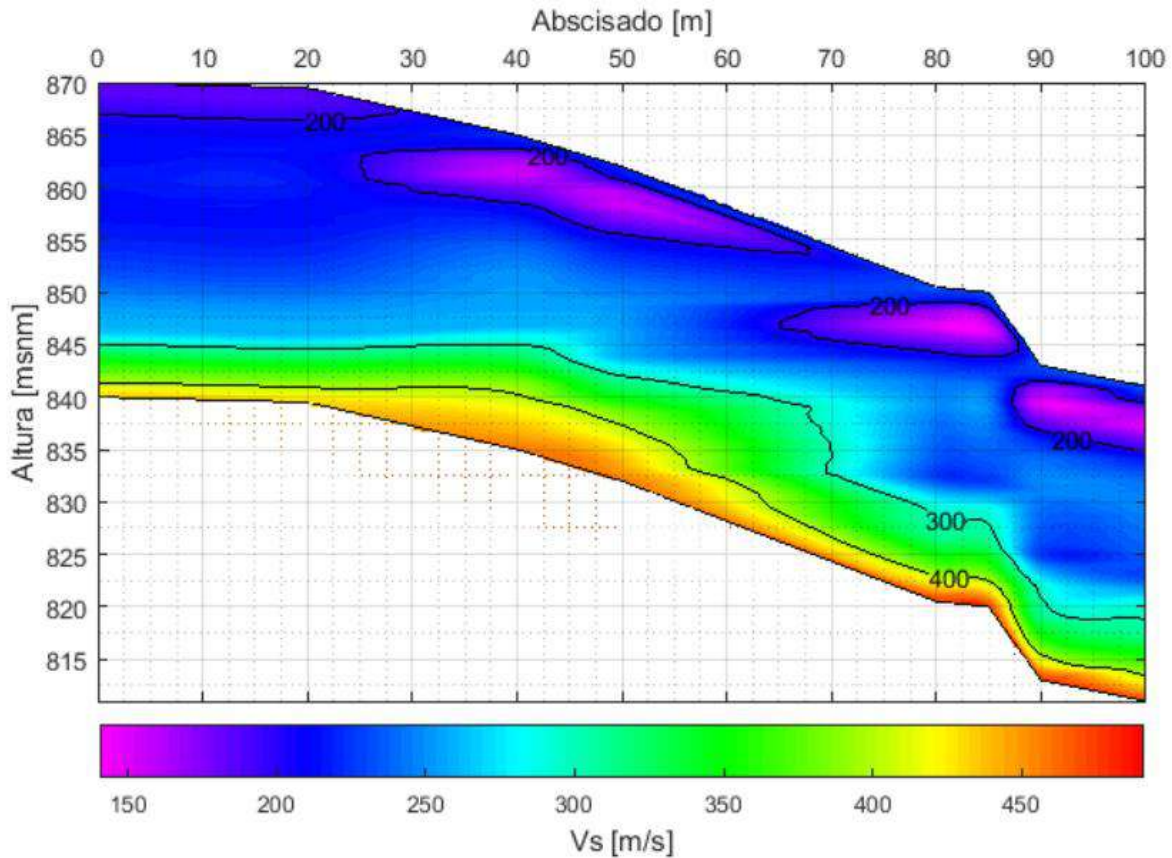


Figura 5.1.1.92 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-030
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXVIII. Línea SRG20-033

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.93 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-033. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 874 m/s y un espesor variable entre 0 m y 3 m, una segunda capa con una velocidad promedio de onda P de 2170 m/s, una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 2993 m/s y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 4195 m/s.

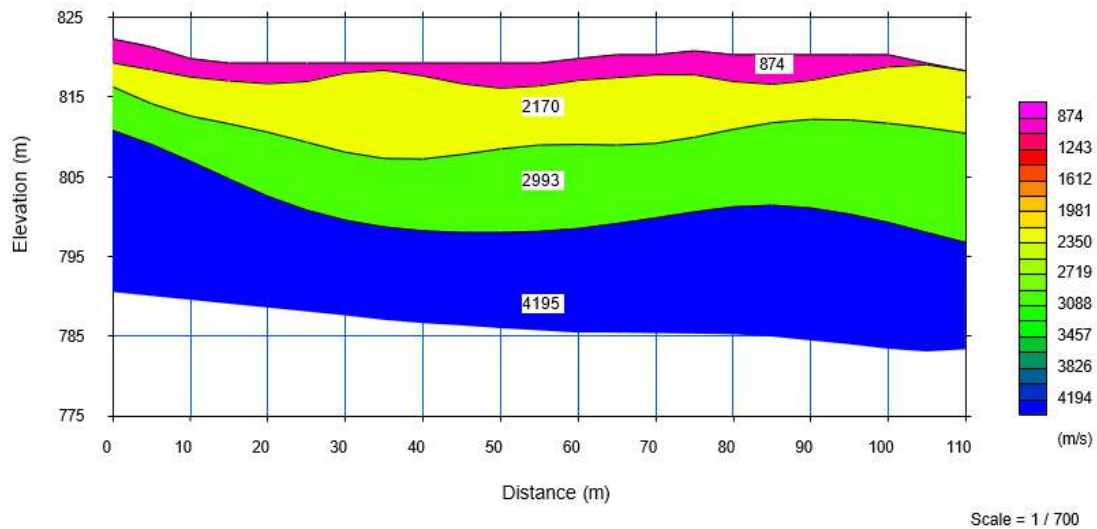


Figura 5.1.1.93 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-033
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.94 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

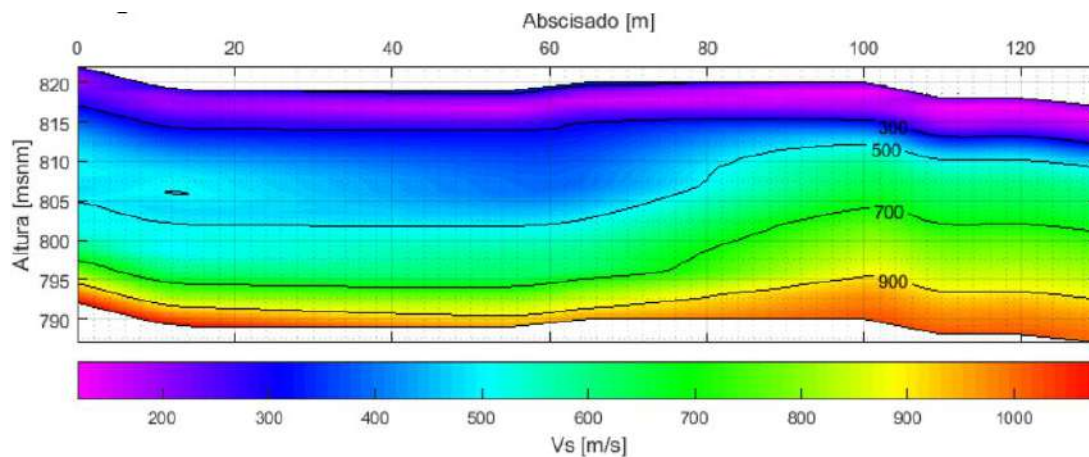


Figura 5.1.1.94 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-033
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XXXIX. Línea SRG20-034

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.95 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-034. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 790 m/s y un espesor variable entre 0 m y 7 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 2340 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 3120 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 5120 m/s.

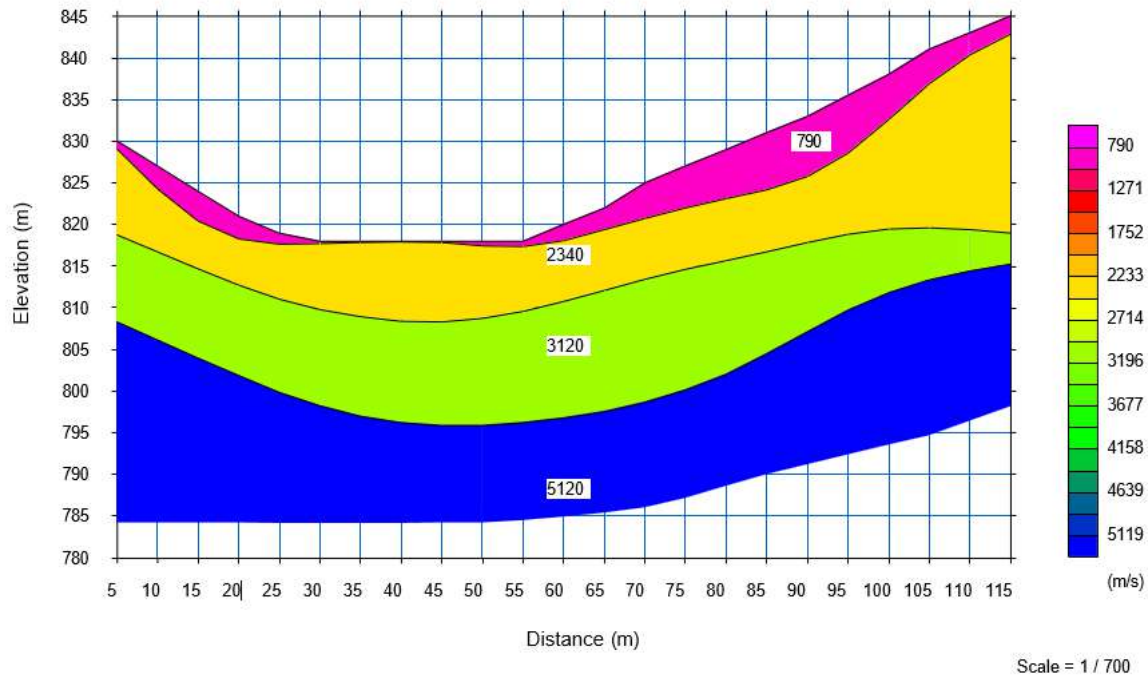


Figura 5.1.1.95 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-034

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.96 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 150 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

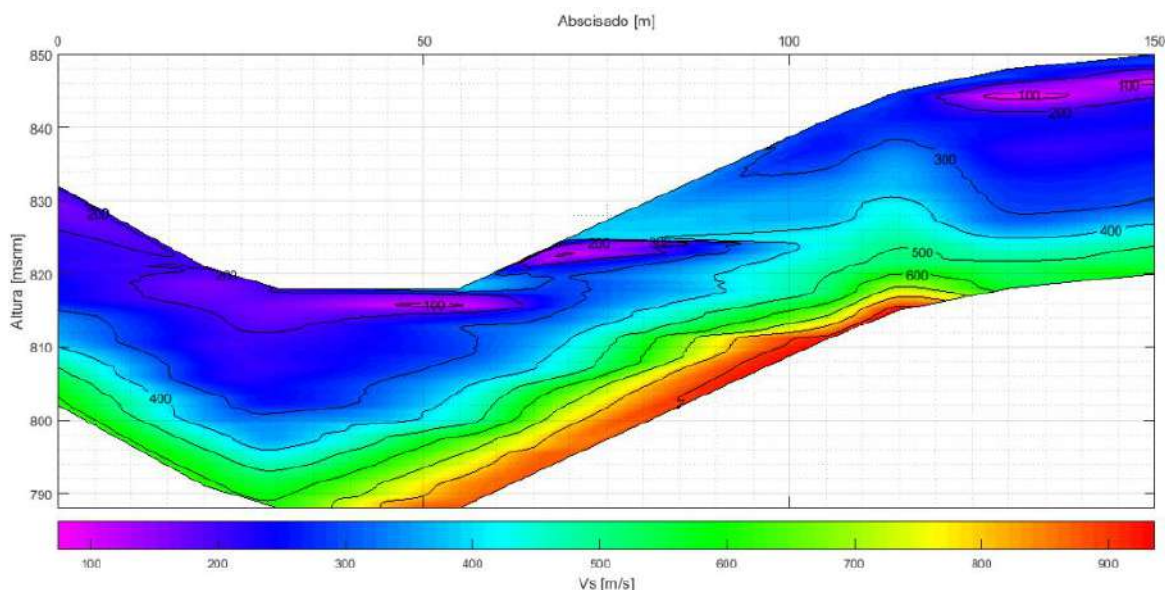


Figura 5.1.1.96 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-034
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XL. Línea SRG20-035

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.97 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-035. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 720 m/s y un espesor variable entre 0 m y 7 m, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1720 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2520 m/s.

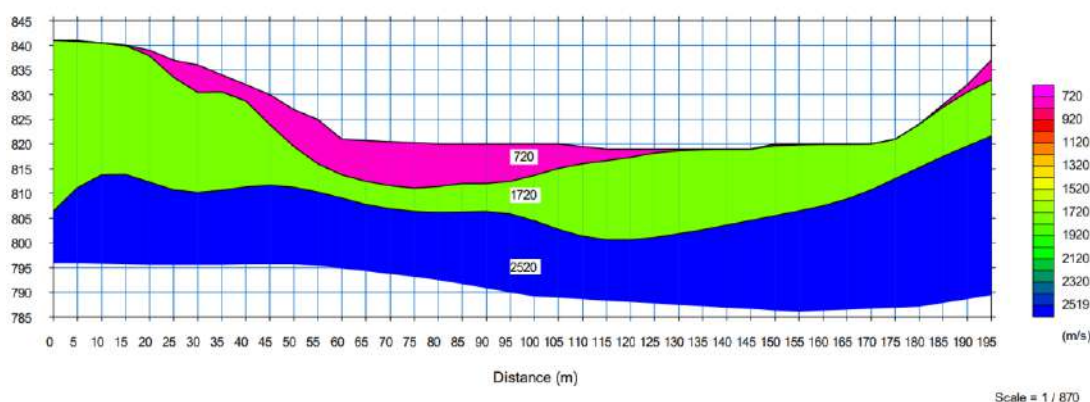


Figura 5.1.1.97 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-035
Fuente: Tomado de (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.98 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 180 m de longitud. El

análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

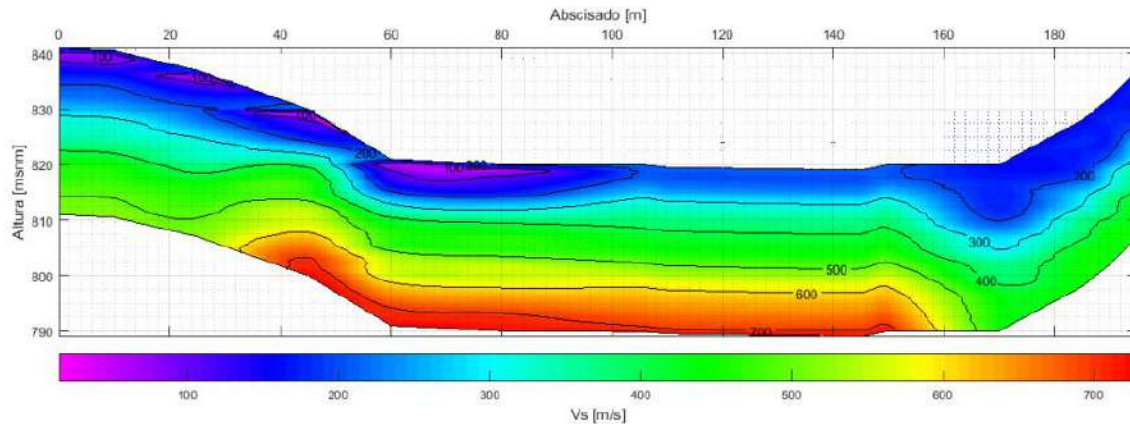


Figura 5.1.1.98 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-035

Fuente: Tomado de (INTEINSA, 2020)

XLI. Línea SRG20-037

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.99 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-037. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 795 m/s y un espesor variable entre 1 m y 6 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1845 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 2445 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 3560 m/s.

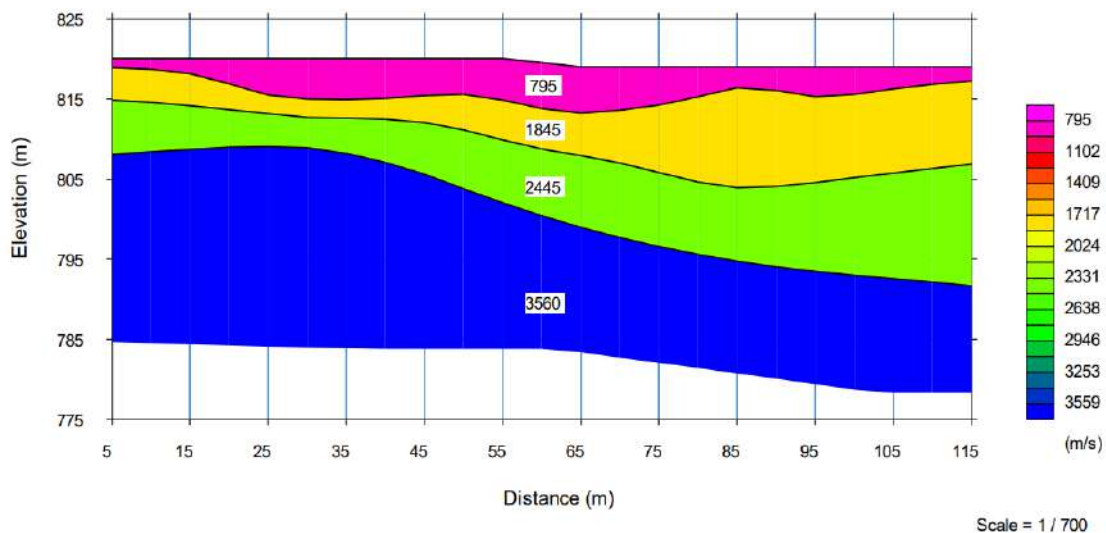


Figura 5.1.1.99 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-037

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.100 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

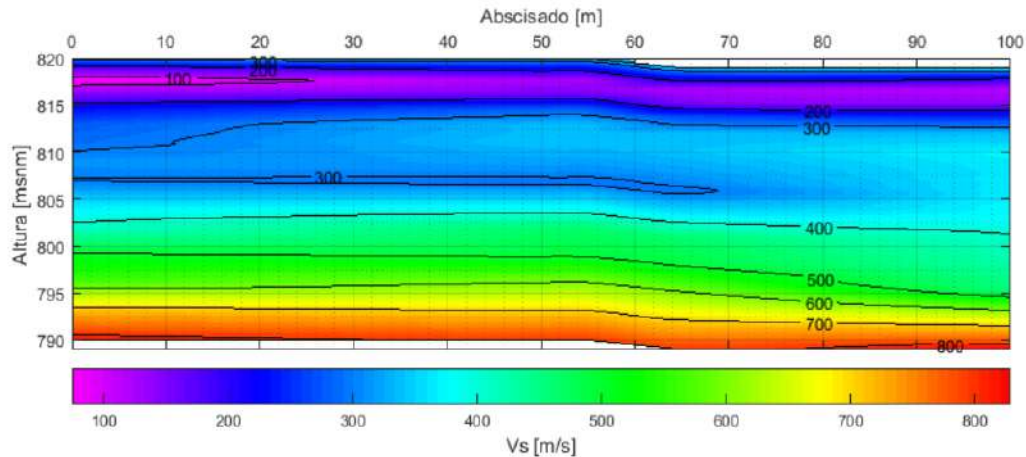


Figura 5.1.1.100 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-037
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XLII. Línea SRG20-039

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.101 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-039. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 590 m/s y un espesor variable entre 2 m y 10 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 780 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1340 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2350 m/s.

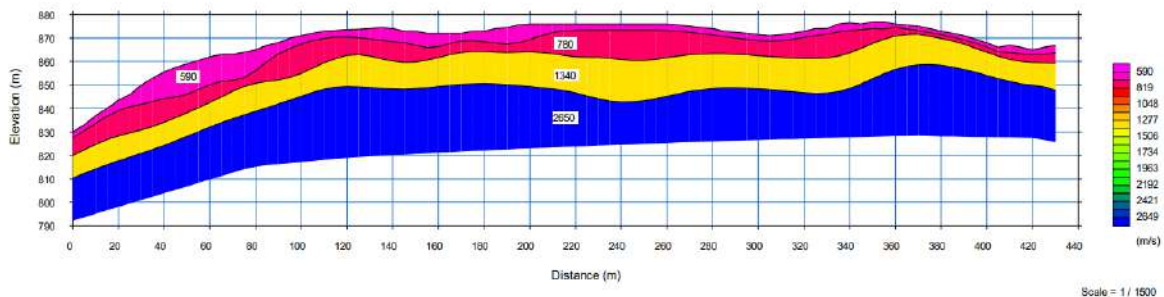


Figura 5.1.1.101 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-039
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.102 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 400 m de longitud. El

análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

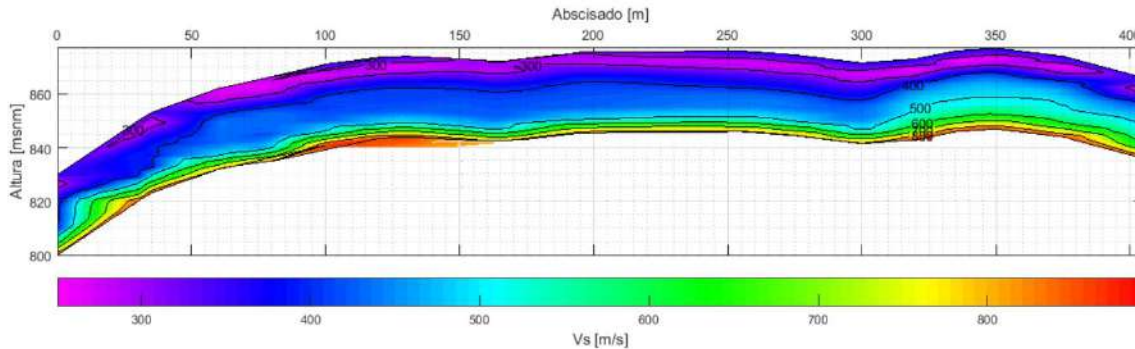


Figura 5.1.1.102 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-039

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XLIII. Línea SRG20-040

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.103 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-040. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 520 m/s y un espesor variable entre 1 m y 5 m, una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 1150 m/s y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 2120 m/s.

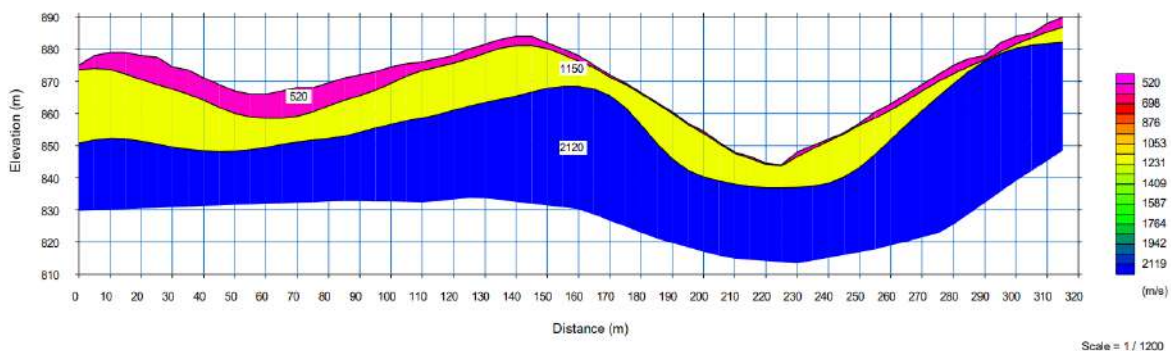


Figura 5.1.1.103 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-040

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.104 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 250 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

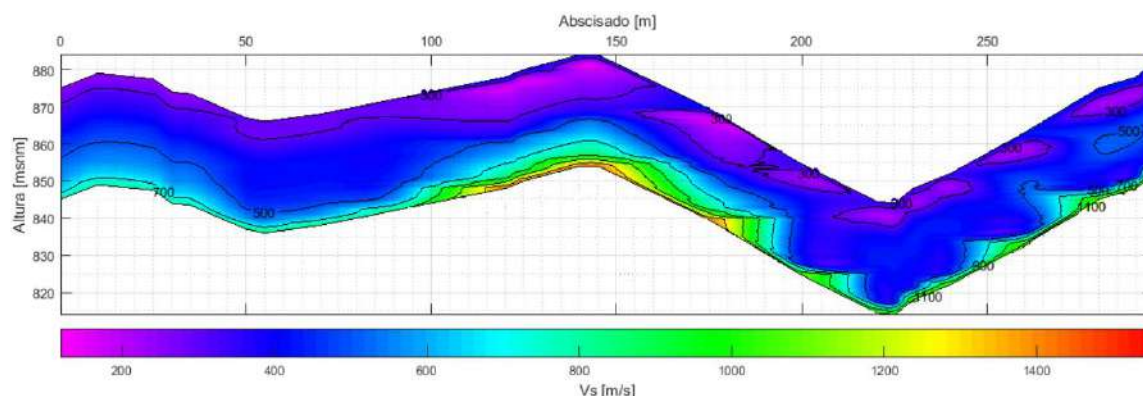


Figura 5.1.1.104 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-040
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XLIV. Línea SRG20-041

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.105 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-041. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad promedio de onda P de 510 m/s y un espesor variable entre 0 m y 10 m, una capa intermedia con una velocidad promedio de onda P de 1190 m/s y una capa más profunda con una velocidad promedio de propagación de onda P de 2440 m/s.

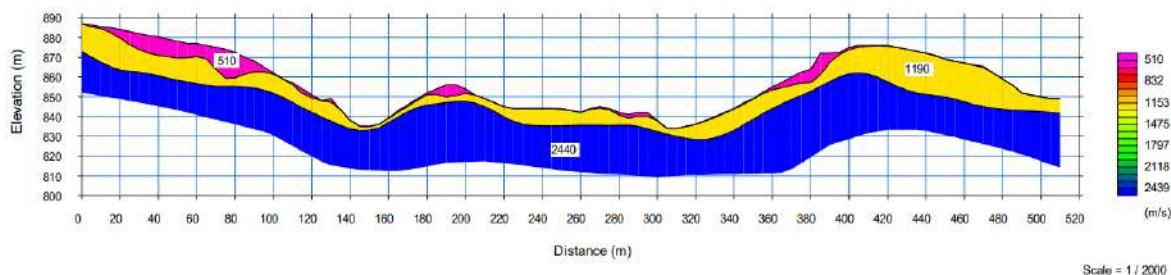


Figura 5.1.1.105 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-041
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.106 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 400 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

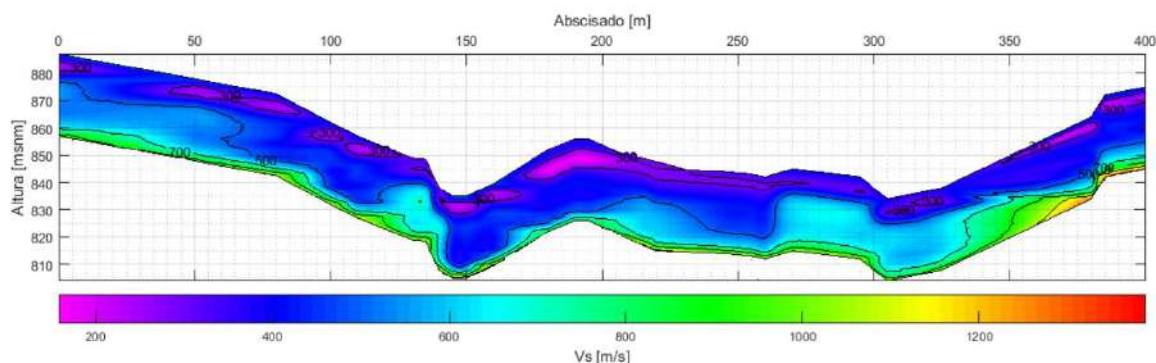


Figura 5.1.1.106 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-041

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XLV. Línea SRG20-042

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.107 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-042. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 560 m/s y un espesor variable entre 1 m y 10 m, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1230 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2760 m/s.

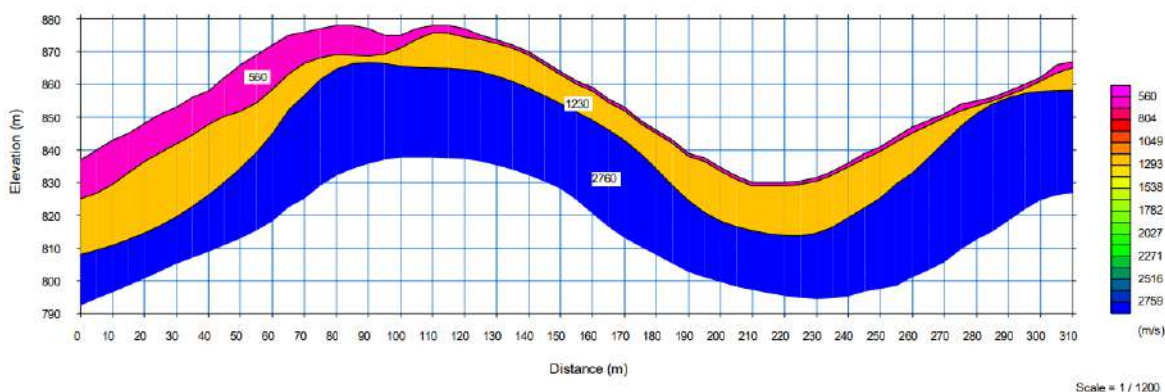


Figura 5.1.1.107 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-042

Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.108 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 300 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

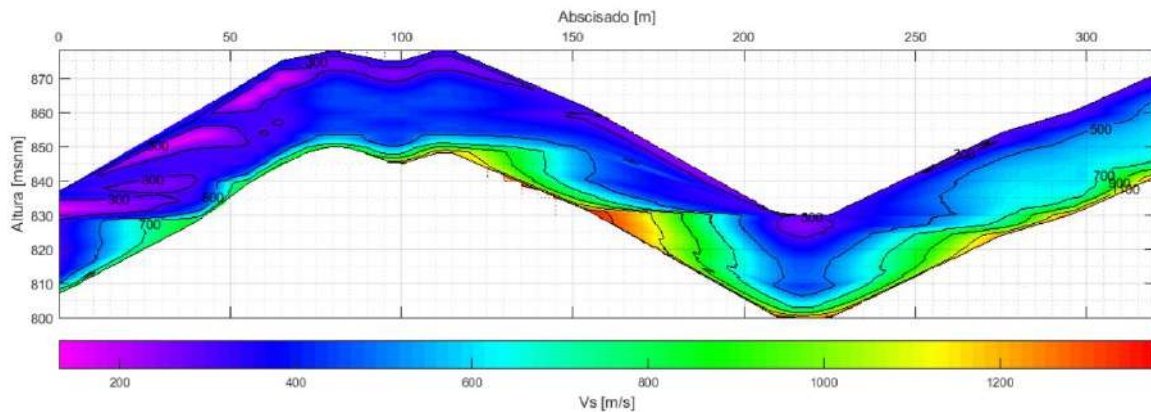


Figura 5.1.1.108 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-042
Fuente: (INTEINSA, 2020)

XLVI. Línea SRG20-043

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.109 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-043. Los resultados indican tres capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 593 m/s y un espesor variable entre 4 m y 9 m, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1579 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2790 m/s.

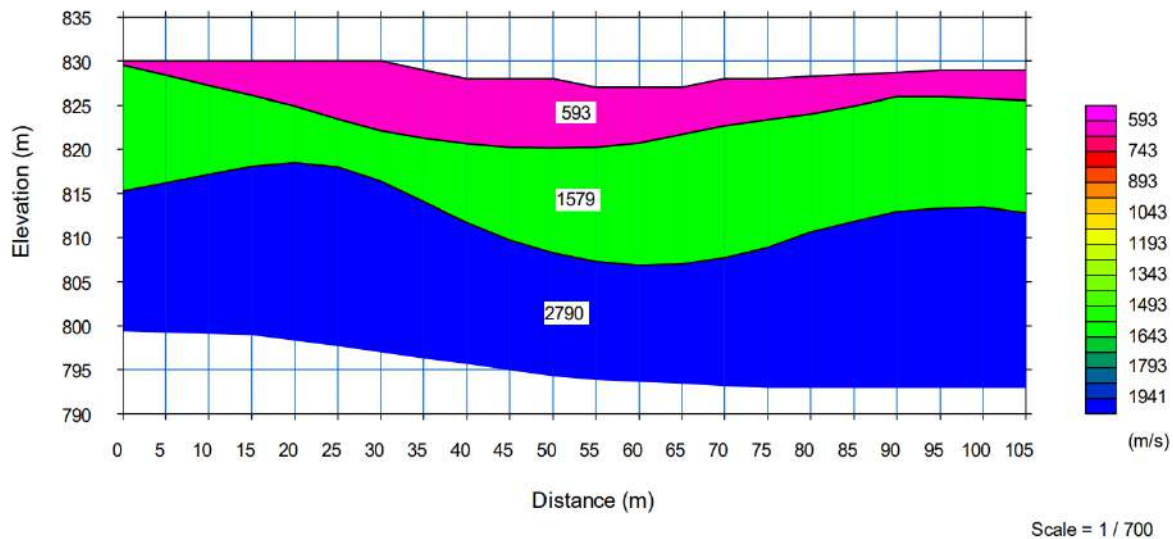


Figura 5.1.1.109 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-043
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.110 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 110 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

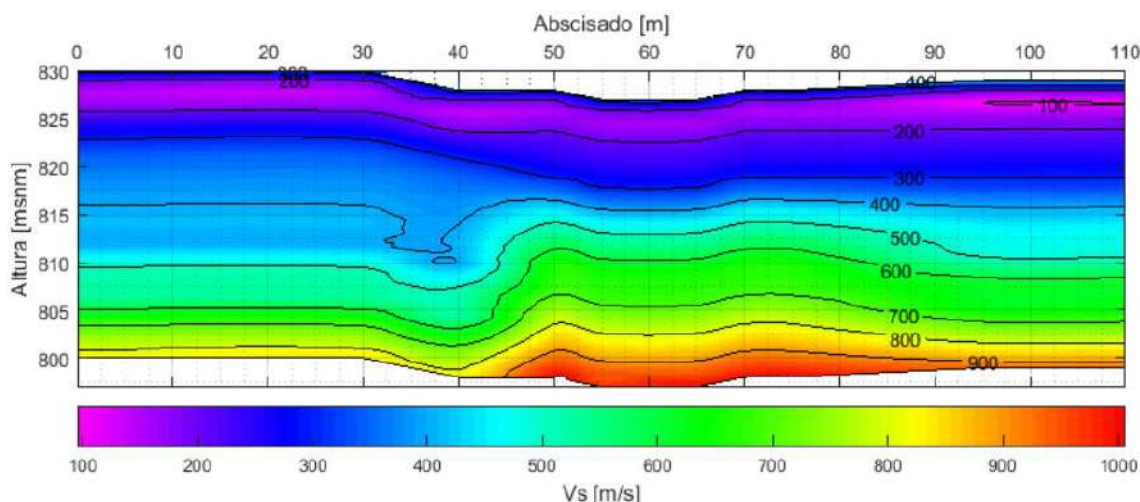


Figura 5.1.1.110 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-043

Fuente: (INTEINSA, 2020)

XLVII. Línea SRG20-044

i. Refracción sísmica

La Figura 5.1.1.111 muestra la distribución de velocidades de ondas longitudinales para la línea sísmica SRG20-044. Los resultados indican cuatro capas de suelo: una capa superficial con una velocidad de onda P promedio de 473 m/s y un espesor variable entre 0 m y 7 m, una segunda capa con una velocidad de onda P promedio de 1180 m/s, una capa intermedia con una velocidad de onda P promedio de 1500 m/s y una capa más profunda con una velocidad de propagación de onda P promedio de 2490 m/s.

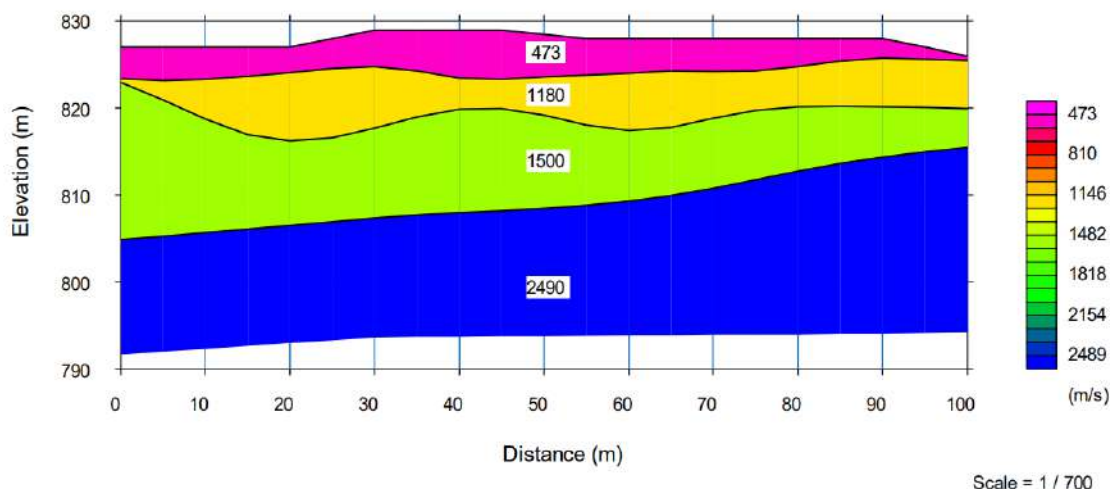


Figura 5.1.1.111 Perfil de velocidad de ondas P de la línea sísmica SRG20-044
Fuente: (INTEINSA, 2020)

ii. MASW

La Figura 5.1.1.112 presenta el perfil 2D del levantamiento MASW con exploración a 30 m de profundidad, según los datos de campo recopilados y más de 100 m de longitud. El análisis de los resultados permite observar una variación significativa en los valores de velocidad de onda de corte (V_s), que reflejan cambios en la rigidez del subsuelo.

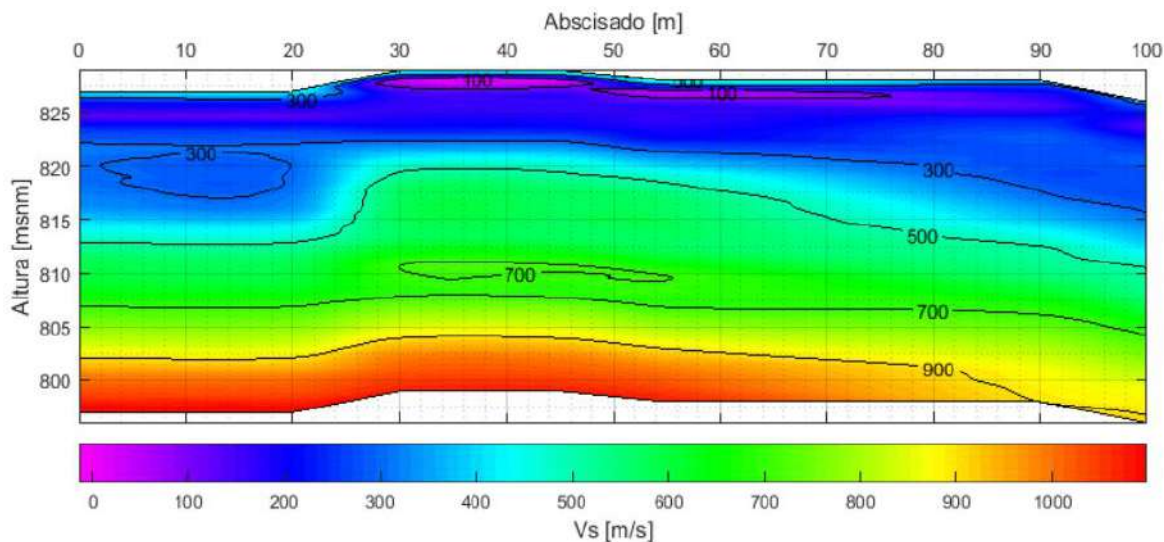


Figura 5.1.1.112 Sección 2D de velocidad de onda de corte en la línea SRG20-044
Fuente: (INTEINSA, 2020)

f. Ensayos de refracción sísmica y MASW INTEINSA, 2025

En la Tabla 5.1.1.7 y Figura 5.1.1.113 se presentan los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo por Inteinsa en el área de estudio del proyecto.

Tabla 5.1.1.7 Localización de las líneas de refracción sísmica Inteinsa

Ensayo	Coordenadas Punto inicial			Coordenadas punto final			Longitud
	Este (m)	Norte (m)	Z	Este (m)	Norte (m)	Z	
Línea 1	4.789.402,58	2.277.694,68	865	4.789.462,18	2.277.590,43	884	115
Línea 2	4.789.600,90	2.277.515,87	880	4.789.496,65	2.277.456,27	857	115
Línea 3	4.789.640,27	2.277.606,73	881	4.789.699,86	2.277.502,47	852	115
Línea 4	4.789.223,64	2.277.465,35	848	4.789.305,01	2.277.555,05	858	115

Fuente: Inteinsa, 2025

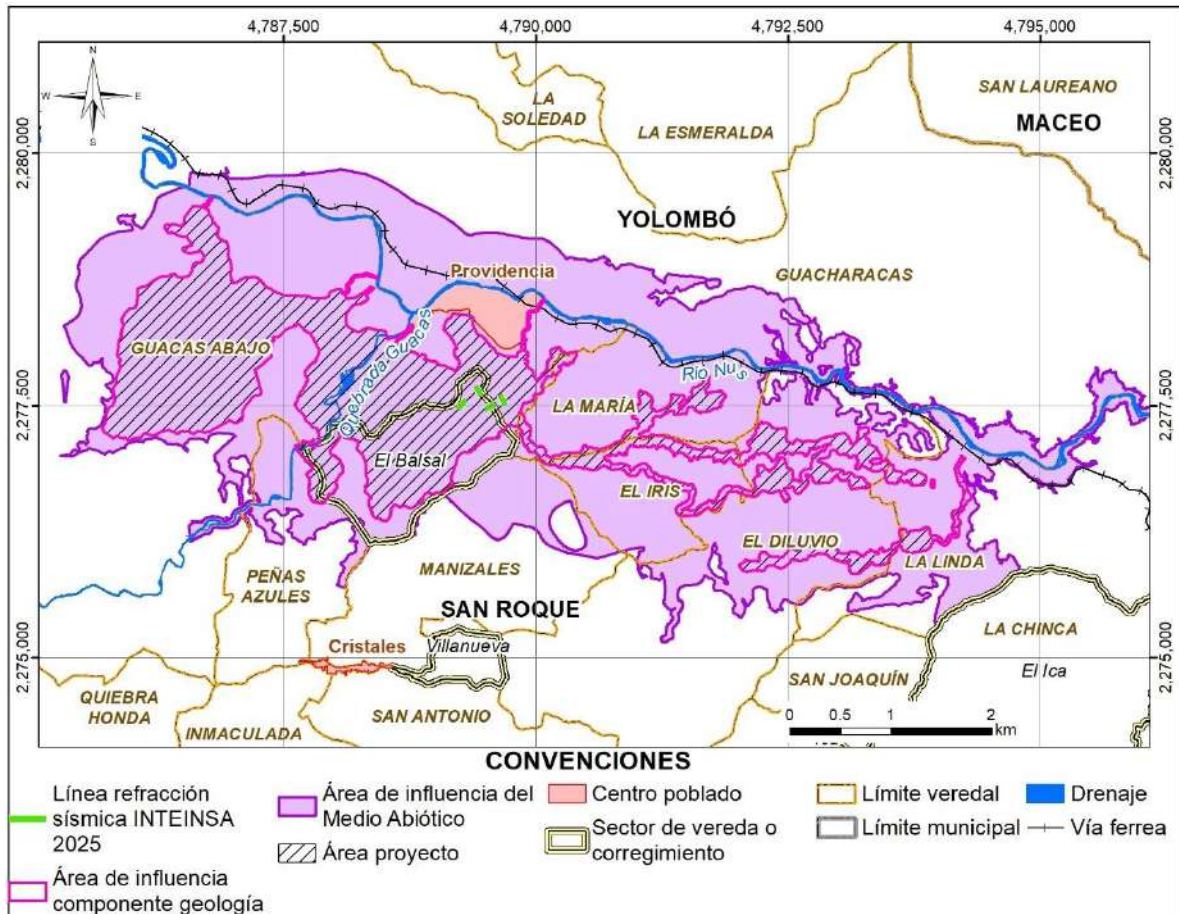


Figura 5.1.1.113 Localización en planta de los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo en el área de interés del proyecto por INTEINSA 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Inteinsa, 2025

I. Resultados Línea 1

i. Línea de refracción sísmica LRS-1

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG25-003B, muestran una estratigrafía compuesta por cuatro horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de

meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV) y roca parcialmente meteorizada a masiva (III-II).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 388 m/s para el suelo residual, 944 m/s para el saprolito, 1202 m/s para la zona de transición, y 1975 m/s para el horizonte rocoso.

La Figura 5.1.1.114 muestra la distribución metro a metro de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

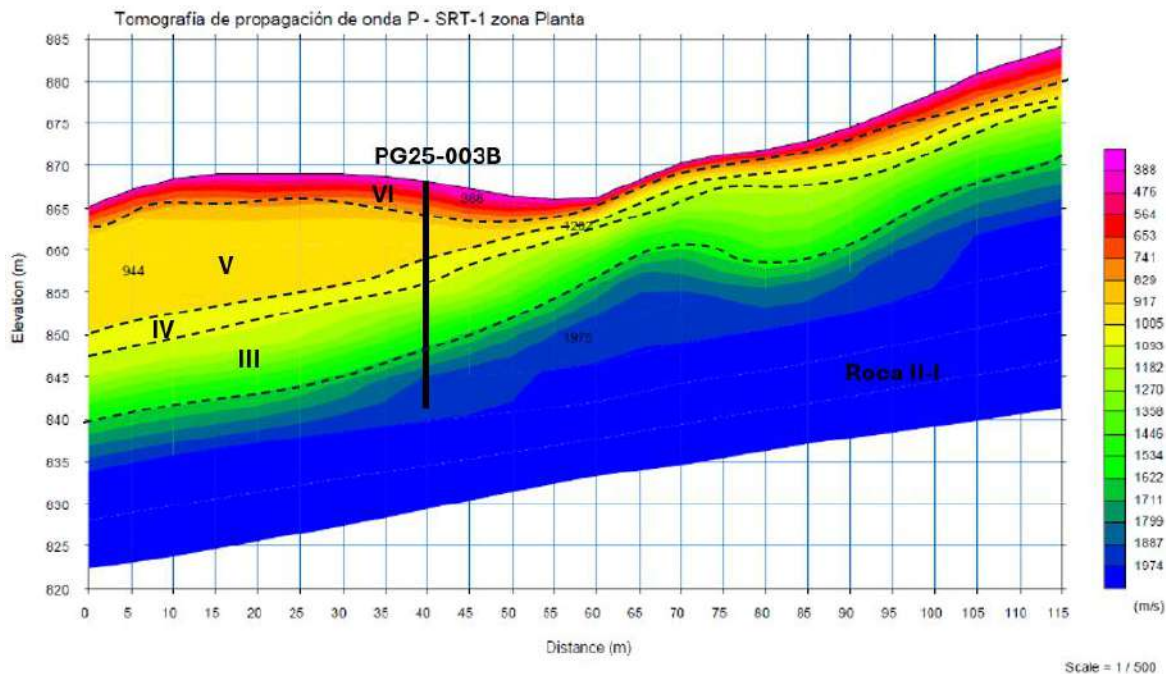


Figura 5.1.1.114 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-1

Fuente: Modificado de Inteinsa, 2025

ii. Ensayo MASW-1

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOFISICA, se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.1.115, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-1, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona. La velocidad promedio de la onda S para la línea 1 es de 468 m/s.

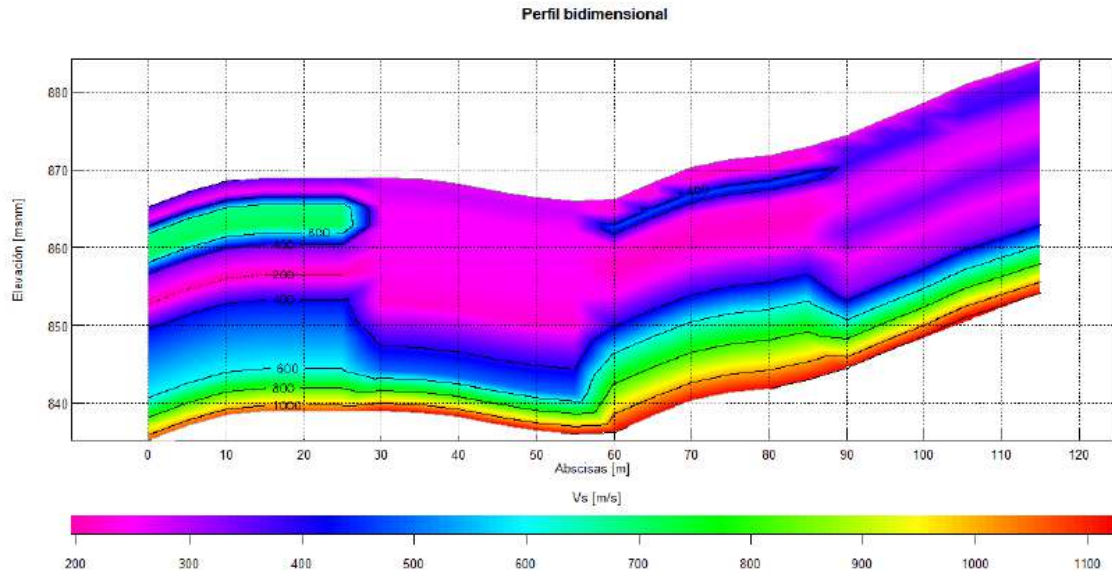


Figura 5.1.1.115 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-1
Fuente: Inteinsa, 2025

II. Resultados Línea 2

i. Línea de refracción sísmica LRS-2

Los resultados obtenidos muestran una estratigrafía compuesta por cuatro horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV) y roca parcialmente meteorizada a masiva (III–II).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 427 m/s para el suelo residual, 998 m/s para el saprolito, 1427 m/s para la zona de transición, y 1855 m/s para el horizonte rocoso.

La Figura 5.1.1.114 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

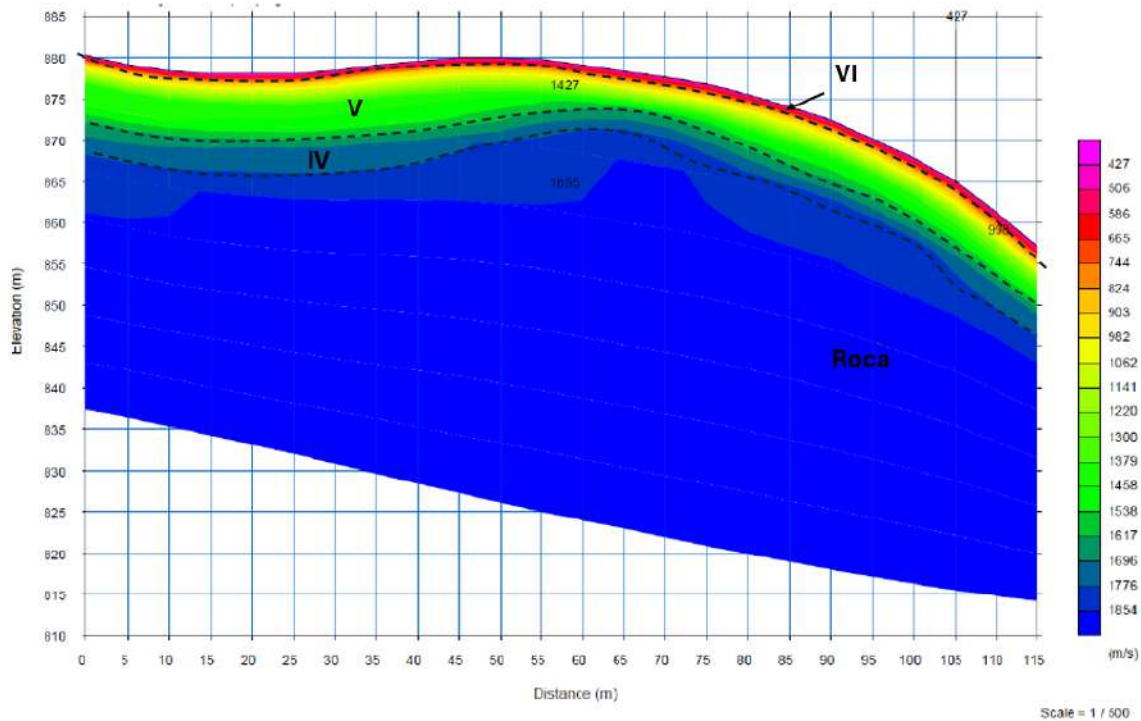


Figura 5.1.1.116 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-2

Fuente: Modificado de Inteinsa, 2025

ii. Ensayo MASW-2

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOFISICA, se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.1.117, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-2, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona. La velocidad de onda S promedio para la Línea 2 es de 312 m/s.

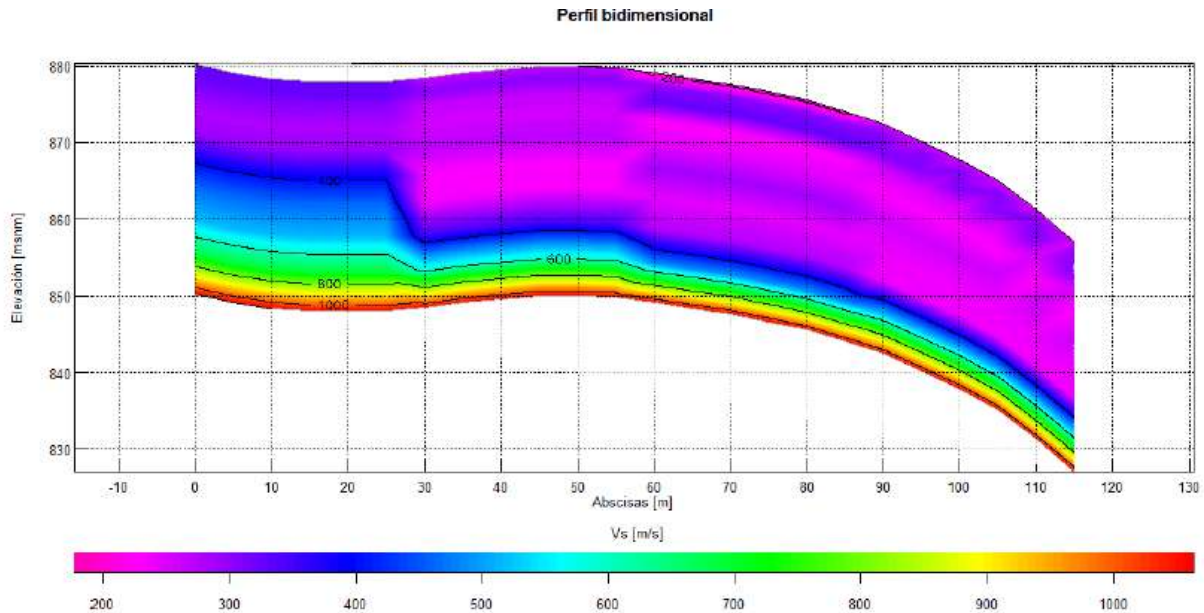


Figura 5.1.1.117 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-2

Fuente: Inteinsa, 2025

III. Resultados Línea 3

i. Línea de refracción sísmica LRS-3

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG24-018, muestran una estratigrafía compuesta por cinco horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV), roca moderadamente meteorizada (III) y roca poco meteorizada a masiva (II - I).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 370 m/s para el suelo residual, 579 m/s para el saprolito, 927 m/s para la zona de transición, 1137 m/s para el horizonte roca tipo III y 1416 m/s para el horizonte rocoso tipo II-I.

La Figura 5.1.1.118 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

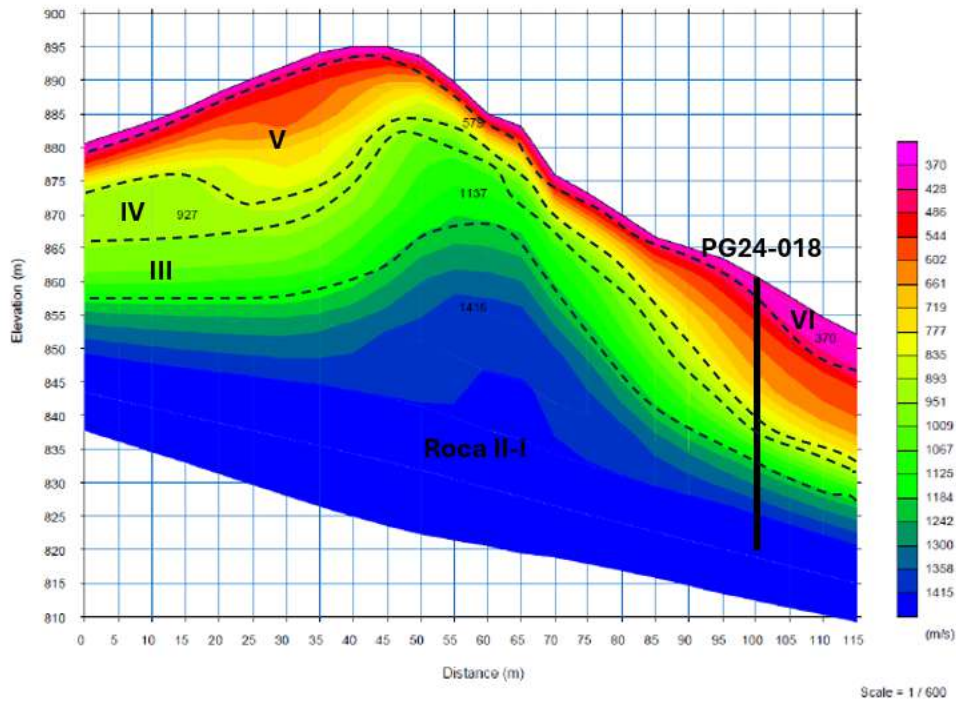


Figura 5.1.1.118 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-3

Fuente: Modificado de Inteinsa, 2025

ii. Ensayo MASW-3

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en EL ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOFISICA), se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.1.119, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-3, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo. La velocidad promedio de la onda S para la línea 3 es de 504 m/s.

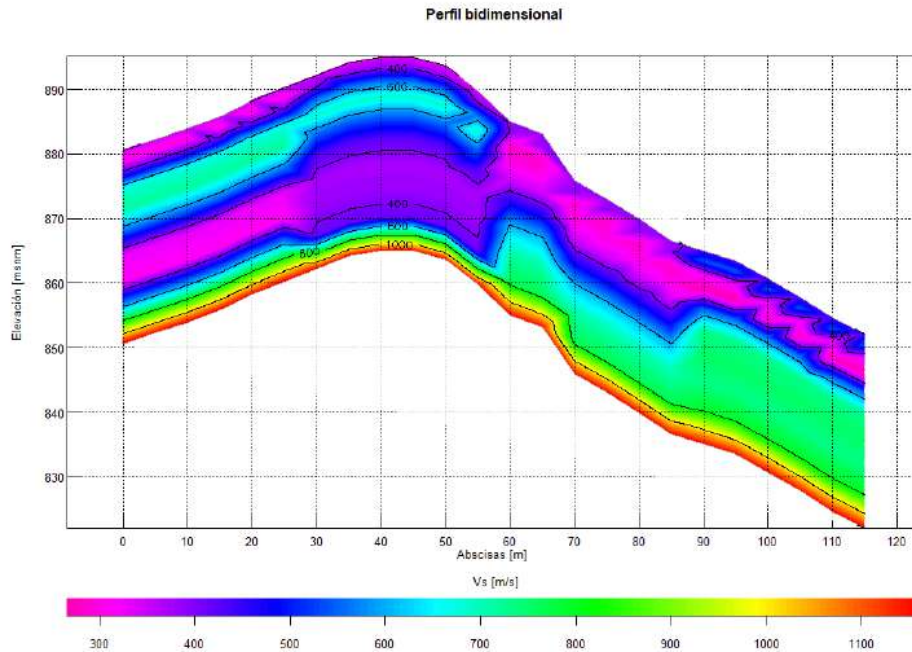


Figura 5.1.1.119 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-3

Fuente: Inteinsa, 2025

IV. Resultados Línea 4

i. Línea de refracción sísmica LRS-4

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG25-001B, muestran una estratigrafía compuesta por cinco horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV), roca moderadamente meteorizada – III y roca poco meteorizada a masiva (II - I).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 353 m/s para el suelo residual, 809 m/s para el saprolito y la transición, 1113 m/s para la zona de roca tipo III, y 1315 m/s para la roca poco meteorizada (II - I).

La Figura 5.1.1.120 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

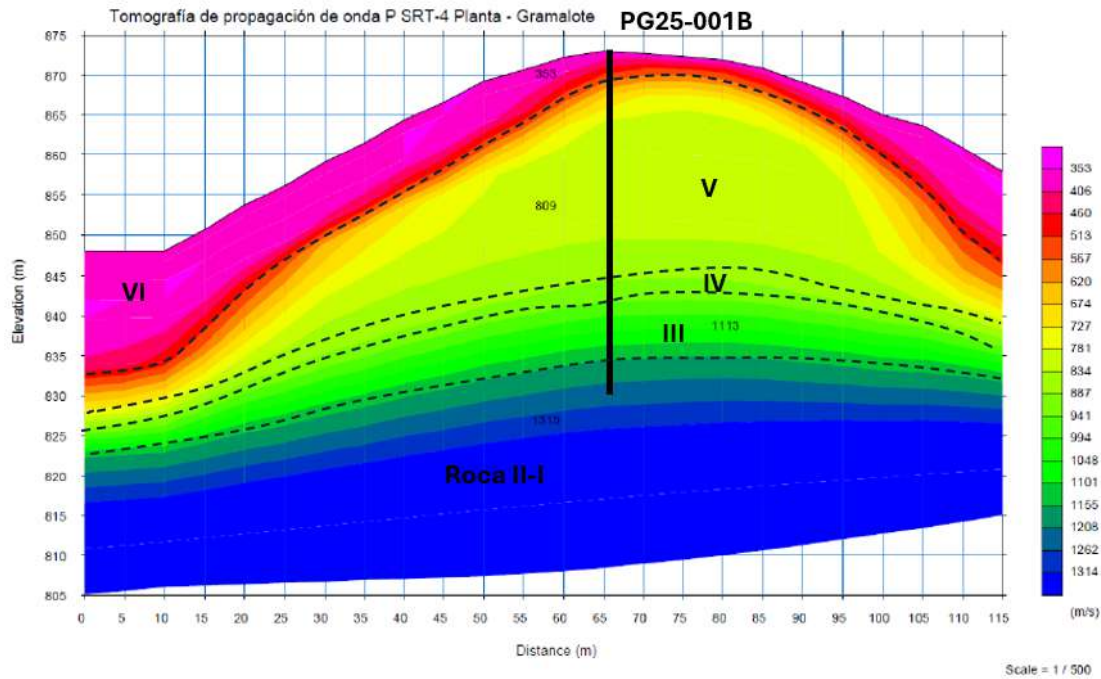


Figura 5.1.1.120 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-4

Fuente: Modificado de Inteinsa, 2025

ii. Ensayo MASW-4

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOFISICA, se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.1.121, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-4, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona.

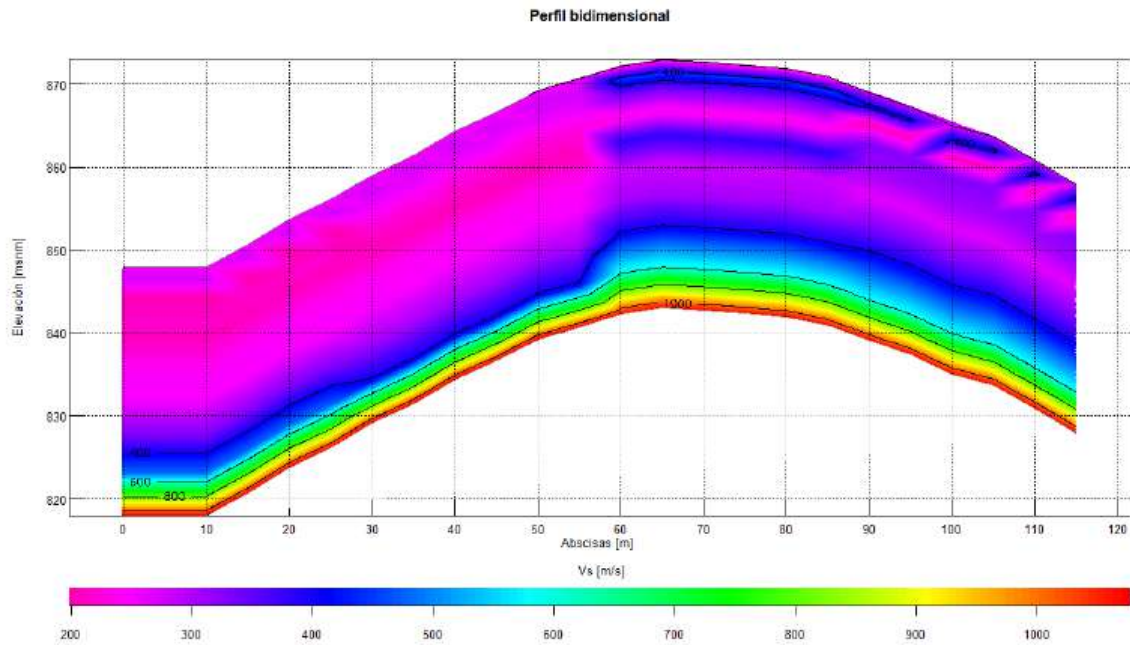


Figura 5.1.1.121 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-4

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad promedio de la onda S para la línea 4 es de 304 m/s.

B. Campañas de exploración directa

A continuación, se presenta la información asociada a las campañas de exploración directa realizada desde el año 2012 hasta el año 2025, en inmediaciones del área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote.

La ubicación de las perforaciones geotécnicas se puede observar en la Figura 5.1.1.122 en donde se diferencian las campañas de exploración realizada durante los años. En la Tabla 5.1.1.8 se presenta las características generales de las perforaciones y en el ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_PLANOS se presentan los diferentes perfiles estratigráficos asociados a las obras objeto de modificación, así como la geología en planta correspondiente.

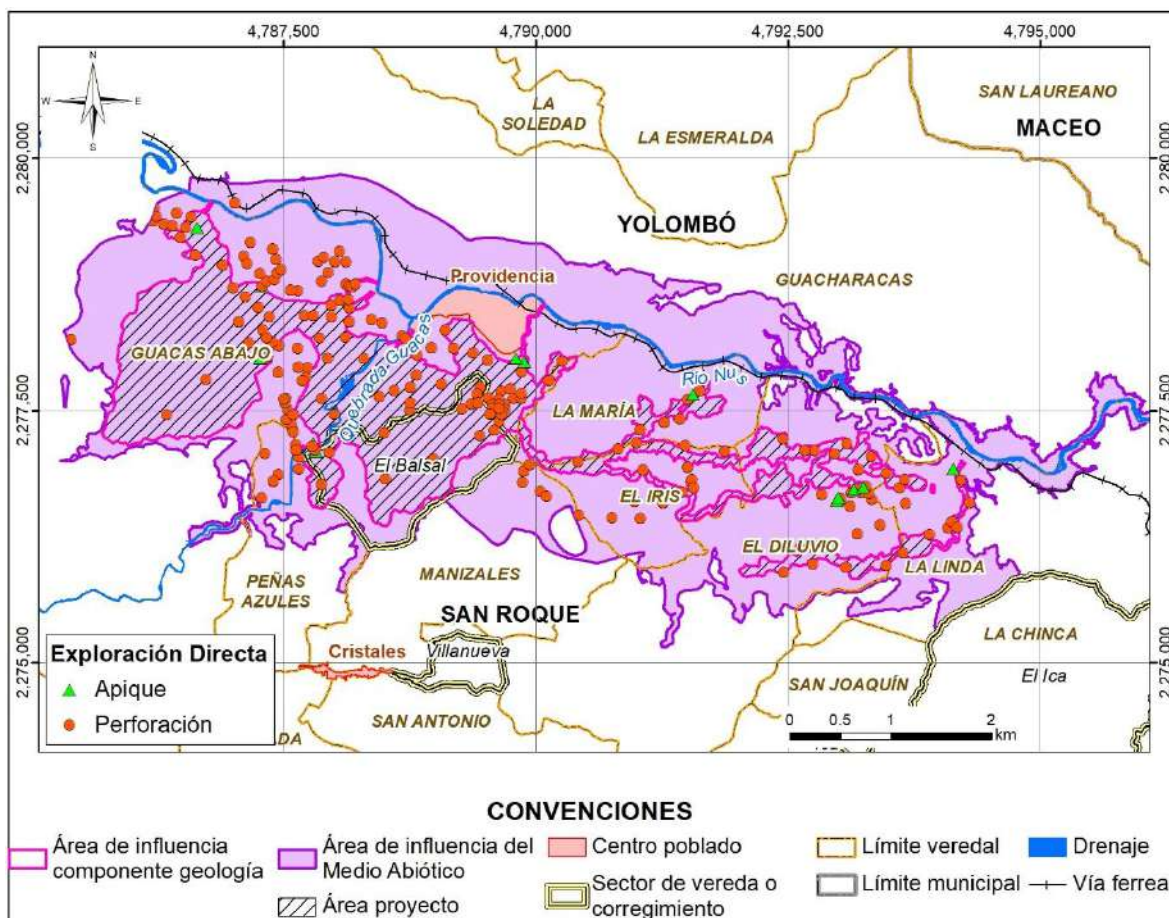


Figura 5.1.1.122 Ubicación de la exploración geológica en la zona de Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote

Fuente: Integral S.A., 2025

Tabla 5.1.1.8 Sondeos ejecutados entre los años 2012 y 2025

ID	Año	Tipo	Campaña	ESTE	NORTE
DH-DS-03	2021	Perforación	Integral S.A.	4.792.961,62	2.277.067,51
DH-DS-06	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.535,32	2.276.791,11
DH-DS-07	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.548,43	2.276.816,06
DH-HGS-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.369,20	2.278.397,81
DH-SD-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.131,12	2.276.683,79
DH-SD-03	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.226,12	2.276.679,41
DH-SD-04	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.331,87	2.276.613,98
DH-SD-04A	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.304,12	2.276.678,10
DH-SD-06	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.571,54	2.276.521,02
DH-SD-07	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.666,77	2.276.576,65
DH-SD-08	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.199,04	2.276.913,55
DH-SD-09	2021	Perforación	Integral S.A.	4.792.961,62	2.277.067,51

ID	Año	Tipo	Campaña	ESTE	NORTE
DH-SP-03	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.527,53	2.279.315,34
DH-SP-05	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.859,40	2.277.883,90
DH-SP-06	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.506,54	2.277.605,34
DH-SP-07	2021	Perforación	Integral S.A.	4.794.218,75	2.276.805,50
DH-ST-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.792.836,00	2.276.663,95
GG-AP-01	2013//2012	Apique	Knighth Piésold	4.787.821,93	2.277.089,84
GG-AP-02	2012	Apique	Knighth Piésold	4.787.793,24	2.277.168,96
GG-PP-01	2013	Perforación	Knighth Piésold	4.787.808,99	2.277.103,89
GG-PP-02	2014	Perforación	Knighth Piésold	4.787.782,15	2.277.146,00
I-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.452,49	2.277.729,49
I-03	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.650,23	2.276.918,49
I-04	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.496,77	2.277.274,20
I-06	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.974,25	2.278.427,45
I-07	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.651,68	2.277.033,50
I-102	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.038,30	2.277.308,15
I-103	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.064,71	2.276.905,99
I-104	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.443,83	2.277.251,45
I-106	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.937,61	2.278.014,53
I-118	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.150,63	2.278.515,77
I-15	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.421,95	2.276.990,54
I-19	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.703,66	2.278.439,93
I-17	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.819,09	2.277.847,01
I-22	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.187,21	2.278.115,60
I-24	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.521,80	2.277.999,26
I-26	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.609,37	2.276.729,90
I-27	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.585,07	2.277.304,90
I-32	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.291,67	2.278.015,13
I-50	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.377,05	2.278.067,84
I-52	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.111,46	2.278.220,88
I-59	2021	Perforación	Integral S.A.	4.794.085,87	2.276.333,97
I-57	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.641,83	2.276.086,69
I-72	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.327,55	2.277.037,06
I-74	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.475,93	2.276.876,45
I-75	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.364,05	2.277.561,81
I-83	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.271,62	2.277.382,24
I-84	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.271,62	2.277.382,24
I-92	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.824,89	2.278.049,02
I-96	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.854,40	2.278.216,89
LYCO-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.792.766,72	2.277.100,28
LYCO-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.126,09	2.277.794,83
PG20-019	2020	Perforación	Golder	4.790.259,86	2.277.985,33

ID	Año	Tipo	Campaña	ESTE	NORTE
PG20-033	2020	Perforación	Golder	4.789.100,90	2.278.292,97
PG20-036	2020	Perforación	Golder	4.787.793,26	2.278.436,17
PG20-053	2020	Perforación	Golder	4.787.876,64	2.276.761,57
PG20-056	2020	Perforación	Golder	4.794.123,11	2.276.393,83
PG20-063	2020	Perforación	Golder	4.787.620,16	2.277.155,65
PG20-067	2020	Perforación	Golder	4.787.452,04	2.278.142,48
PG20-068	2020	Perforación	Golder	4.787.951,92	2.277.081,32
PG20-069	2020	Perforación	Golder	4.792.454,90	2.275.891,35
PG20-070	2020	Perforación	Golder	4.793.072,18	2.275.940,92
PG20-072	2020	Perforación	Golder	4.794.303,88	2.276.583,14
PG20-094A	2020	Perforación	Golder	4.792.450,14	2.277.216,55
PG20-097	2020	Perforación	Golder	4.792.668,71	2.277.101,67
PG20-100	2020	Perforación	Golder	4.791.623,92	2.277.695,89
PG20-107	2020	Perforación	Golder	4.788.150,08	2.278.377,75
PG20-116	2020	Perforación	Golder	4.787.386,18	2.278.180,74
PG20-117	2020	Perforación	Golder	4.787.623,97	2.277.107,62
PG20-121	2020	Perforación	Golder	4.788.675,63	2.278.240,65
PG20-122	2020	Perforación	Golder	4.788.704,53	2.278.214,53
PG25-001B	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.270,14	2.277.510,62
PG25-003B	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.418,14	2.277.659,21
PG24-005	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.653,45	2.277.689,71
PG24-006	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.748,54	2.277.710,06
PG24-008	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.780,36	2.277.616,68
PG24-009	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.859,88	2.277.615,11
PG24-010	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.860,08	2.277.665,12
PG24-013	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.689,62	2.277.555,77
PG24-015B	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.424,63	2.277.574,15
PG24-018	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.689,47	2.277.515,77
PG24-020	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.629,30	2.277.476,00
PG24-021	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.689,31	2.277.475,76
PG24-024	2024	Perforación	Integral S.A.	4.789.632,02	2.277.607,60
PG25-025	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.637,93	2.277.394,52
PG24-026	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.661,90	2.277.460,51
PG25-004B	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.527,86	2.277.623,69
PG25-011	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.569,61	2.277.556,25
PG25-012	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.629,62	2.277.556,01
PG25-016	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.569,45	2.277.516,24
PG25-017	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.629,46	2.277.516,01
PG25-019B	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.542,10	2.277.465,48
TG25-BH-07	2025	Perforación	Integral S.A.	4.788.748,15	2.277.502,54
TP-SD-02	2021	Apique	Integral S.A.	4.791.144,76	2.276.661,63

ID	Año	Tipo	Campaña	ESTE	NORTE
TP-SP-03	2021	Apique	Integral S.A.	4.786.640,53	2.279.309,89
TP-SP-04	2021	Apique	Integral S.A.	4.787.284,34	2.278.730,24
TP-SP-05	2021	Apique	Integral S.A.	4.787.267,49	2.278.012,19
TP-SP-06	2021	Apique	Integral S.A.	4.789.883,79	2.277.980,82
TP-SP-07	2021	Apique	Integral S.A.	4.789.799,91	2.278.014,16
TP-SP-08	2021	Apique	Integral S.A.	4.787.332,80	2.278.087,94
TP-SP-09	2021	Apique	Integral S.A.	4.791.556,76	2.277.658,15
TP-SP-10	2021	Apique	Integral S.A.	4.794.142,19	2.276.918,82
PG20-115	2020	Perforación	Golder	4.787.329,32	2.278.217,97
TG25-BH-04	2025	Perforación	Integral S.A.	4.788.987,00	2.277.015,00
I-61	2021	Perforación	Integral S.A.	4.792.746,27	2.275.975,21
TP-20-13	2020	Apique	Golder	4.792.254,23	2.277.248,33
TP-20-14	2020	Apique	Golder	4.792.254,23	2.277.144,35
I-23	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.963,56	2.278.117,49
I-79	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.878,50	2.276.897,68
DH-DS-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.427,78	2.277.415,62
DH-DS-04	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.479,73	2.277.149,38
DH-DS-05	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.504,88	2.276.932,25
DH-HGS-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.477,08	2.278.364,45
DH-PP-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.284,34	2.278.730,24
DH-PP-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.262,84	2.278.856,35
DH-PP-03	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.332,54	2.278.779,06
DH-PP-04	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.408,63	2.278.797,76
DH-PP-05	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.432,88	2.278.861,67
DH-PP-06	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.471,03	2.278.896,53
DH-PP-07	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.247,51	2.278.522,35
DH-SD-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.116,60	2.276.550,83
DH-SD-05	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.504,88	2.276.932,25
DH-SD-10	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.414,90	2.276.364,62
DH-SD-11	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.191,51	2.276.274,49
DH-DS-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.566,10	2.276.732,98
DH-DS-01A	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.566,10	2.276.732,98
DH-SP-04	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.334,55	2.278.023,92
DH-WRF-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.336,14	2.277.458,78
DH-WRF-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.785.390,93	2.278.203,65
I-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.421,42	2.278.996,74
I-05	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.973,70	2.278.540,48
I-08	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.117,56	2.278.750,94
I-09	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.150,51	2.278.736,81
I-10	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.180,46	2.278.723,69
I-101	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.757,80	2.276.434,13

ID	Año	Tipo	Campaña	ESTE	NORTE
I-105	2022	Perforación	Integral S.A.	4.787.738,20	2.277.919,31
I-107	2021	Perforación	Integral S.A..	4.786.198,70	2.279.372,65
I-112	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.018,11	2.276.594,04
I-113	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.022,22	2.276.628,56
I-114	2021	Perforación	Integral S.A..	4.793.178,27	2.276.719,60
I-115	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.279,37	2.276.741,21
I-116	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.217,21	2.279.499,60
I-117	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.578,94	2.279.417,15
I-12	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.894,44	2.278.936,68
I-122	2021	Perforación	Integral S.A..	4.787.722,84	2.277.827,35
I-13	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.635,83	2.278.688,24
I-14	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.042,73	2.276.696,00
I-16	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.053,80	2.278.377,09
I-18	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.280,64	2.276.634,50
I-20	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.036,82	2.276.428,03
I-21	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.261,46	2.276.582,16
I-25	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.638,96	2.278.113,73
I-28	2021	Perforación	Integral S.A.	4.785.934,34	2.279.545,73
I-29	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.475,12	2.279.214,53
I-30	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.003,44	2.277.462,18
I-31	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.877,03	2.277.616,71
I-34	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.013,57	2.279.555,45
I-37	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.308,62	2.279.347,21
I-38	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.397,56	2.279.327,86
I-40	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.169,04	2.279.164,77
I-41	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.392,82	2.279.099,87
GG-PT-02	2013	Perforación	Knighth Piésold	4.787.580,80	2.277.317,83
I-45	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.435,07	2.279.455,73
I-51	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.681,13	2.277.792,79
I-56	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.477,32	2.275.961,32
I-58	2021	Perforación	Integral S.A.	4.794.180,90	2.276.338,59
I-62	2021	Perforación	Integral S.A.	4.792.624,89	2.276.135,71
I-65	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.758,61	2.277.728,24
I-66	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.872,93	2.278.779,44
I-71	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.425,85	2.276.460,45
I-73	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.084,05	2.277.173,04
I-80	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.657,71	2.276.813,72
I-85	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.999,77	2.277.177,28
I-87	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.448,93	2.276.694,44
GG-PT-01	2012	Perforación	Knighth Piésold	4.787.570,98	2.277.365,88
DH-SP-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.785.440,26	2.280.050,78

ID	Año	Tipo	Campaña	ESTE	NORTE
DH-SP-02	2021	Perforación	Integral S.A.	4.785.524,7	2.279.928,43
GG-PT-03	2013	Perforación	Knighth Piésold	4.787.519,97	2.277.617,12
I-119	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.057,91	2.278.589,15
I-120	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.136,96	2.278.599,84
I-53	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.122,89	2.278.624,86
I-70	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.980,46	2.276.592,27
I-78	2021	Perforación	Integral S.A..	4.789.940,77	2.276.962,44
I-86	2021	Perforación	Integral S.A.	4.790.813,52	2.277.119,01
I-108	2021	Apique	Integral S.A.	4.792.987,56	2.276.596,54
I-109	2021	Apique	Integral S.A.	4.793.000,39	2.276.629,83
I-110	2021	Apique	Integral S.A.	4.793.154,24	2.276.712,70
I-111	2021	Apique	Integral S.A.	4.793.247,34	2.276.735,33
I-89	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.450,19	2.277.635,44
I-90	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.754,99	2.277.572,22
I-91	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.065,79	2.277.761,02
I-94	2021	Perforación	Integral S.A.	4.787.154,10	2.278.169,66
I-95	2021	Perforación	Integral S.A.	4.788.598,45	2.277.693,86
PG20-017	2020	Perforación	Golder	4.786.234,92	2.279.425,52
PG20-021	2020	Perforación	Golder	4.787.000,22	2.278.713,36
PG20-022	2020	Perforación	Golder	4.788.210,57	2.278.750,57
PG20-026	2020	Perforación	Golder	4.786.623,44	2.279.036,91
PG20-027	2020	Perforación	Golder	4.787.101,50	2.279.030,01
PG20-028	2020	Perforación	Golder	4.787.137,22	2.278.957,86
PG20-030	2020	Perforación	Golder	4.787.359,16	2.278.429,89
PG20-031	2020	Perforación	Golder	4.787.565,23	2.278.690,12
PG20-034	2020	Perforación n	Golder	4.788.847,49	2.278.199,96
PG20-051	2020	Perforación	Golder	4.788.506,97	2.276.819,09
PG20-054	2020	Perforación	Golder	4.787.291,62	2.278.296,14
PG20-055	2020	Perforación	Golder	4.793.904,58	2.276.267,67
PG20-057B	2020	Perforación	Golder	4.787.447,97	2.276.862,28
PG20-059	2020	Perforación	Golder	4.787.310,79	2.277.073,86
PG20-060	2020	Perforación	Golder	4.787.524,14	2.277.407,07
PG20-061	2020	Perforación	Golder	4.787.536,54	2.277.508,04
PG20-062	2020	Perforación	Golder	4.787.593,34	2.277.455,80
PG20-064	2020	Perforación	Golder	4.787.513,79	2.277.573,14
PG20-065	2020	Perforación	Golder	4.787.591,67	2.277.285,78
PG20-066	2020	Perforación	Golder	4.787.445,99	2.277.878,46
PG20-073	2020	Perforación	Golder	4.786.730,59	2.277.807,28
PG20-074	2020	Perforación	Golder	4.787.642,20	2.277.923,69
PG20-093	2020	Perforación	Golder	4.789.868,07	2.276.788,70
PG20-112	2020	Perforación	Golder	4.787.939,98	2.278.865,66

ID	Año	Tipo	Campaña	ESTE	NORTE
PG20-113	2020	Perforación	Golder	4.788.115,43	2.278.969,98
PG20-114	2020	Perforación	Golder	4.787.393,70	2.276.796,48
PG20-115	2020	Perforación	Golder	4.787.329,32	2.278.217,97
PG20-118	2020	Perforación	Golder	4.787.498,95	2.277.614,20
PG20-096	2020	Perforación	Golder	4.790.107,55	2.276.647,73
PG20-101	2020	Perforación	Golder	4.791.873,58	2.277.096,82
PG20-108	2020	Perforación	Golder	4.787.839,41	2.278.978,08
PG20-109	2020	Perforación	Golder	4.787.899,58	2.279.017,85
PG20-110	2020	Perforación	Golder	4.788.048,85	2.279.079,27
PG20-111	2020	Perforación	Golder	4.788.007,41	2.278.970,41
DH-DS-02A	2021	Perforación	Integral S.A.	4.791.441,80	2.277.419,57
I-11	2021	Perforación	Integral S.A.	4.789.824,55	2.276.152,77
I-49	2021	Perforación	Integral S.A.	4.786.994,87	2.278.625,37
I-76	2021	Perforación	Integral S.A..	4.785.703,31	2.279.546,65
I-98	2021	Perforación	Integral S.A.	4.785.323,63	2.279.897,22
PG20-020	2020	Perforación	Golder	4.785.585,61	2.279.376,09
PG20-023	2020	Perforación	Golder	4.785.656,70	2.279.648,85
PG20-025	2020	Perforación	Golder	4.785.673,78	2.279.163,70
PG20-094	2020	Perforación	Golder	4.792.443,04	2.277.193,58
TP-HGS-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.785.726,99	2.279.213,50
TP-OS-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.785.838,87	2.279.180,05
TP-SD-01	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.037,14	2.276.690,16
TP-SP-11	2021	Perforación	Integral S.A.	4.794.008,68	2.276.794,33
TP-SD-03	2021	Perforación	Integral S.A.	4.793.461,60	2.276.541,46
PG25-021	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.689,31	2.277.475,76
PG25-026	2025	Perforación	Integral S.A.	4.789.665,51	2.277.457,18

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de los registros de perforación de Knigh Piésold (2013), Golder (2020), Tierra Group (2025)

C. Unidades litoestratigráficas

Las unidades geológicas fueron identificadas a través de la exploración directa de campo en donde se recuperaron muestras alteradas e inalteradas del subsuelo. Las descripciones presentadas en este capítulo parten, en primera instancia, de una inspección visual y separación de los distintos estratos u horizontes que componen el perfil geológico. Cabe resaltar que dos estratos u horizontes pueden presentar similitudes geomecánicas y granulares, pero un distinto origen geológico y viceversa.

En general, la geología superficial de toda el área de influencia consiste en suelos residuales y saprolitos de rocas ígneas pertenecientes al Batolito Antioqueño (Kqd o Ksta), localmente cubiertos por depósitos de vertiente (Qv), coluvio aluviales (Qcal) y aluviales (Qal).

Los mayores espesores de suelo residual (VI) y saprolito (V) (entre 5,0 m y 40,0 m), ocurren en sitios de pendientes bajas a moderadas. Estas pendientes bajas corresponden a cimas

amplias de baja inclinación, quiebres de pendiente en la ladera, zonas de colinas y en los fondos de los valles.

El saprolito es una arena limosa, color gris claro, de compacidad suelta a firme. Cuando la roca inicial presenta cantidades altas de minerales ferromagnesianos, el saprolito generado se compone de un limo arenoso, color rojo amarillento con moteados blancos y negros.

También se observa alteración de la roca por meteorización esferoidal. En los primeros metros bajo la superficie se encuentra un suelo residual que perdió la textura de la roca original por el proceso de meteorización química. Este suelo se presenta como un limo arcilloso, homogéneo, de color café rojizo a naranja, de consistencia variable.

Por último, los horizontes de roca se encuentran aflorando en cotas bajas hacia la incisión del terreno desarrollada por drenajes que cruzan el área de influencia y que permiten localmente observar horizontes de meteorización II y I (Dearman, W.R., 1974) de las rocas del Batolito Antioqueño.

En la Fotografía 5.1.1.1 ilustra los suelos (residual y saprolito) de la unidad del Batolito Antioqueño en el proyecto. Así mismo, en la Figura 5.1.1.123 se ilustra un ejemplo de los testigos de perforación relacionados a estos.



Fotografía 5.1.1.1 Unidad litológica correspondiente al Batolito Antioqueño. Izquierda: Horizonte de meteorización de suelo residual (VI). Derecha: Horizonte de meteorización de saprolito (V)

Fuente: GCL, 2024

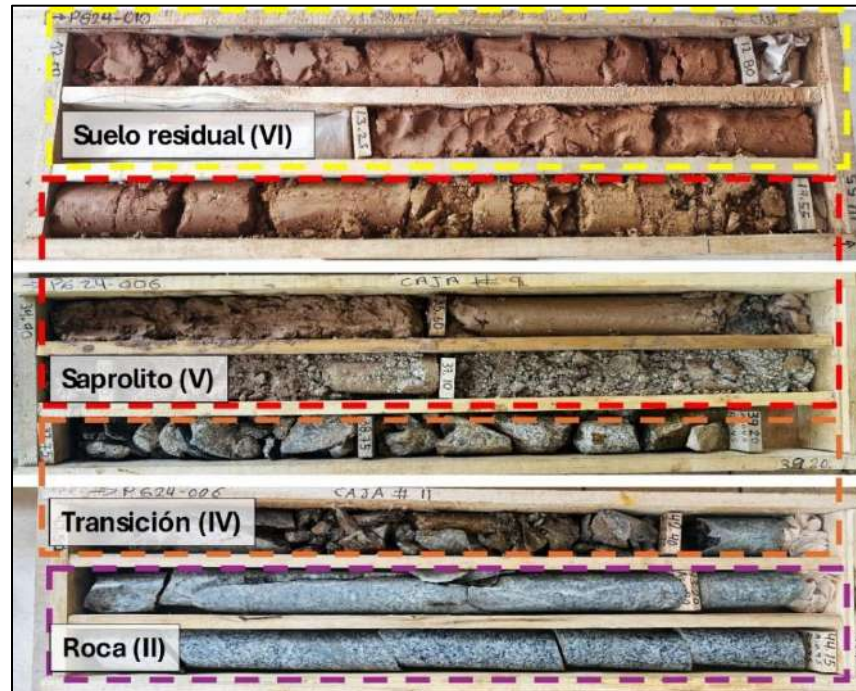


Figura 5.1.1.123 Testigos de perforación mostrando algunos horizontes de meteorización. Perforación PG24-006 (ejecutado 2024) (BS5930) típicos en las rocas del Batolito Antioqueño

Fuente: Integral S.A., 2025

Se debe tener en cuenta que en el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote existen depósitos recientes de carácter coluvial, asociados a la dinámica de las laderas conformadas por espesos suelos y zonas de pendientes altas a moderadas que favorecen la generación de fenómenos de vertiente. Estos depósitos son derivados de procesos hidrogravitacionales cuyo detonante principal es una conjugación de factores como la deforestación, la fuerza de la gravedad y el aumento en la presión de poros por la saturación debida a las fuertes precipitaciones.

Por lo anterior, estos depósitos comúnmente son constituidos por suelo y bloques de roca que han sido removidos de los horizontes de meteorización más superficiales y posteriormente se acumulan en las zonas de pendiente moderada a baja. Son de carácter puntual, con espesores que no superan los 10 m, cubriendo pequeñas áreas pero que alcanzan a ser cartografiables a la escala de trabajo.

En la [Figura 5.1.1.124](#) se presenta la geología local para área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote, cuyo mapa corresponde al I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-GEOYAC, y en la en la Tabla 5.1.1.9 se presentan las áreas y los porcentajes de ocupación de las unidades geológicas locales con respecto al área de influencia abiótica.

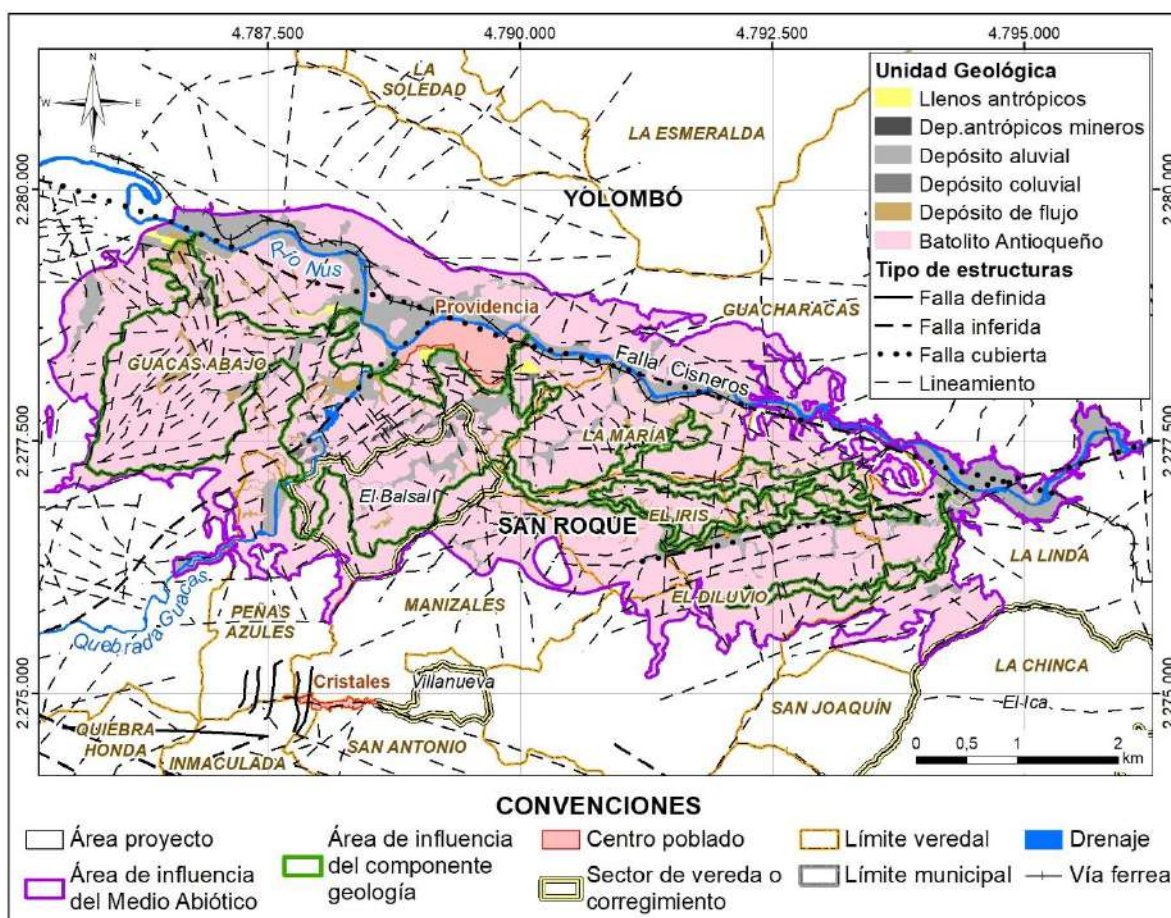


Figura 5.1.1.124 Geología local de la zona del Proyecto Gramalote

Fuente: Integral S.A., 2026

Tabla 5.1.1.9 Porcentajes de las unidades litoestratigráficas en el área para área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote

Unidad Geológica o Formación superficial	Área de influencia abiótica		Área de influencia componente geología	
	ha	%	ha	%
Batolito Antioqueño	1968,09	78,87	588,12	83,64
Depósitos aluviales	387,70	15,54	58,52	8,32
Depósitos coluviales	17,09	0,68	10,87	1,55
Depósitos de flujo	66,56	2,67	38,86	5,53
Unidades geológicas antrópicas	17,94	0,72	2,43	0,35
Río	37,91	1,52	4,38	0,62
Total	2495,27	100,00	703,18	100,00

Fuente: Integral S.A., 2025

A continuación, se realiza una descripción de las diferentes unidades geológicas y formaciones superficiales presentes para área de influencia del medio abiótico:

a. Batolito Antioqueño (Ksta)

Mediante la ejecución de la exploración directa en el área de interés, se lograron identificar suelos in situ derivados de la meteorización de la unidad geológica Batolito Antioqueño, unidad principal del sector. Es una roca de tipo ígneo, masiva, de textura fanerítica, equigranular con variaciones locales en el tamaño de grano. Su composición es principalmente tonalítica con variaciones a granodiorita y cuarzdiorita. Los minerales constituyentes incluyen plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo. En algunos sectores se observa orientación de minerales y presencia de autolitos o enclaves de la roca encajante.

Se presentan espesos niveles de alteración por meteorización que conforman el suelo residual y saprolito. Sus características varían lateralmente, en espesor, textura y estructura.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han ejecutado exploraciones directas para el Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote con diversas finalidades para conocer tanto las propiedades del depósito minero como también la caracterización del terreno para las obras superficiales relacionadas. El proyecto cuenta con un total de 562 perforaciones ejecutadas entre los años 2012 y 2025 (ANEXOS_CARACTERIZACIÓN_GEOLOGIA_PERFO) que brindaron los datos suficientes para la interpretación del subsuelo y la relación espacial de las formaciones superficiales que pudieran tener incidencia con las obras proyectadas. Se realizó un filtro de las perforaciones dentro del área de influencia y se encontraron 324 perforaciones.

En la Tabla 5.1.1.10 se muestra el perfil de meteorización de la roca asociada al Batolito Antioqueño comparando los sistemas de clasificación de Deere y Patton (1971) y de la BS 5930 (2015). De la Figura 5.1.1.125 a la Figura 5.1.1.128 se muestran algunos perfiles estratigráficos en zonas de plataformas y ZODMES.

Tabla 5.1.1.10 Perfil de meteorización típico de las rocas del Batolito Antioqueño

Horizonte		Características
BS 5930	Deere y Patton	
VI	IB	Suelo residual: Desarrolla un suelo limo arcilloso a arcilloso, de consistencia baja, de color amarillo a rojizo. Si se presentan los dos horizontes, el nivel amarillo se localiza por encima del nivel rojizo. Es homogéneo y no presenta la textura de la roca original. Este horizonte se localiza en gran parte del área del proyecto y alcanza espesores que pueden variar entre 1 m y 10 m. Disminuye hacia las zonas de pendientes moderadas a altas.
V	IC	Saprolito: Se observan variaciones que dependen de la roca parental, así: cuando la roca original presenta alto contenido de feldespato y cuarzo, el saprolito se caracteriza por una arena de color gris claro a café claro. En el caso en que la roca original presente minerales máficos como hornblenda y biotita, el saprolito generado es limo arenoso, de color moteado rojizo, blanco y café, por el proceso de oxidación de los minerales oscuros. En general, es un horizonte de compacidad firme a duro y es susceptible a la erosión superficial. Se puede identificar dentro del saprolito, planos de diaclasas heredados de la roca original, que pueden exhibir relleno de óxidos.

Horizonte		Características
BS 5930	Deere y Patton	
		<p>Localmente, y asociado a las zonas de meteorización esferoidal, se presentan bloques de roca parcialmente meteorizados, oxidados, decolorados y redondeados que alcanzan 1 m de diámetro.</p> <p>El horizonte saprolítico presenta un espesor de entre 5 m a 40 m. Los valores son máximos hacia las partes altas de las laderas y disminuyen hacia las zonas de las vertientes donde ha sido removido en parte por los procesos morfodinámicos.</p> <p>Donde el saprolito presenta granulometría arenosa predominante, es común el desarrollo de procesos de erosión concentrada, evidenciado por la ocurrencia de surcos y cárcavas. De igual manera, los drenajes inmaduros que atraviesan terrenos constituidos por este material exhiben procesos de socavación de orillas y desgarres superficiales sobre las laderas.</p>
IV	IC-IIA	Suelo con bloques rocosos (<i>Saprock</i>): Este horizonte es una transición entre la zona saprolítica y el macizo rocoso parcialmente meteorizado. Se caracteriza por material fino a medio representado por limo a arena de consistencia dura que envuelve fragmentos frescos a ligera o moderadamente meteorizados, subredondeados a angulosos. Su espesor máximo aproximado es de 10 m. La proporción aproximada de suelo – roca es de 60: 40.
III	IIA	Roca moderadamente meteorizada: Se caracteriza por ser una roca masiva de color moteado blanco y negro en zonas de color café, textura fanerítica, equigranular, grano medio a grueso. Las paredes de las discontinuidades presentan oxidación avanzada que penetra la roca. Localmente se presentan minerales producto de la alteración de esta rellenando las fracturas. Este horizonte tiene un espesor medio de 10 m.
II	IIB	Roca levemente meteorizada: Roca con oxidación leve sobre las paredes de las discontinuidades, localmente exhibe zonas de fracturamiento de poco espesor asociadas a lineamientos y fallas que disminuyen la calidad geotécnica del macizo.
I	III	Roca sana: Roca fresca, masiva, sin oxidación, de textura fanerítica, equigranular de grano grueso a medio con variación composicional entre tonalita, granodiorita, diorita y granito.

Fuente: Modificado GCL, 2015

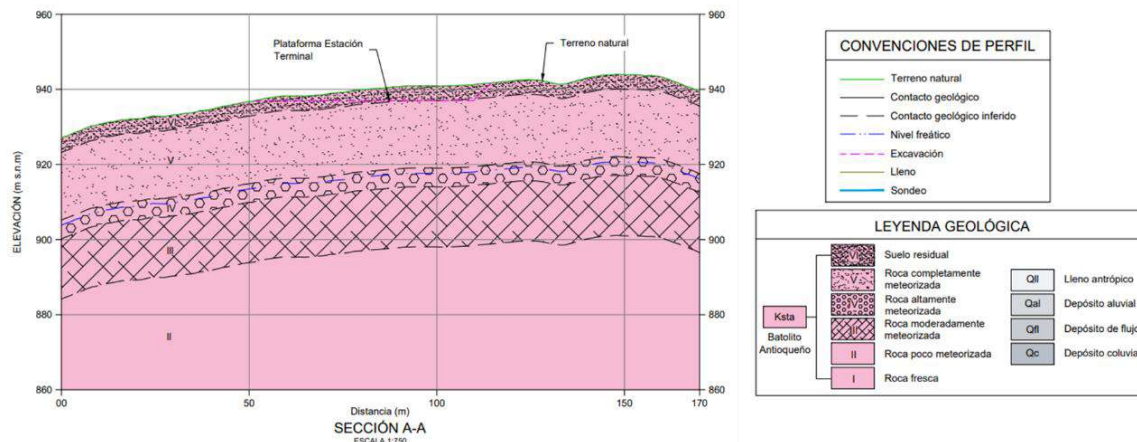


Figura 5.1.1.125 Perfil estratigráfico zona de plataforma de Estación Terminal

Fuente: Integral S.A., 2025

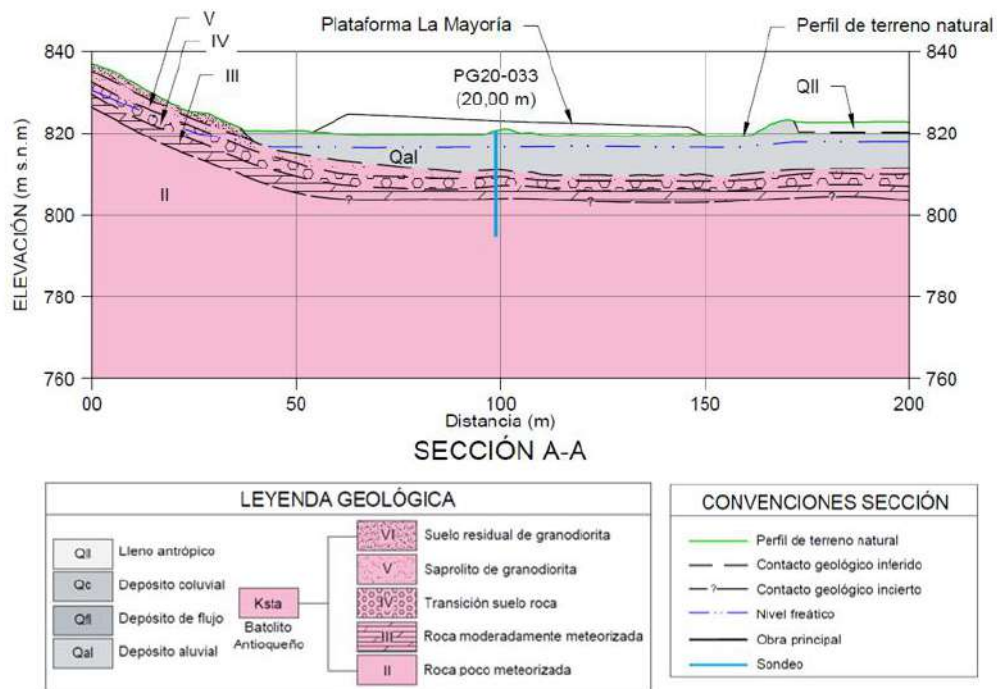


Figura 5.1.1.126 Perfil estratigráfico zona de plataforma La Mayoría

Fuente: Integral S.A., 2025

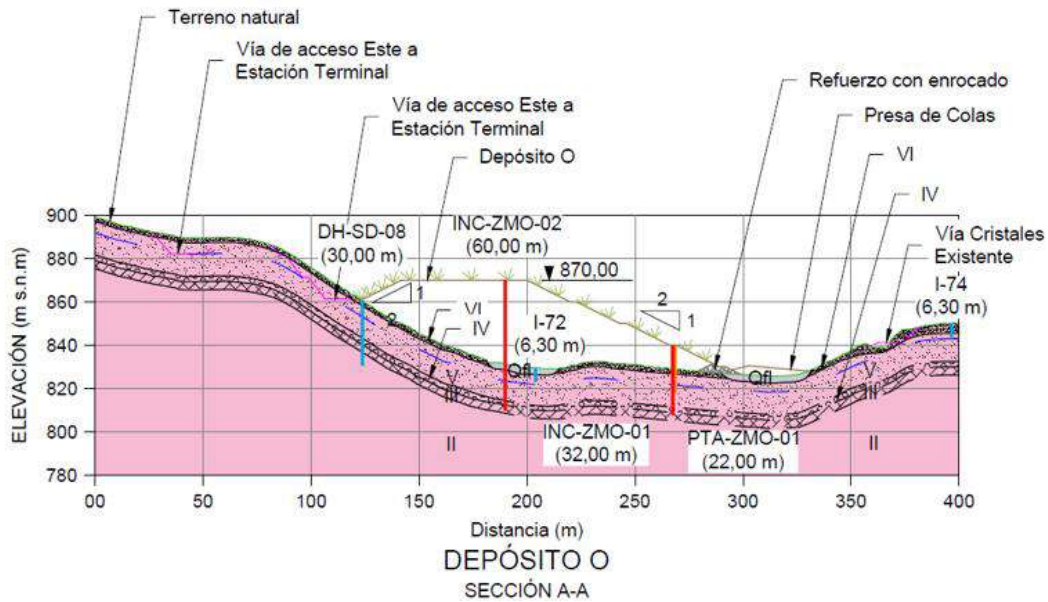


Figura 5.1.1.127 Perfil estratigráfico zona de Depósito (ZODME O)

Fuente: Integral S.A., 2025

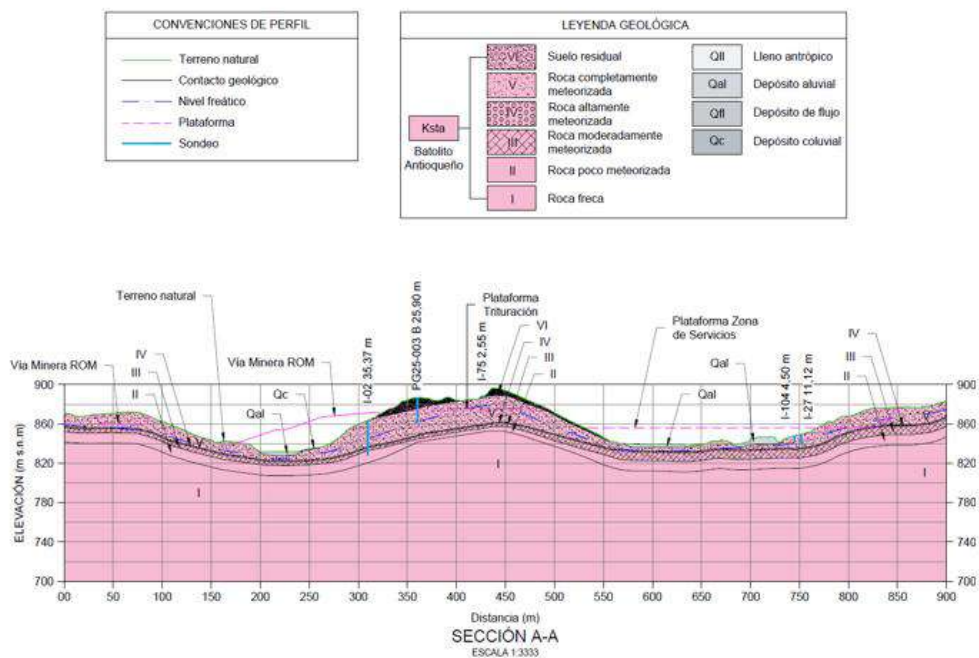


Figura 5.1.1.128 Perfil estratigráfico zona de plataforma de trituración

Fuente: Integral S.A., 2025

b. Depósitos Cuaternarios

Son depósitos generados en el periodo geológico más reciente (Cuaternario) como producto de los diferentes eventos y procesos de la dinámica externa de la tierra como la depositación fluvial; eventos torrenciales o de vertiente. Para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote corresponden a depósitos aluviales, coluviales y de flujo.

I. Depósitos aluviales (Qal)

Esta unidad agrupa depósitos generados a partir de los drenajes que surcan la zona. La dinámica fluvial del sector incluye corrientes permanentes, con cauces definidos y diversos grados de incisión que favorecen la acumulación del material aluvial hacia los cauces activos y llanuras de inundación cercanos al río Nus y quebradas afluentes de éste (Fotografía 5.1.1.2 a).

Los principales depósitos aluviales se asocian a los drenajes que incisan en sentido NE (agrupadas de Oeste a Este están representados por las quebradas El Topacio, El Banco, San Antonio, Guacas, La Colorada, El Balsal y La Palestina) y desembocan posteriormente al río Nus. La mayoría están constituidos por suelos arenosos finos a limosos, de compacidad baja, derivados del arrastre de los suelos del Batolito Antioqueño.

La tasa de acumulación de estos depósitos se incrementa durante las precipitaciones fuertes cuando se inundan las márgenes de los drenajes que moldean el relieve configurado por el Batolito Antioqueño, lo cual se observa en depósitos de varios metros (Fotografía 5.1.1.2 b).

El tamaño de la arena disminuye a medida que se aleja del cauce principal. Los materiales de las llanuras aluviales viajan suspendidos en el agua y se precipitan cuando el peso de la partícula excede la energía del flujo de agua.



Fotografía 5.1.1.2 Depósitos aluviales a) generan morfologías planas en un relieve colinado bajo perteneciente a litologías del Batolito Antioqueño b) Depósito aluvial de varios metros

Fuente: Integral S.A., 2025

II. Depósitos coluviales (Qc)

La dinámica de ladera asociada a los espesos suelos presentes y las zonas de pendientes altas a moderadas favorece la generación de deslizamientos. Por lo anterior, es común la ocurrencia de depósitos coluviales (Qc) constituidos en su mayoría por suelo y menor porcentaje de bloques de roca que han sido removidos de los horizontes de meteorización más superficiales (Fotografía 5.1.1.3). Son generalmente matriz soportados con fragmentos meteorizados de tamaños generalmente centimétrico, de formas angulosas a subangulosas; la textura de la matriz varía de limo arcilloso a limo arenoso y es de consistencia principalmente blanda.



Fotografía 5.1.1.3 Depósito coluvial asociado a erosión lateral de quebrada sin nombre al SW de la vereda Guacas

Fuente: Integral S.A., 2025

III. Depósitos de flujo (Qfl)

Son depósitos generados por movimientos en masa, muchas veces canalizados por cañadas o valles estrechos, que involucran gran cantidad de agua y por lo tanto un transporte relativamente fluido, para finalmente depositarse con una forma alargada con mayor amplitud en una parte baja.

Son generalmente matriz soportados con fragmentos meteorizados de tamaños centimétrico, de formas angulosas a subangulosas; la textura de la matriz varía de limo arcilloso a limo arenoso y es de consistencia principalmente blanda. Se presentan en algunas vaguadas y caños menores.

c. Unidades Geológicas Antrópicas

Corresponden a depósitos artificiales no consolidados que son generados por el hombre con diferentes finalidades como excavaciones, reconfiguración de terraplenes para vías o

caminos, depósitos de escombros, entre otros. A continuación, se presenta la descripción de dichas unidades:

I. Llenos antrópicos asociados a adecuación de terrenos e infraestructura (QII)

La unidad geológica Llenos Antrópicos (QII) corresponden a materiales empleados en actividades de conformación de plataformas, vías de acceso y adecuación topográfica, constituidos por mezclas heterogéneas de suelos y fragmentos de roca procedentes de excavaciones locales (Fotografía 5.1.1.4).



Fotografía 5.1.1.4 Llenos antrópicos identificados en la zona de estudio

Fuente: Integral S.A., 2026

Mineralógicamente predominan plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo, minerales característicos de los materiales de excavación procedentes de las unidades ígneas aflorantes en el área, principalmente Batolito Antioqueño. Adicionalmente, pueden encontrarse fragmentos de concreto, ladrillo, cerámica y otros materiales de origen antrópico asociados a las actividades de adecuación del terreno en infraestructura. Geoquímicamente presentan características similares a los materiales geológicos utilizados para su conformación.

Los llenos antrópicos cartografiados corresponden a condiciones preexistentes en el área de estudio y fueron incorporados como parte de la caracterización geológica de la línea base. Estos depósitos no fueron generados ni intervenidos por el Proyecto Gramalote y su ocurrencia está asociada a actividades históricas de adecuación del terreno e infraestructura desarrolladas previamente en la zona.

Estos materiales que se disponen la unidad geológica Lleno Antrópicos (QII), además de escombros, se constituyen principalmente del respaldo de la roca encajante y no tienen mineralización económicamente explotable. En este sentido, se consideran materiales

estériles llevando a concluir que su proceso de disposición y compactación no genera lixiviados ácidos contaminantes.

II. Depósitos antrópicos mineros asociados a minería artesanal histórica (Dam)

Corresponden a acumulaciones de estériles y materiales de excavación generados durante actividades históricas de minería artesanal. Estos depósitos presentan geometrías irregulares y distribución localizada sobre laderas intervenidas, conformando acumulaciones superficiales de material rocoso grueso derivado de las unidades geológicas explotadas, las cuales se observan en cercanías de la quebrada La Colorada (Fotografía 5.1.1.5)



Fotografía 5.1.1.5 Depósitos antrópicos mineros identificados en el área de estudio

Fuente: Integral S.A., 2026

Su composición mineralógica está directamente controlada por las unidades geológicas explotadas y por los materiales descartados durante las labores extractivas. En consecuencia, estos depósitos están constituidos principalmente por fragmentos de tonalita, granodiorita, cuarzodiorita y diques asociados, por lo que mineralógicamente predominan cuarzo, plagioclasa, feldespatos, biotita y hornblenda, además de minerales secundarios generados por procesos de meteorización y alteración hidrotermal.

La unidad geológica explotada corresponde al Batolito Antioqueño, cuyos principales tipos composicionales son tonalita y granodiorita, con monzonita subordinada y gabro. Adicionalmente, se presentan diques alaskíticos, félsicos y andesíticos que han intruído el complejo. Los principales tipos de rocas y sus características mineralógicas se resumen en la Tabla 5.1.1.15.

Tabla 5.1.1.11 Principales tipos de roca

Unidad	Descripción
Tonalita, granodiorita	Consisten principalmente de cristales de plagioclasa, cuarzo y minerales máficos (biotita y hornblenda)

Unidad	Descripción
Cuarzodiorita	Contenido de cuarzo de 10-20 %, predominando sobre la plagioclasa cálcica y los minerales máficos, con contenido variable (hornblenda y/o biotita). Los máficos pueden ser alterados a clorita.
Diorita porfírica de grano fino	Texturas ígneas porfíricas, plagioclasa y fenocristales de cuarzo de 0.5 a 2 mm de diámetro, embebidos en una matriz afanítica. La matriz contiene también minerales máficos tales como hornblenda y mica (biotita)
Dique de microdiorita	Similar a la diorita porfírica, pero de tamaño cristalino <0,5 mm, presente en áreas adyacentes al depósito mineral y en forma de diques centimétricos ocasionalmente afectados por eventos hidrotermales en el contacto con la tonalita/granodiorita huésped
Aplitas y pegmatitas	Las aplitas consisten principalmente de feldespato alcalino, cuarzo y mica (biotita localmente). Típicamente, textura afanítica, que varía en tamaño de mm a cm de escala. Las pegmatitas tienen componentes similares, pero son más gruesas.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

En la Fotografía 5.1.1.6 se presenta un detalle de fragmentos angulosos de roca correspondientes a material estéril derivado del Batolito Antioqueño. Se observa bloques de composición tonalítica a granodiorítica, con tamaños de grava a bloque.



Fotografía 5.1.1.6 Detalle del material constituyente de los depósitos antrópicos mineros

Fuente: Integral S.A., 2026

Geoquímicamente, estos depósitos presentan una composición consistente con los materiales geológicos que les dieron origen, por lo que sus características químicas

corresponden principalmente a las rocas del Batolito Antioqueño y a los materiales de excavación y estériles derivados de su explotación.

La caracterización de los depósitos antrópicos mineros asociados a la minería artesanal histórica se fundamenta en su origen directo a partir de la excavación y procesamiento de las unidades del Batolito Antioqueño. Debido a que estos depósitos consisten en acumulaciones de fragmentos de roca estéril y materiales descartados, su firma geoquímica es una extensión de las propiedades de las rocas originales descritas en la **Tabla 5.1.1.15**, tales como tonalitas, granodioritas y cuarzodioritas.

De esta forma, se tiene que las características geoquímicas de estos materiales se pueden presentar de la siguiente manera:

- **Firma elemental y enriquecimientos anómalos**

- Fragmentos de Tonalita/Granodiorita: Presentan excesos consistentes de Oro (Au) y Bismuto (Bi), con presencia ocasional de Plata (Ag), Cobre (Cu), Azufre (S) y Antimonio (Sb).

- Fragmentos de Cuarzodiorita: Se caracterizan por una firma distinta con excesos de Bismuto (Bi), Cobalto (Co), Cromo (Cr) y Magnesio (Mg).

- Diques y Aplitas: Aportan principalmente Bismuto (Bi) y, de manera ocasional, Oro (Au) y Plata (Ag).

- **Potencial de generación de ácido (DAR)**

El comportamiento ambiental de los depósitos artesanales está intrínsecamente ligado al contenido de azufre y la capacidad de neutralización de las rocas que los conforman:

- Contenido de Azufre: En las tonalitas (material predominante en los depósitos), el azufre total varía entre 0,01% y 3,2%, con un promedio bajo de 0,3%. En las cuarzodioritas, este promedio es aún menor, siendo inferior al 0,1%.

- Umbral de Seguridad: Se ha determinado que los materiales con un contenido de azufre total inferior al 0,15% presentan generalmente una relación de potencial de neutralización (NPR) superior a 2, lo que los clasifica como no generadores de ácido (no-PAG).

- Capacidad de Neutralización: El análisis de las tonalitas muestra la presencia de calcita (hasta 5%) y trazas de ankerita/dolomita, lo que otorga a los fragmentos de roca una capacidad intrínseca para neutralizar la acidez potencial.

- **Calidad de lixiviados y movilidad de metales**

Los resultados de las pruebas cinéticas (barriles de campo y celdas de humedad) realizadas sobre estas mismas litologías permiten predecir el comportamiento geoquímico de los depósitos artesanales ante la exposición al agua y al aire:

- Estabilidad del pH: Los lixiviados derivados de estas rocas mantienen condiciones de pH casi neutro a ligeramente alcalino, con valores estables entre 7,2 y 8,1.

- Baja Solubilidad: Las concentraciones de metales lixiviados son generalmente bajas y se encuentran dentro de valores normales. Se ha observado una movilidad ligera de Molibdeno (Mo) en muestras con mayor contenido de este elemento y de Cobre (Cu) en materiales meteorizados, pero sin representar concentraciones críticas en condiciones de pH neutro.

- Sulfatos: La producción de sulfatos es baja, con concentraciones estables generalmente menores a 20-48 mg/L, lo que refleja la baja tasa de oxidación de los sulfuros presentes en los fragmentos de roca.

En conclusión, los depósitos de minería artesanal son geoquímicamente análogos a las rocas del Batolito Antioqueño analizadas, caracterizándose por una firma de Au-Bi, un bajo potencial de generación de acidez debido a sus contenidos reducidos de azufre y una lixiviación de metales limitada bajo un régimen de pH neutro.

De igual manera, los depósitos antrópicos mineros identificados corresponden a evidencias de actividades mineras históricas desarrolladas con anterioridad al proyecto y, por tanto, no guardan relación con las actividades de exploración, construcción u operación propuestas por Gramalote.

5.1.1.2.2 Geología Estructural Local

Para el análisis estructural a nivel local se utilizó la base de datos de perforaciones de GCL Colombia (2026), aquí se hizo una diferenciación de las perforaciones que se encontraban por fuera del tajo Gramalote (externas) y las perforaciones que se encontraban dentro del tajo Gramalote, la ubicación espacial de estas se presenta en la Figura 5.1.1.129. Los datos de la zona externa corresponden a mediciones estructurales de afloramientos superficiales e información de sondeos, mientras que los datos de la zona del Tajo provienen de sondeos y de datos acústicos.

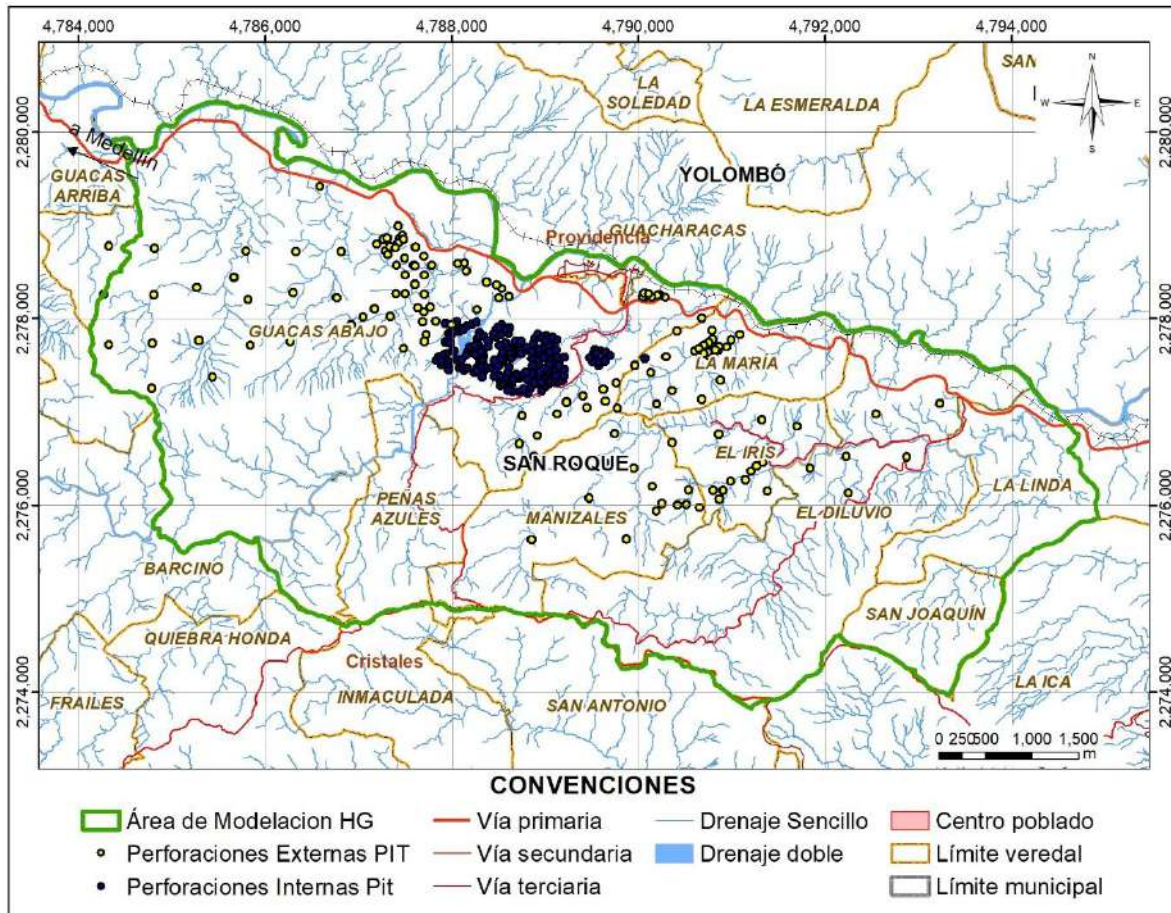


Figura 5.1.1.129 Área externa e interna del tajo Gramalote y ubicación de las perforaciones.

Fuente: (GCL 2026)

De ambas bases se extrajo la información relevante para el análisis estructural, incluyendo el tipo de estructura, la dirección de buzamiento (Dip Direction) y el ángulo de buzamiento (Dip) de cada estructura registrada.

A partir de esta información, las estructuras fueron agrupadas en las siguientes categorías estructurales para su análisis conjunto: Joints y Fracturas; Zonas de cizalla; Vetas y venillas; Fallas (Faults); Extensional Dúplex y Dúplex; Diques; Contactos; y brechas tectónicas.

Adicionalmente, en la base de datos correspondiente a la zona interna del Tajo se reportó información de estructuras adicionales, no presentes en la zona externa, propias del registro de sondeos y datos acústicos: Voids, zonas de rotura (Broken Zone), zonas de alta deformación (High Strain Zone), brechas tectónicas e intrusiones.

Con la información de dirección de buzamiento y buzamiento de cada grupo estructural, se generaron diagramas de rosas y diagramas de contornos (estereogramas), con el objetivo de visualizar las orientaciones dominantes diferenciando el tipo de estructura.

El análisis de los diagramas de rosas y de contornos para el grupo de diaclasas y fracturas evidencia una tendencia dominante. La dirección N20°E-N50°E, con ángulo de buzamiento

alto predominante hacia el NW. En el diagrama se muestra una segunda dirección N80°W, con ángulo de buzamiento inclinado hacia el NE, sin embargo, no se considera predominante. Estas orientaciones son consistentes al sistema que controla el tramo inferior que la quebrada Guacas y a la falla Cisneros respectivamente.

Las zonas de cizalla presentan una tendencia estructural dominante con dirección N10°E-N40°E con buzamientos predominantemente subverticales, lo que sugiere una relación con la orientación de las estructuras regionales mayores. Esta orientación coincide con las familias dominantes observadas en el grupo de diaclasa y fracturas, lo que podría indicar un control estructural. Se tiene otra orientación preferencial para la zona externa del tajo con dirección N40°E-N80°E.

Las vetas y venillas muestran una orientación preferencial N20°E-N50°E, con buzamientos hacia el NW, concordante a la dirección del tramo inferior de la quebrada Guacas, cabe resaltar que de este tipo de estructuras solo se tienen datos estructurales superficiales y sondeos de la zona del Tajo Gramalote. Adicionalmente, se tienen otras dos tendencias. La dirección N20°W-N40°W asociada al sistema de fallas que controla tramos del río Nus y la quebrada Guaca. Y la dirección N80°E, la cual se relaciona con otros sistemas complementarios.

Los diagramas de las fallas representan las direcciones de las principales fallas del área. El sistema de fallas que controla el tramo inferior de Guacas, con dirección N30°E-N60°E, y sistemas complementarios N - S y E - W. Las mismas tendencias de direcciones se muestran en las brechas tectónicas.

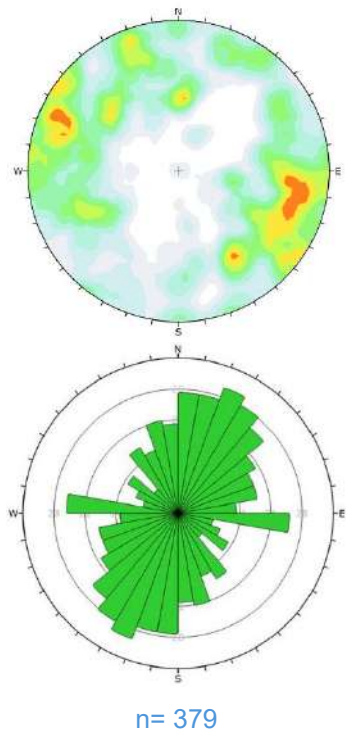
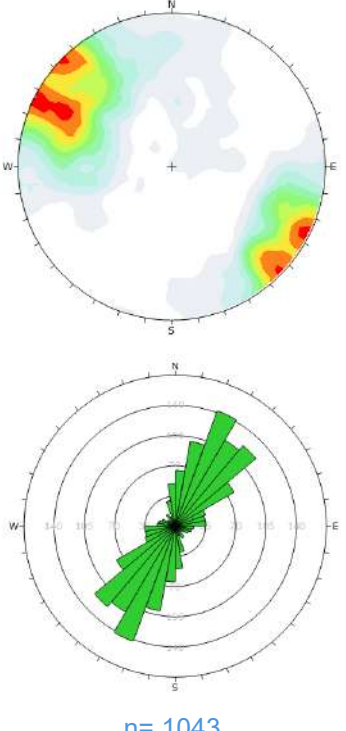
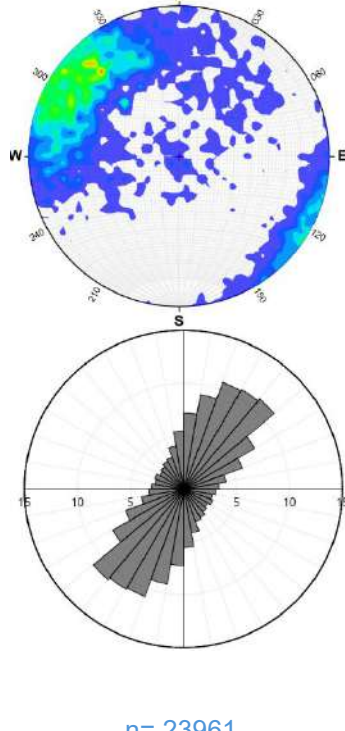
Las estructuras tipo *Extensional Dúplex* y *Dúplex* asociados a dilatación tensional muestran tendencias con direcciones N10°E-N20°E, N50°E-N80°E, N10°W-N30°W y NS. Asociados a los sistemas de falla de la zona.

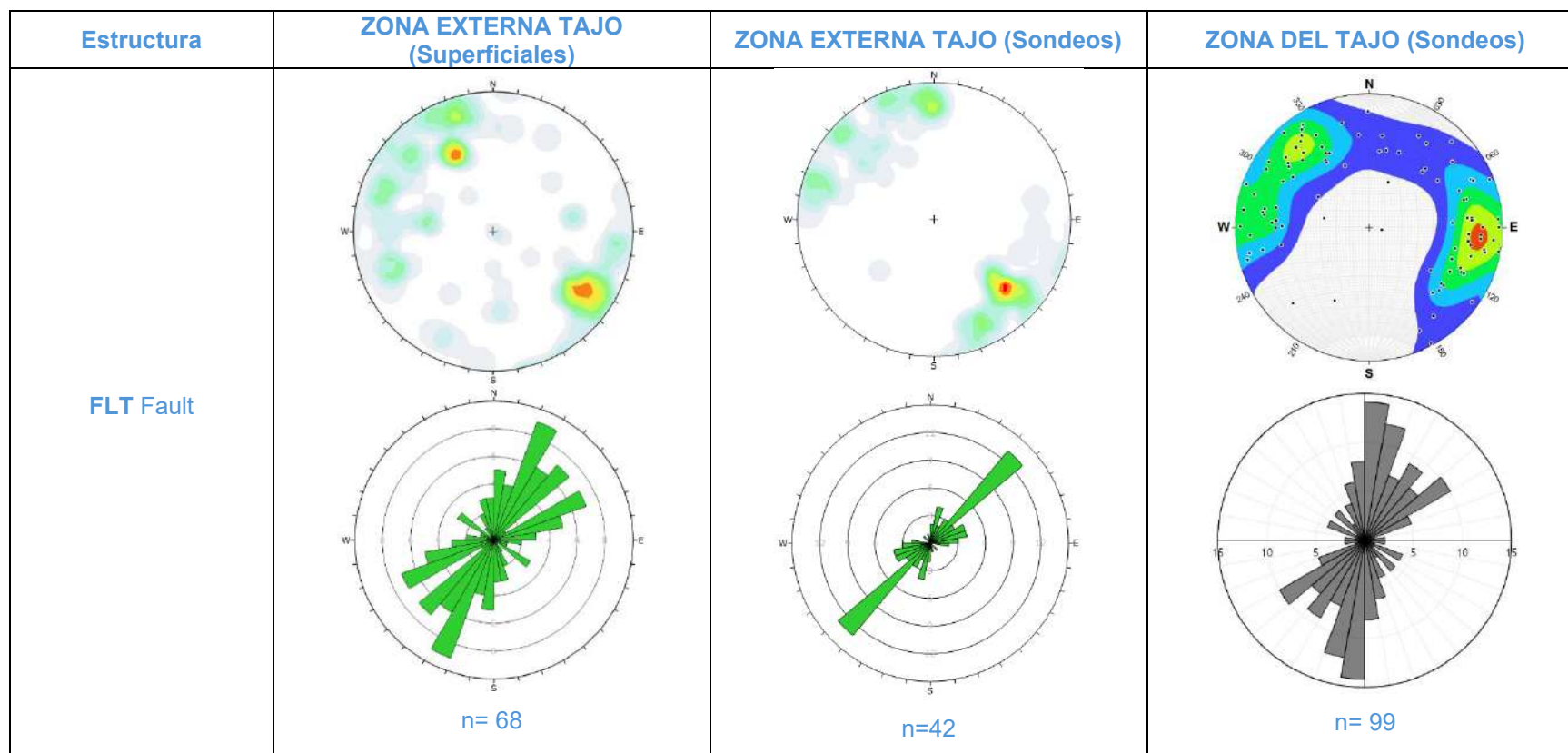
Los contactos litológicos presentan tres orientaciones principales. La primera N30°E-N60°E buzando hacia NW. La segunda N10°W-N40°W, buzando hacia SW, y la tercera con una dirección E-W.

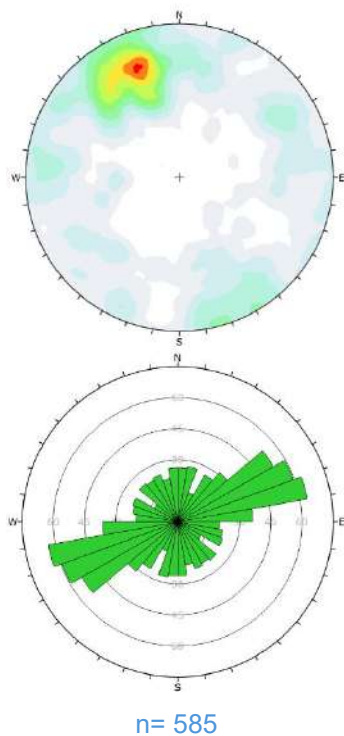
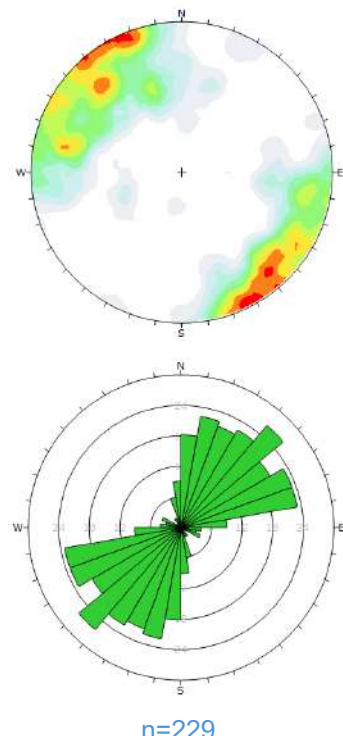
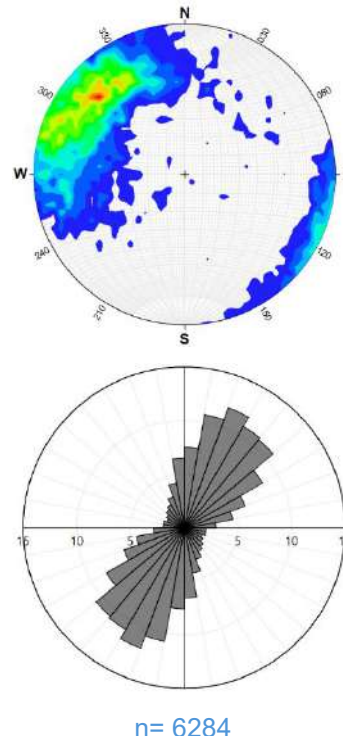
Los diques muestran un sentido variable, en la zona externa en datos superficiales hay pocos datos para definir una dirección dominante, en la zona externa en sondeos el sentido es NNE-SSE, con buzamientos altos con ligera tendencia al W. En zona del Tajo en sondeos (profundidad) predominan E-W aunque direcciones secundarias no tienen orientaciones preferenciales, solo una ligera disminución general en direcciones N-S, aquí los buzamientos tienden a ser de medio-bajo ángulo a subhorizontales hacia el SW.

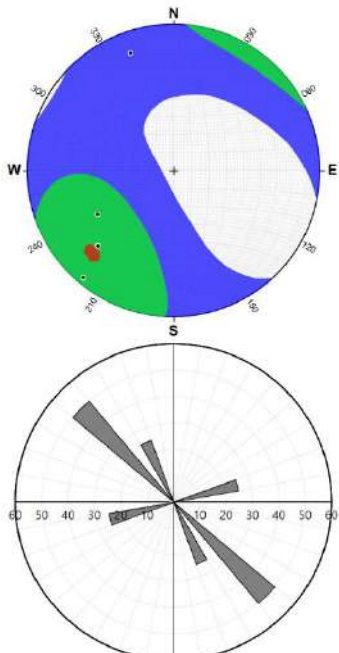
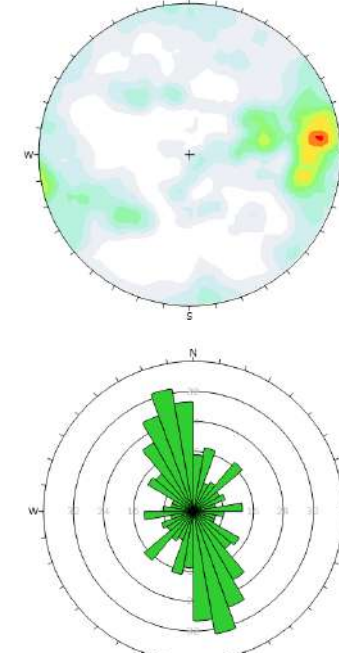
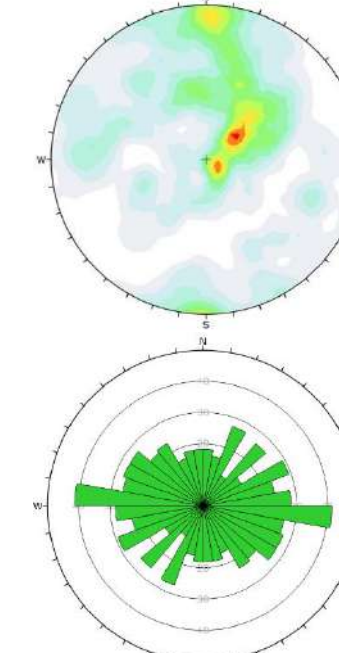
La Tabla 5.1.1.12 muestra un resumen de los diagramas de rosas de las direcciones preferenciales de fracturas, diaclasas zonas de cizalla y diques intrusivos tomados a partir de perforaciones.

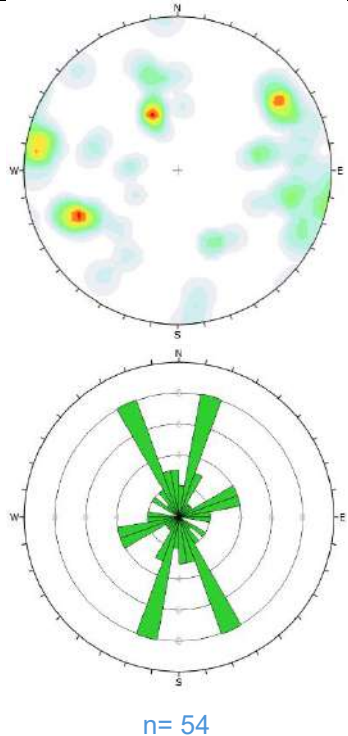
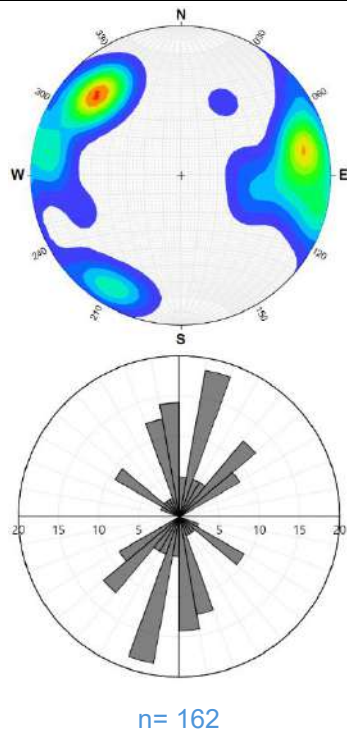
Tabla 5.1.1.12 Diagrama de rosas de las direcciones preferenciales de fracturas, diaclasas, fallas, zonas de cizalla y diques a partir de perforaciones.

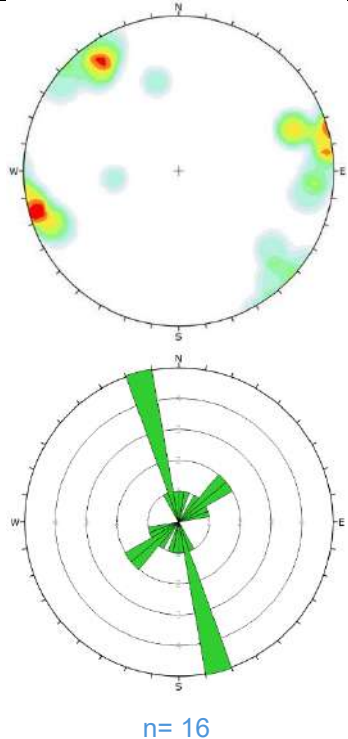
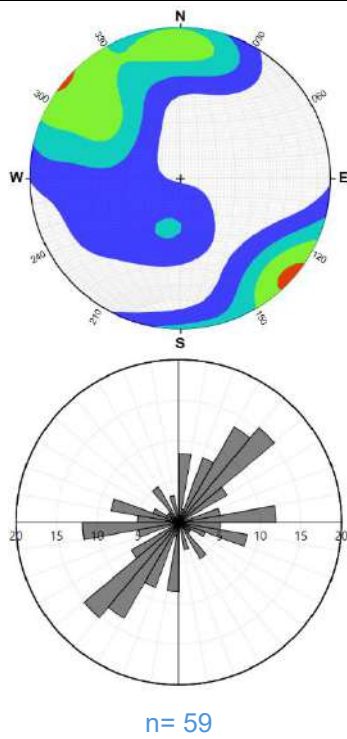
Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
JNT y Fr Diaclasas y fracturas	 <p>n= 379</p>	 <p>n= 1043</p>	 <p>n= 23961</p>

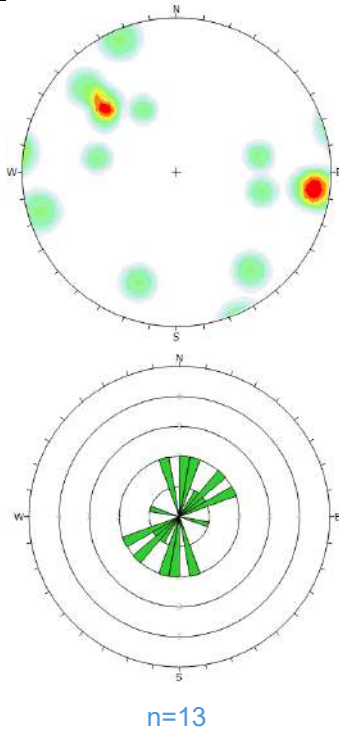
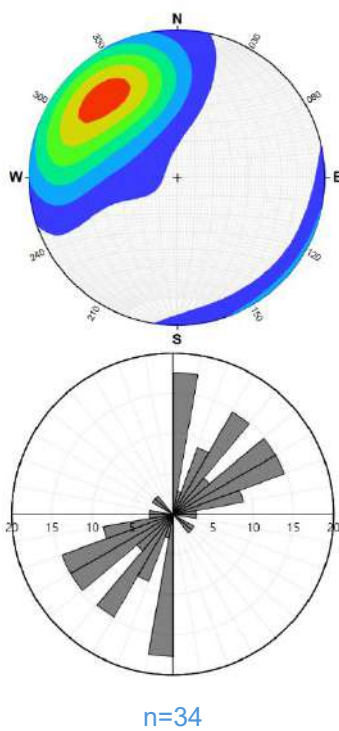


Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
SH Zona de cizalla	 <p>n= 585</p>	 <p>n=229</p>	 <p>n= 6284</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
DIKE Diques	 <p>n= 4</p>	 <p>n= 325</p>	 <p>n= 656</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
<p>EXTDUP_SEXDUP (Extensional duplex y secondary extensional duplex)</p> <p>DUP</p>	 <p>n= 54</p>	<p>Sin informacion</p>	 <p>n= 162</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
CNT Contacto	 <p>n= 16</p>	Sin informacion	 <p>n= 59</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
BRX Tectonic breccia	 <p>n=13</p>	Sin informacion	 <p>n=34</p>

Fuente: Propia a partir de GCL (2026)

A. Análisis RQD

El grado de fracturamiento del macizo rocoso se define por el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades, independientemente de su origen y clase (González de Vallejo, 2002). Habitualmente, el índice RQD (Rock Quality Designation) ayuda a expresar el grado de fracturamiento (útil como una predisposición a la alteración) y se define como la relación porcentual entre la suma de las longitudes de testigos de perforación que sean mayores a 10cm en una longitud total del tramo analizado (Figura 5.1.1.130), siguiendo la siguiente ecuación:

$$RQD = \frac{\sum \text{Longitud de fragmentos del testigo} > 10\text{cm}}{\text{Longitud total del tramo}} \times 100$$

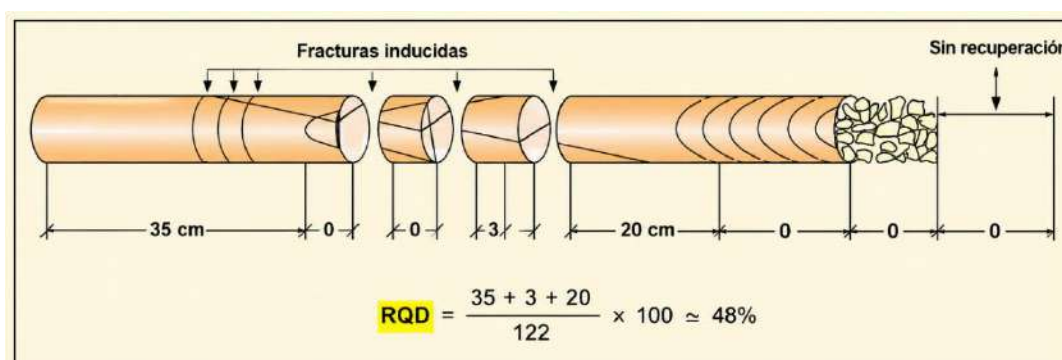


Figura 5.1.1.130 Metodología para el cálculo del índice RQD.

Fuente: Adaptado de Clayton *et al* (1995) en González de Vallejo (2002)

De esta manera, valores altos de RQD suelen asociarse con macizos relativamente masivos o poco fracturados, mientras que valores bajos indican una mayor intensidad de fracturamiento, disgregación o alteración estructural del medio rocoso. En la estimación se excluyen los sectores con grado de meteorización avanzada (a partir del horizonte IV de meteorización o roca altamente meteorizada), a los que se les asigna un RQD=0%. Para este ejercicio se utilizó la clasificación de calidad de roca (Tabla 5.1.1.13) en función del RQD propuesta por González de Vallejo (2002):

Tabla 5.1.1.13 Clasificación de la calidad de la roca en función del índice RQD.

Calidad	RQD (%)
Muy mala	<25
Mala	25-50
Media	50-75
Buena	75-90
Muy buena	90-100

Fuente: González de Vallejo (2002)

Existen además correlaciones desarrolladas por diversos autores entre este índice y la frecuencia del espaciamiento de las discontinuidades en el macizo, clasificaciones de resistencia de la roca como el índice de calidad RMR, módulos de deformación in-situ, índices de velocidades relativas, etc.

Los intervalos con valores bajos de RQD pueden sugerir sectores con mayor densidad de fracturamiento. En contraste, unidades caracterizadas por valores elevados de RQD suelen corresponder a macizos más competentes y menos fracturados.

En general, en la zona predomina un macizo rocoso de muy buena calidad a lo largo de la mayoría de las profundidades, mostrando un comportamiento homogéneo, estos en conjunto representan el 53% de la información obtenida de las perforaciones. Seguido a estos se encuentran los de calidad buena, con un 14% del total de los datos. Por su parte los macizos rocosos de muy mala calidad abarcan el 13%, mientras que las calidades malas y media corresponden al 4% y 9% respectivamente como se observa en la Figura 5.1.1.131.

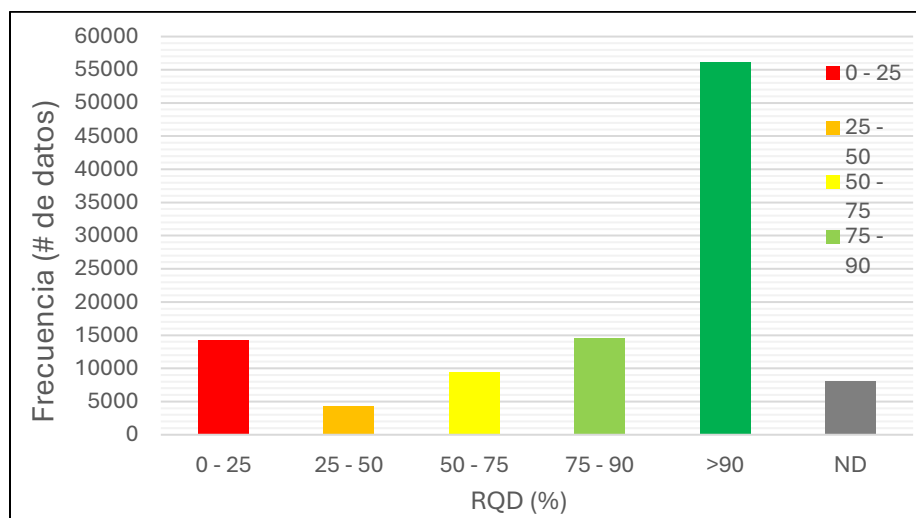


Figura 5.1.1.131 Frecuencia del RQD registrado en las perforaciones

Fuente: (GCL 2026).

Las zonas fracturadas se distribuyen desde superficie hasta los 900 metros de profundidad; sin embargo, la intensidad del fracturamiento tiende a disminuir con la profundidad. Como se observa en la Figura 5.1.1.132, los valores de RQD inferiores al 25% se concentran en los primeros 50 metros, en este intervalo predominan suelos residuales y la zona de transición suelo-roca. Estos materiales aportan peso estadístico a esta categoría, pero no reflejan un incremento en la densidad de fracturas en el macizo rocoso. A partir de los 50 metros hay un aumento gradual de los RQD mayores a 90%, asociados a la aparición de los horizontes de roca, constituyendo la fracción dominante en profundidad.

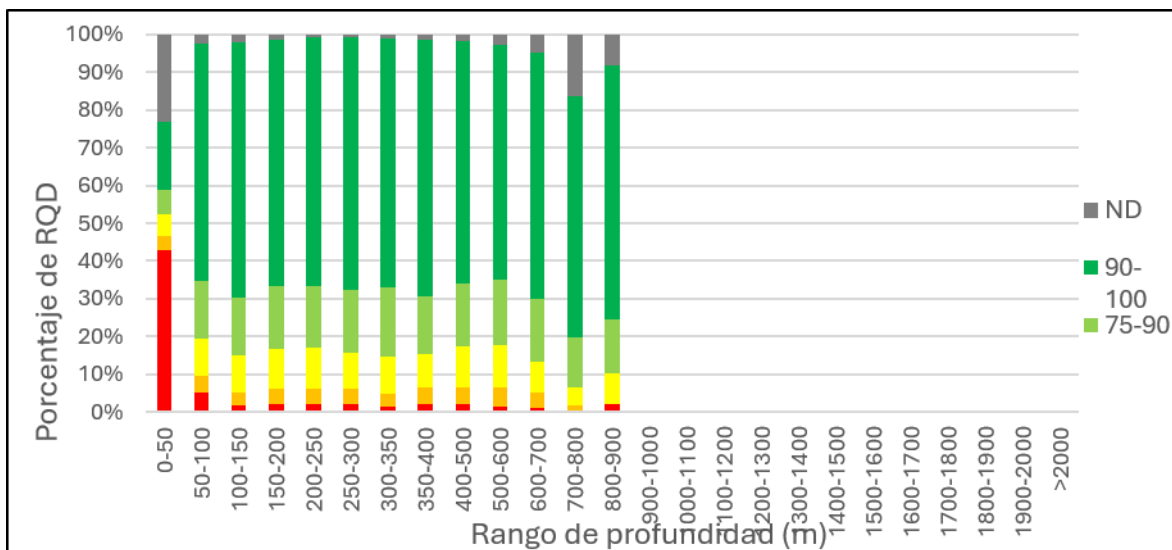


Figura 5.1.1.132 RQD registrado en las perforaciones según la profundidad.

Fuente: (GCL 2026)

Por lo tanto, considerando las condiciones de fracturamiento del macizo en el área de estudio, donde los valores de RQD entre 0 y 25 % representan el 14 % de los datos y los valores entre 25 y 50 % corresponden al 4 %, se interpreta que la mayor capacidad para favorecer el flujo y almacenamiento de agua subterránea se concentra principalmente en los primeros 50 m, asociada al desarrollo de los horizontes de suelo y del perfil de meteorización (ver Tabla 5.1.1.14).

Tabla 5.1.1.14 Datos de perforaciones según la profundidad.

Datos según profundidad							
RQD							
Profundidad	0-25	25-50	50-75	75-90	90-100	ND	Suma %
0-50	42.9	3.8	5.6	6.4	18.1	23.2	100.0
50-100	5.0	4.4	10.0	15.4	62.7	2.4	100.0
100-150	1.9	3.4	9.6	15.4	67.6	2.1	100.0
150-200	2.0	4.2	10.6	16.7	65.1	1.5	100.0
200-250	2.0	4.1	10.9	16.5	65.7	0.8	100.0
250-300	1.9	4.1	9.6	16.9	66.8	0.7	100.0
300-350	1.3	3.3	9.9	18.4	66.0	1.1	100.0
350-400	2.0	4.3	9.1	15.2	67.9	1.4	100.0
400-500	2.0	4.3	10.9	16.9	64.2	1.6	100.0
500-600	1.4	5.2	11.3	17.2	62.3	2.7	100.0
600-700	1.0	4.0	8.2	16.8	65.2	4.8	100.0

Datos según profundidad							
RQD							
700-800	0.2	1.6	4.8	13.0	64.2	16.2	100.0
800-900	2.0	0.0	8.2	14.3	67.3	8.2	100.0

Fuente: GCL (2026)

5.1.1.2.3 Unidad geológica superficial (UGS)

Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), son el conjunto de materiales de suelo y/o roca expuestos en superficie, clasificados desde el punto de vista ingenieril; que presentan un origen en común y conservan similares características físicas y geomecánicas incluso en parte del subsuelo, que las hacen más o menos propensas a la generación de movimientos en masa y se considera como factor condicionante para la estabilidad del terreno (Servicio Geológico Colombiano, 2017). Estas unidades pueden clasificarse según su origen en: roca inalterada, suelos derivados de roca *in situ* o residuales y suelos transportados.

El área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote se encuentra localizada principalmente sobre UGS de roca inalterada de origen ígneo y del tipo cuarzodioritas y gabros pertenecientes al Batolito Antioqueño. Estas unidades se encuentran cubiertas en algunos sectores por suelos transportados del tipo depósitos de vertiente (coluviales y de flujo) y depósitos aluviales de espesores variables que se asocian a la quebrada La Palestina.

Las UGS fueron definidas mediante el análisis de la exploración geotécnica de perforaciones y exploraciones ejecutadas dentro del marco del Proyecto Gramalote, el Estudio de Impacto Ambiental (Integral S.A., 2015) y el uso de los modelos digitales de elevación (DEM), que ayudaron a determinar algunas de las características geomorfológicas y límites de estas unidades. En la Figura 5.1.1.133 se presenta la cartografía de las UGS para el área del Proyecto Gramalote. El mapa correspondiente es I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-GEOSUP.

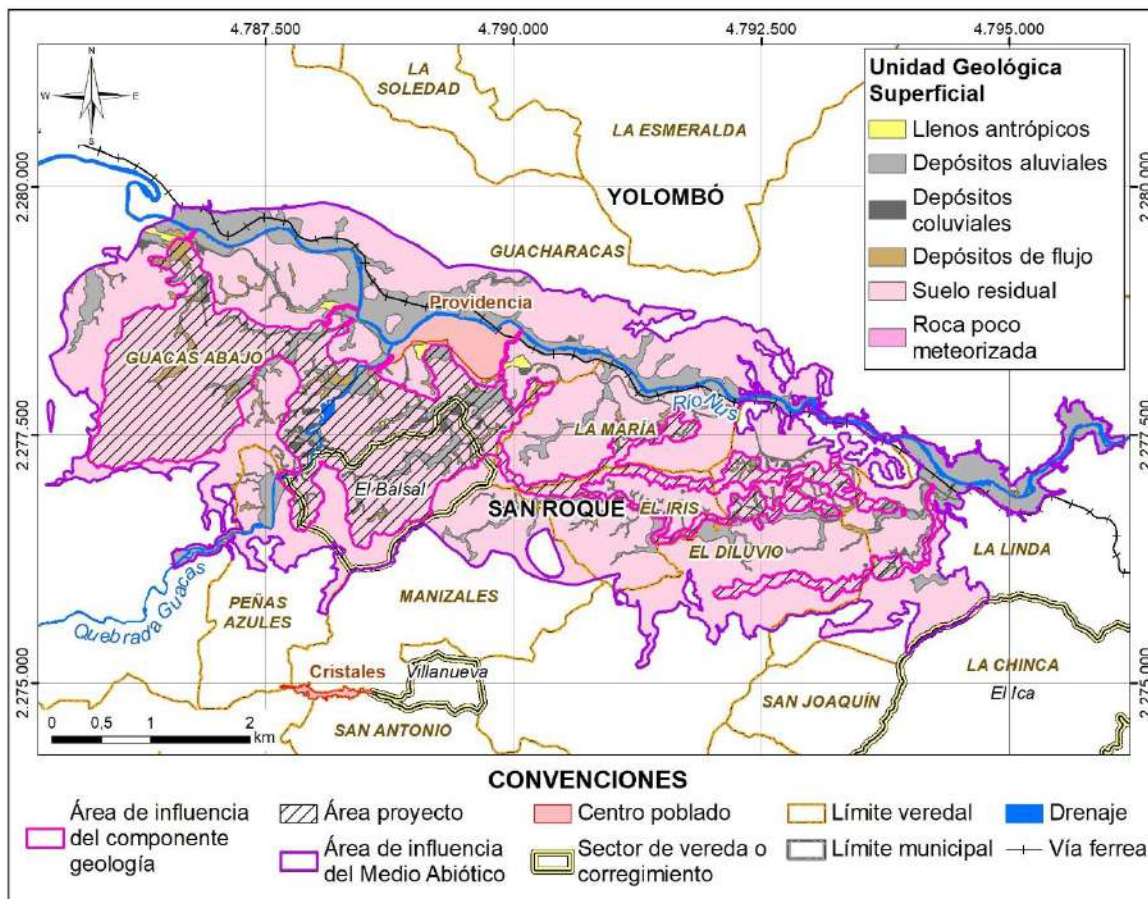


Figura 5.1.1.133 Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Fuente: Integral S.A., 2022

A. Roca poco meteorizada (II) – Batolito Antioqueño (Rpmba)

Este tipo de roca aflora en las orillas de la quebrada Guacas, donde se observa un material poco meteorizado del color gris claro y muy resistente a la meteorización.

B. Suelos residuales

Consisten en suelos con espesores variables que se han generado por la meteorización y descomposición in situ, de los materiales subyacentes que en este caso corresponden a las rocas ígneas plutónicas del Batolito Antioqueño.

a. Suelo residual de cuarzodiorita – Batolito Antioqueño (Srcba)

Se identifican superficialmente los siguientes horizontes del perfil de meteorización definidos por Dearman, W.R., (1974).

I. Suelo residual (VI)

Limo arcilloso a arcilloso, de consistencia baja, de color amarillo a rojizo. Sí se presentan los dos horizontes, el nivel amarillo se localiza por encima del nivel rojizo. Es homogéneo y no presenta la textura de la roca original (Fotografía 5.1.1.7).



Fotografía 5.1.1.7 Perfil de meteorización de cuarzodiorita del Batolito Antioqueño. A. Horizonte de suelo residual (grado VI) - B Apique, Horizonte del perfil de meteorización (grado VI)

Fuente: Integral S.A., 2025

II. Roca completamente meteorizada (V)

Corresponde al denominado saprolito, este se caracteriza por ser una arena de color gris claro a café claro. En el caso en que la roca original presente minerales máficos como hornblenda y biotita, el saprolito generado es limo arenoso, de color moteado rojizo, blanco y café, por el proceso de oxidación de los minerales oscuros. En general, es un horizonte de compacidad mediana a densa y susceptible a la erosión superficial. Se pueden identificar dentro del saprolito planos de diaclasas heredados de la roca original, que pueden exhibir relleno de óxidos (Fotografía 5.1.1.8).



Fotografía 5.1.1.8 Perfil de meteorización del Batolito Antioqueño (sapolito). Apique donde se observa el horizonte del grado V del perfil de meteorización

Fuente: Integral S.A., 2025

En los sectores donde el sapolito presenta una granulometría arenosa predominante, es común el desarrollo de procesos de erosión concentrada evidenciado por la ocurrencia de surcos y cárcavas. De igual manera, los drenajes inmaduros que atraviesan terrenos constituidos por este material son más susceptibles de generar procesos de socavación de orillas y desgarres superficiales sobre las laderas. Localmente y asociado a las zonas que exhiben proceso de meteorización esferoidal, se presentan bloques de roca parcialmente meteorizados, oxidados, decolorados y redondeados que alcanzan un metro de diámetro. El horizonte saprolítico presenta un espesor que varía entre 15 a 40 m, presentando los valores máximos hacia las partes altas de las laderas y disminuyendo hacia las zonas de las vertientes donde ha sido removido, en parte, por los procesos morfodinámicos que operan en la zona.

b. Suelos transportados coluviales (Stc)

Son depósitos de materiales sueltos producto de los movimientos en masa, transportados por efecto de la gravedad y el aumento en la presión de poros por la saturación debida a las fuertes precipitaciones. Estos son movimientos en masa de diferente tipo como flujos, movimientos translacionales, rotacionales, entre otros.

Los depósitos coluviales en el área del Proyecto Gramalote, vía Cristales, están constituidos en su mayoría por una matriz arenosa o limo arcillosa y bloques de roca que han sido

removidos de los horizontes de meteorización más superficiales y posteriormente se acumulan en las zonas de pendiente moderada a baja; son de carácter puntual, con espesores que no superan los cinco metros, cubriendo pequeñas áreas que dificultan su localización cartográfica (Fotografía 5.1.1.9).



Fotografía 5.1.1.9 Suelos transportados coluviales (Stc)

Fuente: Integral S.A., 2021

c. Suelo transportado de flujo (Stf)

Son depósitos de materiales sueltos producto de los movimientos en masa, transportados por efecto de la gravedad y el aumento en la presión de poros por la saturación debida a las fuertes precipitaciones. Estos son movimientos en masa de diferente tipo como flujos, movimientos translacionales y rotacionales, entre otros.

Los depósitos de flujo en el área del Proyecto Gramalote, vía Cristales, están constituidos en su mayoría por una matriz arenosa o limo arcillosa y bloques de roca que han sido removidos de los horizontes de meteorización más superficiales y posteriormente se acumulan en las zonas de pendiente moderada a baja; son de carácter puntual (Fotografía 5.1.1.10), con espesores que no superan los diez metros.



Fotografía 5.1.1.10 Suelo transportado de flujo (Stf)

Fuente: Integral S.A., 2022

d. Suelos transportados aluviales (Sta)

Son depósitos sedimentarios sin consolidar conformados por partículas que han sido transportadas y depositadas por la dinámica fluvial de los drenajes en el área del Proyecto. Se encuentran en cauces activos, llanuras de inundación y la zona de influencia de las corrientes. Una variable que ha controlado la dinámica y evolución de esta unidad geológica está relacionada con la intervención antrópica derivada de las explotaciones mineras no controladas hacia las márgenes de las corrientes. En estos sectores se han configurado montículos de material aluvial por la intervención antrópica.

- Suelos transportados de llanura aluvial (Stlla)

Consisten en depósitos fluviales recientes no consolidados ubicados en zonas planas aledañas a los cauces de los ríos y quebradas, como puede apreciarse en la Fotografía 5.1.1.11.



Fotografía 5.1.1.11 Suelos transportados de llanura aluvial (Stlla)

Fuente: Integral S.A., 2025

Conformados por gravas, cantos y bloques de formas subredondeados a redondeados en una matriz compuesta principalmente de arena gruesa, limo y arcilla, lo que facilita el desprendimiento de material por efectos de socavamiento lateral. Estos depósitos exhiben espesores variables de hasta 20 m.

- Suelos transportados de cauce activo (Stca)

Corresponde a depósitos fluviales no consolidados ubicados dentro de los cauces de las quebradas que intervienen en el área. Son depósitos pobremente sorteados, compuestos por arenas, cantos y bloques de diferente tamaño, de formas subredondeadas a redondeadas de color variable y son continuamente removilizados variando su espesor, tamaño y forma de un lugar a otro. Se localizan en zonas de baja pendiente.

C. Llenos antrópicos (Lla)

Este tipo de llenos por su naturaleza, son depósitos artificiales no consolidados generados por el hombre con diferentes finalidades como excavaciones, reconfiguración de terraplenes para vías o caminos, disposición de escombros, actividades mineras, rellenos sanitarios, entre otros, los cuales dependiendo de su ubicación pueden mejorar o disminuir las condiciones de estabilidad del terreno.

El material se caracteriza por presentar diferente granulometría desde fino a grueso granular suelto, color gris a amarillo claro, presenta consistencia blanda a media, mal seleccionado; con espesores variables; es común que en los clastos además de bloques angulares de roca y madera y materiales de origen no natural como fragmentos de ladrillo, cerámica, concreto, plástico y vidrio, entre otros. En el área del Proyecto estas zonas [se dividen en Llenos antrópicos asociados a adecuación de terrenos e infraestructura y Depósitos antrópicos mineros asociados a minería artesanal histórica.](#)

5.1.1.2.4 Depósito Gramalote

En el área general del proyecto, los principales tipos composicionales dentro del Batolito Antioqueño son tonalita y granodiorita, con monzonita subordinada y gabro. Diques alaskíticos, félsicos y andesíticos han intruído el complejo. Los principales tipos de rocas se resumen en la Tabla 5.1.1.15. Las dataciones realizadas por AngloGold sugieren que la mineralización de oro está asociada con las últimas etapas de cristalización del batolito.

Tabla 5.1.1.15 Principales tipos de roca

Unidad	Descripción
Tonalita, granodiorita	Consisten principalmente de cristales de plagioclasa, cuarzo y minerales máficos (biotita y hornblenda)
Cuarzodiorita	Contenido de cuarzo de 10-20 %, predominando sobre la plagioclasa cálcica y los minerales máficos, con contenido variable (hornblenda y/o biotita). Los máficos pueden ser alterados a clorita.
Diorita porfirítica de grano fino	Texturas ígneas porfiríticas, plagioclasa y fenocristales de cuarzo de 0.5 a 2 mm de diámetro, embebidos en una matriz afanítica. La matriz contiene también minerales máficos tales como hornblenda y mica (biotita)
Dique de microdiorita	Similar a la diorita porfirítica, pero de tamaño cristalino <0,5 mm, presente en áreas adyacentes al depósito mineral y en forma de diques centimétricos ocasionalmente afectados por eventos hidrotermales en el contacto con la tonalita/granodiorita huésped (Figura 5.1.1.134 y Figura 5.1.1.139)
Aplitas y pegmatitas	Las aplitas consisten principalmente de feldespato alcalino, cuarzo y mica (biotita localmente). Típicamente, textura afanítica, que varía en tamaño de mm a cm de escala (Figura 5.1.1.135). Las pegmatitas tienen componentes similares, pero son más gruesas.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

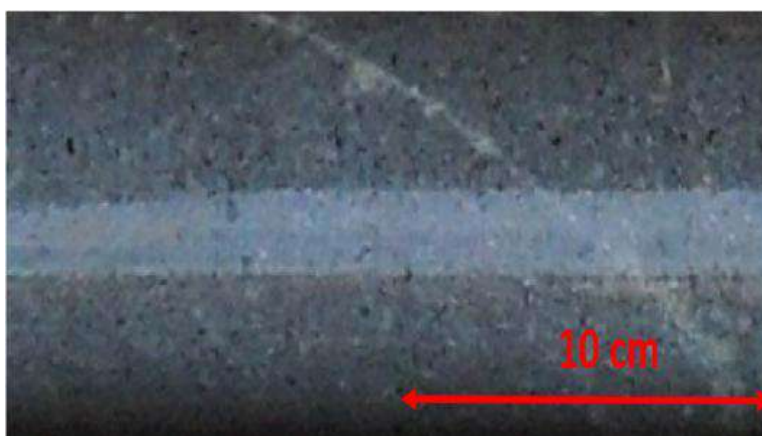


Figura 5.1.1.134 Dique de microdiorita

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

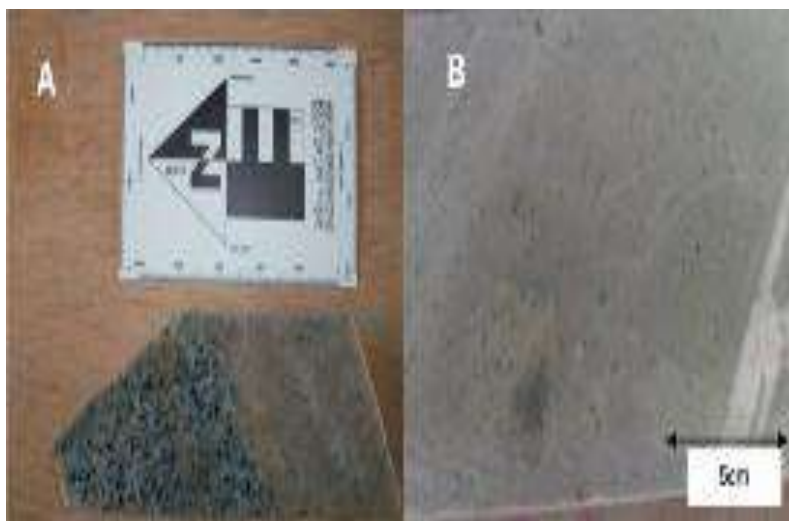


Figura 5.1.1.135 Aplitas y pegmatitas. A) Dique de pegmatita en contacto con tonalita de grano medio. B) Aplita de textura afanítica y composición félsica

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)



Figura 5.1.1.136 Tonalita fresca

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

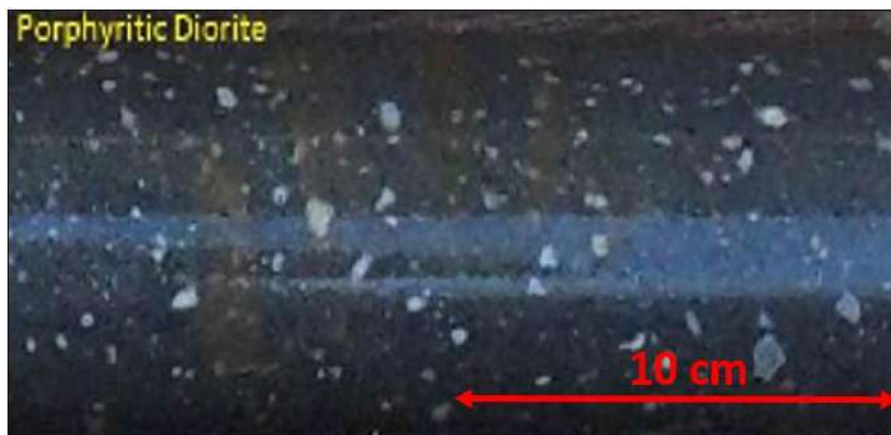


Figura 5.1.1.137 Diorita porfídica

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

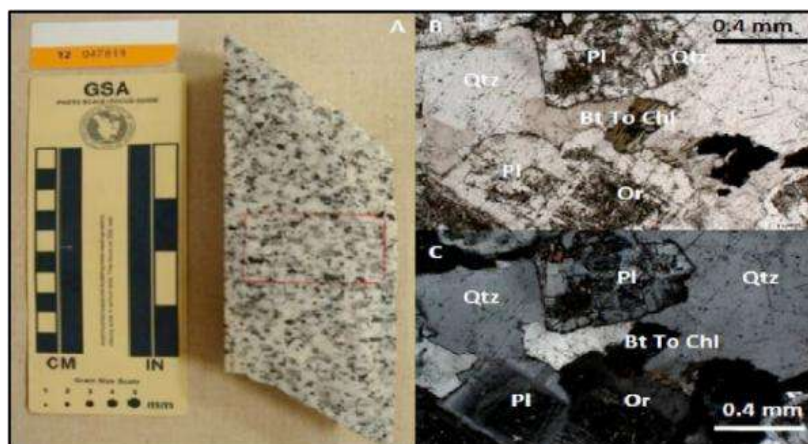


Figura 5.1.1.138 Tonalita fresca y ortoclasa. Núcleo de tonalita fresca. A) microfotografía mostrando cuarzo (Orz), plagioclasa (Pl) y ortoclasa (Or). B) Igual que A), con luz polarizada y nicoles cruzados

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

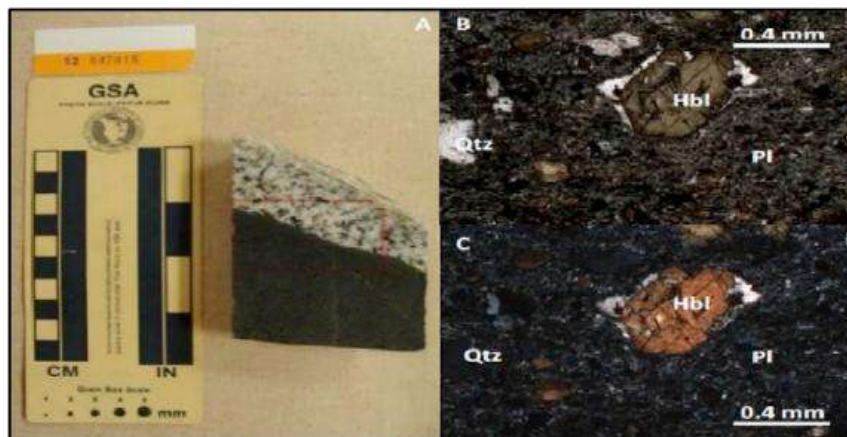


Figura 5.1.1.139 Contacto diorita fina/tonalita

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

A. Perforaciones

La exploración del subsuelo es una etapa clave en la caracterización detallada del depósito mineral, proporcionando información más precisa sobre la continuidad, extensión y características geotécnicas e hidrogeológicas del cuerpo mineralizado. Esta fase complementa los estudios de exploración superficial mediante la ejecución de labores subterráneas, perforaciones y estudios específicos, permitiendo una mayor confiabilidad en la estimación de recursos minerales.

La Tabla 5.1.1.16 resume las perforaciones realizadas hasta el 21 de mayo de 2025 en todo el proyecto. Las perforaciones realizadas en el proyecto incluyen perforaciones RC y con extracción de testigos, con un total de 1.245 perforaciones (269.049 m). La fecha límite de la base de datos de perforación de recursos para Gramalote fue el 9 de marzo de 2022.

Tabla 5.1.1.16 Resumen de campañas de perforación

Campaña	Propósito	Tipo	No Pozos	Metros
2006–2007	Exploración	Núcleo	46	13062,11
2007-2008	Exploración	Túnel	2	481,1
2008	Condenación	Núcleo	1	200,9
2008	Exploración	Núcleo	9	2830,07
2008	Relleno/Definición	Núcleo	60	20138,37
2010–2017	Exploración	Núcleo	62	20698,79
2010–2017	Metalurgia	Núcleo	16	3688,06
2010–2017	Relleno/Definición	Núcleo	350	58902,38

Campaña	Propósito	Tipo	No Pozos	Metros
2010–2017	Geotecnia	Núcleo	32	6629,13
2010–2017	Condenación	Núcleo	76	12341,25
2010–2017	Relleno/Definición	RC	180	14134,00
2019–2022	Relleno/Definición	Núcleo	211	69437,80
2019–2022	Metalurgia	Núcleo	22	9632,07
2019–2022	Exploración	Núcleo	5	1413,44
2019–2022	Infraestructura	Núcleo	124	3668,02
2019–2022	Condenación/Exploración	Núcleo	6	1699,64
2022	Hidrogeología	Núcleo	11	527,62
2024	Infraestructura	Núcleo	7	211,88
2025	Infraestructura	Núcleo	25	695,54
Total			1.245	240.392

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Hay 907 perforaciones (aproximadamente 193.126 m) y dos muestreos de galerías (481 m) que respaldan la estimación de recursos minerales para Gramalote.

Las ubicaciones de los collares de perforación utilizados en las estimaciones de recursos minerales se muestran en la Figura 5.1.1.140 para Gramalote Ridge, los pozos de perforación completados con fines geotécnicos y metalúrgicos se incluyen en los totales de perforación de recursos. Estos pozos de perforación no se analizaron sistemáticamente, pero el registro proporcionó información sobre la superficie de meteorización y las interpretaciones estructurales que forman parte de los modelos de recursos.

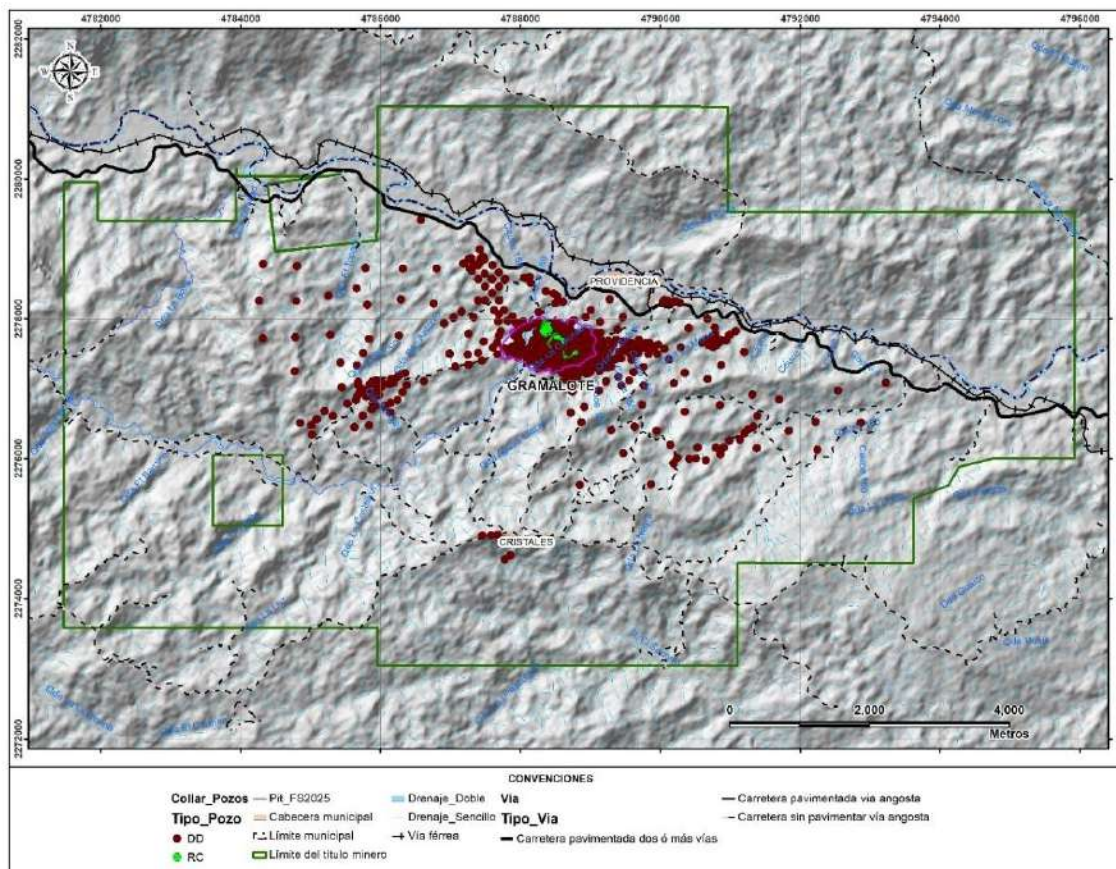


Figura 5.1.1.140 Localización collar de perforaciones título 14292

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

La Tabla 5.1.1.17 resume la campaña de perforación en el yacimiento, cuya localización se muestra en la Figura 5.1.1.141, la cual se extendió hasta el 9 de marzo de 2022.

Tabla 5.1.1.17 Perforaciones utilizadas para la estimación de recursos

Operador	Propósito	Año	Tipo	No Pozos	Metros
AngloGold	Exploración	2006–2007	Núcleo	43	12.312,34
AngloGold	Exploración	2006–2008	Túnel	1	240,00
B2Gold	Relleno/Definición	2008	Núcleo	60	20.138,37
B2Gold	Exploración	2008	Túnel	1	241,10
B2Gold	Exploración	2008	Núcleo	6	1.829,23
B2Gold	Condenación	2008	Núcleo	1	200,9
GCL	Metalurgia	2010–2017	Núcleo	14	3.148,06

Operador	Propósito	Año	Tipo	No Pozos	Metros
GCL	Exploración	2010–2017	Núcleo	23	8.183,11
GCL	Relleno/Definición	2010–2017	Núcleo	308	44.129,36
GCL	Geotecnia	2010–2017	Núcleo	17	6.048,91
GCL	Condenación	2010–2017	Núcleo	16	2.488,63
GCL	Relleno/Definición	2010–2017	Núcleo	180	14.134,00
B2Gold	Metalurgia	2019–2022	Núcleo	22	9.632,07
B2Gold	Relleno/Definición	2019–2022	Núcleo	211	69.437,80
B2Gold	Infraestructura	2019–2022	Núcleo	1	30,08
B2Gold	Exploración	2019–2022	Núcleo	5	1.413,44
Subtotal Túnel				2	481,10
Subtotal Perforación				907	193.126,30
Total				909	193.607,40

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

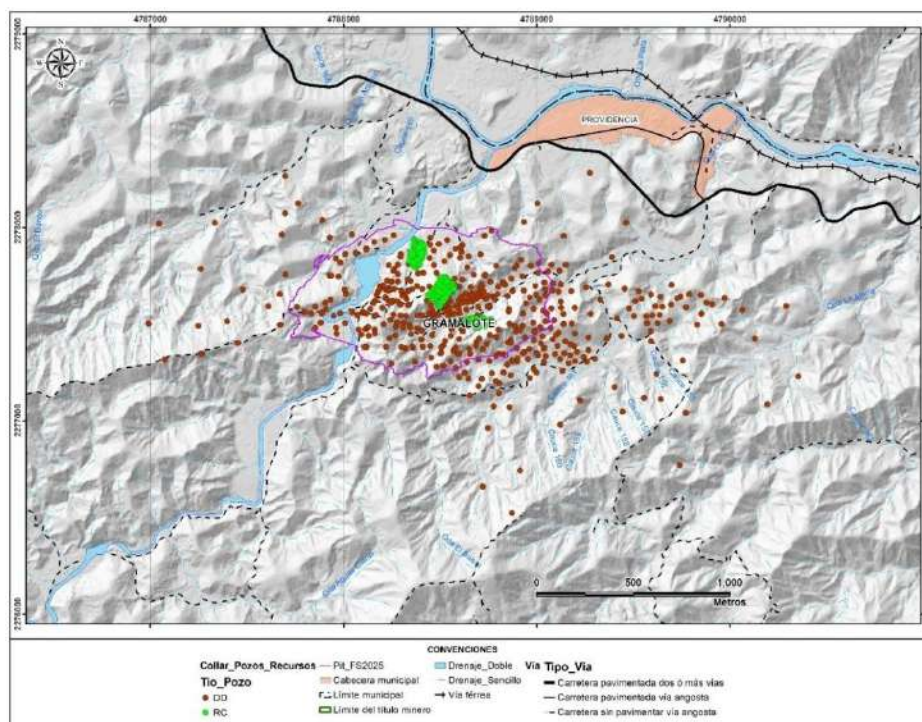


Figura 5.1.1.141 Ubicación de collares de perforaciones utilizadas para la estimación de recursos

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

B. Alteraciones

La alteración está controlada estructuralmente y ocurre tanto en zonas amplias como en bordes delgados alrededor de las vetas. En el depósito mineral, los bordes de las vetas varían desde unos pocos milímetros hasta 10 cm. Las zonas de alteración más amplias imitan el comportamiento de las vetas y progresan desde una zona exterior de cuarzo-sericita a zonas interiores potásicas y de carbonato – carbonato sericita. En la superficie se identifica una zona de alteración argílica menor (Figura 5.1.1.142 y Figura 5.1.1.143).

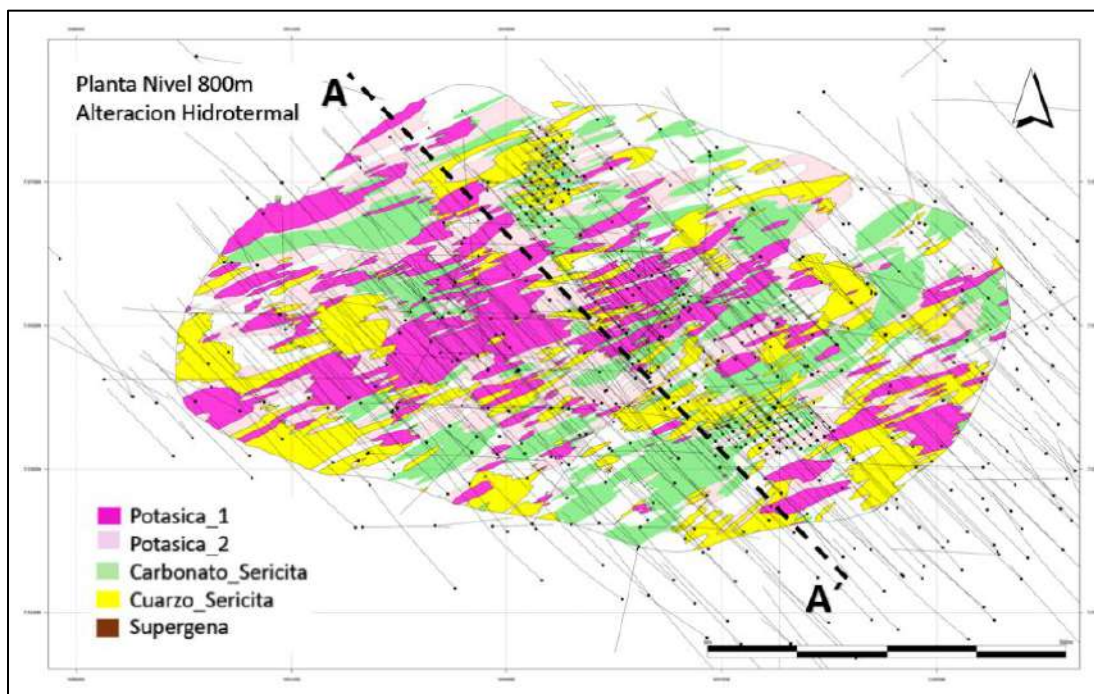


Figura 5.1.1.142 Modelo de alteración del depósito - vista en planta

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

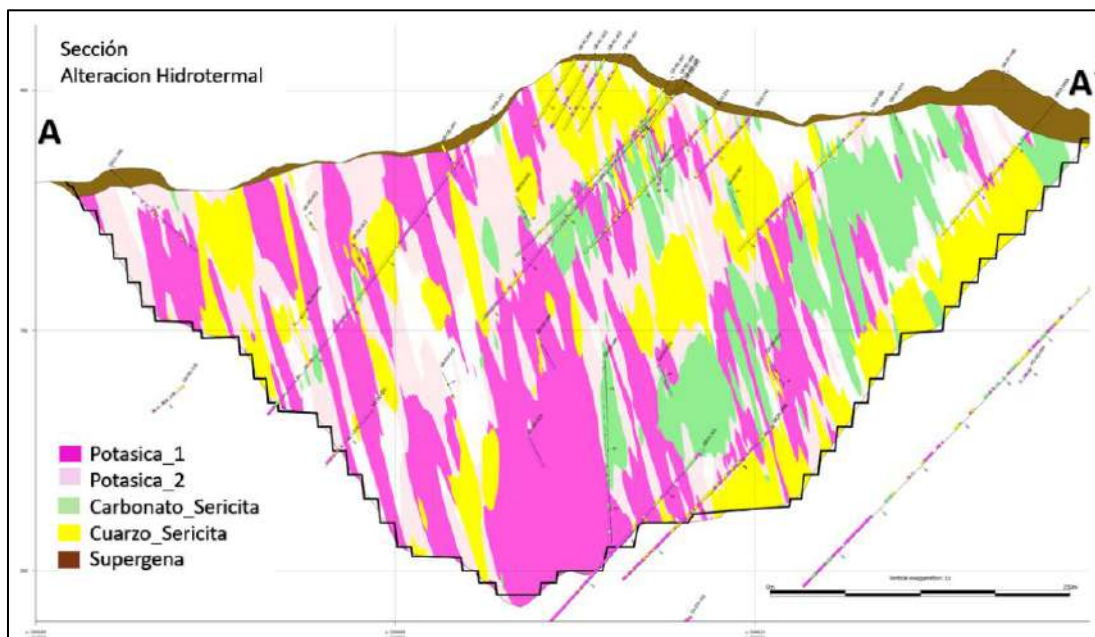


Figura 5.1.1.143 Modelo de alteración del depósito – Sección del núcleo del depósito

Fuente: Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Se identifican típicamente tres zonas de alteración difusa y superpuesta que alternan de roca fresca a vetas mineralizadas en un rango generalmente menor de 20 cm (Figura 5.1.1.144):

- Una sericita incipiente distal (alteración de plagioclasa a una zona de mica fina) con magnetita parcialmente oxidada y biotita alterada a clorita.
- Una sericitización extensa intermedia y una zona de carbonato incipiente con pirita reemplazando a la magnetita y una carbonatización incipiente.
- Una zona proximal sin magnetita, $\pm$ feldespato-K, moscovita que reemplaza completamente a la clorita y una mayor carbonatización

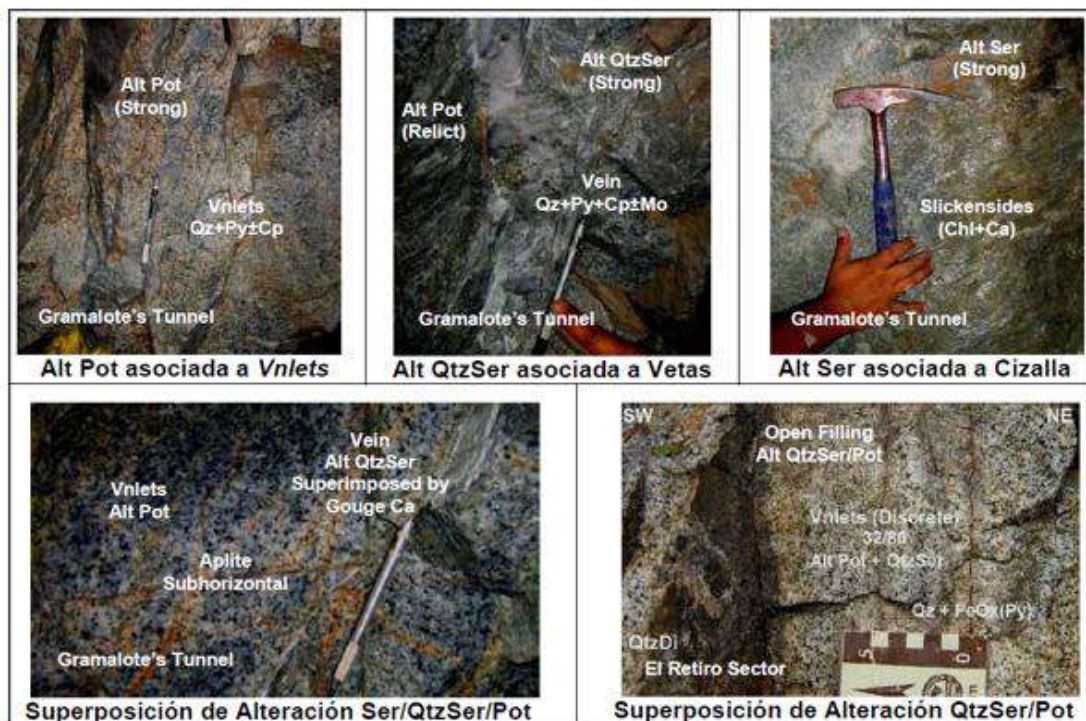


Figura 5.1.1.144 Tipos de alteración

Fuente: Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

C. Mineralizaciones y concentraciones de interés económico

El depósito mineral tiene unas dimensiones de 1.300 x 1.500 x 700 m. La mineralización ha sido probada con perforación hasta una profundidad de aproximadamente 650 m.

La mineralización está alojada en una tonalita uniforme de grano medio con pequeñas cantidades menores de granodiorita y aplita. Diques de composición diorítica a granodiorítica y granítica se encuentran en toda el área de depósito mineral y constituyen menos del 1% en volumen del macizo rocoso observado. La tonalita huésped es débilmente magnética y la mineralización/alteración es magnéticamente destructiva, por lo que los mapas de magnetismo muestran las zonas mineralizadas con bajo valor.

La mineralización ocurre dentro de varias zonas que se fusionan periódicamente tanto a lo largo del rumbo como en el buzamiento. Las zonas varían de 10 a 150 m de espesor con buzamientos verticales a subverticales al sur - sureste. El depósito permanece abierto en profundidad y a lo largo del rumbo. Los tenores anómalos de oro están relacionados con tres asociaciones de alteración sobreimpuestas, con destrucción de texturas; las cuales corresponden a potásica, cuarzo-sericita y sericita-carbonato.

Las características de la destrucción de magnetita en estas zonas se definen claramente a partir de estudios magnéticos aéreos y terrestres sobre la roca huésped de tonalita, la cual es débil a moderadamente magnética. La mineralización está alojada en vetas, ya sea en vetas laminadas o en stockworks locales, y está controlada estructuralmente.

La Figura 5.1.1.145 muestra una sección transversal en el que se identifican las tres zonas de mineralización del depósito, asociadas con los tipos de vetas y alteraciones:

- Cuarzo-calcita-pirita (Bajo grado - LG): es una asociación de cuarzo de grano fino y calcita con pirita de grano muy fino. Este tipo de veta generalmente no alberga oro.
- Cuarzo-pirita-calcopirita (Alto grado - HG): es el huésped de oro más importante, típicamente asociado con bordes de feldespato potásico. El oro se presenta en fracturas en pirita junto con calcopirita.
- Cuarzo-calcita-mica blanca (Halo): es comúnmente estéril, pero puede mostrar contenidos moderados de oro. Las vetas se identifican comúnmente gracias a bordes de mica blanca. Los tipos de vetas se resumen desde la más joven hasta la más vieja. La mineralización de oro anómala está asociada con las vetas Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 5, siendo las Tipos 1 y Tipo 2, las predominantes.

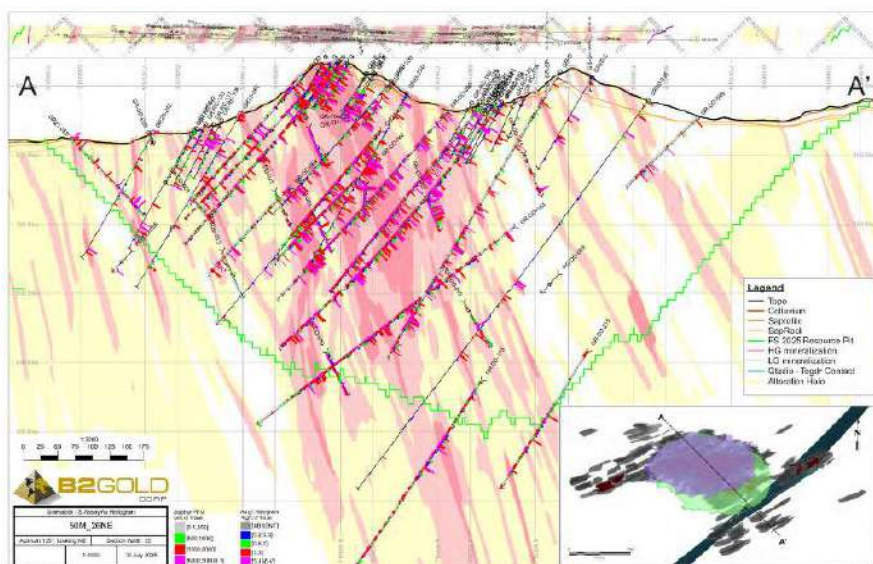


Figura 5.1.1.145 Sección transversal -Dominios definidos para el depósito; amarillo (Halo), rosado claro (LG) y rosado oscuro (HG)

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Tabla 5.1.1.18 Tipos de vetas

Veta	Composición	Descripción
Tipo 1	Cuarzo $\pm$ pirita	Puede tener calcopirita. Aristas bien definidas y formas generalmente rectas con aspecto tabular. Más contenido de cuarzo que azufre y generalmente asociado a halos de alteración potásico (Figura 5.1.1.146).
Tipo 2	Cuarzo + carbonato + pirita + calcopirita	Normalmente muestran salbandas irregulares y con las formas de las lentes cuando el grosor es centimétrico. Contiene cantidad variable de pirita y calcopirita. El carbonato es típicamente siderita o anquerita, principalmente asociado con halos de alteración cuarzosericita (Figura 5.1.1.147).
Tipo 3	Pirita fina	Vetas compuestas casi exclusivamente de pirita con cantidad variable de cuarzo. Forma vetas trenzadas brechadas. Color gris oscuro debido al contenido de pirita (Figura 5.1.1.148).
Tipo 4	Cuarzo + molibdenita $\pm$ pirita	Bandas de color gris azulado con abundante molibdenita. Formas variables y aristas generalmente irregulares. Contiene cantidad variable de pirita y calcopirita. Su espesor es de algunos centímetros (Figura 5.1.1.149).
Tipo 5	Pirita gruesa + cuarzo	Vetas con más pirita que cuarzo. Aristas irregulares con cantidad variable de calcopirita. La pirita es euhédrica, de grano grueso a medio, en comparación con la pirita gris de grano muy fino que se encuentra en las vetas Tipo 3 (Figura 5.1.1.150).
Tipo 6	Carbonato	Vetas de carbonato sin sulfuros.
Tipo 7	Clorita $\pm$ epidota	Cantidad variable de carbonato y ocasionalmente pirita fina.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)



Figura 5.1.1.146 Veta Tipo I

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)



Figura 5.1.1.147 Veta Tipo II

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)



Figura 5.1.1.148 Veta Tipo III

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)



Figura 5.1.1.149 Veta Tipo IV

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)



Figura 5.1.1.150 Veta Tipo V

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

La mineralización en el saprolito y en la roca meteorizada (óxido) está meteorizada in situ y no muestra evidencias de transporte significativo o desplazamiento. La mineralización meteorizada está limitada a las áreas que se encuentran directamente por encima de la mineralización fresca y representa un pequeño porcentaje de la mineralización. El espesor del saprolito/roca meteorizada varía entre 5 – 50 m, con un espesor promedio de 21 m para el total del depósito mineral y de 15 m por encima de la mineralización.

La relación plata a oro es aproximadamente de 1:1. La mineralización primaria consiste en pirita y calcopirita. Los minerales secundarios incluyen rutilo y mineral titanífero. El oro libre se encuentra como oro argentífero coetáneo con diversos teluridos y minerales de sulfosales de bismuto.

D. Tipo de depósito

El yacimiento se considera un ejemplo de depósito de oro intrusivo controlado estructuralmente, cuyas características son según (Lefebure & Hart, 2005) son:

- Comúnmente encontrados en asociaciones sedimentarias de margen continental que han sido intruidas por plutones detrás de los arcos de margen continental. Normalmente se desarrollan en etapas tardías de la orogenia o en condiciones post-colisionales.
- Pueden ser de cualquier edad, aunque son más conocidos en rocas paleozoicas a mesozoicas.
- Las rocas huésped que corresponden a intrusiones graníticas y a diversas rocas sedimentarias metamorfoseadas. Es raro encontrar rocas volcánicas asociadas. Los granitoides son litológicamente variables, pero normalmente corresponden a granodiorita, cuarzomonzonita a granito. La mayoría de las intrusiones tienen algún grado de variación litológica que aparecen como múltiples fases que pueden incluir monzonita, monzogranito, granitos de albita, sienita alcalina y sienita.
- Las fases más diferenciadas comúnmente contienen feldespato y cuarzo y menos de 5% de minerales máficos. Las intrusiones de grano medio a grueso son comúnmente equigranulares, pero pueden contener megacristales de feldespato potásico o fenocristales porfíricos de cuarzo, plagioclasea o biotita. La biotita es común, la hornblenda sólo se observa localmente, raramente se encuentra piroxeno y la moscovita y la turmalina son comunes en fases altamente fraccionadas, aplitas o pegmatitas. Las intrusiones tienen un estado de oxidación primaria reducido.
- La mineralización está fuertemente controlada estructuralmente y relacionada espacialmente con intrusiones granitoides altamente diferenciadas. La mineralización comúnmente se encuentra dentro o cerca de las fases más evolucionadas de la intrusión.
- Las vetas laminares son planares y a menudo paralelas a las estructuras regionales. Son generalmente extensionales sin desplazamiento de paredes, aunque algunos sistemas de vetas también pueden incluir vetas en cizallas.
- Zonas de alteración relativamente restringidas que son más obvias como bordes estrechos de alteración a lo largo de las vetas. La alteración generalmente consiste en los mismos minerales que ocurren en las vetas, normalmente albita, feldespato potásico, biotita, sericita, carbonato (dolomita) y algo de pirita. La alteración pervasiva, dominada por la sericita, sólo ocurre en asociaciones con las zonas de mineral de mejor tenor.
- Mineralización de oro en vetas de cuarzo con espesores desde milímetros hasta metros, alojadas en intrusiones graníticas equigranulares a porfíricas y cornubiana adyacente. Las vetas forman matrices paralelas (laminadas) y, en menor proporción, stockworks débilmente desarrollados; la densidad de las vetas y de las vetillas es un elemento crítico para definir la mena. El oro nativo se encuentra

asociado con algo de pirita, arsenopirita, pirrotita, scheelita y minerales de bismuto y telurio.

- Los sulfuros son por lo general menores al 3 % y pueden ser inferiores al 1 %. Varios depósitos/intrusiones tienen vetas tardías y periféricas de arsenopirita, estirrita o galena. El oro nativo, a veces visible, ocurre asociado con algo de pirita, arsenopirita, loellingita, pirrotita, cantidades variables de scheelita o raramente wolframita, y a veces molibdenita, bismutinita, bismuto nativo, maldonita, telurobismutinita, bismita, teluridas, tetradimita, galena y calcopirita.

E. Geoquímica

Los programas geoquímicos de superficie como método inicial para la búsqueda de depósitos minerales fueron llevados a cabo desde el periodo 2003 y consistieron en la toma de sedimentos activos, la prospección y el muestreo de rocas superficiales a nivel regional, junto con el análisis geoquímico respectivo. El muestreo se utilizó para definir y luego refinar las áreas que justifican ser perforadas, las cuales continúan siendo objeto de exploración.

a. Localización de muestras

Se han recolectado un total de 7608 muestras de suelo, 5743 muestras de roca, 7609 muestras en trincheras y 132 muestras de sedimentos activos, como parte de las distintas fases de exploración del proyecto (Figura 5.1.1.151). Esta campaña de muestreo ha permitido delinear áreas con potencial geológico, contribuyendo a la identificación de prospectos minerales relevantes. Gracias a esta información, se logró delimitar el área donde actualmente se encuentra ubicado el depósito Gramalote, consolidando su marco geológico y respaldando su viabilidad técnica para etapas posteriores del desarrollo minero.

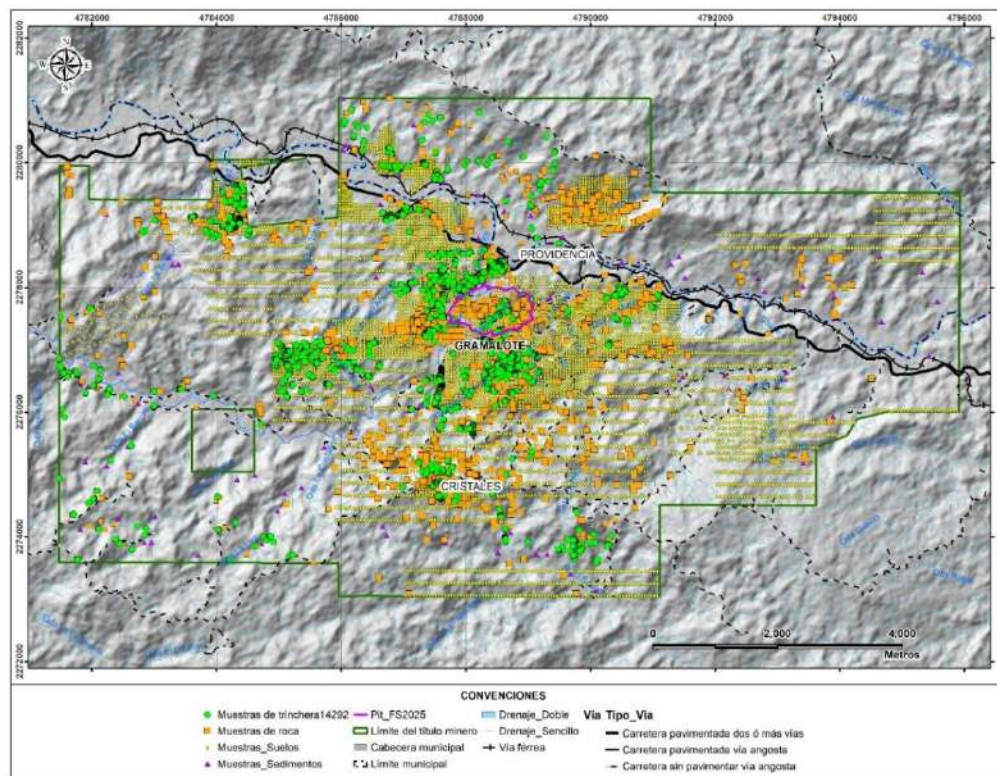


Figura 5.1.1.151 Muestras de suelo, roca, trinchera y sedimentos activos tomados en el título 14292

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

En la exploración del subsuelo por medio de perforaciones tipo diamantina y de aire reverso (RC), se cuenta con el soporte de datos geoquímicos de 103,529 muestras a las cuales se les ha realizado análisis de los diferentes elementos con los cuales se caracterizó la mineralización del depósito de Gramalote (Figura 5.1.1.152).

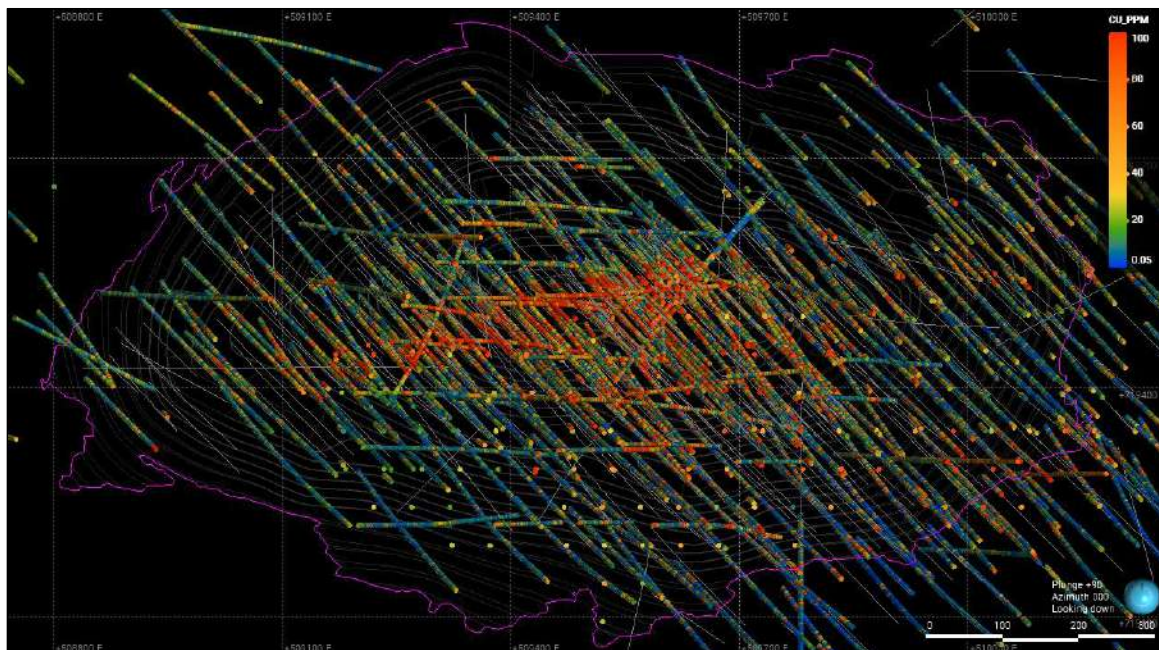


Figura 5.1.1.152 Muestreo perforaciones Gramalote – vista planta

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

b. Anomalías geoquímicas

El tipo de depósito asociado al yacimiento Gramalote, vinculado a intrusiones graníticas se caracteriza por tener una geoquímica relacionada a un origen magmático e hidrotermal. El tipo de sistema estructural del área de Gramalote hace que se presenten elementos distintivos como Bi, Te, S, Cu que presentan relación con la mineralización de oro y plata del sistema, además de tener una baja concentración de sulfuros.

En el núcleo del depósito se observa una asociación geoquímica dominante entre Au, Ag, Bi, Te, S y Cu, vinculada directamente a la mineralización de interés. Esta se encuentra alojada en estructuras de tipo stockwork y venillas laminadas de cuarzo, con presencia subordinada de sulfuros. El sistema corresponde a un ambiente reductor, donde fluidos hidrotermales con temperaturas estimadas entre 250 °C y 400 °C se movilaron a través de fracturas asociadas a zonas de cizalla. La precipitación del oro se produjo como resultado de variaciones en el pH y la temperatura del sistema, favoreciendo su concentración en las zonas estructuralmente más permeables.

Estas asociaciones geoquímicas proveniente de los análisis de laboratorio en muestras suelos y rocas son usadas como vectores para identificar las zonas de potencial en el área donde se desarrolla el proyecto.

En la Figura 5.1.1.153 se observa una marcada correlación entre la mineralización de oro y plata en el núcleo del depósito y la presencia de elementos como bismuto, telurio, azufre y cobre. Estos elementos muestran concentraciones elevadas en el centro del sistema,

mientras que sus valores disminuyen progresivamente hacia las zonas periféricas. Esta dispersión geoquímica está asociada a una reducción en los tenores y volúmenes de mineralización, reflejando una transición desde zonas centrales más amplias y enriquecidas hacia sectores marginales más estrechos, donde la circulación de fluidos hidrotermales fue limitada y menos efectiva para alojar el mineral de interés.

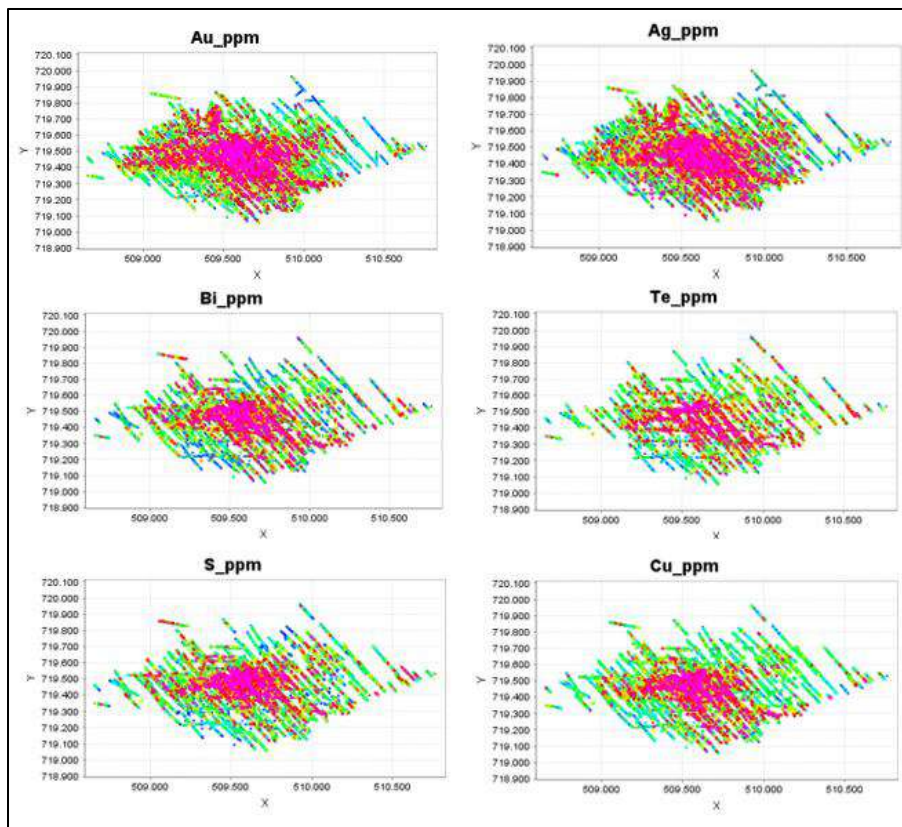


Figura 5.1.1.153 Correlación geoquímica de los elementos asociados a la mineralización del depósito Gramalote

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

c. Interpretación de resultados

A partir de los resultados obtenidos del análisis geoquímico de las muestras superficiales, fue posible delimitar con mayor precisión la zona de interés dentro del depósito principal. Esta información sirvió como base para la construcción de un modelo de interpolación de la mineralización, utilizando técnicas geoestadísticas que permitieron estimar la distribución espacial del contenido metálico (Figura 5.1.1.154). Dicho modelo facilitó la planificación estratégica de las campañas de perforación, orientando los esfuerzos hacia zonas con mayor potencial económico. Como resultado, se logró confirmar la continuidad de la

mineralización en profundidad y en las extensiones laterales, fortaleciendo el entendimiento geológico del yacimiento.

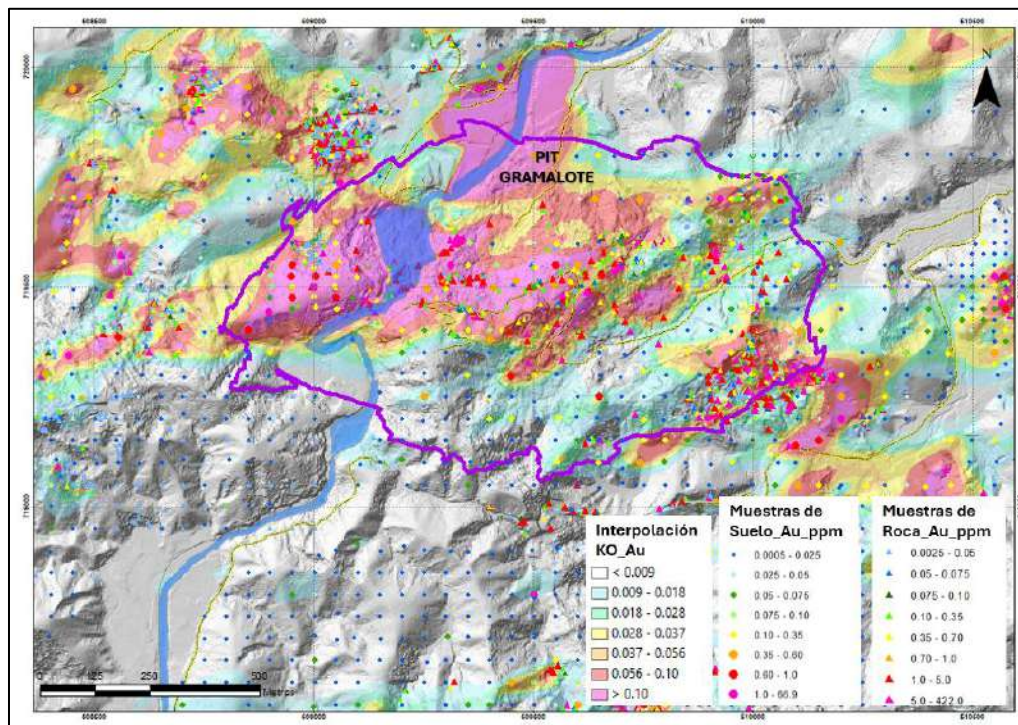


Figura 5.1.1.154 Mapa de interpolación de oro para muestras de superficie del depósito Gramalote

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Mediante las perforaciones planificadas durante las fases exploratorias se obtuvo información geoquímica detallada del depósito en profundidad, lo que permitió validar las anomalías superficiales previamente identificadas. Estas campañas facilitaron la caracterización de la distribución vertical de elementos clave asociados a la mineralización, tales como oro (Au), plata (Ag), bismuto (Bi), telurio (Te), arsénico (As) y cobre (Cu), y permitieron definir con mayor claridad la zonación geoquímica del sistema mineralizado. Los datos recolectados fueron fundamentales para la calibración y refinamiento del modelo geológico del depósito, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en el modelamiento de recursos y planificación minera.

En la Figura 5.1.1.155 se presentan secciones preliminares del modelo, en las cuales se analizaron las anomalías geoquímicas asociadas a la mineralización principal, tanto en sus extensiones laterales como en profundidad. Estas secciones permitieron identificar patrones de distribución de elementos clave, delimitar zonas de interés y evaluar la continuidad del sistema mineralizante más allá del núcleo del depósito.

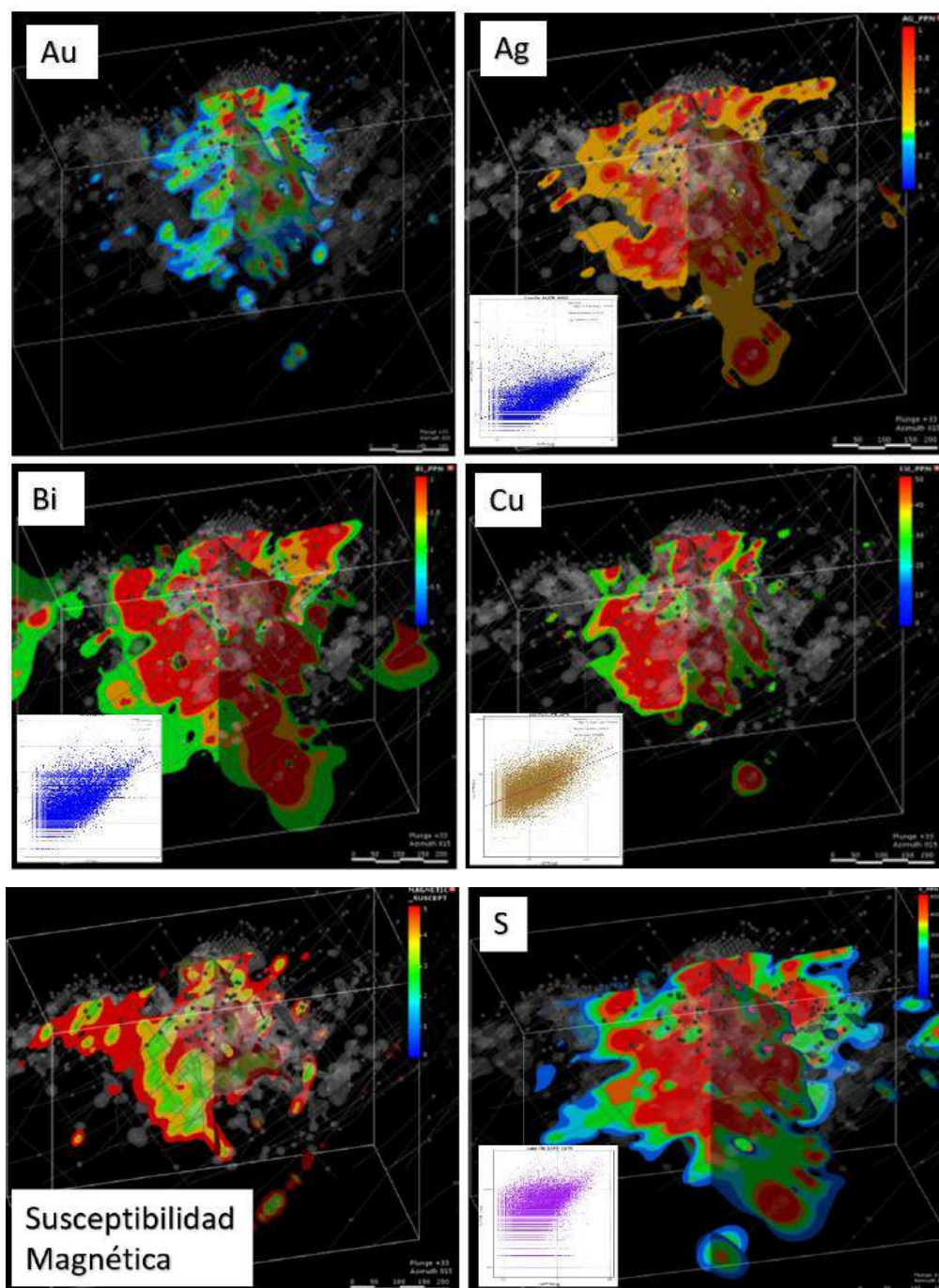


Figura 5.1.1.155 Secciones de interpolación geoquímica de oro para muestras de perforación del depósito Gramalote

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

5.1.1.3 Geoquímica del yacimiento

En concordancia con los lineamientos establecidos por la ANLA en los “Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para Proyectos de Explotación Minera” (ANLA, 2016) y la Guía para evaluar EIAs de Proyectos Mineros (Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW), 2010), que para la caracterización del mineral establece como aspectos fundamentales la mineralogía de roca total, el potencial de generación de ácido mediante pruebas estáticas y cinéticas, el potencial de generación de contaminantes lixiviados a corto y largo plazo, y la identificación de contaminantes de interés.

El contenido de este capítulo se soporta en una base de información técnicamente consolidada, construida a partir de campañas de muestreo superficial, análisis geoquímicos de perforación, caracterización mineralógica y programas específicos de ensayos geoquímicos para roca de desmonte, mineral de baja ley, paredes del tajo y relaves con criterios de representatividad espacial y composicional del depósito mineral.

Los resultados obtenidos confirman que el depósito mineral corresponde a un sistema mineralizado homogéneo, alojando predominantemente una tonalita intrusiva con asociaciones geoquímicas bien definidas y consistentes en las que Au, Ag, Bi, Te, S y Cu se relacionan directamente con la mineralización, manteniendo un comportamiento coherente entre la superficie, la profundidad y los distintos dominios evaluados.

De igual forma, los análisis efectuados hasta la fecha han permitido establecer conclusiones sobre el comportamiento geoquímico de los materiales del yacimiento, incluyendo el bajo contenido general de azufre en roca, la ocurrencia localizada de materiales con potencial de generación de ácido asociada al bajo potencial de neutralización, y tasas bajas de lixiviación para los parámetros de interés, lo que proporciona un marco de interpretación estable y suficiente para la evaluación ambiental del proyecto. En este sentido, dadas las condiciones geológicas y geoquímicas intrínsecas del depósito, no hay variaciones en su composición.

5.1.1.3.1 Mineralogía de roca

La composición mineralógica se desarrolla en el capítulo 5.1.1.2.4, donde se describen los principales tipos de roca del yacimiento, la localización de las muestras, las alteraciones mineralógicas y las mineralizaciones concentraciones de interés económico.

5.1.1.3.2 Potencial de generación de ácido – pruebas estáticas y cinéticas

A continuación, se presenta en este subcapítulo, los resultados de las pruebas geoquímicas realizadas hasta la fecha, en el marco de la aplicación de los nuevos criterios establecidos por la ANLA para la clasificación del drenaje ácido de roca (DAR) en materiales de mina, según lo estipulado en los “Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para Proyectos de Explotación Minera” (ANLA, 2016) para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote. Asimismo, se incluye una comparación entre los

criterios específicos del sitio (pHase Geochemistry, 2013) y los lineamientos definidos por la ANLA en 2016 (Golder, 2020).

La selección de las muestras se realizó buscando contar con un conjunto de muestras representativas tanto espacial como de composición de todo el depósito Gramalote. (Golder, 2020).

La mayoría de la roca presente en el depósito Gramalote es tonalita / granodiorita, con presencia minoritaria de otras litologías. Dado que, el 90% de los testigos de perforación disponibles correspondieron a la litología tonalita/granodiorita, entre 5% y 6% de saprolito y saproroca, entre 1% y 2% corresponden a diorita, cuarzodiorita, aplita y dacita. Por consiguiente, la mayoría de las muestras de roca de desmonte corresponden a la litología tonalita / granodiorita, este material fue evaluado también por pruebas cinéticas. (Golder, 2020).

Esta caracterización se realiza para evaluar de una manera conservadora la proporción de generación de material potencial generador de ácido (PAG) con la finalidad de reducir riesgos ambientales mediante el diseño de un plan de manejo de residuos con un enfoque conservador. (Golder, 2020).

A. Protocolo de muestreo

El protocolo de selección de muestras para caracterización y análisis de potencial de generación de drenaje ácido vincula cuatro elementos principales: tipo de material (litotipos, alteraciones, zonas meteorizadas), representatividad asociada a la selección de número de las muestras, tipo de muestreo y control de calidad. En la Figura 5.1.1.156 se presenta diagrama metodológico.

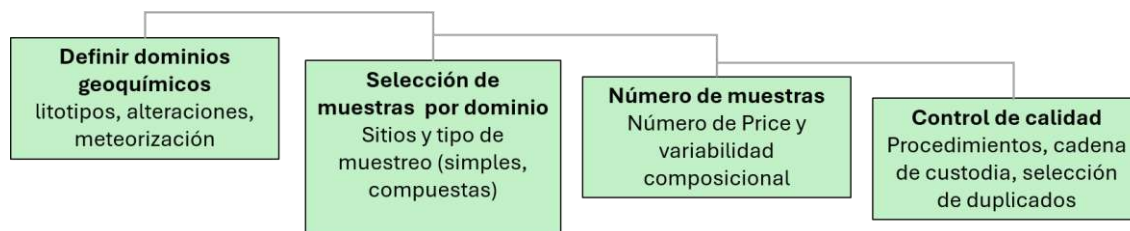


Figura 5.1.1.156 Esquema de protocolo de muestreo para análisis de Drenaje ácido
Fuente: Adaptado de Phase, 2013, Golder, 2020.

El análisis se realiza en detalle para todos los materiales involucrados en el proceso minero. En esta sección se especifica las muestras provenientes de la zona de explotación y paredes del tajo. A continuación, se detalla cada uno.

a. Dominios geoquímicos

Se tomaron como base para este análisis los datos disponibles de la caracterización geológica del yacimiento (mapa y secciones), geoquímica (ensayos), mineralogía y diseño de la excavación. A partir de la integración de la información, se identificaron las variaciones litológicas menores y alteraciones sobreimpuestas a las rocas. Un mismo tipo de roca, como

es la tonalita/granodiorita, solo presenta variaciones por las mineralizaciones y alteraciones, lo que en este caso representa los dominios geoquímicos que se tuvieron en cuenta.

El yacimiento se caracteriza por su gran homogeneidad geológica, en la cual la mayoría de la mineralización se aloja en la roca tipo tonalita/granodiorita, aunque también se presentan en proporciones menores a diorita, dacita y aplita. En la Figura 5.1.1.157 se presenta la distribución de los tipos de rocas para la zona del tajo Gramalote.

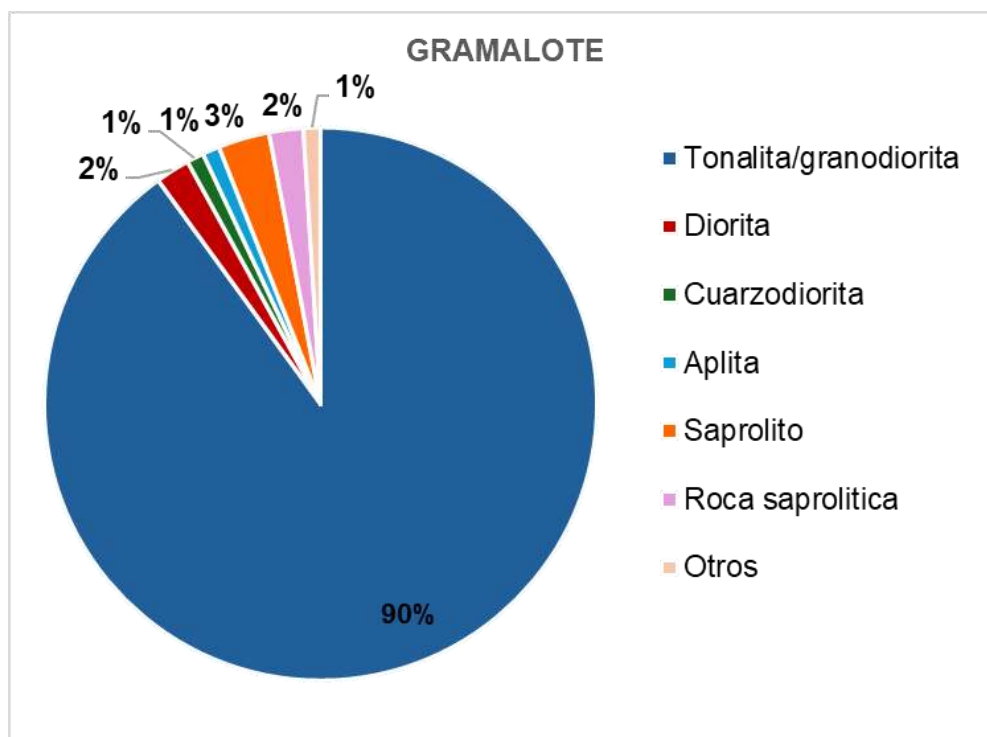


Figura 5.1.1.157 Distribución litológica a partir de testigos de exploración tajo Gramalote

Fuente: Phase, 2013, Golder, 2020.

Desde la óptica de las alteraciones se reportan cuarzo-sericita, carbonato-sericita, potásica y supergena. Estas alteraciones están relacionadas con la mineralización y se limitan a tramos estrechos desarrollados a lo largo de los sistemas de vetas. En la Figura 5.1.1.158 se presenta la distribución en planta de las alteraciones y en la Figura 5.1.1.159 se muestra una sección con la distribución.

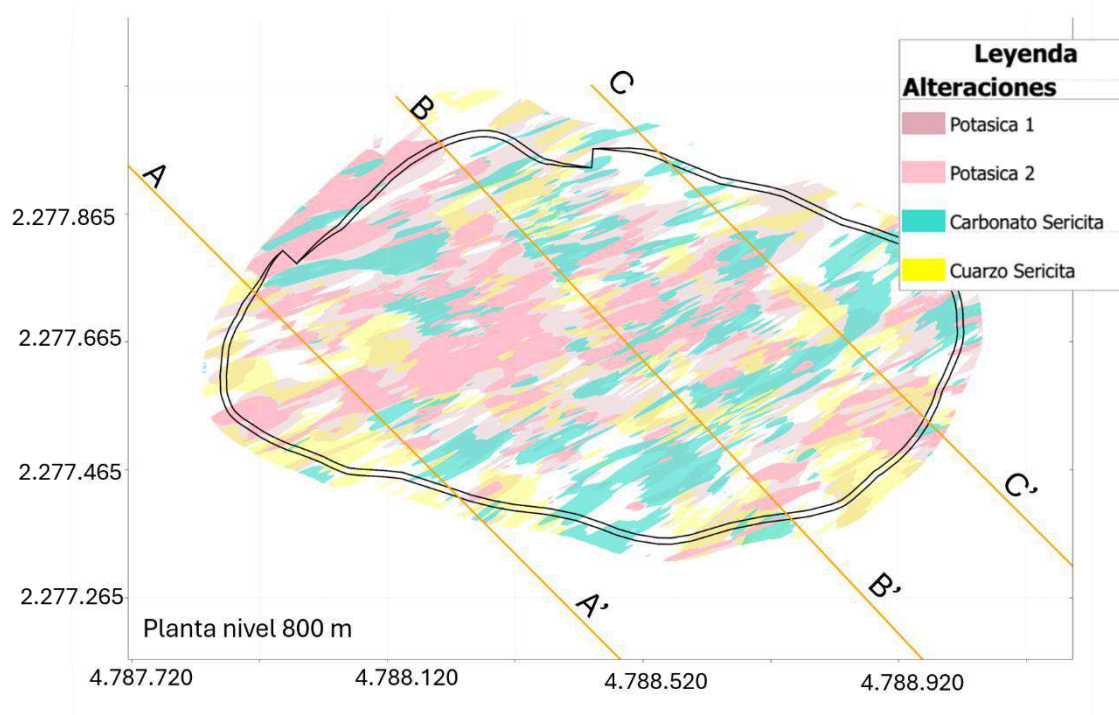


Figura 5.1.1.158 Modelo de alteración del yacimiento - distribución en planta
Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

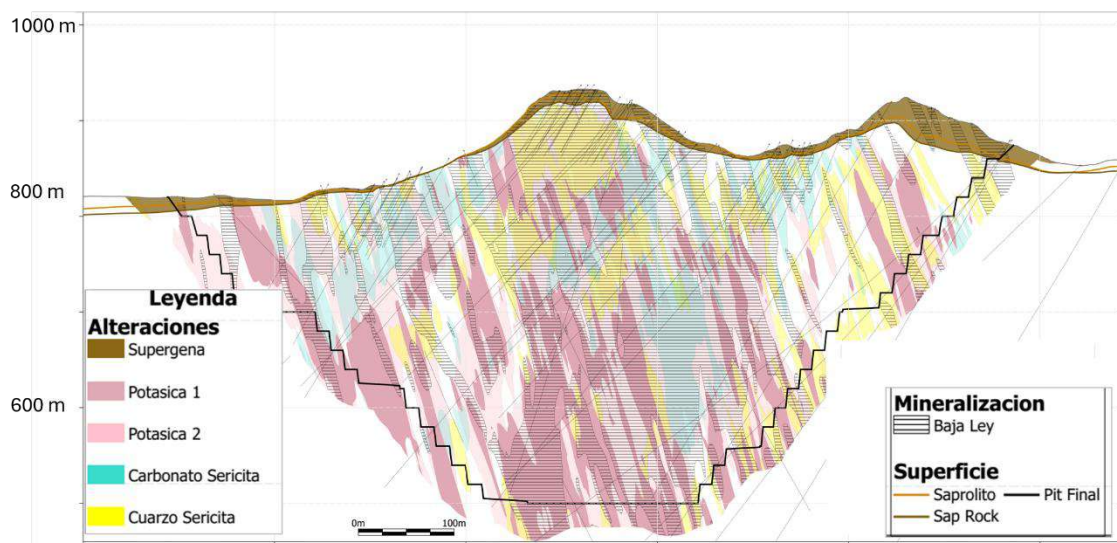


Figura 5.1.1.159 Modelo de alteración del yacimiento – Distribución sección B-B'
Fuente: Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Por último, se encuentra en la zona una sobrecapa de meteorización, con desarrollo de zona de saprolito (óxidos) y zona de transición saprolito-roca (saprock), con espesor conjunto que varía entre 5 y 30 metros, con un promedio de 15 metros. En la Figura 5.1.1.143 se presenta los contornos que delimitan estos niveles asociados a suelo.

b. Selección de muestras

El número de muestras seleccionado para ensayos estáticos y cinéticos debe ser suficiente para representar adecuadamente la variabilidad de los litotipos y las alteraciones identificadas. La selección de muestras se realizó con el apoyo del grupo de geólogos, profesionales idóneos por su conocimiento del yacimiento.

La fuente de información disponible corresponde a los núcleos recuperados en la exploración directa que fue descrita detalladamente en el numeral (exploración directa).

A partir del cruce de la información de modelo geológico del yacimiento, se seleccionaron las muestras de las zonas mineralizadas y roca huésped, considerando los siguientes aspectos para garantizar representatividad.

- **Representación espacial (x, y, z)**

Las muestras están restringidas a líneas unidimensionales definidas por la localización de cada uno de los sondeos, puesto que no hay representación completa de los materiales a excavar y exponer con el futuro tajo en superficie. El gran número de sondeos con que cuenta el proyecto permitió tener una adecuada representación espacial, tanto vertical como horizontal, cubriendo el área de explotación.

- **Tipo de material**

Las muestras seleccionadas cubrieron los dominios geoquímicos representativos de los diversos tipos de material, por ejemplo, litología o tipo de alteración, vinculando los resultados de la caracterización geoquímica del yacimiento para garantizar la caracterización de cada uno de los materiales.

- **Representación composicional**

La selección de muestras incluyó los principales tipos de materiales, en función del tipo de roca, mineralización, alteraciones vetas y otros rasgos estructurales relevantes. Por lo general se seleccionaron intervalos entre 1,0 a 2,0 m de núcleo para alcanzar el tamaño de la muestra.

- **Procedimientos**

Se realizó el adecuado almacenamiento, registro fotográfico, llevando siempre el protocolo de control de calidad y garantizando el tamaño de la muestra requerida para los ensayos (entre 3 a 5 kg).

Una vez se realizó la toma de cada muestra, se empacó en doble bolsa de polietileno de alto calibre y resistentes a los rayos UV. La etiqueta de la muestra resistente a la intemperie y se ubicó dentro de la bolsa, rotulando el número de muestra correspondiente en el exterior del empaque con un marcador permanente. Las bolsas se sellaron con precintos de seguridad de un solo uso, registrando en el formato correspondiente coordenadas,

profundidad, litología, estimaciones del porcentaje de vetas y tipo de alteración para el posterior envío al laboratorio correspondiente.

Otras muestras fueron seleccionadas mediante cono y cuarteo, usando el método para las muestras compuestas que integran material estéril y de baja ley. El procedimiento consiste en:

- Formación del cono: Disponer el material de los sondeos sobre una superficie limpia y lisa, formando un cono simétrico al dejar caer los fragmentos en el centro.
- Aplanado: Se aplasta el cono con cuidado para transformarlo en una capa circular plana de grosor uniforme.
- División: Trazo de dos líneas en cruz sobre la torta para dividirla en cuatro partes iguales o cuadrantes.
- Selección: Se descartan dos cuartos opuestos en diagonal y se retienen los otros dos para formar la muestra reducida o repetir el ciclo si el volumen sigue siendo alto.

c. Número de muestras (Justificación)

Para la definición del número de muestras se revisaron los siguientes criterios de representatividad: i) el área total de las paredes de la zona de explotación ii) la variabilidad del tipo de materiales, litología, alteraciones y por último iii) el grado de incertidumbre de la evaluación.

El número de muestras incrementa con la heterogeneidad de los materiales (litotipos, tamaño de grano, alteraciones), por lo que la homogeneidad de los materiales del tajo es una ventaja para los análisis hechos. Es importante anotar que la representatividad de las muestras debe validarse durante la operación, pues los modelos geológicos se ajustan a partir de los cambios en las características del yacimiento, conllevando a cambios en la geoquímica del material de relaves. El monitoreo debe incluir un seguimiento sistemático de los relaves para identificar cambios e implementar medidas de manejo en caso de requerirse.

I. Número de Price

A partir de los lineamientos presentando en la Guía The Global Acid Rock Drainage (GARD), el número de muestras para ensayos de drenaje ácido puede ser estimada mediante la ecuación de Price, la cual, a partir del volumen de material involucrado en los procesos de explotación, plantea el número de Price (Price, 2009), en este caso en particular, para las paredes expuestas de la zona de explotación.

$$N.M. = 0.0347 \times \alpha^{0.479}$$

Ecuación 5.1.1.1 Ecuación de Price para calcular en número de muestras

Donde:

N.M= Número de muestras

α = Masa del material involucrado en la operación, susceptible a ser removido o intervenido en el proceso de generación de drenaje ácido

- **Estimación de volumen de material expuesto en las paredes del tajo**

Para la determinación de este parámetro hay que tener claro el principio de que, para la formación del drenaje ácido, se requiere de la existencia e interacción de tres componentes: mineral con contenido de sulfuro + agua + oxígeno. En la Figura 5.1.1.160 se representan los componentes para la generación en las paredes del tajo.

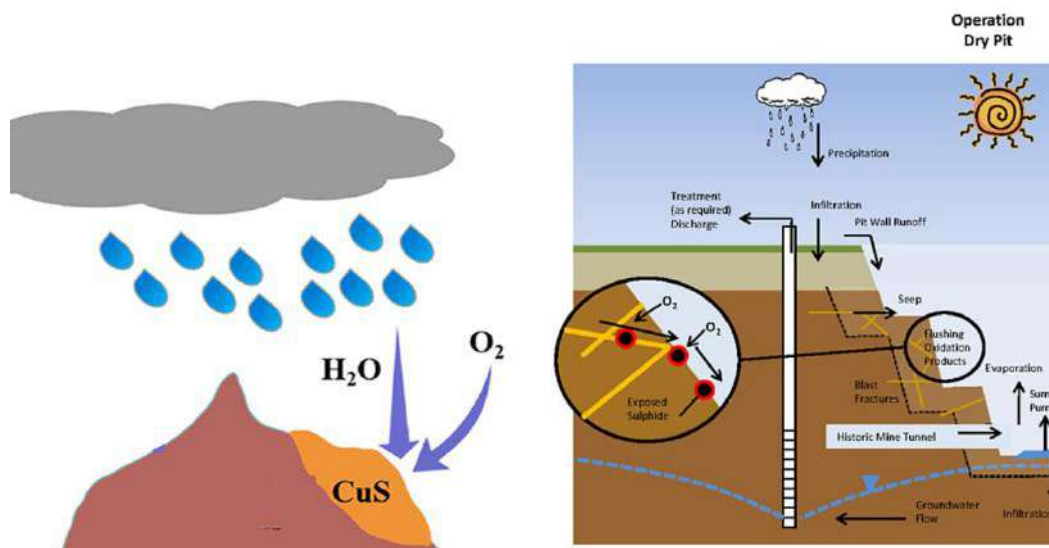


Figura 5.1.1.160 Representación de mecanismo de formación de drenaje ácido.

Fuente: Der. Adaptado de Zhang et al., 2023. Izq. <https://www.gardguide.com>.

Para el cálculo de la masa de material involucrado (α) en el área total del tajo planeado durante la fase de operación, se trabajó con el área total del tajo y una profundidad de 1 m para la zona de interacción de las tres variables: mineral con contenido de sulfuro, agua y aire. El área total de las paredes y fondo del tajo es de 145 Ha. En la Figura 5.1.1.161 se presenta geometría final de la zona de explotación.

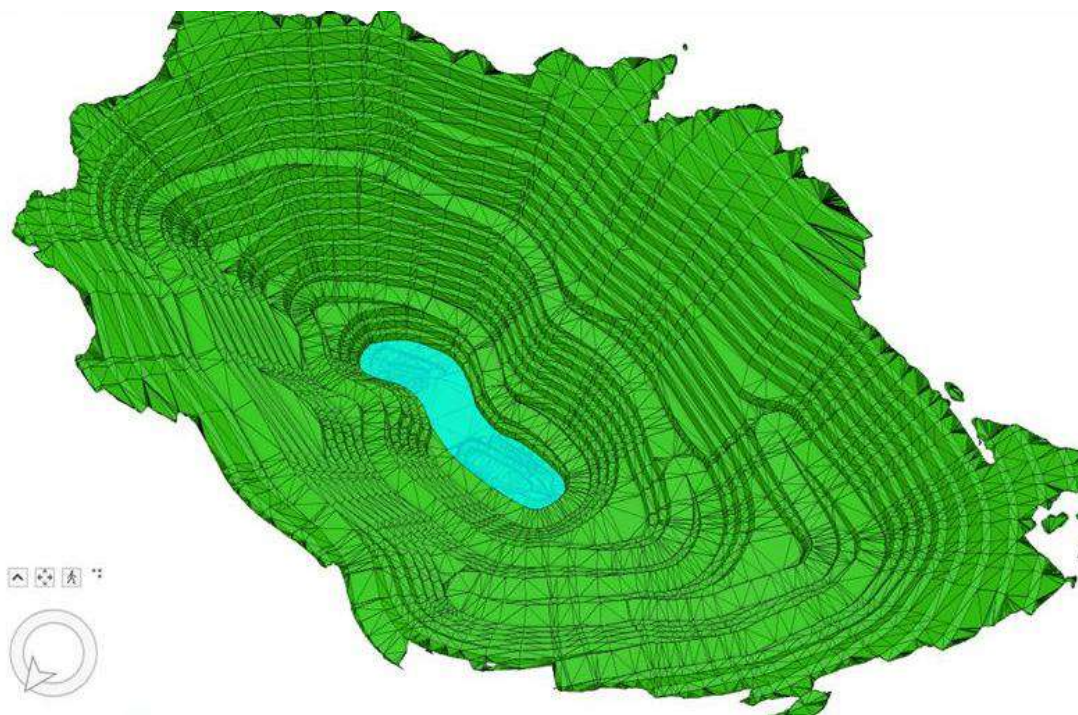


Figura 5.1.1.161 Paredes y fondo de tajo

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

En la Tabla 5.1.1.19 se presentan los valores de las masas estimadas de paredes de tajo y se calcula mediante la ecuación de Price el número de muestras requeridas.

Tabla 5.1.1.19 Número de muestras aplicando la ecuación de Price

Zona tajo	Área (m ²)	Profundidad (m)	Volumen (m ³)	Densidad	Masa (toneladas)	Nºmuestras (E. Price)
Paredes	1.409.500	1	2.819.000	2,8	3.946.600	51
Fondo	40.000	1	80.000	2,8	112.000	10
TOTAL						61

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

II. Variabilidad composicional y materiales

A partir de la caracterización geológica y geoquímica del yacimiento, se identificaron los materiales: litología, alteraciones y meteorización, definiendo los dominios geoquímicos. En la Figura 5.1.1.162 se presenta la distribución de las muestras seleccionadas para ensayos Acid Base Accounting (ABA) según los tipos de roca y los materiales de suelo (Saprolito y roca saprolítica).

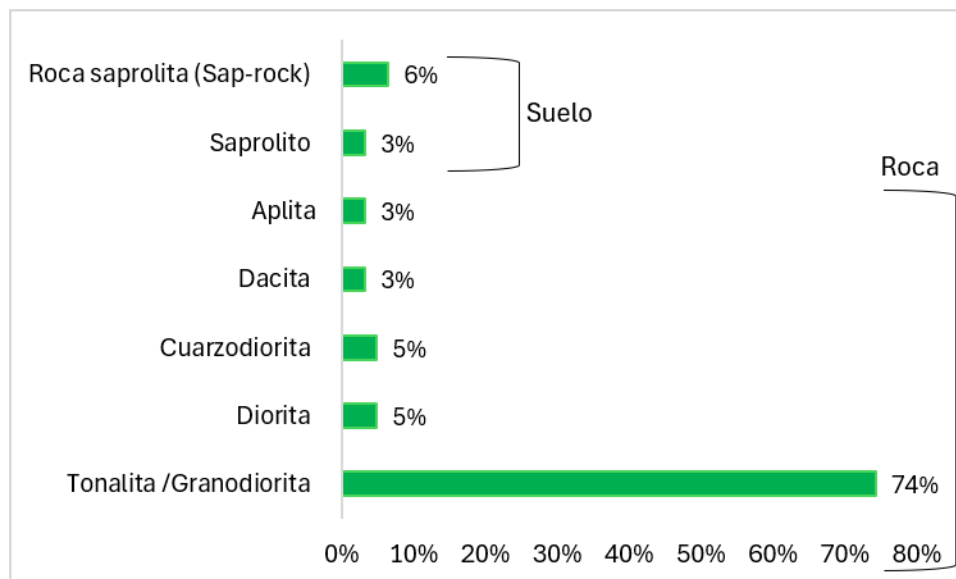


Figura 5.1.1.162 Distribución del porcentaje de muestras ensayos ABA según tipo de roca y suelo.
Fuente: Phase, 2013.

La caracterización geoquímica para evaluación de drenaje ácido del tajo Gramalote se realizó en dos fases.

En la fase inicial (fase 1) se seleccionaron 57 muestras, las cuales fueron representativas del rango de composición según parámetros clave, tales como el azufre y molibdeno, y consistieron en material registrado entre "ninguna alteración" y "alteración fuerte generalizada", primordialmente en forma de alteración potásica con menor grado de alteración sericita/cuarzo-sericita y arcillosa. Diez de las muestras de esta fase inicial representan muestras obtenidas con métodos de cono y cuarteo.

Otras 523 muestras (fase 2), fueron analizadas para incrementar el conjunto de datos existente sobre las unidades de roca estéril y de la pared del tajo. Se tomó desde el inicio hasta la profundidad total de cada sondeo. Aproximadamente cada diez muestras de los sondeos que se cruzan con las paredes del tajo fueron muestreadas y analizadas para determinar el contenido total de azufre y el carbono inorgánico total (TIC) como indicadores de potencial ácido y potencial de neutralización, respectivamente.

En comparación con el número estimado mediante la ecuación de Price, ambas fases aportan una cifra significativa de numérico de muestras, que da cuenta de la adecuada caracterización de la zona del yacimiento para evaluación de potencial de generación de drenaje ácido.

d. Control de la calidad

La ejecución de pruebas estáticas incluyó un programa de aseguramiento de la calidad/control de la calidad (QA/QC), el cual consistió en aproximadamente 25% de

análisis duplicados y análisis de materiales de referencia. Se identifica las diferencias porcentuales relativas (RPD) calculadas usando la Ecuación 5.1.1.2 para cada medición duplicada.

$$RPD = \frac{(X1 - X2) \times 100}{(X1 + X2) / 2}$$

Ecuación 5.1.1.2 Ecuación diferencia porcentual relativa

Fuente: Phase, 2013, Golder, 2020.

El criterio general es que los valores de RPD deben estar en un rango de +/- 20%. En la Tabla 5.1.1.20 se presenta ejemplo de la estimación del RPD.

Tabla 5.1.1.20 Ejemplo de aseguramiento de la calidad/control de la calidad (QA/QC)

Sample ID	Lithology	Total S (%S)	Total C (%C)	TIC (%C)
103471	Tonalita/Granodiorita	0.65	0.72	0.71
DUP 103471	Tonalita/Granodiorita	0.68	0.73	0.71
% RPC		-4.5	-1.4	0.0

Fuente: Phase, 2013.

B. Análisis sobre la representatividad

En esta sección se presenta una descripción del plan de muestreo que se realizó para clasificar los materiales como potencialmente generador de ácido (PAG) y no potencialmente generador de ácido (No PAG). También se describe el método de selección de muestras representativas para ser sometidas a pruebas cinéticas de materiales para evaluar su reactividad

A partir de la aplicación del protocolo para la selección de muestras a continuación se describen los aspectos analizados.

a. Dominios geoquímicos

Inicialmente se analizó la distribución de los materiales involucrados en la zona de explotación, mostrando los resultados de la Figura 5.1.1.163. El 90% del material a explotar y que constituye las paredes del tajo están representados por roca tipo tonalita/granodiorita y proporciones menores a 2% de diorita, cuarzodiorita, dacita, aplita. Para los niveles de suelo (Saprolito + roca saprolítica) se registra un 5%.

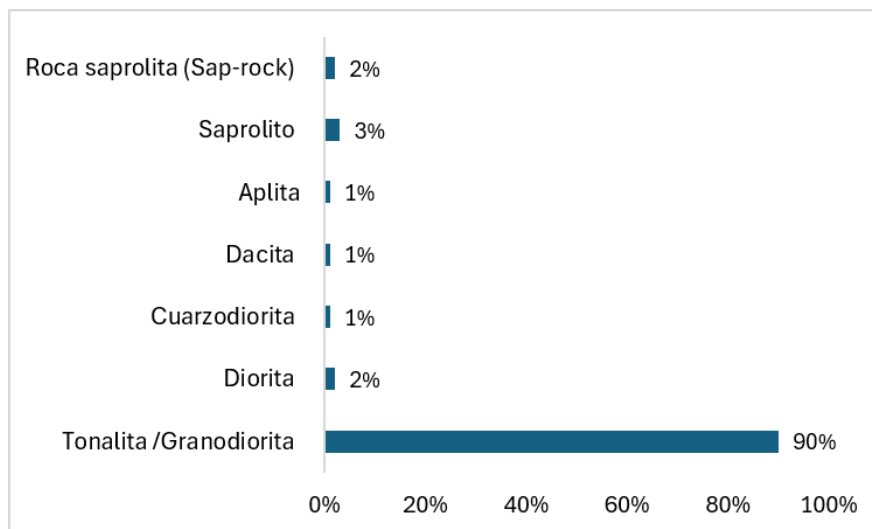


Figura 5.1.1.163 Distribución porcentual de materiales en la zona de explotación

Fuente: Phase, 2013.

Para el planteamiento de los dominios geoquímicos se vincula el tipo de roca más las diferentes alteraciones que se registran: cuarzo sericita, carbonato sericita, potásica y supergena (está última representado sapolito y roca sapolítica).

En la Figura 5.1.1.164 se presenta la distribución en planta de las alteraciones y en las Figura 5.1.1.165, Figura 5.1.1.166 y Figura 5.1.1.167 se presentan las secciones. Se observa predominio de la alteración cuarzo sericita seguida de carbonato sericita y por último potásica.

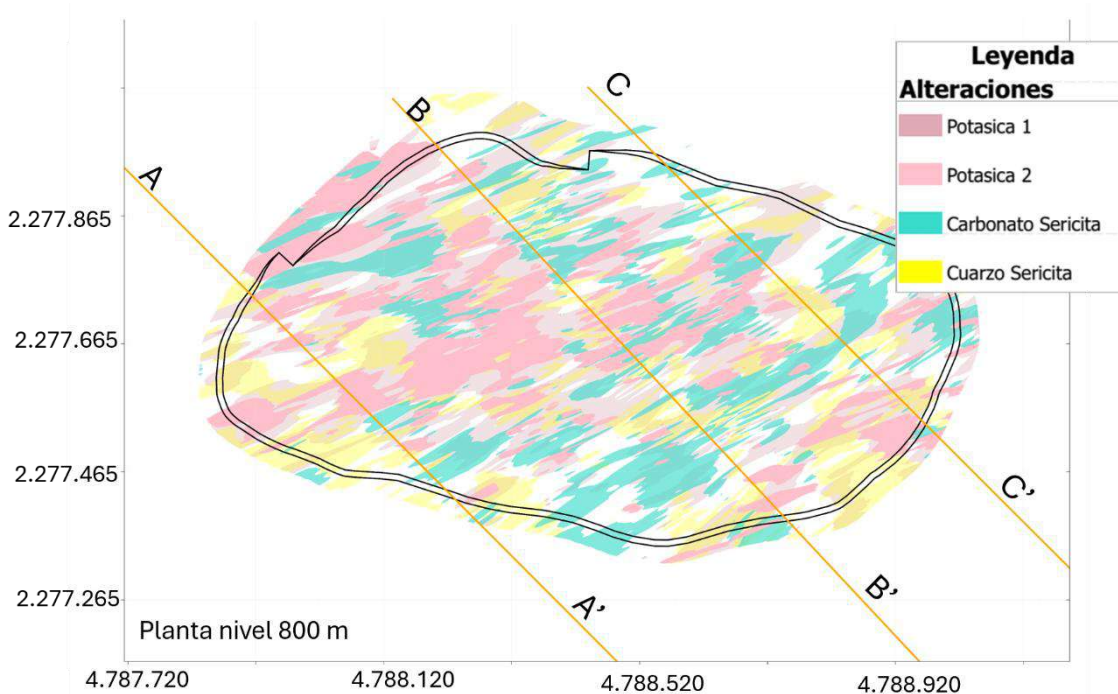


Figura 5.1.1.164 Distribución en planta de tipos de alteraciones

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

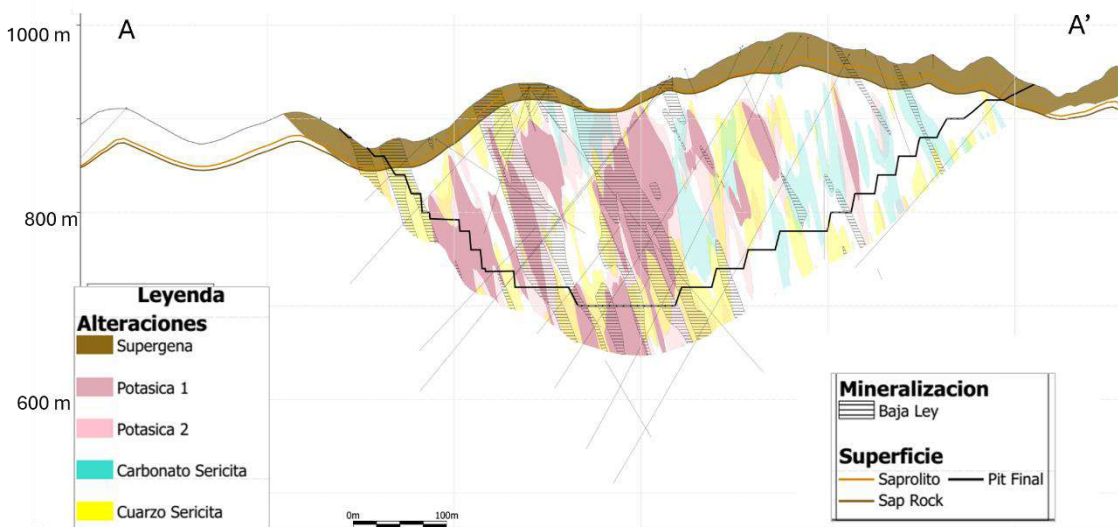


Figura 5.1.1.165 Distribución del tipo de alteraciones sección A-A'

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

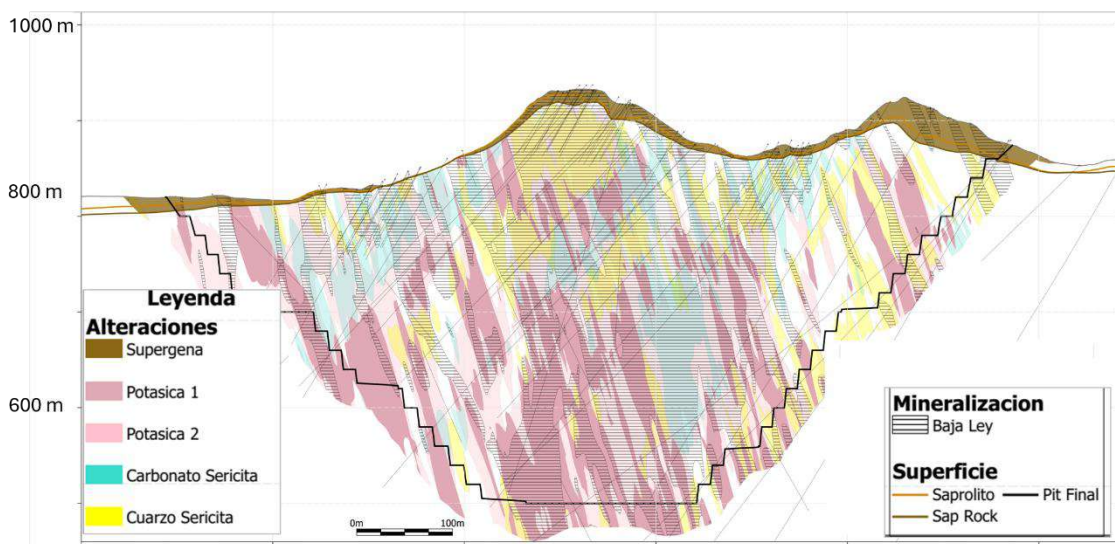


Figura 5.1.1.166 Distribución del tipo de alteraciones sección B-B'

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

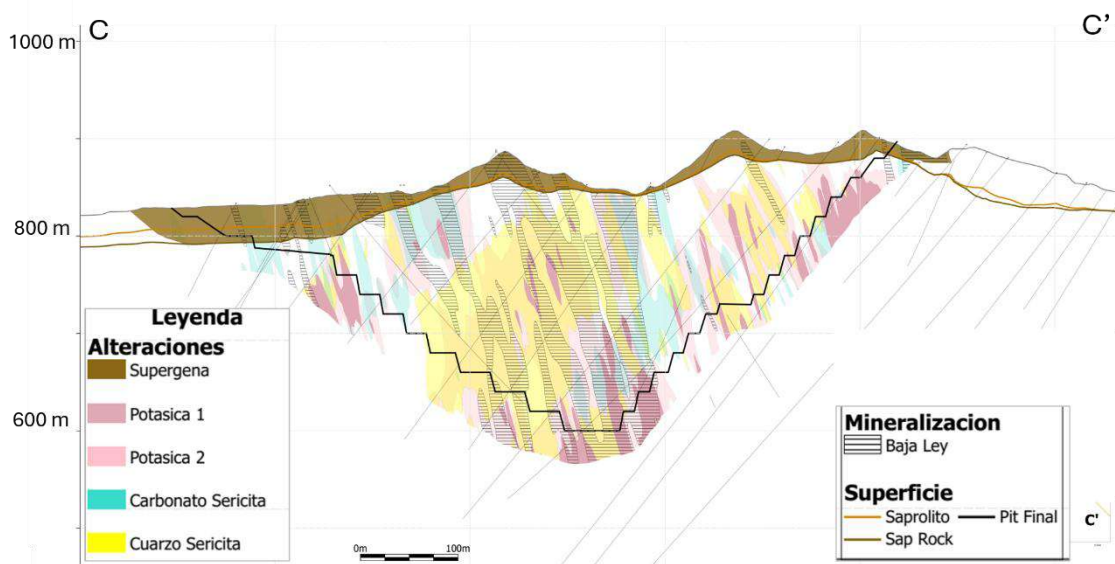


Figura 5.1.1.167 Distribución del tipo de alteraciones sección C-C'

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

b. Selección de muestras

En la Figura 5.1.1.168 se presenta la distribución del porcentaje de muestras por litología. El predominio del muestreo se realizó sobre la roca tonalita/granodiorita con el 74% de las muestras seguido de material tipo suelo (roca saprolítica y Saprolito) que suman el 9%.

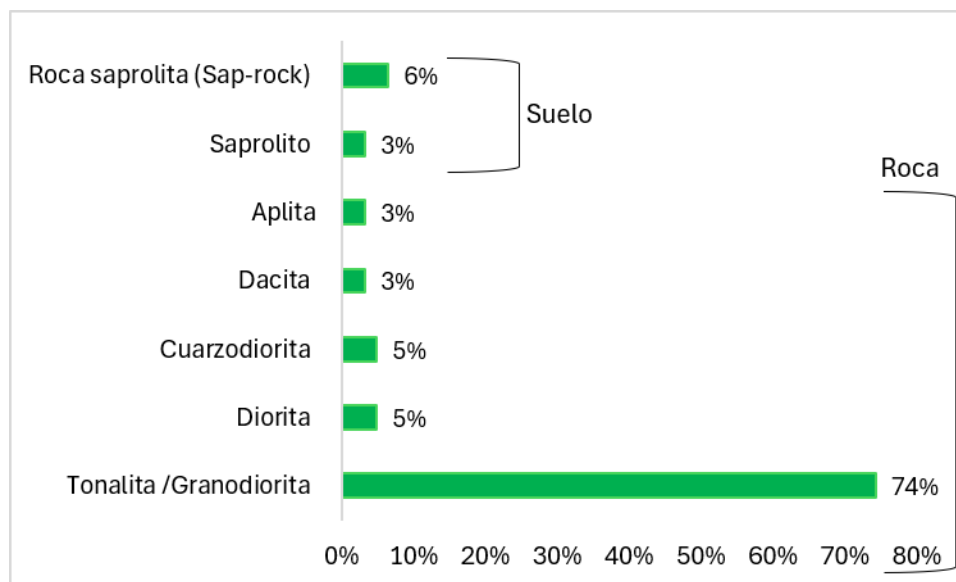


Figura 5.1.1.168 Distribución del porcentaje de muestras por litología

Fuente: Phase, 2013.

Para el planteamiento de los dominios geoquímicos que incluyen las alteraciones, se identificó que son controladas estructuralmente y ocurren tanto en zonas amplias como en bordes delgados alrededor de las vetas.

Las zonas de alteración avanzan desde una zona exterior cuarzo-sericita (que representa el 42% de las muestras) a zonas interiores de carbonato sericita (que representan el 26% de las muestras) y potásicas (que representan el 13% de las muestras). La alteración supergena representa el 6% de las muestras y roca tonalita/granodiorita sin alteración definida representa el 14%, cubriendo así los dominios geoquímicos presentes en la zona de explotación (Figura 5.1.1.169).

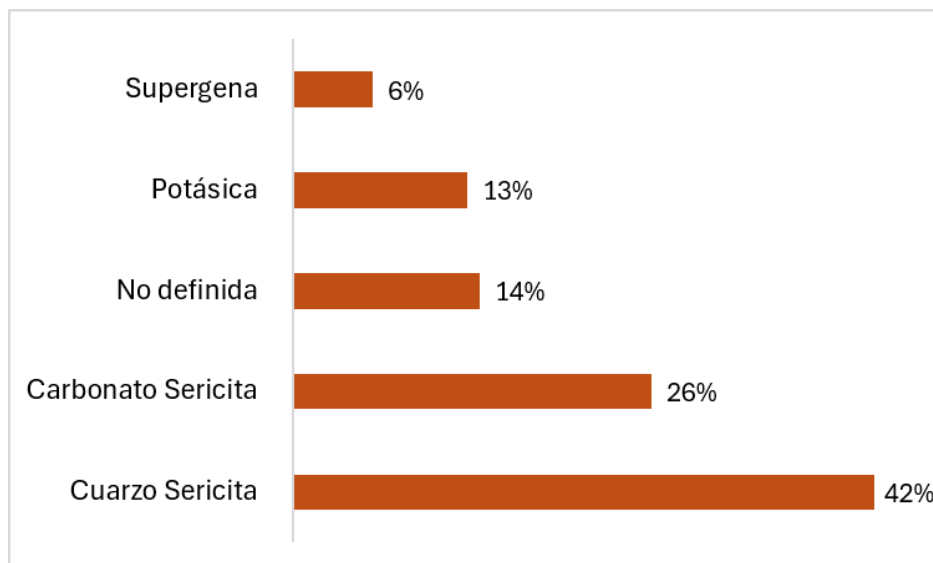


Figura 5.1.1.169 Distribución del porcentaje de muestras por alteración (dominios geoquímicos)

Fuente: Phase, 2013.

En la Figura 5.1.1.170 se presenta la distribución de los porcentajes de muestras por alteración para cada litología. Así, del total de muestras de roca tipo tonalita/granodiorita, que representa el 74% de las muestras, se tiene la siguiente distribución según las alteraciones (44% Cuarzo sericita, 28% Carbonato sericita, 14% potásica y 14% no definida).

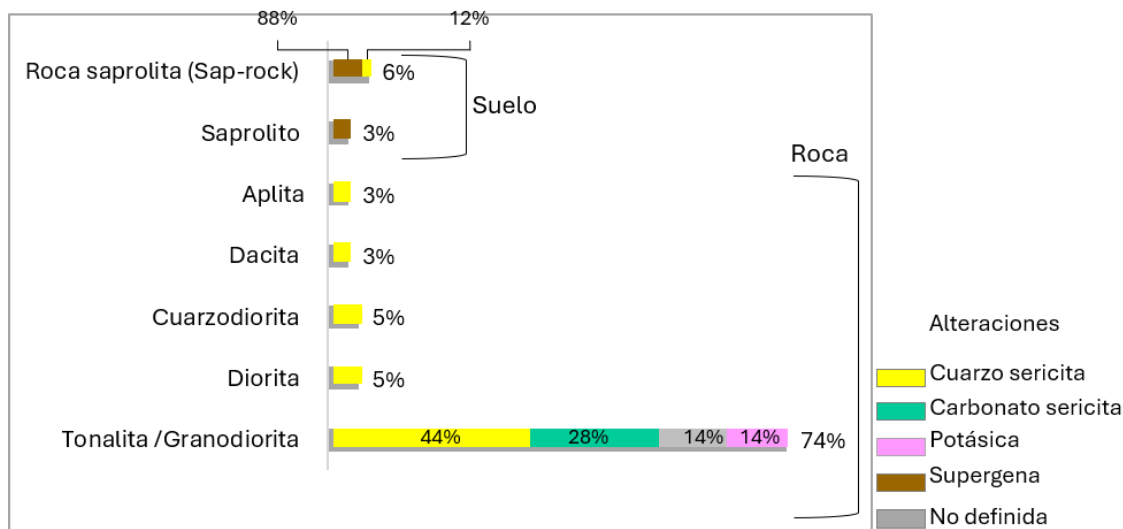


Figura 5.1.1.170 Distribución del porcentaje de muestras por litología y alteración (dominios geoquímicos)

Fuente: Phase, 2013.

c. Localización de muestras

En la Figura 5.1.1.171 se presenta la localización en planta de las muestras analizadas para la caracterización de DAR. En total se cuentan con un total de 571 muestras. Se observa distribución en la zona de explotación desde superficie y alcanzando cota de muestreo de 615 m.s.n.m, aprovechando los sondeos de exploración. Las muestras de las Fase 2 corresponden a muestras de diferentes profundidades a lo largo de sondeos exploratorios, por lo que se visualizan como líneas continuas de color azul. En la Figura 5.1.1.172 se presenta detalle de los sitios de sondeos discretizando la posición de la muestra en el sondeo, registrando la cota (m.s.n.m).

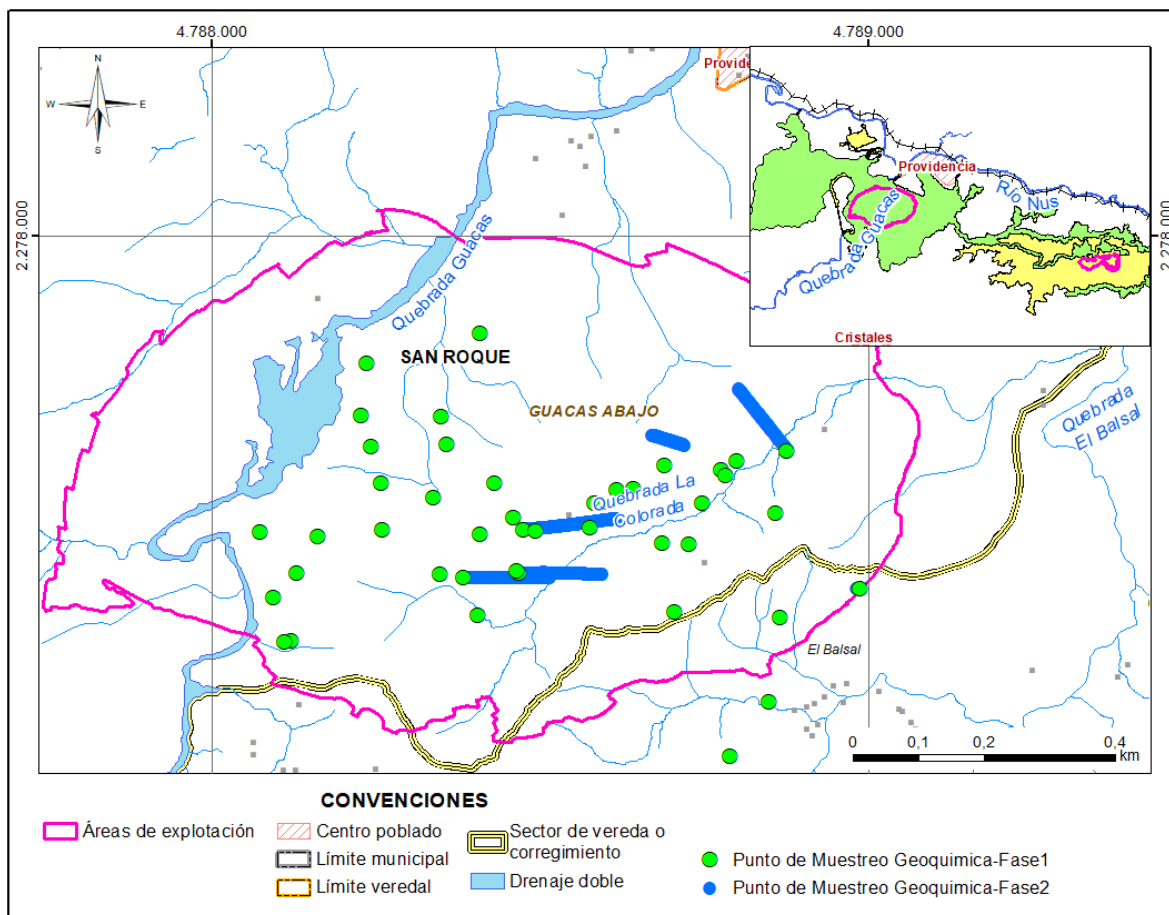


Figura 5.1.1.171 Distribución de las muestras para caracterización de DAR en zona de explotación.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

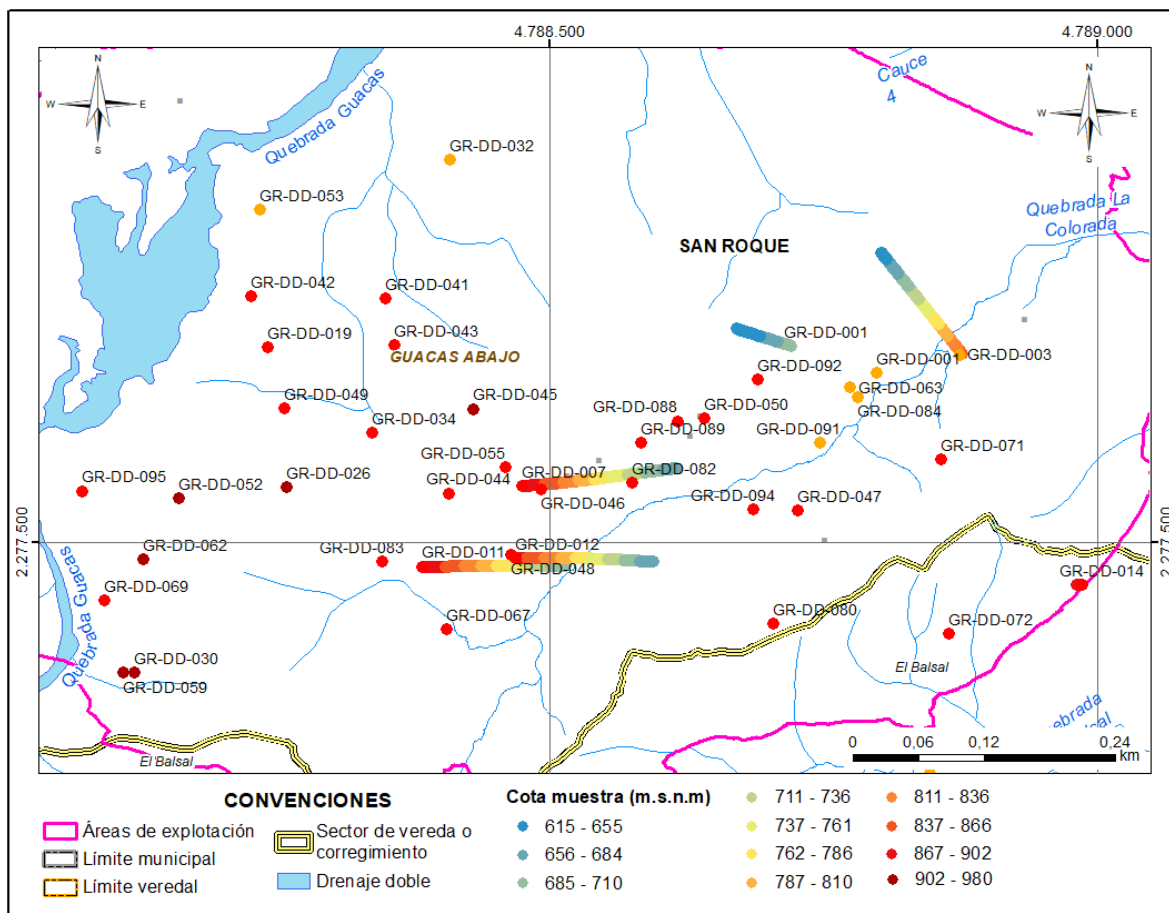


Figura 5.1.1.172 Discretización de la posición de las muestras (cota en m.s.n.m.).

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Las muestras de roca de desmonte analizadas se consideran representativas de cada litología y alteración, así como del rango de concentraciones de azufre total. El número de muestras fue proporcional a cada litología, donde las tonalitas representan el 90% de los testigos de perforación. (Golder, 2020). El detalle del número de muestras y análisis por cada litología se presenta en la Tabla 5.1.1.21.

Tabla 5.1.1.21 Resumen de Pruebas Geoquímicas – Roca de Desmante y Paredes del Tajo

Litología	Pruebas Estáticas							Pruebas Cinéticas	
	Balance Acido Base (ABA)	Azufre Total y Carbono Inorgánico Total (TIC)	Generación de acidez neta (NAG)	Análisis Elemental (ácidos fuertes)	Análisis Elemental (agua regia)	Lixiviación de metales por SFE	Mineralogía QXRDa & Petrografía y Granulometría	Celdas de Humedad (1 kg HCT)	Barriles de campo (400 kg)
Tonalita/Granodiorita	46	471	15	512	15	5	15	4	10
Diorita	3	2		5					
Cuarzo diorita	3			3					
Dacita	2			2					
Aplita	2	1		3					
Saprolito	2	33		35					
Roca Saprolita	4	8		12				1	
Vetas		4		4					
Gouge		3		3					
Suelo/ Coluvial		1		1					
Total	62	523	15	580	15	5	15	5	10

Fuente: (Golder, 2020)

Las pruebas cinéticas fueron desarrolladas en diferentes escalas para mejorar la capacidad de entendimiento de las condiciones del sitio y como se relaciona con el potencial de generación de acidez de la roca. (Golder, 2020).

Las colas producto del procesamiento del mineral de Gramalote serán de dos tipos: colas de flotación (rougher flotation tailings) y colas de lixiviación de cianuros (Cyanide Leach). Las colas de flotación serán ciclonados para crear dos fracciones, los finos que se depositarán en playa y los gruesos que serán usados para la construcción del dique de arena. En la Tabla 5.1.1.22 se presentan las muestras que fueron sometidas a pruebas geoquímicas (Golder, 2020). Algunas de las muestras fueron obtenidas de procesar material de rechazo durante la vida temprana de la mina y una muestra de material rechazado durante la vida restante de la mina (Golder, 2020).

Tabla 5.1.1.22 Resumen de Pruebas Geoquímicas – Relaves

Tipo de Relave	Muestra	Pruebas Estáticas						Pruebas Cinéticas	
		ABA y NAG	Mineralogía (QXRD)	Análisis Elemental y Roca Total	Análisis del Sobrenadante	Lixiviación de metales por TCLP	Lixiviación por SFE	Celdas de Humedad (HCT)	Columna Sumergida
Mineral sin procesar (Whole Ore)	EMLR CND	x		x	x			x	
Relaves o colas de Flotación	EMLR-F10KG-3 Tls	x	x	x	x	x	x	x	
Lixiviación de cianuro	EMLR-FCC-CND	x	x	x	x	x	x	x	
Mineral sin procesar (Whole Ore)	RMLR CND	x		x	x			x	
Relaves o colas de Flotación	RMLR-F10KG-4 Tls	x	x	x	x	x	x	x	
Lixiviación de cianuro	RMLR_FCC_CND	x	x	x	x	x	x	x	
Relaves o colas de flotación – gruesos	Flot Tls Coarse	x	x	x		x	x	x	
Relaves o colas de flotación – finos	Flot Tls Fines	x	x	x		x	x	x	

Tipo de Relave	Muestra	Pruebas Estáticas						Pruebas Cinéticas	
		ABA y NAG	Mineralogía (QXRD)	Análisis Elemental y Roca Total	Análisis del Sobrenadante	Lixiviación de metales por TCLP	Lixiviación por SFE	Celdas de Humedad (HCT)	Columna Sumergida
Relaves o colas de flotación					x				
Lixiviación de cianuro	cyanide leach	x		x	x	x	x		x
GER Comp, PP GER Flot Tls	Head sample & flotation tailings	x		x	x	x			
GIR Comp, PP GIR Relaves o colas de flotación	PP GIR Flot Tls	x		x	x	x		x	x
MWR Comp, MWR Comb Relaves o colas de flotación	Head sample & flotation tailings	x		x		x			
TNR Comb, TNR Comb Relaves o colas de flotación	Head sample & flotation tailings	x		x		x			

Tipo de Relave	Muestra	Pruebas Estáticas						Pruebas Cinéticas	
		ABA y NAG	Mineralogía (QXRD)	Análisis Elemental y Roca Total	Análisis del Sobrenadante	Lixiviación de metales por TCLP	Lixiviación por SFE	Celdas de Humedad (HCT)	Columna Sumergida
SPR10% Comp, SPR10% Comb									
Relaves o colas de flotación	SPR10% Comb Tls	x		x	x	x		x	x

Fuente: (Golder, 2020)

C. Pruebas geoquímicas desarrolladas

De acuerdo con lo indicado en los Términos de Referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera 2016 (ANLA 2016) se realizaron pruebas estáticas en todas las muestras colectadas. De acuerdo con los resultados de las pruebas estáticas, un subgrupo de muestras que incluyen las muestras con RPN (Razón de Potencial de Neutralización) < 3 (menor a tres) fueron sometidas a pruebas cinéticas (Golder, 2020).

La descripción detallada de las metodologías usadas para cada prueba geoquímica se describe en pHase 2013. A continuación, se listan las pruebas desarrolladas en las muestras de roca de desmonte y colas:

a. Pruebas Estáticas

- Prueba balance ácido base (ABA) según el método Sobek modificado.
- Azufre total y carbono inorgánico total (TIC) mediante horno LECO.
- Análisis elemental tras digestión con ácidos fuertes y agua regia.
- Pruebas de generación neta de ácido (NAG) sobre réplicas de muestras de barriles.
- Prueba de extracción por agitación en frasco (SFE), a una tasa de 3:1 de relación líquido a sólido.
- Análisis granulométrico (réplicas de muestras de barriles).
- Procedimiento de lixiviación para caracterización de toxicidad (TCLP), el cual usa una tasa de 20:1 de relación líquido a sólido y pH de reactivo 5.
- Mineralogía mediante Difractometría cuantitativa de rayos X (QXRD) y evaluación petrográfica (réplicas de muestras de barriles) (Golder, 2020).

b. Pruebas Cinéticas

Celdas de Humedad de muestras de 1 kg: las muestras de roca de desmonte se analizaron mediante el método (Price, 1997). Las colas se analizaron mediante el método estándar ASTM D5744-07e1 (Método de prueba estándar para la meteorización de materiales sólidos en el laboratorio utilizando una celda de humedad). Ambos métodos son similares y utilizan celdas de iguales dimensiones. Se analizaron un total de cinco muestras: dos muestras PAG, dos inciertas y una muestra No PAG. El rango de azufre de las muestras de HCT estuvo entre 0,1% y 1,2%. En 2011, diez muestras correspondientes a intervalos de aproximadamente 60 m de tonalita/granodiorita, material de desmonte y mineral de baja ley fueron usadas para los primeros cinco barriles. El programa de pruebas en barriles se amplió en 2012 para incluir cinco muestras de tonalita/granodiorita, que representan los materiales de las paredes del Tajo Gramalote. Estas muestras compuestas consistían en aproximadamente 120 m de testigo, situado cerca de la parte inferior de cinco sondajes seleccionados, que cruzan las paredes del Tajo Gramalote.

Prueba en columna sumergida (relaves o colas) de 5 kg: evalúan el comportamiento lixiviación de cianuro de los relaves o colas (Cyanide Leach) bajo condiciones de disposición saturadas.



Barriles de campo de 400 kg: para evaluar los materiales en condiciones ambientales de campo. Los lixiviados fueron colectados aleatoriamente dependiendo de la precipitación natural (Golder, 2020).

D. Resultados roca estéril, mineral de baja ley y paredes del tajo Gramalote

La información presentada en los siguientes numerales hace parte del documento Caracterización geoquímica para el proyecto Gramalote, Colombia elaborado por Phase, 2013.

a. Mineralogía

Se realizaron análisis mineralógicos en réplicas de muestras de barriles con el propósito de identificar las fases minerales primarias, haciendo énfasis en las fases de sulfuro y carbonato, así como en los minerales traza. Los resultados de la difracción de rayos X se presenta de manera detallada en ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013 y se resume en la Tabla 5.1.1.23.

En ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXOF también contiene los informes petrográficos detallados y el análisis de las principales observaciones se presenta a continuación.

Las muestras de tonalita que fueron examinadas estaban compuestas fundamentalmente por cuarzo y plagioclasa (entre ~55% y ~85% por peso), con cantidades menores de K-feldespato, moscovita, biotita, actinolita, clinocloro y carbonato, y sulfuro en niveles entre insignificantes y menores. Los minerales raros identificados mediante QXRD incluyen laumontita, magnetita y hidroxilapatita. La tonalita exhibe diversos grados de alteración, que variaron entre una alteración selectiva illita/arcilla-clorita a una alteración generalizada K-feldespato sobreimpresa por una alteración sericita-carbonato $\pm$ cuarzo/clorita.

El carbonato proveniente del análisis QXRD consistió en calcita variable (traza al 5%) y cantidades traza de ankerita/dolomita. Las observaciones petrográficas muestran que el carbonato se presenta de la siguiente manera: 1) sustitución desigual, de grano fino a muy fino, de plagioclasa, biotita o hornblenda, 2) vetillas con orillos sericíticos, 3) vetillas de cuarzo-carbonato, 4) relleno de fracturas y/o 5) granos liberados.

Las observaciones petrográficas muestran que los minerales de sulfuro no se encuentran con mucha frecuencia, o se encuentran en cantidades entre residuales y menores. Normalmente se encuentran como pirita inalterada, que aparece entre finamente y muy finamente disseminada en granos euhedrales a anhedrales, en fragmentos alterados de tonalita y sericita-carbonato o clorita, así como granos liberados. También se identificó molibdenita en una muestra.

Tabla 5.1.1.23 Resultados del análisis de difracción cuantitativa de rayos X (%) para réplicas de muestras de barriles

	ID del barril	ID de la muestra	Tipo de roca	Cuarzo	Plagioclasa	K-feldespato	Clinocloro	Moscovita	Biotita	Actinolita	Calcita	Ankerita/Dolomita	Pirita	Laumontita	Magnetita	Hidroxiapatita	Total
Fase I	FB #1	GR011 90-154 top	Tonalita/granodiorita	25.4	60.6	4.8	1.0		4.9	3.3							100
		GR035 68-128 bottom	Tonalita/granodiorita	28.4	58.2	6.0	1.9		3.0	1.7	0.5	0.3					100
	FB #2	GR015 96-156 top	Tonalita/granodiorita	27.6	48.1	5.9	2.6	6.6	4.4	1.8	3.1						100
		GR028 90-150 bottom	Tonalita/granodiorita	28.7	54.0	7.6	2.1		3.5	1.7	1.2	0.3			0.7	0.3	100
	FB #3	GR114 56-116 top	Tonalita/granodiorita	26.2	42.1	8.7	2.5	12.5	2.1		4.9		0.9				100
		GR025 40-100 bottom	Tonalita/granodiorita	27.9	38.6	11.7	3.5	7.3	2.2	1.9	3.2		0.9	2.7			100
	FB #4	GR008 174-234 top	Tonalita/granodiorita	24.5	44.9	10.9	3.6	10.7			3.7		1.7				100
		GR034 112-172 bottom	Tonalita/granodiorita	28.4	37.9	9.8	3.2	13.8			5.5	0.4	1.0				100
	FB #5	GR007 178-238 top	Tonalita/granodiorita	29.1	27.4	19.1	2.1	14.3			5.1	0.6	2.3				100
		GR118 188-248 bottom	Tonalita/granodiorita	32.7	40.3	12.1	2.3	6.6	1.2		2.1		2.8				100
Fase II	FB #6	GR045 280.6-411	Tonalita/granodiorita	29.6	35.6	14.2	2.5	12.5			3.9		1.7				100
	FB #7	GR069 100-226	Tonalita/granodiorita	28.8	50.9	8.9	2.7	4.6	1.7		1.9		0.5				100
	FB #8	GR091 199.1-326.3	Tonalita/granodiorita	25.7	53.3	5.5	2.8	5.7	3.1	1	2.6		0.3				100
	FB #9	GR101 80.77-209.4	Tonalita/granodiorita	27.3	50.8	7.5	3	4.4	3.4	1.4	1.9		0.3				100
	FB #10	GR102 88.5-208,5	Tonalita/granodiorita	25.6	59.4	6.4	0.9		5	2	0.7						100



Fuente: pHase, 2013.

b. Potencial de drenaje ácido de roca

El potencial de drenaje ácido de roca (DAR) se ha evaluado con base en los resultados de las pruebas estáticas, principalmente en los resultados de las pruebas de balance ácido base (ABA), verificados posteriormente mediante pruebas cinéticas.

La prueba ABA mide el pH en pasta, el azufre total y el azufre sulfato, y calcula el sulfuro de azufre (por diferencia) y el potencial de ácido (AP) en unidades equivalentes de kg CaCO₃/t.

El procedimiento también mide el potencial de neutralización (NP) por titulación en unidades de kg CaCO₃/t y el carbono inorgánico total (TIC) como una indicación del contenido de carbonato potencialmente disponible para la neutralización. Los resultados de la prueba ABA se proporcionan en ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXOG .

La especiación de azufre en los datos de la prueba ABA indica que el sulfuro de azufre, que es normalmente la especie activa de azufre en la generación de ácido, es la forma dominante de azufre en el conjunto de datos y una buena aproximación al contenido total de azufre, como se ilustra en la Figura 5.1.1.173 por tipo de roca y en la Figura 5.1.1.174 por tipo de alteración.

El contenido total de azufre también se muestra en el diagrama de caja estándar y bigotes en la Figura 5.1.1.175 se indica generalmente cierta variabilidad en el contenido de azufre con respecto al tipo de roca y con el tipo de alteración la tendencia no es marcada (Figura 5.1.1.176).

Una amplia gama de azufre se detectó dentro de la tonalita, entre 0,01 a 3,2%, con un promedio de 0,3%. Promedios similares de ~0,3 a 0,4% se registraron también en unidades de diorita y aplita. Valores bajos de azufre total se observan en unidades de saprolito, roca saprolítica, cuarzodiorita y dacita, con promedios menores a 0,1%. Un mayor contenido de azufre promedio se observó en las muestras registradas como salbanda (gouge) y veta, en niveles de 0,5% y 1,6%, respectivamente.

Los esquemas usados típicamente para ilustrar los resultados de la prueba ABA se proporcionan en las Figura 5.1.1.177, Figura 5.1.1.178, junto con la serie de datos ilustrativos de los tipos de rocas. Las clasificaciones DAR por tipo de roca y los resultados completos se tabulan en ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXO G.

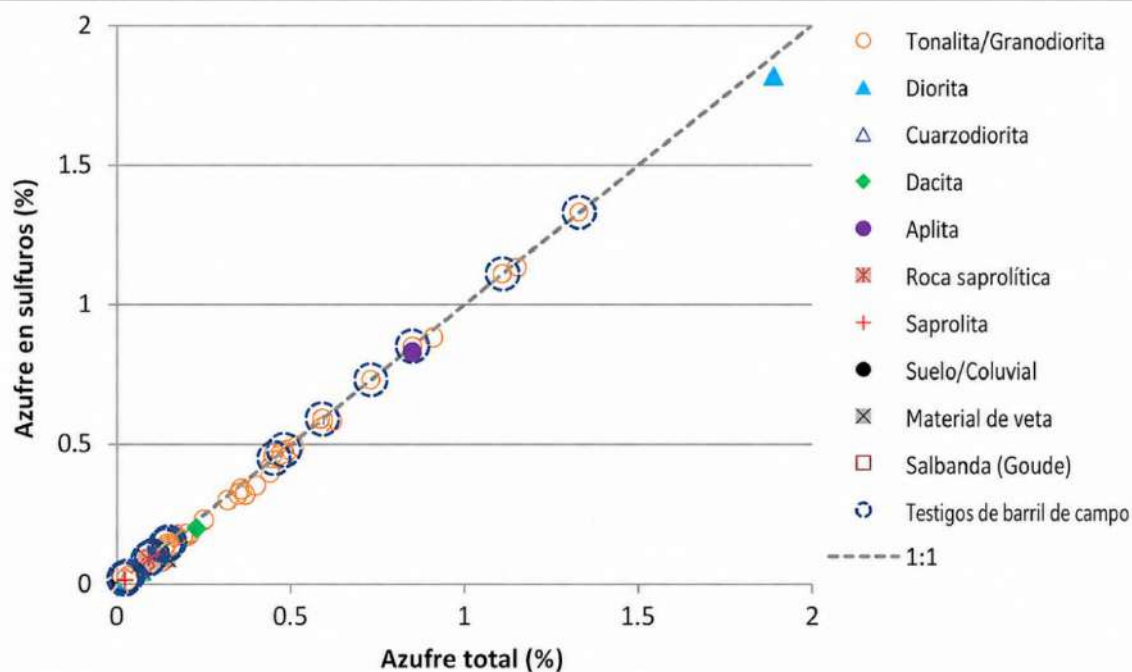


Figura 5.1.1.173 Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de roca (n= 70)
Fuente: pHase, 2013.

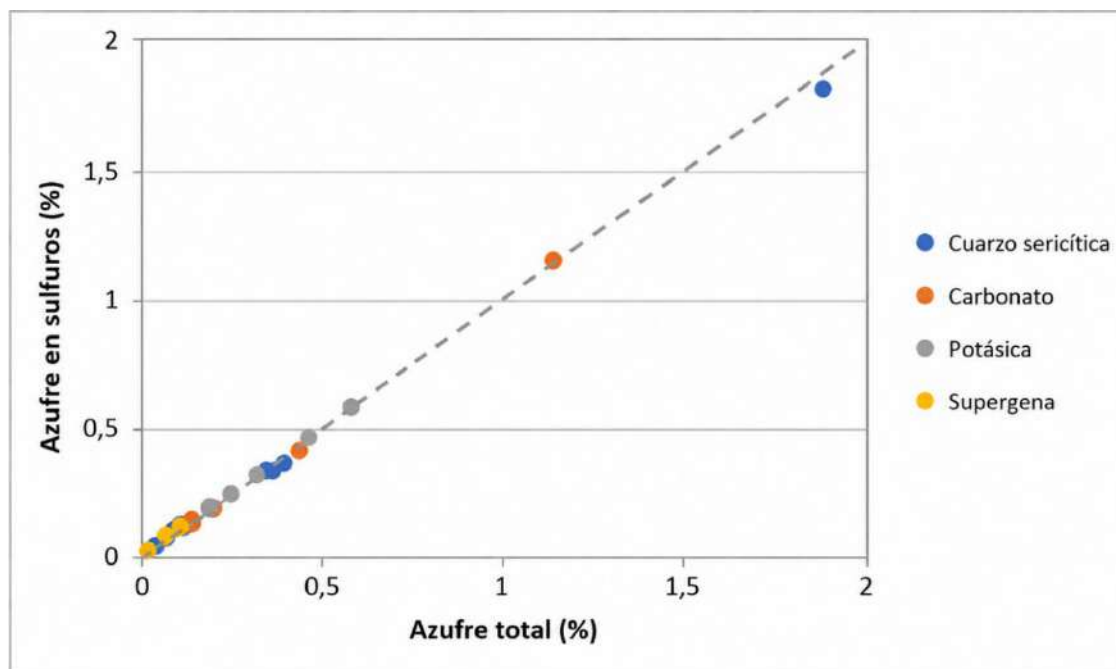


Figura 5.1.1.174 Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de alteración (n= 26)
Fuente: pHase, 2013.

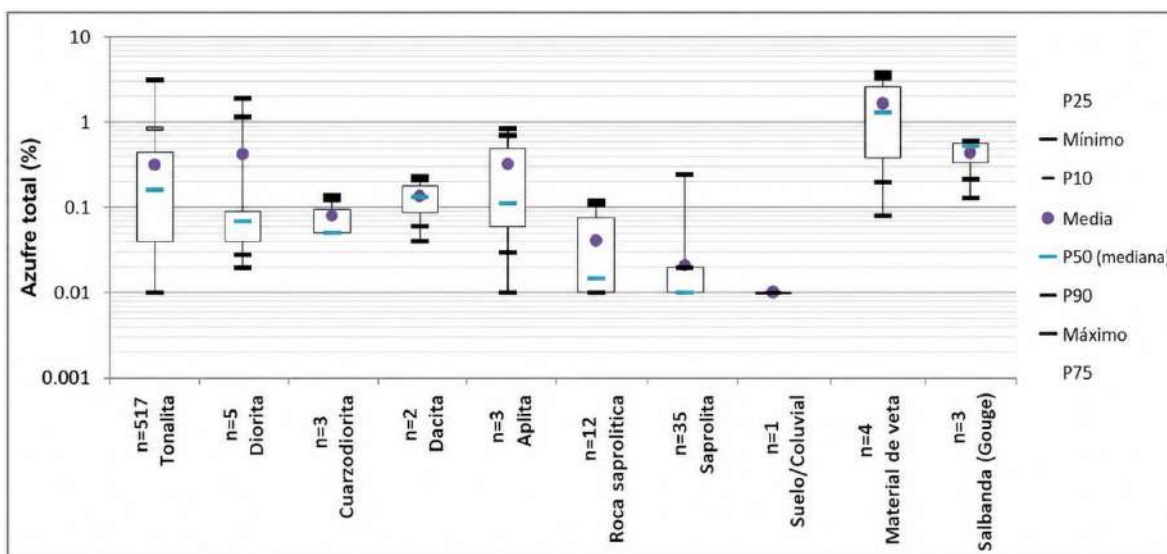


Diagrama de caja y bigotes de azufre total por tipo de roca

(Este gráfico es un diagrama convencional de caja y bigotes. Los extremos superior e inferior muestran los valores mínimos y máximos, las graduación fuera de la caja muestran los percentiles 10 y 90, los márgenes exteriores de la caja muestran los percentiles 25 y 75, la línea central en el cuadro muestra el valor de la mediana y el punto muestra la media aritmética).

Figura 5.1.1.175 Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de roca
Fuente: pHase, 2013.

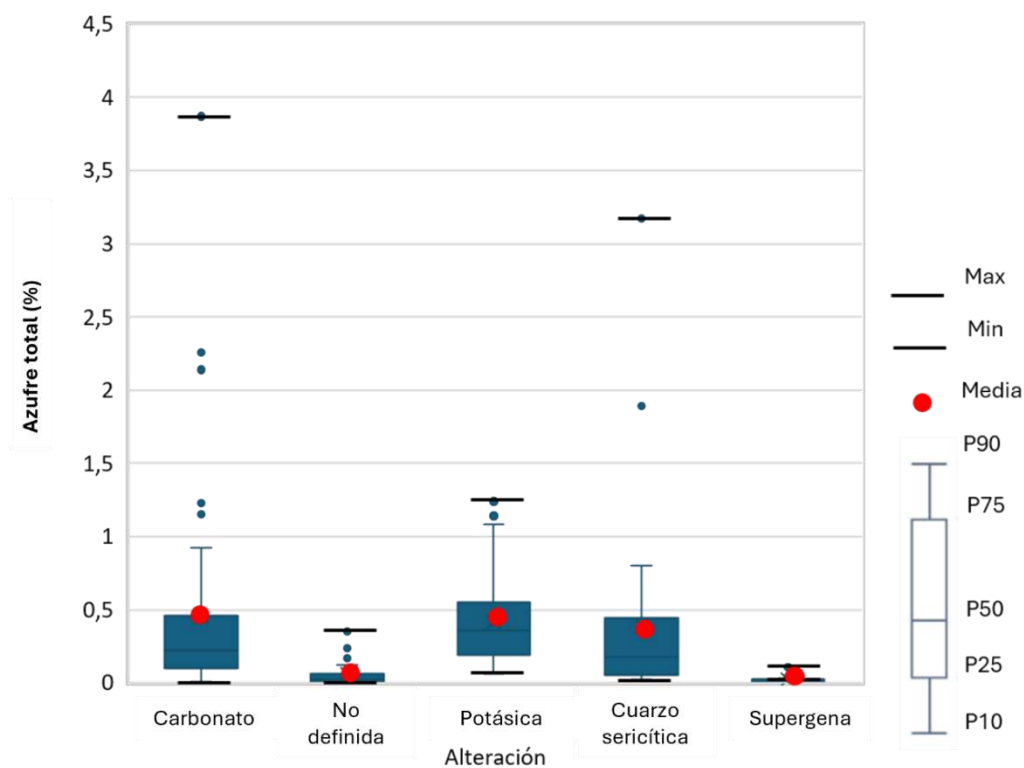


Figura 5.1.1.176 Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de alteración
Fuente: pHase, 2013.

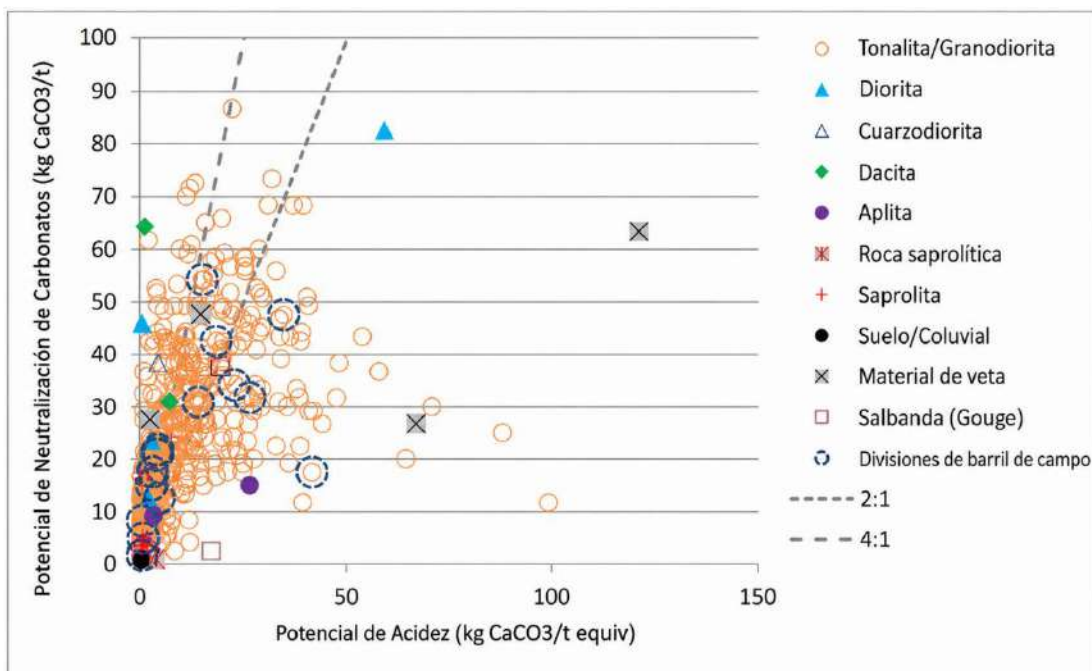


Figura 5.1.1.177 NP de carbonato versus potencial ácido por tipo de roca (n=585)
Fuente: pHase, 2013.

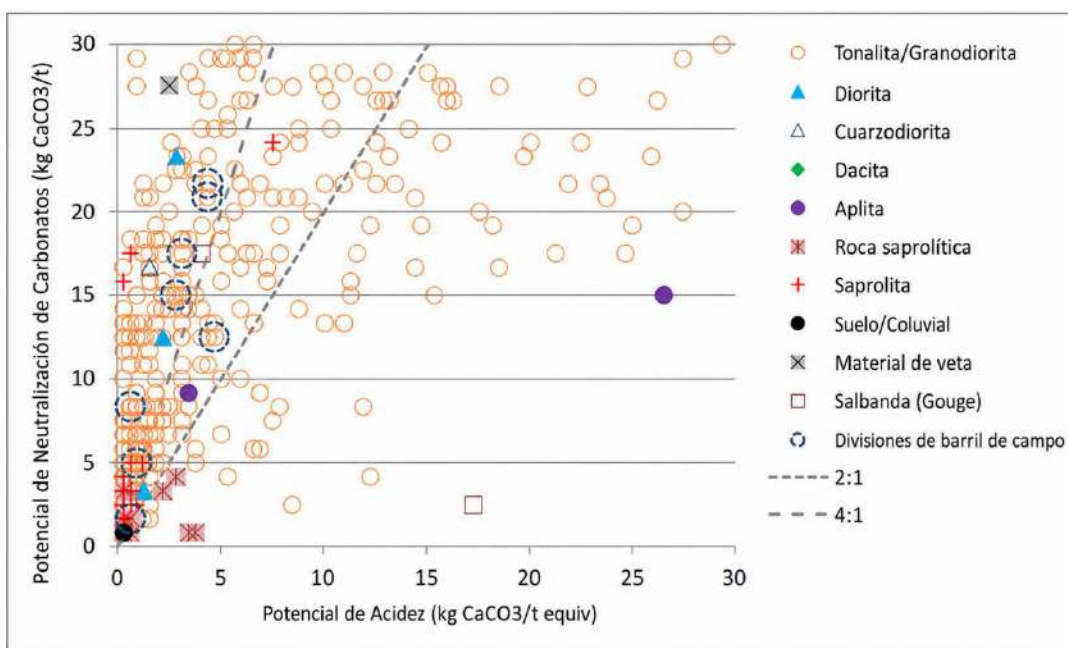


Figura 5.1.1.178 Detalle a escala amplia de NP de carbonato versus potencial ácido por tipo de roca (n=585)
Fuente: pHase, 2013.

Las Figura 5.1.1.179 y Figura 5.1.1.180 muestran la relación entre el azufre total y el potencial de neutralización (NPR) para la tonalita con base en los ensayos ABA y la base de datos de exploración, respectivamente. Aproximadamente el 0,15% de azufre total representa el valor por debajo del cual la gran mayoría de las muestras presentan un NPR superior a 2.

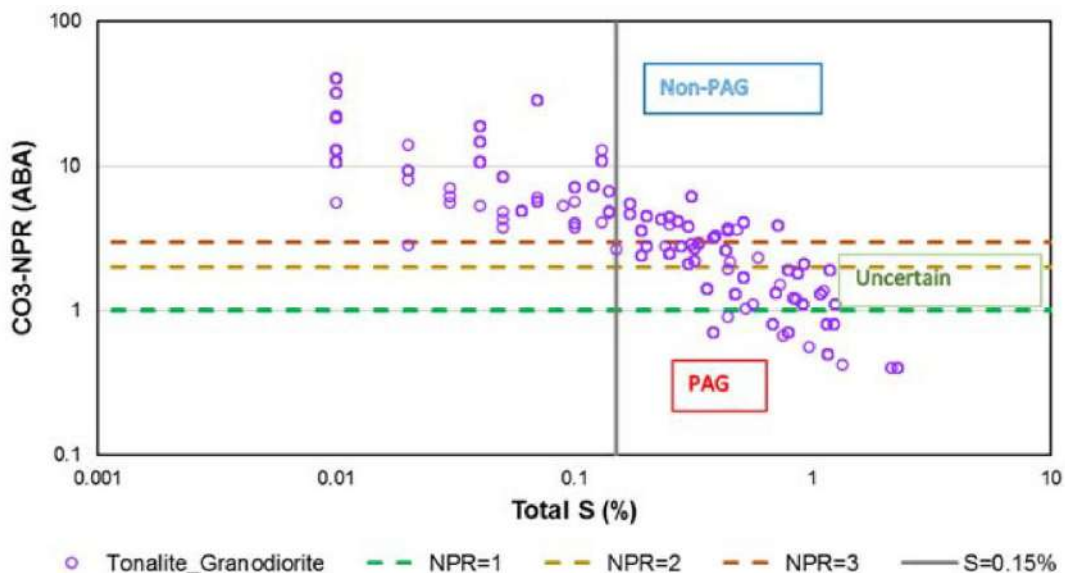


Figura 5.1.1.179 Azufre total vs CO3-NPR (ABA) Tonalita
Fuente: Golder, 2020.

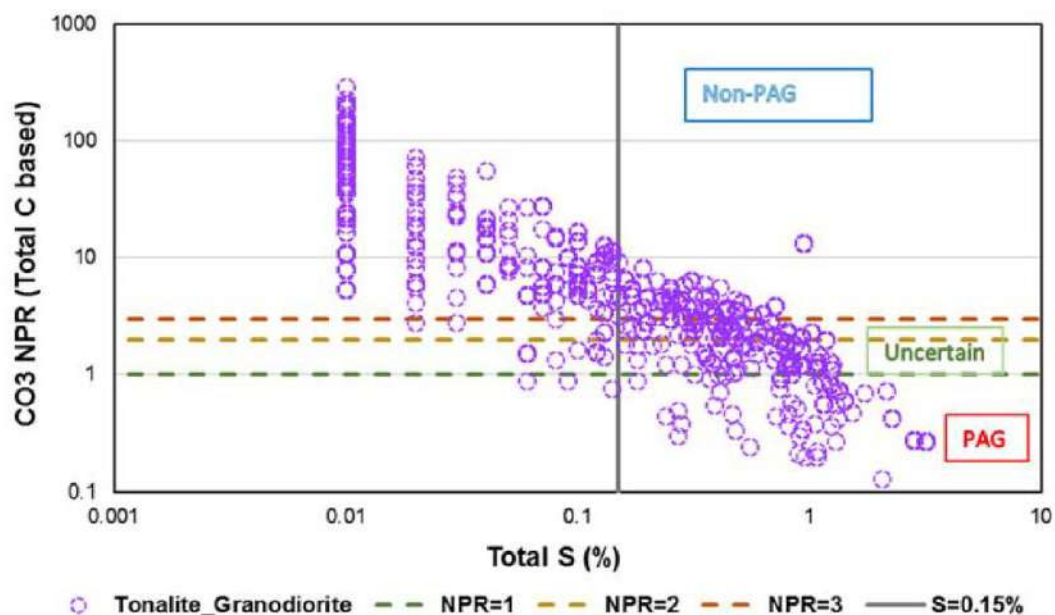


Figura 5.1.1.180 Azufre total vs CO3-NPR (Total Carbono) – Tonalita
Fuente: Golder, 2020.

Las Figura 5.1.1.181 y Figura 5.1.1.182 muestran las mismas relaciones para el saprolito. Según los resultados de ABA, casi todas las muestras con un contenido de azufre total inferior al 0,15 % presentan una NPR superior a 2. Si se considera la base de datos de exploración con la NPR calculada a partir del carbono total, todas las muestras con $S < 0,15\%$ tienen valores de NPR superiores a 2.

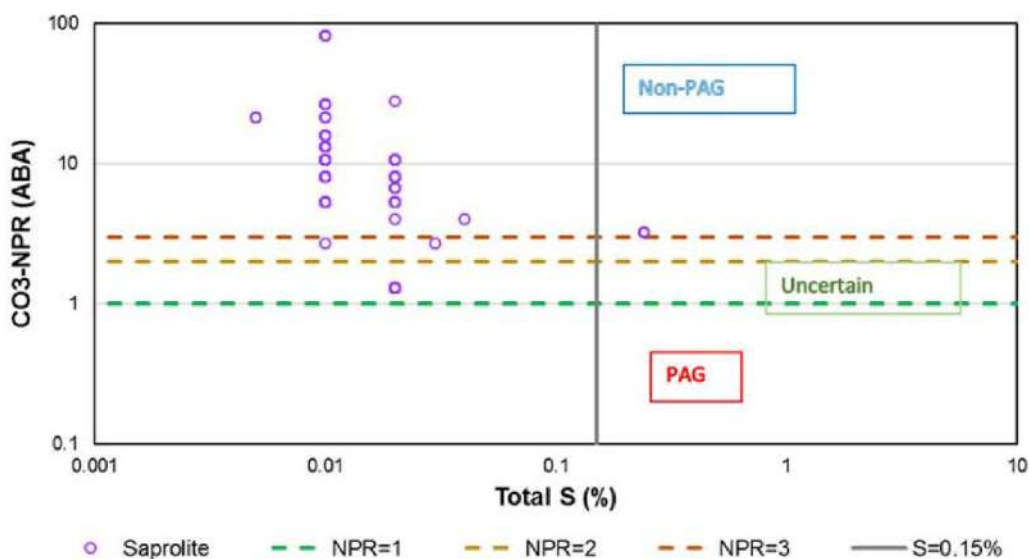


Figura 5.1.1.181 Azufre total vs CO₃-NPR – Saprolito
Fuente: Golder, 2020.

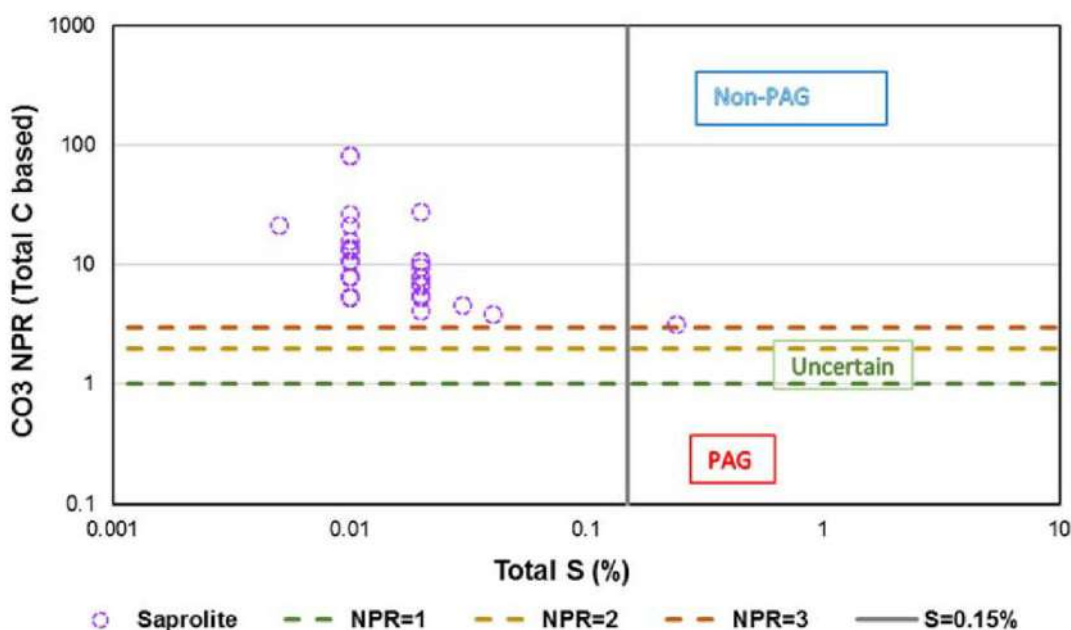


Figura 5.1.1.182 Azufre total vs CO₃-NPR (Total Carbono) – Saprolito
Fuente: Golder, 2020.

Por último, las Figura 5.1.1.183 y Figura 5.1.1.184 presentan las relaciones entre el NPR y el contenido de azufre para la roca saprolítica. Algunas muestras con $S < 0,15\%$ presentan valores de NPR inferiores a 2, pero la cantidad total de roca saprolítica es reducida. Dado que la roca saprolítica es un material que ha sufrido meteorización, es probable que una mayor proporción del azufre total se encuentre en forma de sulfato en lugar de sulfuro. Por consiguiente, el valor umbral de azufre del $0,15\%$ también puede aplicarse a la roca saprolítica.

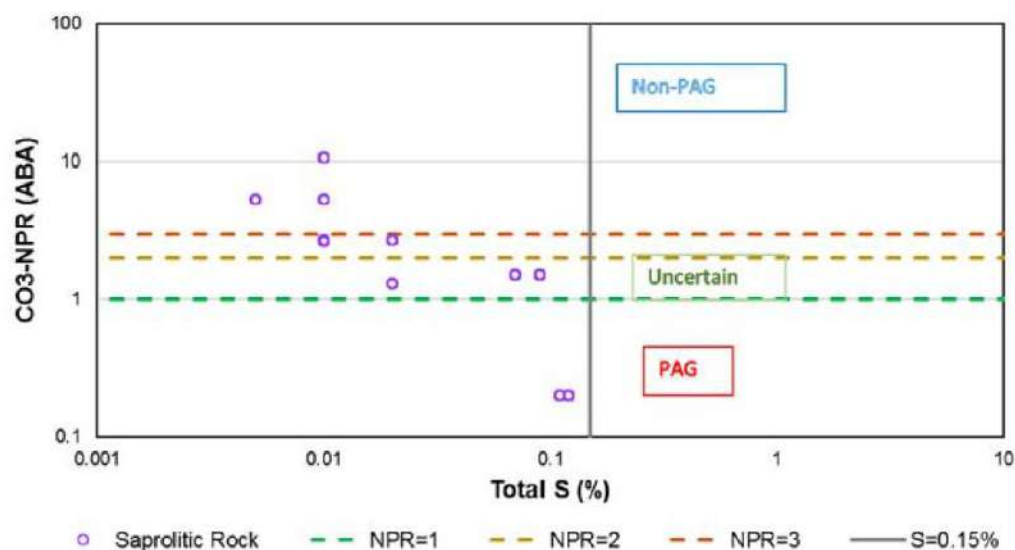


Figura 5.1.1.183 Azufre total vs CO₃-NPR – roca saprolítica
Fuente: Golder, 2020.

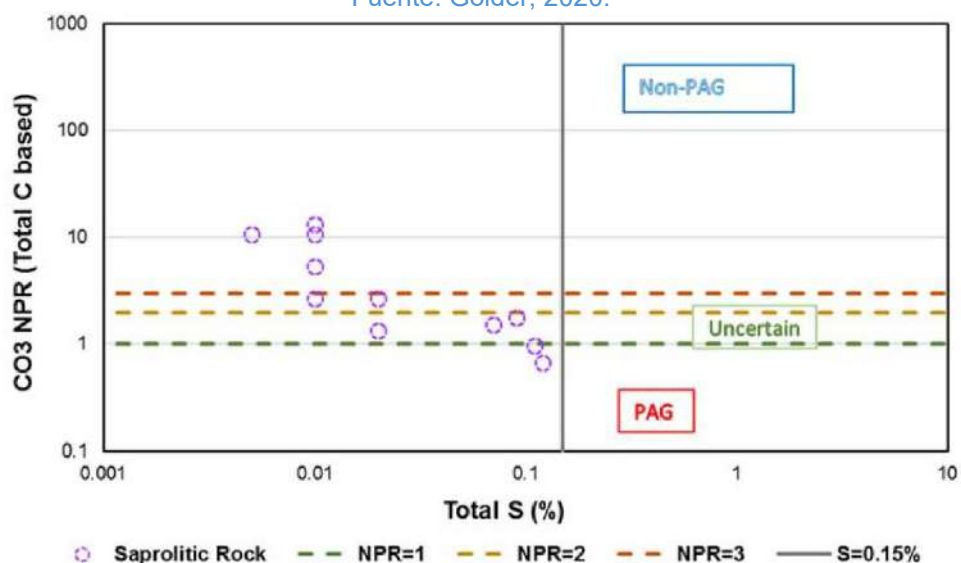


Figura 5.1.1.184 Azufre total vs CO₃-NPR (Total Carbono) – roca saprolítica
Fuente: Golder, 2020.

No hay ninguna relación litológica con el potencial de DAR, y se observa una dispersión típica independientemente del tipo de roca. Si existe una fuerte tendencia a que una mayor proporción de muestras clasifiquen como PAG en el material registrado como zonas de salbanda o vetas debido al mayor contenido de sulfuro asociado a estas estructuras.

Los valores de pH medido en pasta que también se miden en la prueba ABA proporcionan una indicación de la acidez actual. En todos los casos, los valores de pH medido en pasta fueron ligeramente alcalinos, s excepción de las muestras de saprolito, que son débilmente ácidas (pH medido en pasta de ~ 5,5), aunque sin sulfuro residual para potencial de ácido adicional. Los resultados ligeramente alcalinos son normales en cuanto a lo que cabría esperar en muestras de testigo que se han sometido a muy poca oxidación.

Las muestras que representan las pruebas en barriles se sometieron también a un método de prueba llamado generación neta de ácido o prueba NAG, en la que se aplica un oxidante fuerte (H_2O_2) a la muestra con el propósito de oxidar completamente el contenido de sulfuro y posteriormente neutralizar la acidez durante la prueba. El equilibrio entre el oxidante añadido y la reacción de neutralización indica si la condición neta es ácida o básica.

La interpretación de los resultados se basa en si el pH resultante, denominado pH de NAG, está por encima o por debajo del pH del reactivo H_2O_2 (típicamente 4,5).

Las muestras seleccionadas para las pruebas en barriles y, por lo tanto, para la prueba NAG, representan un material con un amplio rango de contenido de sulfuro. Los resultados del pH NAG se muestran con referencia al contenido de sulfuro de azufre, e indican que incluso las muestras con un contenido de azufre de hasta 1,0% pueden ser no PAG (Figura 5.1.1.185). Una de las muestras, con un contenido de sulfuro de 1,3%, se confirmó como PAG.

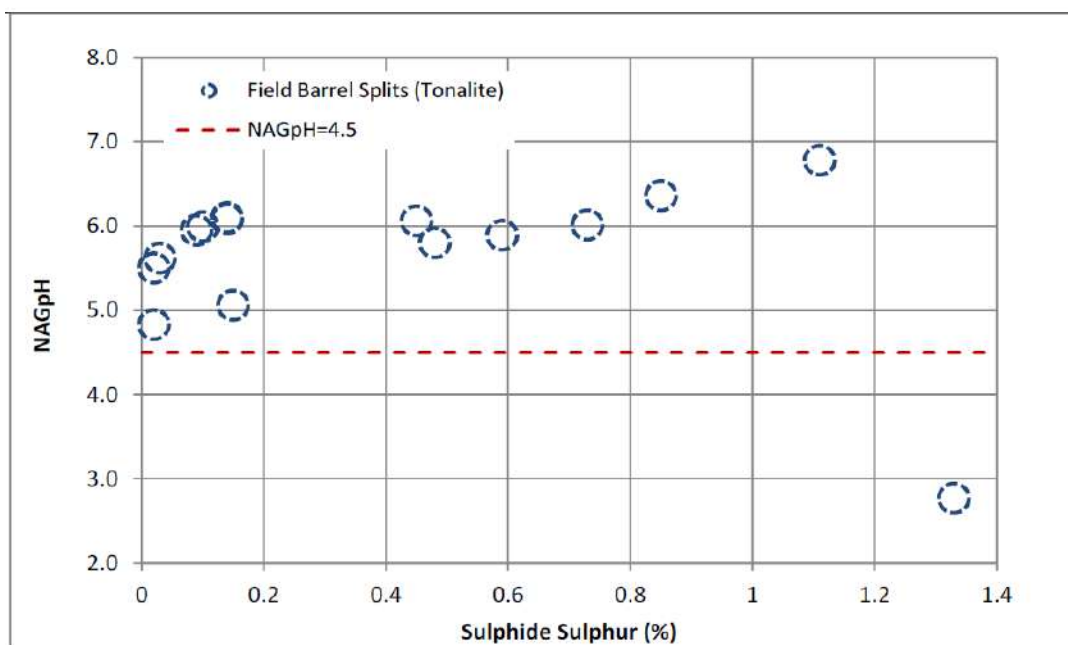


Figura 5.1.1.185 Sulfuro de azufre versus pH NAG en réplicas de muestras de barril
Fuente: pHase, 2013.

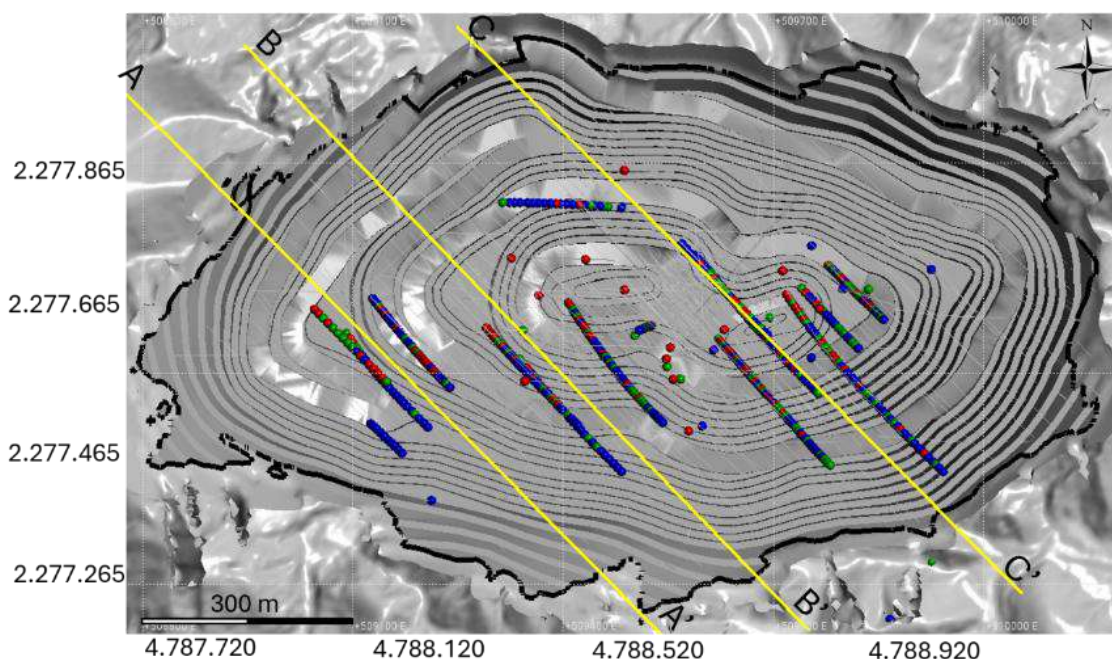
c. Distribución de potencial de generación de ácido

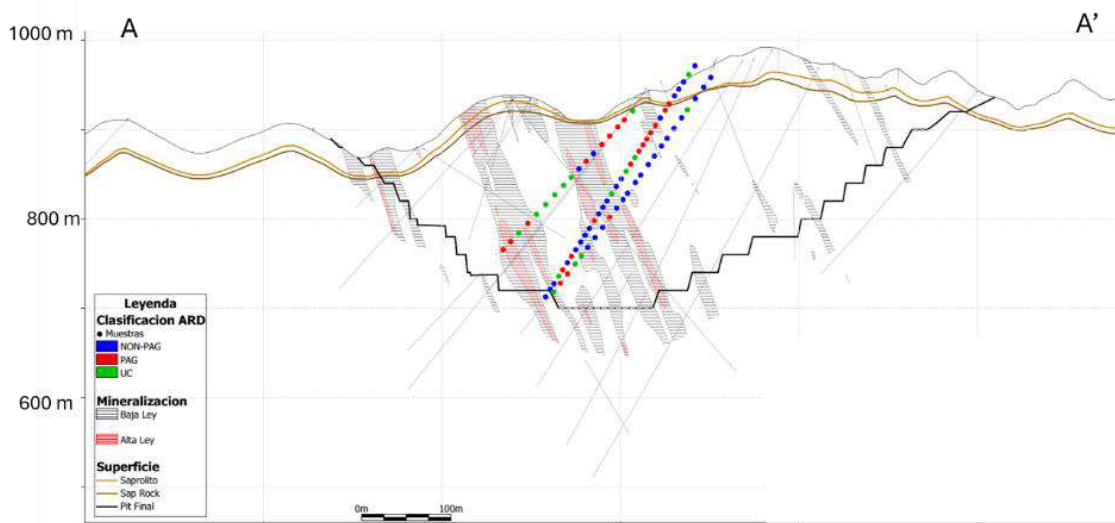
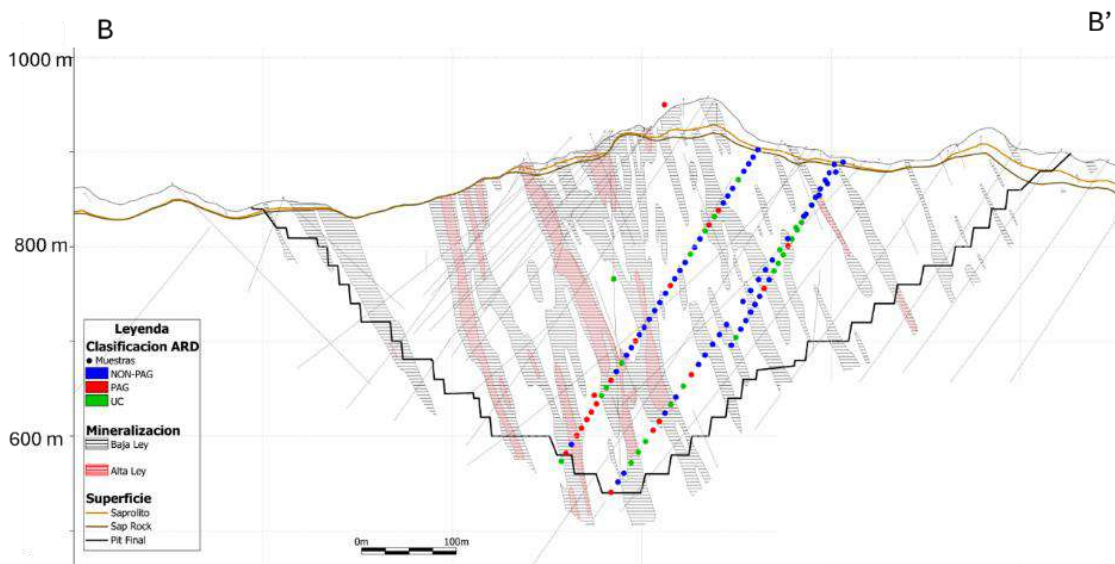
A continuación, se presenta la distribución de la clasificación de muestras según el potencial de drenaje ácido en planta y secciones (Figura 5.1.1.186), teniendo en cuenta los muestreos los resultados de laboratorio analizados en la respuesta anterior.

Acorde a los resultados obtenidos, el contenido de sulfuro está asociado en gran medida a la presencia de vetas. Se observa un mínimo de pirita diseminada, cuya abundancia es generalmente baja (el promedio de todas las muestras en la base de datos de exploración es ~ 0,3%, incluyendo intervalos de mineral).

Para plantear zona de potencial de generación de ácido, acorde a los hallazgos de la caracterización geoquímica, el contenido de azufre se correlaciona con el oro y la plata. Por lo tanto, se prevé que las zonas con contenido más alto de azufre, con un mayor potencial de generación de ácido estarían asociadas en su mayoría a las zonas de mineralización (alta ley, baja ley).

A partir del planteamiento anterior, se observa un aumento de la mineralización hacia el noreste. La sección C-C' exhibe mayor porcentaje de franjas de mineralización en comparación con la sección B-B' y A-A' localizadas hacia el suroeste del tajío.





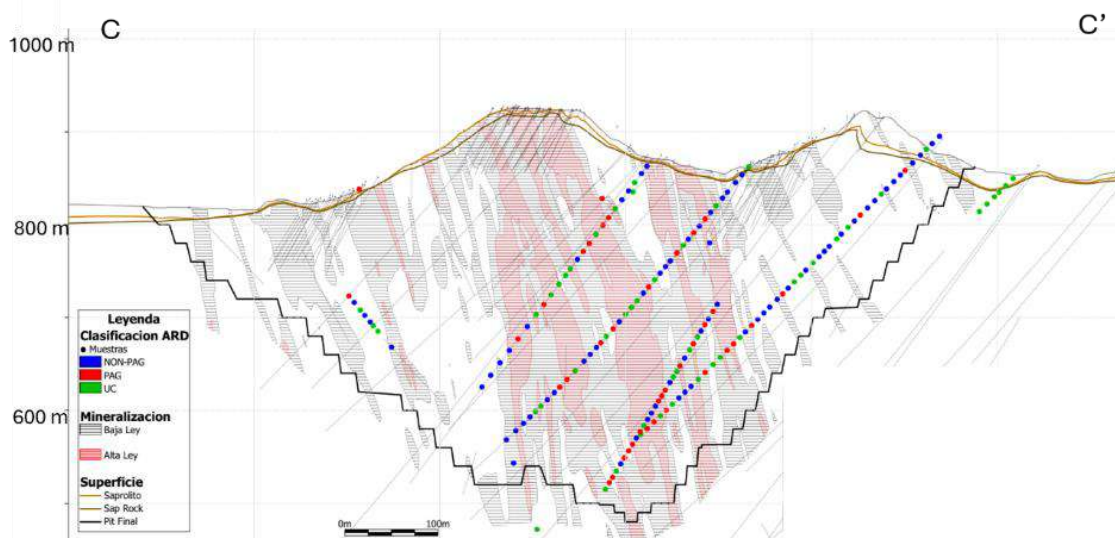


Figura 5.1.1.186 Distribución en planta y sección de muestras clasificada como no-PAG, PAG y UC.
Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

d. Conclusiones

El contenido de sulfuro está asociado en gran medida a la presencia de vetas y vetillas. Se observa un mínimo de pirita diseminada, cuya abundancia es generalmente baja (el promedio de todas las muestras en la base de datos de exploración es ~ 0,3%, incluyendo intervalos de mineral). La distribución de las vetas controla las zonas con potencial DAR. Dado que la mineralización es de tipo “stockwork”, cabría esperar que las zonas con mayores leyes de oro coincidieran también con las áreas de mayor contenido de azufre.

La mineralización de oro está fuertemente asociada a las muestras registradas como material de veta. Los valores promedio de bismuto, cobre, molibdeno, plomo, tungsteno y azufre también son más elevados en el material de veta, lo que refleja la presencia de sulfuros (y sulfosales) en las vetillas del yacimiento. Los contenidos promedio de molibdeno y plata son más altos en las unidades de aplita y dacita.

Los resultados ABA verifican el bajo contenido de azufre y en consecuencia el bajo AP. Los resultados ABA también indican un NP generalmente bajo. Con base en la clasificación ANLA (2016) aproximadamente el 52% de las muestras clasifican como no- PAG, 40% de las muestras clasifican con potencial no definido y el 8% restante de las muestras clasifican como PAG.

En términos generales las pruebas NAG verifican la clasificación obtenida con base en las pruebas ABA para las muestras clasificadas como PAG y no-PAG, pero sugieren que las muestras clasificadas con potencial no definido según las pruebas ABA pueden ser no-PAG.

A partir de los análisis realizados se presenta en la distribución en porcentaje de los materiales PAG, potencial incierto y no-PAG por litología. La litología de veta representa el

valor más alto clasificado como PAG con un 55%, seguido por roca tipo Aplita con el 30%. Para la roca tipo tonalita-granodiorita el material PAG es menos del 10%.

En la Figura 5.1.1.188 se presenta la distribución por alteraciones. El material clasificado como PAG se asocia en su mayoría (57%) a la alteración Carbonato (CARB), seguido de la alteración QTZSER y POT con un 14% cada una.

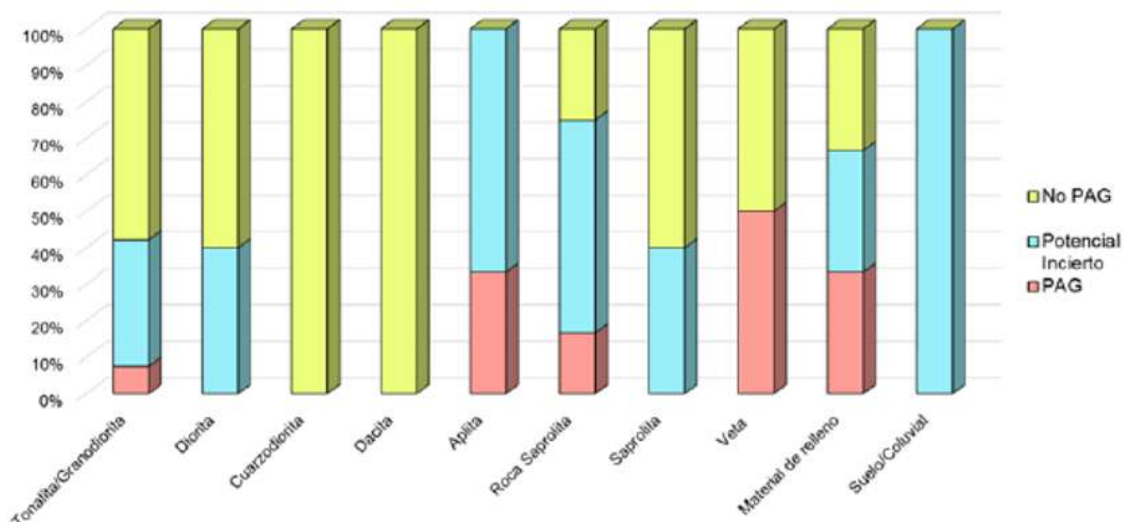


Figura 5.1.1.187 Clasificación DAR por litologías.
Fuente: Golder, 2020.

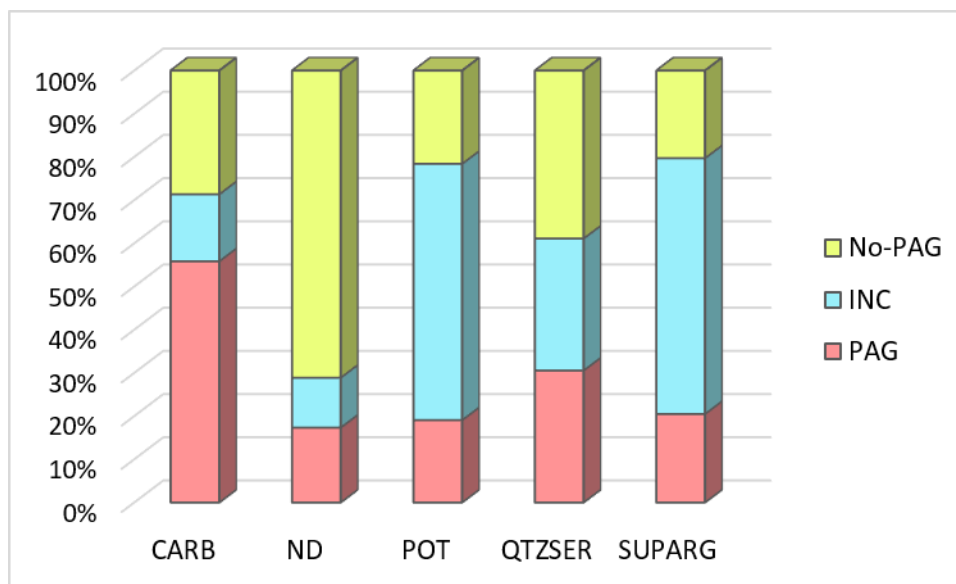


Figura 5.1.1.188 Clasificación DAR por alteraciones.
Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

De la geoquímica del yacimiento se concluye que:

- El depósito se encuentra alojado casi predominantemente dentro de una tonalita compuesta por biotita y hornblenda y una granodiorita intrusiva (pHase Geochemistry, 2013).
- La mineralización está controlada estructuralmente dentro de un conjunto de vetas agrupadas de cuarzo. Las vetas incluyen vetillas de cuarzo con pirita de grano fino (Tipo 1), vetillas de cuarzo-carbonato (Tipo 2) y vetillas de cuarzo con pirita granular (Tipo 5) (pHase Geochemistry, 2013).
- El contenido de sulfuro está asociado en gran medida a la presencia de estas vetillas. Solo se observa un mínimo de pirita diseminada, cuya abundancia es generalmente baja (el promedio de todas las muestras en la base de datos de exploración es ~ 0,3%, incluyendo intervalos de mineral) (pHase Geochemistry, 2013).
- El contenido de azufre se correlaciona con el oro y la plata. Por lo tanto, se prevé que las zonas con contenido más alto de azufre clasifiquen como mineral (pHase Geochemistry, 2013).
- El estudio de testigos de perforación muestra correlaciones entre ciertos parámetros tal como se espera teniendo en cuenta el tipo de mineralización, así como la mineralogía de sulfuro y sulfosales (pHase Geochemistry, 2013).

Los resultados de las pruebas cinéticas fueron usados para confirmar la clasificación PAG y No PAG, así como brindar más información acerca de las muestras clasificadas con potencial incierto (Golder, 2020). Estos resultados se presentan y se discuten en el capítulo de hidrogeología de acuerdo con el orden que plantean los Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental Proyectos de Explotación Minera” (ANLA, 2016).

5.1.1.3.3 Potencial de generación de contaminantes lixiviados – pruebas de lixiviación a corto y largo plazo

Esta información es descrita por (pHase Geochemistry, 2013) y determina la liberación de sustancias tóxicas, donde se emplearon pruebas por agitación en frasco (SFE), TCLP y el seguimiento de lixiviados en pruebas cinéticas.

Para las pruebas a corto plazo (SFE/TCLP) los resultados de extracción SFE en roca estéril indican una buena calidad de agua con pH neutro a alcalino y niveles bajos de metales solubles.

Para las pruebas cinéticas, en las celdas de humedad y barriles de campo, las tasas de lixiviación de parámetros de interés (SO₄, Cu, Mo, As y Se) han sido generalmente bajas.

Para el material que será dispuesto en el depósito de relaves, los relaves de flotación se clasifican como No PAG y muestran una lixiviación insignificante, por el contrario, los relaves de lixiviación de cianuro son claramente PAG y tienen potencial de lixiviar Cd, Cu, Ni, Pb y Zn si se desarrollan en condiciones ácidas. El potencial de generación de contaminantes lixiviados se puede identificar en el ANEXO_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_geoquimica, esta información no presenta variación o modificación debido a que las características geológicas y geoquímicas conservan su homogeneidad en el tiempo.

A. Identificación de contaminantes de interés

De acuerdo con los resultados geoquímicos obtenidos en los estudios de pHase Geochemistry, (2013) y Golder, (2020), es posible identificar como contaminantes de interés aquellos elementos que presentan mayor movilidad potencial bajo escenarios de meteorización y lixiviación, particularmente en materiales asociados a zonas mineralizadas y en los relaves del proceso. Los ensayos estáticos y cinéticos realizados que incluyen los análisis elementales por digestión ácida, pruebas SFE y TCLP, así como celdas de humedad y barriles de campo; evidencian que la liberación más significativa se asocia a metales vinculados a la mineralización sulfurada, principalmente aquellos correlacionados con el contenido de azufre, tales como hierro, y en menor medida elementos traza presentes en sulfuros y sulfosales.

Si bien la roca huésped presenta baja reactividad y reducida liberación de metales, los materiales mineralizados y los relaves bajo condiciones de oxidación o saturación pueden movilizar metales típicamente relevantes en sistemas auríferos, tales como arsénico, plomo y otros elementos traza evaluados en las pruebas de lixiviación. De esta manera, los resultados existentes permiten conocer que el riesgo de liberación se concentra en materiales con mayor contenido de pirita. Los análisis de contaminantes se pueden identificar en ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA, esta información no presenta variación o modificación debido a que las características geológicas y geoquímicas conservan su homogeneidad en el tiempo.

El análisis de los lixiviados NAG también se llevó a cabo para proporcionar una indicación de los metales traza liberados durante la oxidación. La composición química de los lixiviados NAG se proporciona en el ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXO H.

Las concentraciones fueron generalmente bajas, incluso en la muestra (field barrel # 5_bottom) que tenía una condición ácida neta después de la oxidación, a excepción del parámetro ocasional (Cu, Fe, Zn, etc.) típicamente móvil en un pH ácido.

a. Análisis elementales

Los análisis de metales en testigos de exploración se pueden usar también como una herramienta de detección para cuantificar la composición básica de la roca estéril y proporcionar una indicación de qué parámetros pueden estar por encima de lo que se considera normal.

Esta comparación se basa generalmente en la abundancia cortical promedio. Según lo recomendado por Price (1997), si un metal está presente en cantidades diez veces mayores a lo que es típico, el parámetro se considera elevado o anómalo (es decir, un orden de magnitud superior a la media). Esto no significa necesariamente que el elemento sea motivo de preocupación con respecto a la lixiviación de metales. El elemento puede estar presente en una fase mineral que no es susceptible a la lixiviación.

El ANEXOS_CARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXO J contiene los resultados completos de los análisis de metales, con los valores que superan el umbral diez veces resaltado en color rosa. En la Tabla 5.1.1.24 se presenta un resumen de los valores que exceden la abundancia cortical. Este conjunto de elementos es consistente con la presencia de minerales de sulfuro en la roca estéril.

Tabla 5.1.1.24 Resumen de parámetros que exceden diez veces las abundancias corticales

Depósito	Valores en exceso consistentes (>75% de las muestras)	Valores en exceso ocasionales	Valores en exceso poco comunes (<10% de las muestras)
Tonalita/granodiorita	Au, Bi	Ag, Cu, S, Sb	Cr, Mo, Se, W
Diorita	Au, Bi	Ag, Co, Cu, Mg, Sr, W	
Cuarzodiorita	Bi, Co, Cr, Mg		
Dacita	Bi, Se	Au	
Aplita	Bi	Au, Ag, S	
Roca saprolítica	Bi	Au, Ag, Cu, Sb	Mg, Mo, Se, W
Saprolito	Bi	Au, Ag, Co, Cu, Sb	Cr, Mg, Mo, Ni, Se, W
Material de vetas	Au, Bi, Cu, S	Ag	
Salbanda	Bi	Au, Ag, Cu, Mo, S	
Suelo/coluvial	Au, Ag, Bi, W		

Fuente: pHase, 2013.

b. Pruebas de extracción de lixiviados

Las muestras que representan los barriles (materiales del fondo) de los cinco primeros barriles (FB#1 a FB#5) fueron sometidas a pruebas a corto plazo (24 horas) de extracción de lixiviados con matraz de agitación (SFE), usando una relación de agua a sólido de 3:1 con el fin de evaluar la proporción de una muestra que pueda ser extraída con facilidad actualmente o que sea soluble cuando se expone a agua destilada y desionizada de pH neutro. Los resultados de la SFE para parámetros se presentan en el ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXOK.

Los resultados de la SFE en réplicas de muestras de barriles indican muy buena calidad de agua, con un pH de lixiviados entre neutral y alcalino, bajo sulfato y generalmente bajos niveles de metales solubles. Una excepción fue el molibdeno, que reportó concentraciones solubles de hasta ~0,1 mg/L en uno de los lixiviados. Todos los parámetros se encuentran dentro de valores normales y muchos metales traza de posible interés se encuentran cerca o por debajo del nivel de detección (As, Bi, Cd, Zn, Sb y Se).

c. Pruebas cinéticas de celdas de humedad

Para evaluar de manera más cuantitativa el comportamiento cinético de los lixiviados, se ejecutaron pruebas de celdas de humedad en cinco muestras de materiales de roca estéril del depósito Gramalote. Tres de las celdas (1G, 2G, 3G) representan intervalos de 2 metros de testigo, y dos de las muestras (4G y 5G) son las réplicas del programa de pruebas en barriles (FB#2 y FB#3, respectivamente), que representan intervalos de testigo significativamente mayores (aproximadamente 60 metros de longitud).

Una de las celdas (1G) representa roca saprolítica mientras que las cuatro restantes comprenden tonalita/granodiorita con diferentes contenidos de azufre (rango de 0,15 a 1,15%). Las pruebas en celdas de humedad se llevaron a cabo en SGS Canadá en Burnaby, Columbia Británica, usando el procedimiento MEND (1991) (ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXOD).



La Tabla 5.1.1.25 resume los resultados de lixiviados de las pruebas de celdas de humedad realizadas hasta la fecha como concentraciones en condiciones estables y la Tabla 5.1.1.26 los presenta como tasas de liberación para parámetros clave.

Las condiciones estables representan las concentraciones promedio para el período de tiempo siguiente al flujo inicial para cada muestra individual. El flujo inicial se determinó inspeccionando las tendencias de sulfato con base en muestras específicas y se llevó a cabo, en general, durante las primeras semanas de pruebas. Las velocidades de liberación se determinaron a partir de las concentraciones estables convertidas a unidades de mg/kg/semana.

Tabla 5.1.1.25 Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).

ID de la celda de h.	ID de la muestra	Litología	Alk	SO4	Al	As	Ca	Cd	Cr	Co	Cu	Mo	Ni	Sb	Se	Zn
HC 1G	10014118 (GR032 2 a 4)	Roca saprolítica	1	4	0.05	2.3e-5	1.6	4.1e-5	5e-4	1.7e-5	2.4e-3	1.7e-4	2e-4	2e-4	5.3e-5	2.3e-3
HC 2G	10009348 (GR014 100 a 102)	Tonalita/Granodiorita	20	6	0.13	2.7e-4	7.9	3e-6	5e-4	5e-5	1.5e-3	5.8e-3	1.2e-4	2e-4	5e-5	1.7e-3
HC 3G	10021382 (GR043 104 a 106)	Tonalita/Granodiorita	16	9	0.09	2.1e-4	8.3	4.1e-5	5e-4	5e-5	4.4e-3	6.3e-4	1.3e-4	2e-4	6.4e-5	2.7e-3
HC 4G	FB #2 (GR028 90 a 150)	Tonalita/granodiorita	19	20	0.11	2.6e-4	14.4	6e-6	5e-4	1.1e-4	1.8e-3	1.7e-3	2e-4	2e-4	5.4e-5	1.5e-3
HC 5G	FR #3 (GR025 40 a 100)	Tonalita/granodiorita	11	4	0.08	2.3e-4	4.3	9e-6	5e-4	2e-5	6e-4	3.2e-4	1e-4	2e-4	7.7e-5	1.6e-3

Fuente: pHase, 2013.

Tabla 5.1.1.26 Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).

ID de la celda de h.	ID de la muestra	Litología	Alk	SO4	Al	As	Ca	Cd	Cr	Co	Cu	Mo	Ni	Sb	Se	Zn
HC 1G	10014118 (GR032 2 a 4)	Roca saprolítica	0.6	1.6	2.5e-2	1.1e-4	0.8	1.9e-5	2.3e-4	7.8e-5	1.1e-3	1e-4	9e-5	9e-5	2.5e-5	1.1e-3
HC 2G	10009348 (GR014 100 a 102)	Tonalita/Granodiorita	9.2	2.9	6.4e-2	1.2e-4	3.6	1e-6	2.3e-4	1.9e-5	8e-4	2.4e-3	6e-5	9e-5	1.8e-5	8.3e-4
HC 3G	10021382 (GR043 104 a 106)	Tonalita/Granodiorita	7.4	4.2	4.1e-2	1e-4	3.8	2e-5	2.3e-4	2.3e-5	2.2e-3	3e-4	6e-5	9e-5	3e-5	1.4e-3
HC 4G	FB #2 (GR028 90 a 150)	Tonalita/granodiorita	8.4	6.6	6.1e-2	1.2e-4	5.6	4e-6	2.5e-4	2.2e-5	6e-4	9e-4	7e-5	1e-4	2.8e-5	7.4e-4
HC 5G	FR #3 (GR025 40 a 100)	Tonalita/granodiorita	5.1	1.7	3.6e-2	1e-4	1.9	5e-6	2.2e-4	1.1e-5	3e-4	1e-4	4e-5	9e-5	3.7e-5	7.5e-4

Fuente: pHase, 2013.

La Figura 5.1.1.189 proporciona los diagramas de tendencias temporales para los parámetros clave. El

ANEXOS CARACTERIZACION GEOLOGIA GEOQUIMICA PHASE2013 ANEXOM contiene un resumen de los resultados clave y los datos de las pruebas de celdas de humedad en roca estéril.

El pH de los lixiviados para las cuatro muestras de tonalita/granodiorita se mantuvo compensado en todas las pruebas, con valores de pH comprendidos entre 7,2 y 7,7. La muestra de roca saprolítica presentó un pH débilmente ácido con valores típicos entre 5,5 y ~7.

La máxima concentración de sulfato registrada en el flujo inicial (aproximadamente las diez primeras semanas de pruebas) fue de ~100 mg/L de HC 3G y tuvo el más alto contenido de azufre (1,15%). La producción de sulfatos fue generalmente baja en todas las celdas después del flujo, presentando concentraciones estables, generalmente <20 mg/L.

Las concentraciones de elementos trazas fueron en general bajas después del flujo inicial. Las tendencias incluyeron Mo ligeramente más soluble de HC 2G y HC 4G (las muestras con mayor contenido de Mo sólido) y Cu de mayor solubilidad de HC 1G (roca saprolítica), aunque también en concentraciones relativamente bajas.

El cálculo de la neutralización de carbonato y de los tiempos de agotamiento del azufre, según lo definido en Price, 1997, emplea la clasificación de celdas de humedad 1G (roca saprolítica) y 3G (tonalita con 1,15% S) como PAG (es decir, el agotamiento del sulfuro durará más que el agotamiento de la neutralización de carbonato). Los resultados de las celdas de humedad 2G, 4G y 5G, que según ABA clasificaban como no definidas, indican que las celdas 2G (0,35% S) y 4G (0,15% S) clasifican como no PAG, mientras que se espera que la celda 5G (0,45% S) sea PAG.

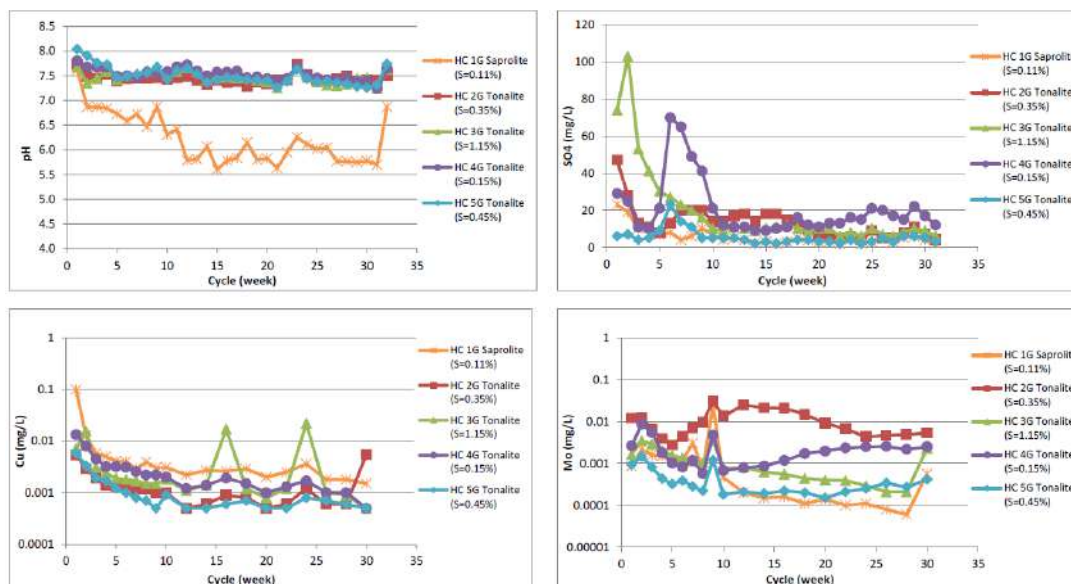


Figura 5.1.1.189 Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en celdas de humedad a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.

Fuente: pHase, 2013

d. Pruebas cinéticas en barriles

El programa de pruebas cinéticas en campo se realizó en testigos de perforación de los sondeos que intersectan las paredes previstas del tajo, está compuesto por un programa de pruebas en barriles que incluye diez barriles de tonalita/granodiorita con contenido de azufre variable (entre 0,02 y 1,22%).

La caracterización de las pruebas estáticas en las muestras de barriles fue presentada en las secciones anteriores.

El ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_GEOQUIMICA_PHASE2013_ANEXOL contiene los resultados a la fecha del monitoreo de los barriles y la Tabla 5.1.1.27 presenta un resumen de la concentración media para parámetros seleccionados. La Figura 5.1.1.190 presenta diagramas de tendencias temporales para parámetros clave de interés.

Tabla 5.1.1.27 Resumen de promedios de pruebas en barril. Concentraciones de lixiviados para parámetros seleccionados

ID del barril	Total S (ABA)	pH en campo	SO ₄	Al	As	Cd	Ca	Co	Cu	Mn	Mo	Ni	Sb	Se	Zn
	%	unidad	mg/L												
FB #1 (GR011 90-154 top)	0.02	6.9	6	2.9e-2	2.1e-4	1.7e-5	8	3e-4	5.6e-3	3.4e-3	1e-3	1.3e-3	5.4e-4	1e-3	1.6e-2
FB #2 (GR015 96-156 top)	0.15	7.1	9	4.3e-2	2.9e-4	2e-5	12	6e-4	6.8e-3	2.2e-3	1.3e-3	1.1e-3	4.9e-4	1e-3	1.2e-2
FB #3 (GR114 56-116 top)	0.52	7.1	12	4e-2	3.9e-4	1.7e-5	16	2e-3	5.5e-3	2e-3	3.6e-3	1e-3	4.4e-4	1e-3	1.3e-2
FB #4 (GR008 174-234 top)	0.61	7.2	23	5e-2	2.9e-4	2.5e-5	22	8e-4	5.1e-3	2.8e-3	1.4e-2	1e-3	5.6e-4	1e-3	1.2e-2
FB #5 (GR007 178-238 top)	1.22	7.2	19	3.4e-2	2.3e-4	2.4e-5	19	6e-4	5.2e-3	7.3e-3	1.3e-2	1e-3	5.9e-4	1e-3	1.2e-2
FB #6 (GR045 280.6-411)	0.85	7.1	35	0.03	2.7e-4	4e-5	28	2e-4	5.1e-3	0.01	1.1e-2	1.2e-3	2.3e-4	1e-3	1.2e-2
FB #7 (GR069 100-226)	0.10	8.1	19	5.7e-2	3e-4	2.7e-5	19	5e-4	5.1e-3	1.8e-2	1e-3	1.2e-3	3e-4	1e-3	1.1e-2
FB #8 (GR091 199.1-326.3)	0.14	7.9	48	6.3e-2	3.3e-4	3.4e-5	30	7e-4	6.8e-3	5.2e-3	6.8e-3	1.6e-3	3.7e-4	1e-3	1.4e-2
FB #9 (GR101 30.77-209.4)	0.09	8.0	32	4.3e-2	4e-4	1.2e-4	25	1.1e-3	6.3e-3	2.3e-2	3.5e-2	2.3e-3	2.3e-4	1e-3	1.3e-2
FB #10 (GR102 88.5-208.5)	0.03	7.4	14	2.7e-2	2.3e-4	6.2e-5	17	6e-4	4.6e-3	1.2e-2	5.1e-3	1.3e-3	3e-4	1e-3	1.1e-2

Fuente: pHase, 2013

Los lixiviados de todos los barriles presentaron un pH cercano a neutral. Las concentraciones de sulfatos lixiviados fueron ligeramente variables, aunque en general bajas, con promedios entre 6 y 48 mg/L. Las concentraciones promedio de sulfato en los barriles de las paredes del tajo (FB#6 a FB#10) son ligeramente superiores a las de los barriles de roca estéril (FB#1 a FB#5); sin embargo, las tendencias sugieren que los barriles de las paredes del tajo pueden seguir estando dentro del flujo inicial de materiales solubles.

Las concentraciones de metales lixiviados también fueron en general bajas y, aunque no se considera una comparación adecuada, se encuentran dentro de los valores típicos de calidad de aguas receptoras.

Se reportó Mo soluble con concentraciones promedio de ~0,01 mg/L en tres de los lixiviados de los barriles. Además, se encontró un contenido ligeramente superior de azufre (0,6 a 1,2%) en estos materiales. Adicionalmente, se reportó una concentración promedio de Mo de ~0,04 mg/L en una muestra de pared del tajo (FB#9) con contenido de azufre muy bajo

(0,09%). Otros metales típicamente móviles a pH neutro, tales como Se, Cd y As, se encontraron en bajas concentraciones en los lixiviados de los barriles.

Las concentraciones del programa de pruebas en barriles son por lo general, aunque no de manera consistente, más altas que aquellas del programa de celdas de humedad. Esto se debe a los volúmenes mucho menores de flujo para los barriles (precipitaciones) que para el HCS (lavado semanal).

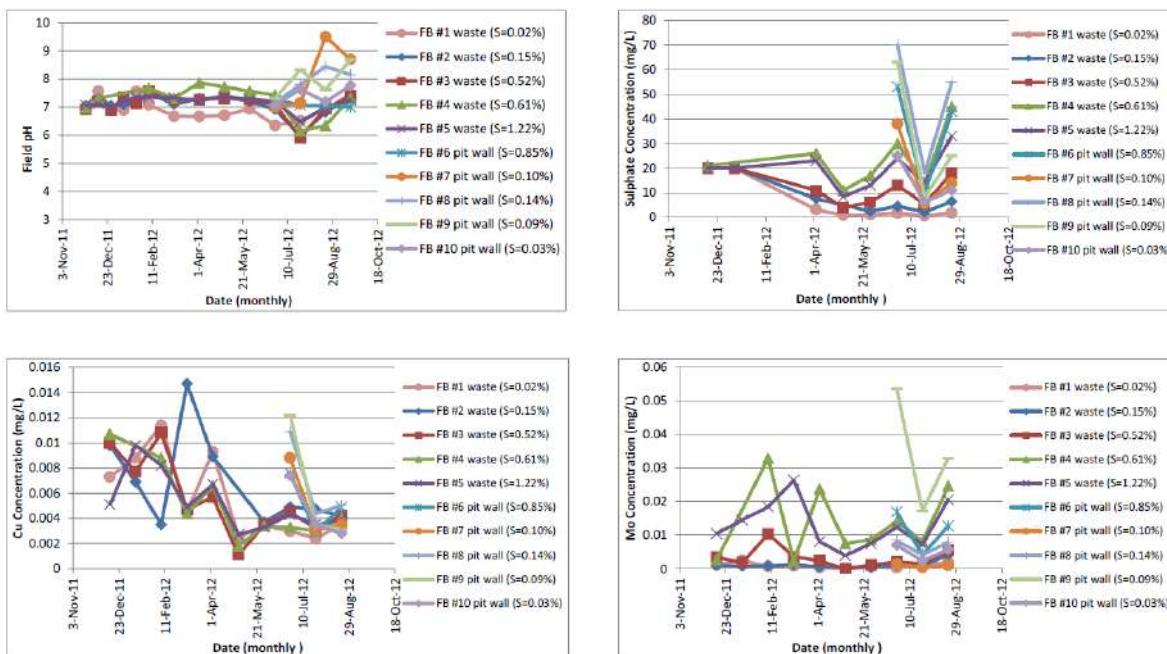


Figura 5.1.1.190 Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en barriles a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.

Fuente: pHase, 2013

Se realizaron pruebas de las tasas de oxidación de sulfuro y de liberación de metales a largo plazo mediante pruebas en laboratorio de celdas de humedad y pruebas en tubos de exploración en campo. Los lixiviados de todas estas pruebas cinéticas han presentado condiciones de pH casi neutro. Las concentraciones de SO_4 y metales de interés son generalmente bajas.

Los niveles meteorizados (Saprolito y roca saprolítica) exhiben los valores más bajos de sulfuros y minerales carbonatados en comparación con las otras unidades. Los lixiviados de cobre y molibdeno no son significativos del lixiviado de estos dos materiales.

e. Distribución de elementos potencialmente tóxicos

Referente al comportamiento entre mineralización y elementos potencialmente tóxicos se presenta a continuación la distribución acorde a los resultados de geoquímica de la base de datos de exploración del yacimiento.

En la Figura 5.1.1.191 se presenta la distribución en planta de la mineralización y los elementos potencialmente tóxicos analizados. Se observa un fuerte control estructural con

tendencia NE-SW para la mineralización y también para la distribución de los elementos analizados. Tomando de referencia el contorno del tajo, los valores elevados están, para el zinc hacia el sector este, para el plomo en la zona central restringido a un tramo pequeño, para el arsénico se observa un pequeño sector al sur, el mercurio se concentra hacia la zona central y el molibdeno hacia los bordes este y oeste.

A partir de la distribución en secciones se describe a continuación los hallazgos y correlaciones entre elementos (Figura 5.1.1.192, Figura 5.1.1.193 y Figura 5.1.1.194).

El zinc (Zn) y el plomo (Pb), que exhiben tendencias similares, se presenta una fuerte correlación con las zonas de alta ley en la parte central y de mayor profundidad del tajo, con control estructural, estrechamente relacionados con los sistemas de vetas que integran el yacimiento. Para la sección C-C' se observa concentración hacia los flancos superiores de las paredes del tajo, desde la superficie hasta niveles intermedios.

El arsénico (As), no se observa una correlación con otro elemento o zonas de mineralización. En la sección C-C', se concentra en el fondo del tajo final y a lo largo de estructuras sub-verticales profundas.

El mercurio (Hg) muestra concentraciones puntuales especialmente hacia los flancos superiores y el centro del tajo, marcado hacia el norte en la sección C-C'. Por último, el molibdeno (Mo) exhibe una distribución vertical más definida, con valores altos hacia la zona central y de mayor profundidad del tajo.

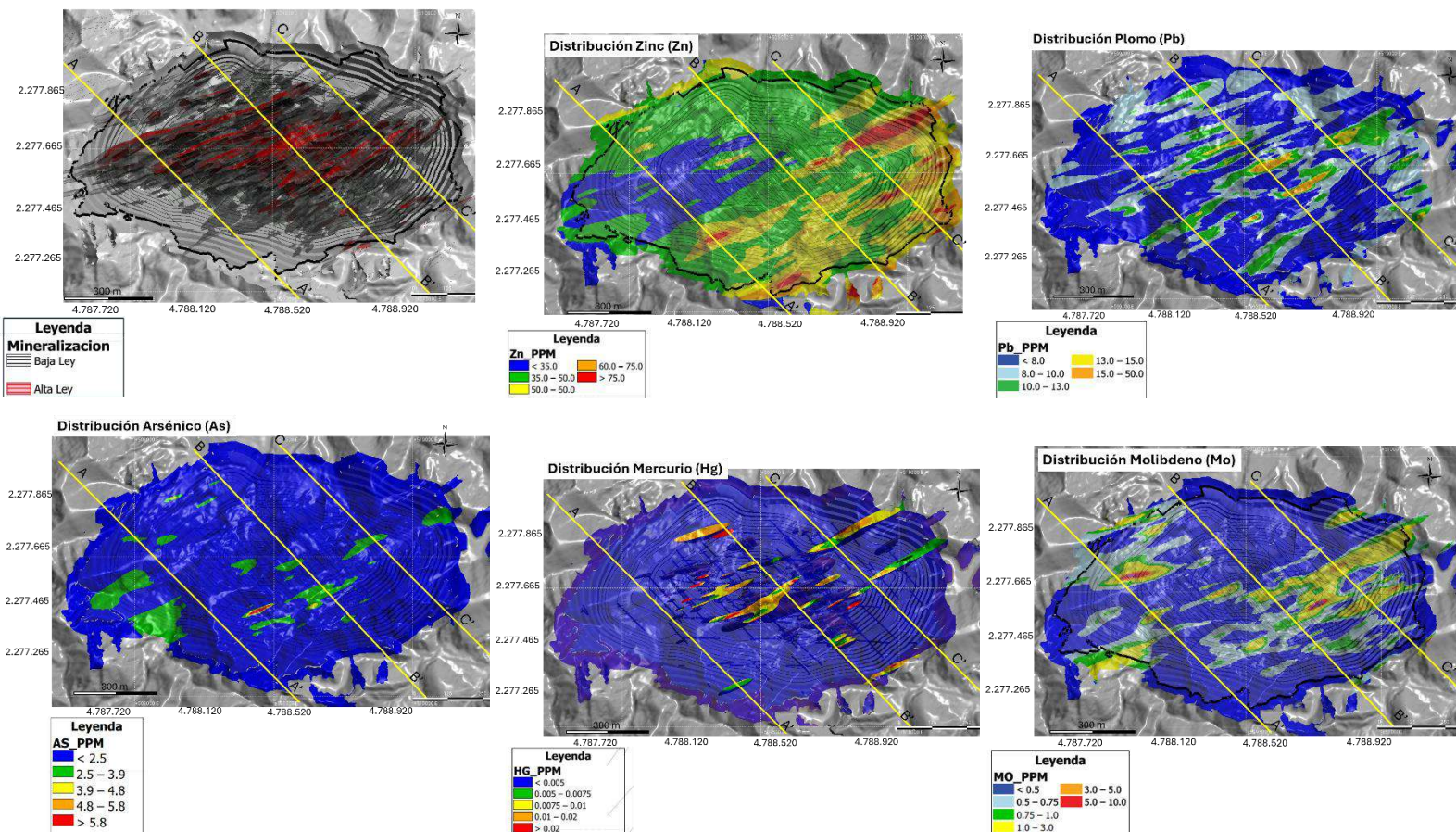


Figura 5.1.1.191

Distribución en planta de mineralización y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.
Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

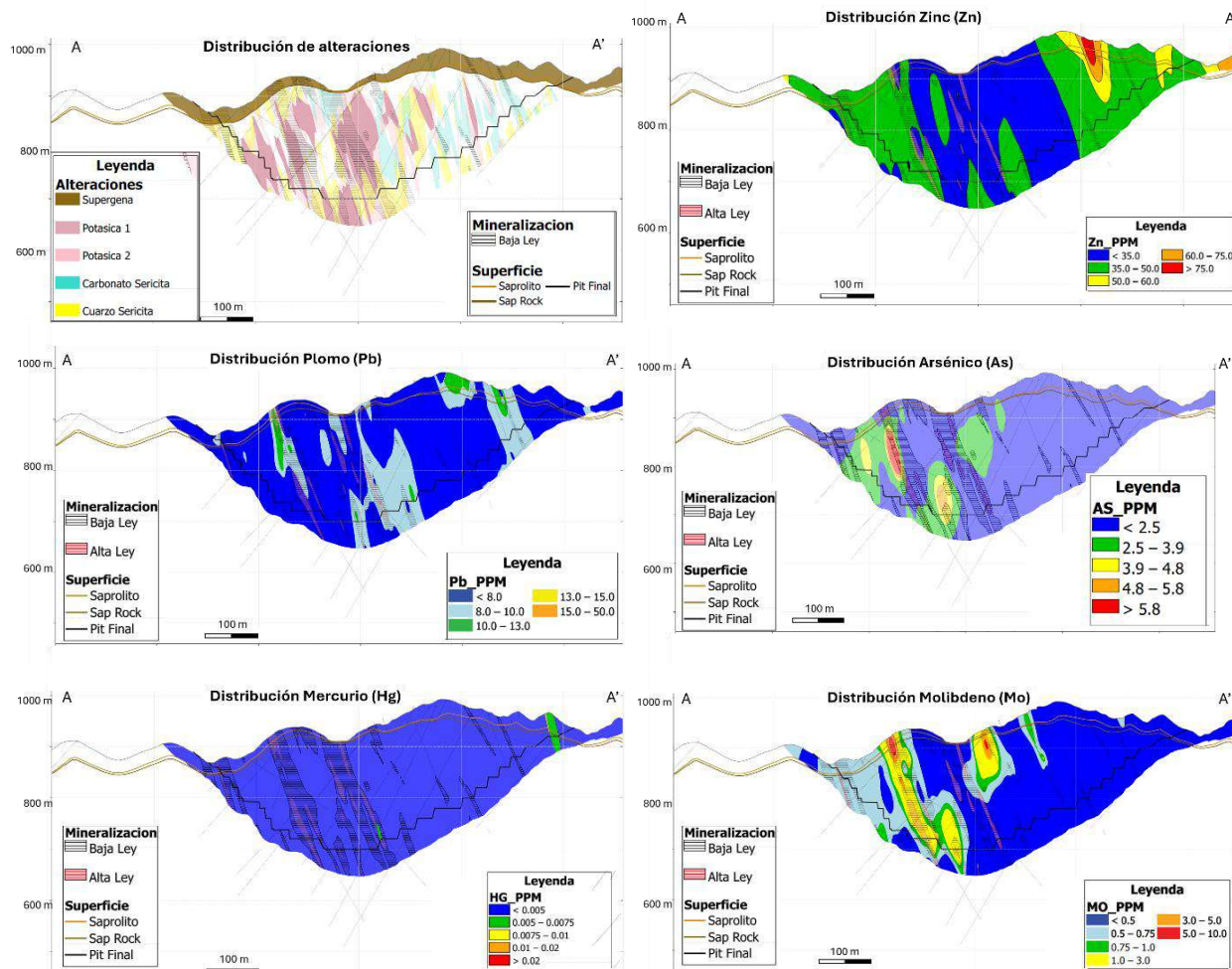


Figura 5.1.1.192 Distribución en sección A-A' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.
Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

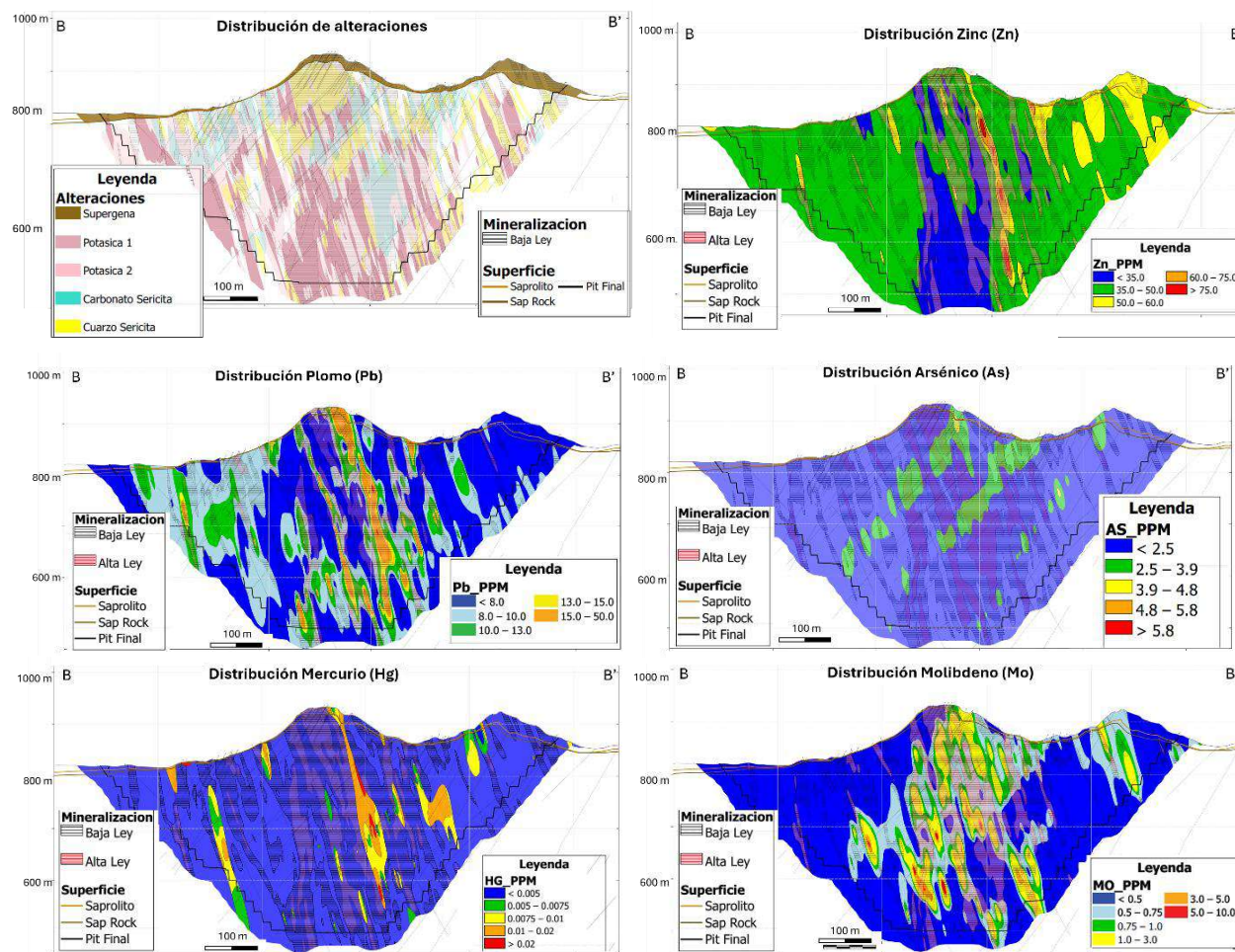


Figura 5.1.1.193 Distribución en sección B-B' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

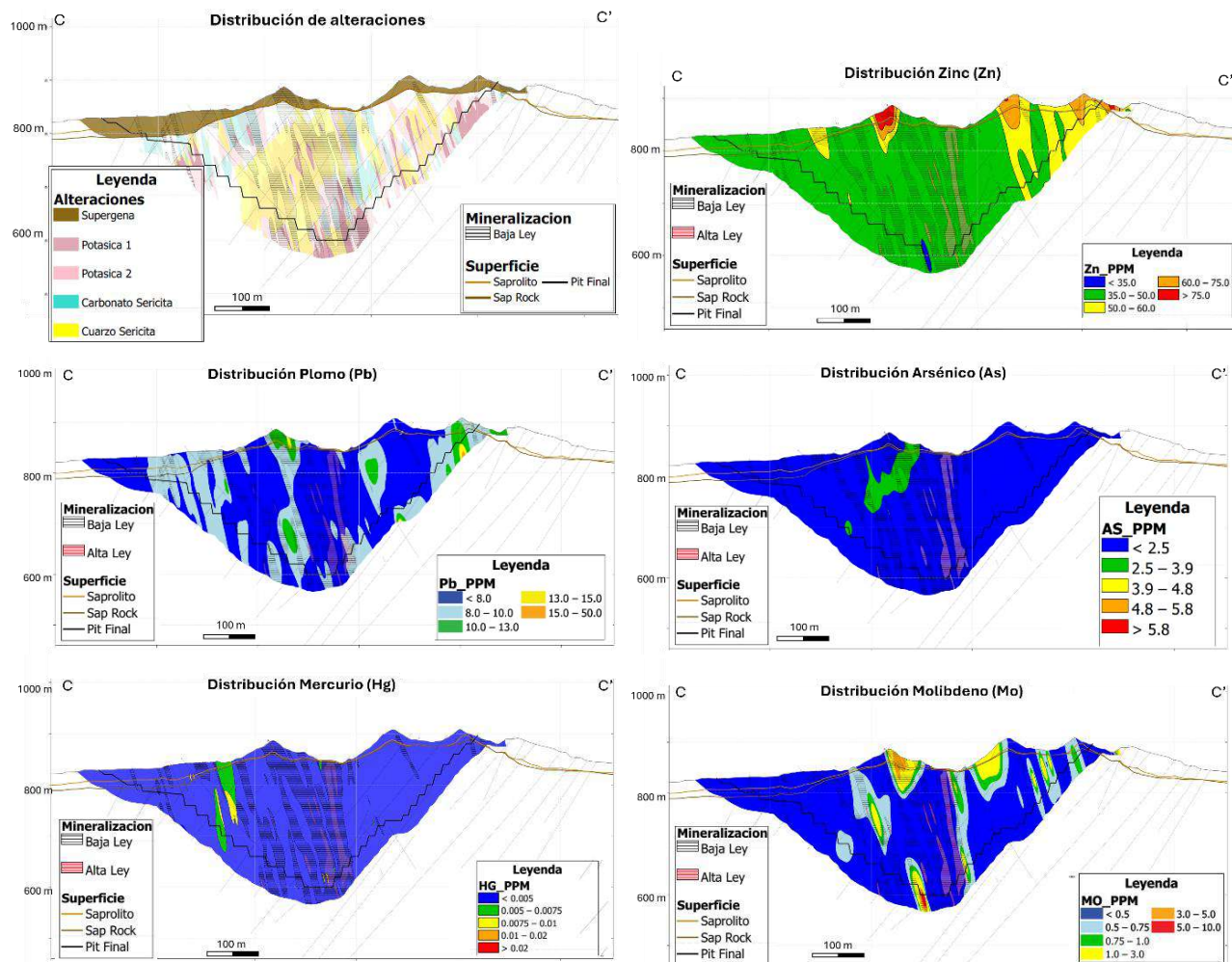


Figura 5.1.1.194. Distribución en sección C-C' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

5.1.1.4 Sismicidad

El proyecto Gramalote cuenta con un estudio de amenaza sísmica desarrollado por la empresa Golder Associates USA Inc. Este fue elaborado para B2Gold & Anglo Gold Ashanti (AGA). Este estudio denominado “Site-specific probabilistic – deterministic seismic hazard assessment and acceleration time histories” (Evaluación de amenaza sísmica probabilística y determinística específica de sitio y aceleración tiempo-historia), con fecha de marzo de 2022, presenta los resultados de los análisis de amenaza sísmica probabilística (PSHA, por sus siglas en inglés) y determinística (DSHA, por sus siglas en inglés) específicos del sitio donde se construirá el terraplén de la presa de almacenamiento de relaves o colas (TSF, por sus siglas en inglés correspondientes a Tailing Storage Facility) propuesta en el sitio de Gramalote, Colombia. Este estudio también incluye el análisis de aceleración tiempo-historia de terremotos (ATH, por sus siglas en inglés) para respaldar el diseño de ingeniería de la presa de almacenamiento de relaves o colas (TSF).

Este informe proporciona la aceleración máxima horizontal del suelo (PGA, por sus siglas en inglés) específica del sitio y aceleraciones espectrales amortiguadas (Sa) al 5 % para las probabilidades de excedencia anual (AEP, por sus siglas en inglés) seleccionadas. Los movimientos sísmicos de la media y del percentil 84 también se estiman para el sismo máximo creíble (MCE, por sus siglas en inglés) en función del DSHA específico del sitio Golder Associates USA Inc (2022).

Como se indica en el estudio desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022), la estimación de la amenaza sísmica tuvo en cuenta los lineamientos de las principales organizaciones internacionales, por ejemplo, International Committee on Large Dams - ICOLD; Canadian Dam Association - CDA; Australian National Commission of Large Dams - ANCOLD; Global International Standard of Tailings Management - GISTM, entre otros.

El estudio de amenaza sísmica desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022) para la presa de almacenamiento de relaves o colas (TSF, por sus siglas en inglés), el cual es aplicable a la mina Gramalote, se presenta en el ANEXOS_CHARACTERIZACION_GEOLOGIA_SISMICA. A continuación, se resumen los principales aspectos del estudio mencionado anteriormente relevantes para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote.

5.1.1.4.1 Contexto sismo-tectónico

El área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote se encuentra ubicado en una región tectónicamente compleja, localizada al noroeste de Sudamérica. Esta zona se caracteriza por importantes zonas de subducción, numerosas fallas tectónicamente activas, las cuales están mayormente orientadas en dirección N-S, la presencia de volcanes activos y un registro histórico de sismos de magnitud importante. La convergencia y las interacciones de tres placas tectónicas (Nazca, Caribe y Sudamericana) con la placa de los Andes del Norte y la placa Paleo-Caribe dominan la tectónica de placas actual del noroeste de Colombia (Golder Associates USA Inc, 2022).

La configuración tectónica actual, la cual domina los procesos presentes en el área de la mina Gramalote, y en general, el territorio colombiano se presenta en la Figura 5.1.1.195 y la Figura 5.1.1.196. Adicionalmente, la evolución tectónica de esta región se describe en

detalle en el numeral 2.0 del informe “*Site-specific probabilistic – deterministic seismic hazard assessment and acceleration time histories*” desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022).

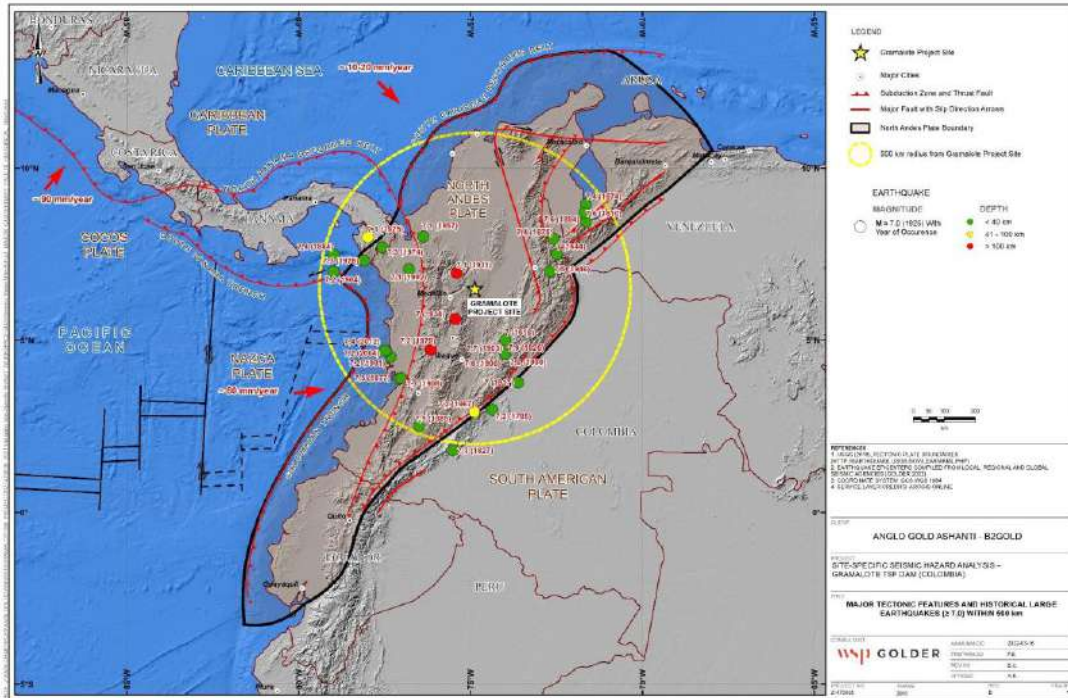


Figura 5.1.1.195 Configuración tectónica y terremotos históricos más importantes

Fuente: (Golder , 2022)

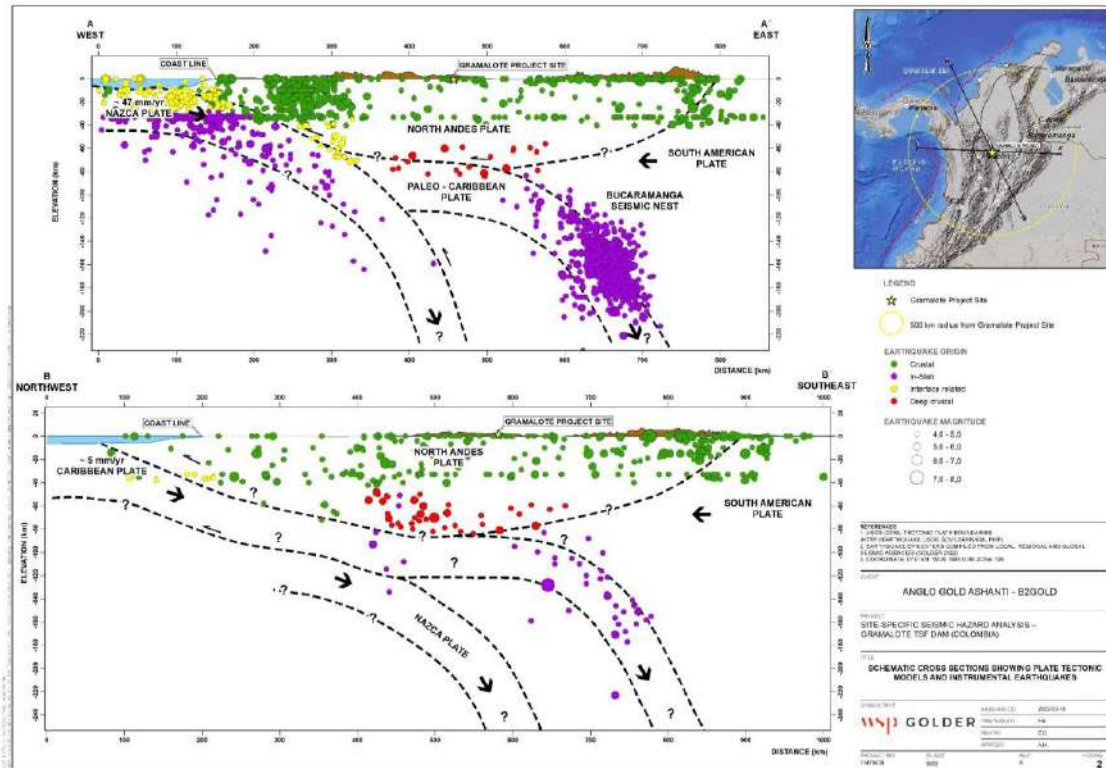


Figura 5.1.1.196 Secciones transversales esquemáticas que ilustran las principales características tectónicas y los hipocentros de los sismos históricos

Fuente: (Golder , 2022)

5.1.1.4.2 Fuentes sísmicas consideradas

La interacción de las placas de Nazca, Caribe, Andes del Norte y América del Sur ha resultado en la formación de una amplia variedad de fallas corticales sísmicamente activas en Colombia, además de volcanes activos en el sur del territorio, cerca de la frontera con Ecuador (Golder Associates USA Inc, 2022). Los terremotos históricos más grandes están asociados con la subducción superficial y más profunda de las placas de Nazca y del Caribe, así como con algunas fallas regionales que atraviesan el territorio colombiano (Figura 5.1.1.196 y Figura 5.1.1.197).

Para el estudio de amenaza sísmica desarrollado por Golder para Gramalote, se consideraron 20 fallas corticales (Golder Associates USA Inc, 2022). La información de estas estructuras fue recopilada desde distintos estudios desarrollados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Modelo de Amenaza Sísmica de Colombia (Arcila, 2020), la base de datos del Proyecto de Evaluación de Riesgos de América del Sur (SARA, 2016) y la base de datos de fallas cuaternarias desarrollado por el USGS para Colombia (Paris, 2000).

En la Tabla 5.1.1.28 se presenta un resumen de los principales parámetros de las fallas geológicas activas consideradas en el estudio de amenaza sísmica, localizadas en un radio de 200 km desde el proyecto Gramalote. Adicionalmente, en la Figura 5.1.1.197 se presenta el mapa de fallas activas consideradas y las características de la sismicidad presente en esta zona del territorio colombiano.

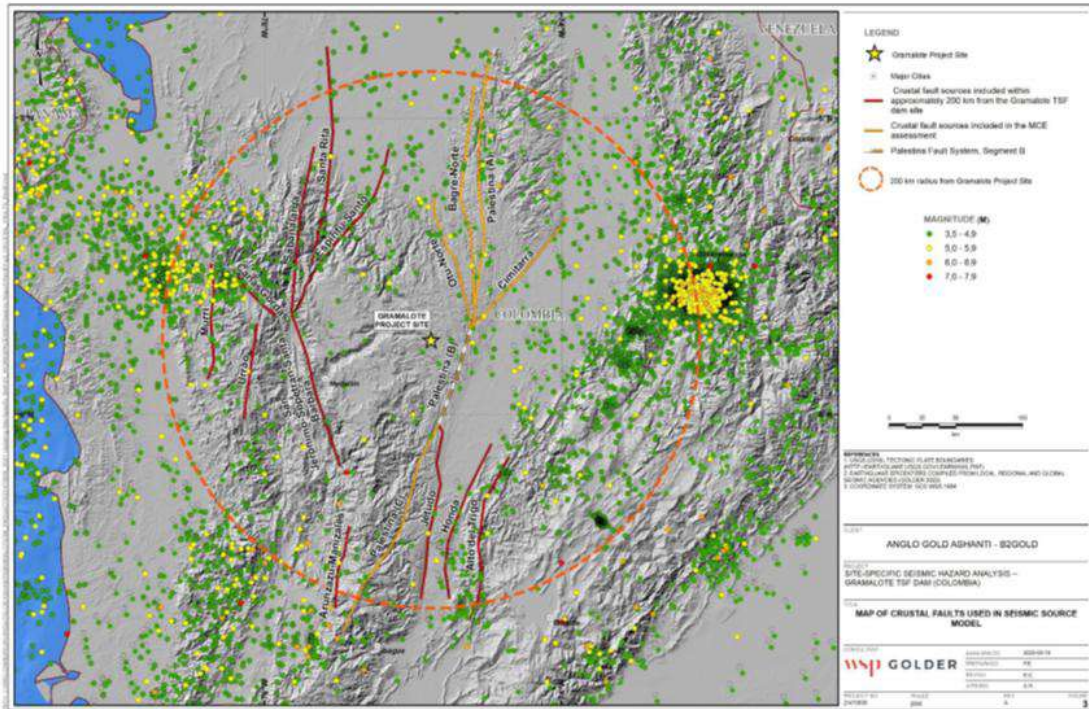


Figura 5.1.1.197 Análisis localizado en la mina Gramalote

Fuente: Golder Associates USA Inc (2022)

Tabla 5.1.1.28 Características del modelo de fuente sísmica de las fallas activas mapeadas en un radio de 200 km desde la mina Gramalote.

Falla o segmento de falla	Longitud de la falla (km)	Distancia más cercana al sitio (km)	Buzamiento (°) y dirección	Tipo de falla ¹	Tasa de deslizamiento promedio (mm/año) y peso	Probabilidad de actividad	Profundidad sismogénica	Magnitud de momento sísmico (M) ²
Alto del Trigo	129	105	52° E	R	0,09 (1)	1	15,8	7,7
Aránzazu-Manizales	63	151	90°, Vertical	SS	0,9 (1)	1	16,8	7,3
Bagre-Norte	164	42	72° E	R	0,1-0,18-1,0 (0,3-0,6-0,1)	1	16,2	7,7
Cañasgordas	42	116	72° SW	R	0,45 (1)	1	19	7,2
Cimitarra	109	32	90°, Vertical	SS	0,1-0,18-1,0 (0,3-0,6-0,1)	1	17	7,5
Espíritu Santo	140	100	72° NW	N	0,45 (1)	1	19	7,7
Honda	123	90	52° E	R	0,9 (1)	1	15,8	7,6
Jetudo	134	62	72° W	R	0,9 (1)	1	19	7,7
Murri	88	162	72° E	R	0,09 (1)	1	19	7,5
Otú-Norte	106	31	72° E	R	0,2-0,45-1,0 (0,2-0,6-0,2)	1	16,2	7,5
Palestina (A)	208	32	72° E	R	0,1-0,18-1,0 (0,3-0,6-0,1)	0,75	19	7,9
Palestina (A+B)	284	27	72° E	R	0,1-0,18-1,0 (0,3-0,6-0,1)	0,2	19	8
	456	27	72° E	R	0,1-0,18-1,0	0,05	19	8,2

Falla o segmento de falla	Longitud de la falla (km)	Distancia más cercana al sitio (km)	Buzamiento (°) y dirección	Tipo de falla ¹	Tasa de deslizamiento promedio (mm/año) y peso	Probabilidad de actividad	Profundidad sismogénica	Magnitud de momento sísmico (M) ²
Palestina (A+B+C)					(0,3-0,6-0,1)			
Palestina (B)	76	27	72° E	R	0,1-0,18-1,0 (0,3-0,6-0,1)	0,55	19	7,4
Palestina (B+C)	248	27	72° E	R	0,1-0,18-1,0 (0,3-0,6-0,1)	0,2	19	7,9
Palestina (C)	172	63	72° E	R	0,1-0,18-1,0 (0,3-0,6-0,1)	0,75	19	7,8
Sabanalarga	126	105	90°, Vertical	SS	0,9 (1)	1	17	7,6
San Jerónimo-Sopetrán-Santa Bárbara	119	92	90°, Vertical	SS	0,9 (1)	1	17	7,5
Santa Rita	163	105	90°, Vertical	SS	0,09 (1)	1	17	7,7
Urrao	72	129	90°, Vertical	SS	0,45 (1)	1	17	7,3

1 R: Reverse (inversa), N: Normal (normal), SS: Strike-slip (deslizamiento lateral).

2 Magnitud de momento sísmico a partir de la relación empírica Wells y Coppersmith (1994), área de ruptura para todos los tipos de deslizamiento.

Fuente: (Golder Associates USA Inc, 2022).

5.1.1.4.3 Sismicidad histórica

Presentar el contexto sísmico de Colombia a través de los sismos más importantes que han generado algún tipo de afectación en el territorio y conocer los efectos que los sismos históricos han tenido en las distintas zonas del país, permite, en cierta medida, entender cuáles serían los efectos locales que podrían suceder en caso de que un sismo de magnitud importante ocurriera en la zona de interés para la mina Gramalote.

El sismo histórico más cercano del área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote sucedió el 10 de abril de 1911, con epicentro localizado en el municipio de Yarumal, Antioquia, al NW del área de la mina. En la Tabla 5.1.1.29 se presentan las características principales de este evento histórico. Adicionalmente, en el numeral A se describen algunos de los efectos generados por este sismo. Para este caso, el evento se mide en la escala de Intensidad Macrosísmica Europea (EMS-98, por sus siglas en inglés), la cual corresponde a una clasificación de la severidad de la sacudida del suelo, basándose en los efectos observados en un área limitada.

Tabla 5.1.1.29 Características de los eventos sísmicos históricos fuera del área interés

Fecha (aaaa-mm-dd)	Hora local (hh:mm)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Magnitud	Área epicentral	Distancia al sitio* (km)
10/04/1911	13:42	6,96	-75,41	120	6,4 Mw	Yarumal*	77

*Departamento de Antioquia

Fuente: Elaboración propia a partir de SGC (2022)

A. Sismo de 1911-04-10

Este sismo generó daños en las poblaciones de Yarumal y Campamento en el departamento de Antioquia, y se sintió en el centro y nororiente del país. El sitio más afectado fue Yarumal, donde se reportaron graves averías en algunas casas y en la torre de la iglesia, la cual posteriormente fue mandada a derribar (Servicio Geológico Colombiano - SGC, 2022).

En Campamento, se desplomó parte del frontis de la iglesia, y en el corregimiento de Santa Isabel (Remedios, Antioquia) se reportaron "grandes pérdidas materiales". Fue sentido en Medellín y Cúcuta en Colombia, y en Barinas, Guanare y Tariba en Venezuela (Servicio Geológico Colombiano - SGC, 2022). El hecho de que este sismo haya sido sentido en un área tan extensa, justifica la interpretación de su profundidad de 120 km. Sin embargo, es necesario considerar la posibilidad de que el epicentro se localizara un poco más al este, dado que fue sentido en el territorio venezolano.

En la Figura 5.1.1.198 se presenta los valores intensidad (EMS-98) alcanzados en los municipios de Yarumal, Medellín, Montería, Cúcuta (Colombia) y San Cristóbal (Venezuela).

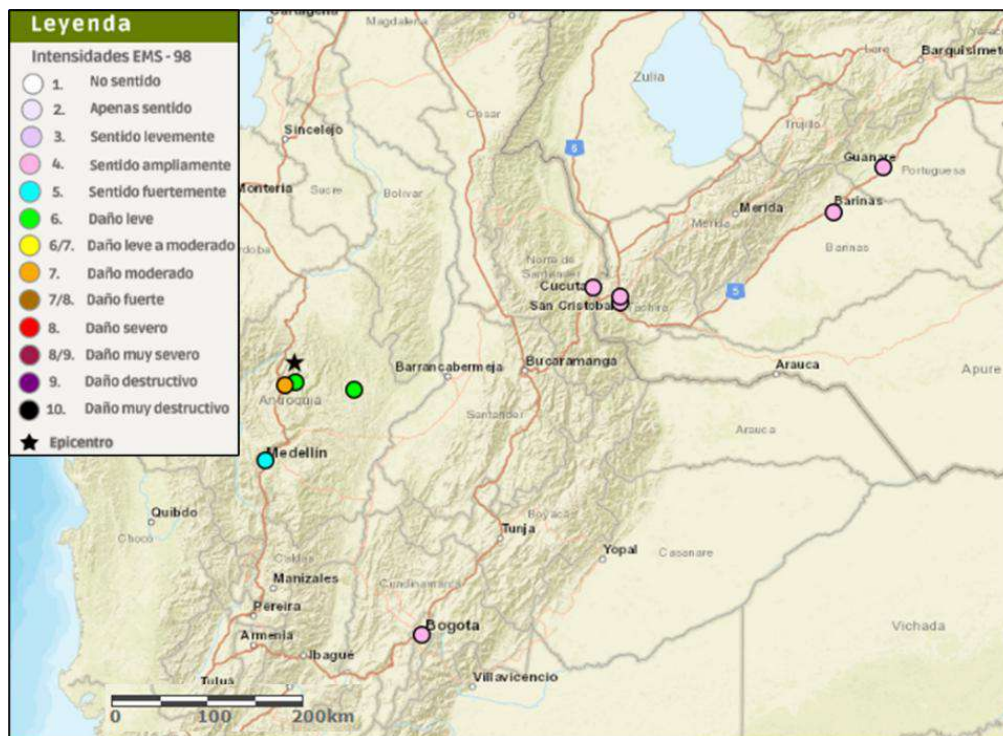


Figura 5.1.1.198 Mapa de intensidades EMS-98 para el sismo histórico del 10 de abril de 1911, con área epicentral en Yarumal, Antioquia. El epicentro de este evento se localizó al NW de la mina Gramalote

Fuente: SGC (2022)

Dadas las características tectónicas del territorio colombiano, existen otros eventos históricos asociados a las distintas sismo-fuentes presentes en el país, sin embargo, los epicentros de estos eventos se encuentran a distancias superiores a los 100 km desde la mina Gramalote. Las características principales de los eventos históricos se presentan en el numeral 3.1 del informe “*Site-specific probabilistic – deterministic seismic hazard assessment and acceleration time histories*” desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022).

5.1.1.4.4 Sismicidad instrumental

El estudio de amenaza sísmica desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022), compiló información de sismicidad histórica e instrumental de 11 catálogos sísmicos (locales, regionales y globales). Esta compilación permitió generar un catálogo de sismos confiable y suficiente para desarrollar los análisis requeridos en el sitio de la mina Gramalote. La distribución de la sismicidad compilada se puede observar en la Figura 5.1.1.197.

A continuación, se listan las bases de datos utilizadas en la compilación del catálogo sísmico del estudio PSHA y DSHA de la mina Gramalote (Golder Associates USA Inc, 2022):

- Servicio Geológico Colombiano (SGC)
- *United States Geological Survey – USGS*
- *USGS Centennial Earthquake Catalog – CENT*
- Archivo histórico global de sismos compilado por *Global Earthquake Model (GEM)*
- Catálogo del boletín del *International Seismological Centre (ISC)*
- Catálogo de sismicidad instrumental global compilado por *ISC y Global Earthquake Model (ISCGEM)*
- Catálogo sísmico del *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*
- Catálogo de *Advanced National Seismic System (ANSS)*
- Catálogo del *Global Centroid Moment Tensor (GCMT)*
- Catálogo del *Incorporated Research Institutions for seismology – IRIS*
- Catálogo de sismos de Suramérica (SARA)

En el numeral 3.0 del informe “*Site-specific probabilistic – deterministic seismic hazard assessment and acceleration time histories*” desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022), se encuentra el detalle y las características de los catálogos mencionados anteriormente.

5.1.1.4.5 Nivel de amenaza del sitio de interés

El análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés) desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022) para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote, se realizó usando el software EZ-FRISK v8.0. El valor de VS30 utilizado en la estimación de la amenaza sísmica fue de 800 m/s (Golder Associates USA Inc, 2022), el cual es equivalente a un afloramiento de roca de rigidez media, según se define en el título A de la NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2010).

Los resultados obtenidos a partir del análisis probabilístico se exponen mediante las curvas de amenaza, que representan la frecuencia anual de los diferentes niveles de aceleración máxima esperada en el sitio de interés y los espectros de respuesta de amenaza uniforme (UHS) para distintos periodos de retorno. El término “Amenaza Uniforme” se usa aquí porque existe la misma probabilidad de exceder los movimientos del terreno en un tiempo de exposición seleccionado en cualquier período espectral (Golder Associates USA Inc, 2022).

En la Figura 5.1.1.199 y Figura 5.1.1.200 se presentan las curvas de amenaza y los espectros de respuesta de amenaza uniforme (UHS). Adicionalmente, en la Tabla 5.1.1.30 se muestran los valores de aceleración para distintos periodos espectrales asociados a los

periodos de retorno de 475, 975, 2.475, 5.000 y 10.000 años y sus respectivas tasas anuales de excedencia. El detalle de los resultados del estudio de amenaza sísmica se puede consultar en los numerales 5.0, 6.0 y 7.0 del informe “*Site-specific probabilistic – deterministic seismic hazard assessment and acceleration time histories*” desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022).

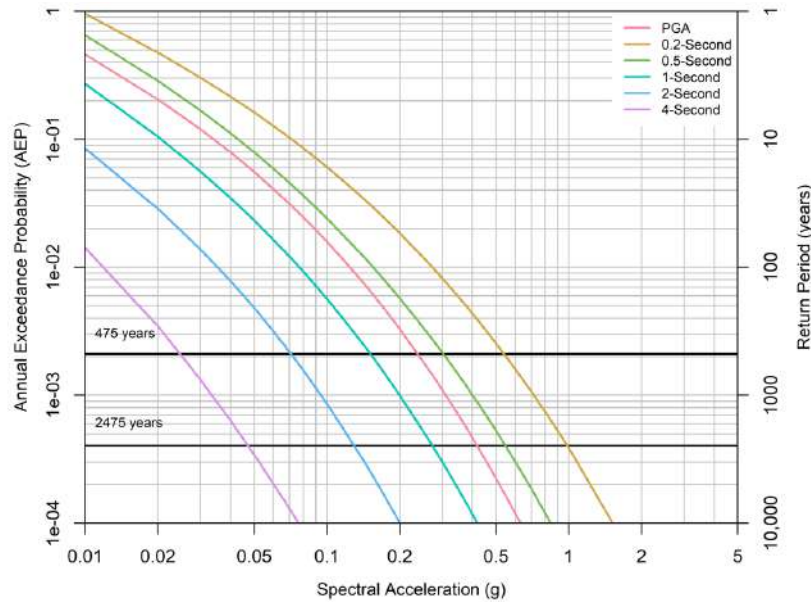


Figura 5.1.1.199 Curvas de amenaza media (5% de amortiguamiento) para los periodos espectrales seleccionados en el sitio de la mina Gramalote. El valor de Vs30 usado es de 800 m/s

Fuente: Golder Associates USA Inc (2022)

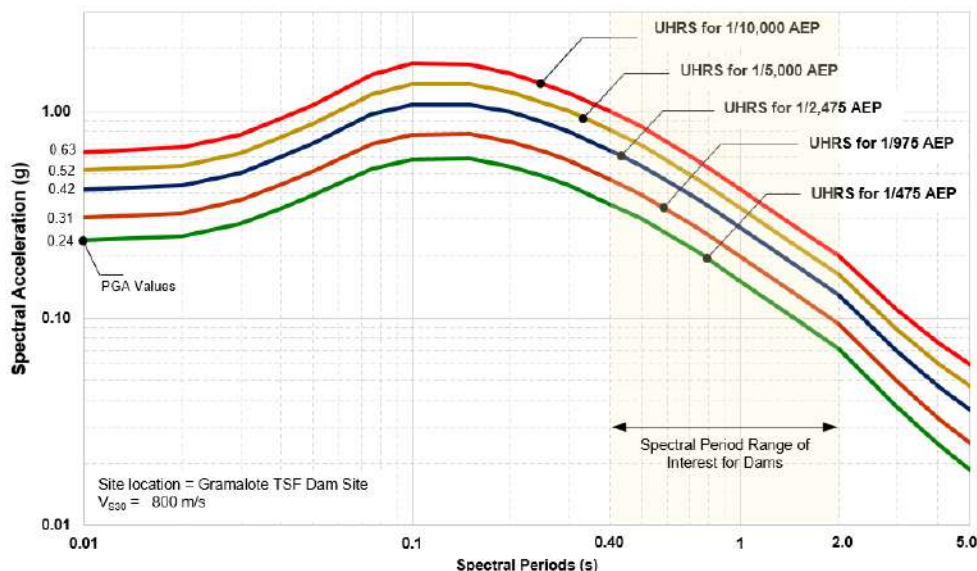


Figura 5.1.1.200 Espectros de Respuesta de Amenaza Uniforme (UHRs) (5% de amortiguamiento) en el sitio de la mina Gramalote. El valor de V_{s30} usado es de 800 m/s

Fuente: Golder (2022)

Tabla 5.1.1.30 UHRs (5% de amortiguamiento) para las Probabilidades Anuales de Excedencia (PAE) seleccionadas en el sitio del proyecto Gramalote. El valor de V_{s30} (1) usado es de 800 m/s

Periodo espectral (s)	Aceleración Espectral Horizontal - UHRs (g)				
	PAE*	PAE*	PAE*	PAE*	PAE*
	1/475	1/975	1/2.475	1/5.000	1/10.000
PGA	0,238	0,308	0,418	0,518	0,632
0,1	0,586	0,773	1,075	1,351	1,692
0,15	0,591	0,779	1,079	1,352	1,689
0,2	0,54	0,711	$S_s = 0,987^{(2)}$	1,227	1,519
0,3	0,438	0,576	0,796	0,997	1,214
0,4	0,357	0,468	0,647	0,811	1
0,5	0,303	0,397	0,547	0,684	0,842
0,75	0,207	0,271	0,373	0,465	0,571
1	0,151	0,198	$S_1 = 0,273^{(2)}$	0,34	0,419
2	0,071	0,094	0,129	0,163	0,2
3	0,038	0,05	0,07	0,089	0,111

Periodo espectral (s)	Aceleración Espectral Horizontal - UHRS (g)				
	PAE*	PAE*	PAE*	PAE*	PAE*
	1/475	1/975	1/2.475	1/5.000	1/10.000
4	0,025	0,033	0,047	0,06	0,076
5	0,019	0,025	0,036	0,047	0,06
7,5	0,011	0,015	0,023	0,03	0,039
8	0,01	0,014	0,021	0,027	0,036
9	0,009	0,012	0,018	0,023	0,03
10	0,008	0,011	0,015	0,02	0,026

Valores espectrales de amenaza sísmica uniforme específico del sitio, calculados para afloramientos de roca de rigidez media (VS30 de 800 m/s) equivalente a un suelo Tipo B, según lo definido por el NSR-10.

SS y S1 son las aceleraciones espectrales medias para el Sismo Máximo Considerado (MCEQ, por sus siglas en inglés) en periodos definidos para TSS = 0,2 s y TS1 = 1,0 s, para el periodo de retorno de 2.475 años según ASCE 7-16 (2016) (Golder Associates USA Inc, 2022). Si bien el MCEQ utiliza un VS30 de 760 m/s, los valores proporcionados aquí pueden considerarse equivalentes, pero para el diseño final, deben recalcularse para un VS30 de 760 m/s.

Fuente: Golder Associates USA Inc (2022)

Como se puede observar en el numeral 7.2 del informe “Site-specific probabilistic – deterministic seismic hazard assessment and acceleration time histories”, los valores de aceleración del estudio desarrollado por Golder Associates USA Inc (2022) para el sitio de la mina Gramalote, son coherentes respecto de otros estudios de amenaza sísmica desarrollados en el país) (Tabla 5.1.1.31). Los valores presentados en este informe son más conservadores por lo que su uso en el diseño de las obras se considera adecuado y representativo para la zona.

Tabla 5.1.1.31 Valores de aceleración para algunos periodos espectrales (PGA, 0,2 y 1,0 s) asociados a un periodo de retorno de 475 años de varios estudios para el sitio de la mina Gramalote

PSHA con Probabilidad Anual de excedencia de 1/475			
Estudio	PGA	0,2 s	1,0 s
Golder -2013	0,21	0,46	0,15
GEM -2018	0,20-0,35	---	---
Petersen et al, -2018	0,22	0,5	0,12
Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia -2020	0,15-0,21	0,33- 0,44	0,07-0,08
Este estudio (Golder, (2022))	0,24	0,54	0,15

Fuente: modificado de Golder Associates USA Inc (2022)

BIBLIOGRAFIA

- Administración Municipal de Caracolí. (2012). *Plan de desarrollo 2012-2015*. Caracolí: Alcaldía Municipal de Caracolí.
- Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW). (2010). *Guia Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. Eugene.
- ANLA. (2016). *Terminos de referencia para la elaboración de estudio de impacto Ambiental. Proyectos de explotación Minera*.
- Antioquia Gold LTD. (2017). *NI 43-101 Technical Report on Updated on Mineral Resource Estimate and Preliminary Economy Assessment*. Antioquia: Cisneros Gold Project.
- Arcila, M. G. (2020). *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia*. Bogotá.
- Botero, A. (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín*.
- Botero, G., & Feininger, T. (1982). *The Antioquian Batholith, Colombia . Publicación Especial Geología, No.13*. Bogotá: Ingeominas.
- Cornare. (2012). *Evaluación y Zonificación de Riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de San Roque*.
- Dearman, W.R. (1974). Weathering classification in the characterisation of rock for engineering purposes in British practice. *Bulletin of the international association of Engineering Geology* N.9, 33 - 42.
- Feininger, T., Barrero L, D., & Castro Q, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-zona II-B). *Boletín Geológico*, XX(2).
- Feininger, T., Barrero, D., Castro, N., Ramirez, O., Lozano, H., & Vesga, J. (1970). *Memoria Explicativa de la Geología del oriente de Antioquia, cuadrángulo I-9 y parte de los cuadrángulos H-9, H-10, I-10, J-9 y J-10. Planchas 132 Yolombó - 148 San Carlos - 168 Argelia (Aquitania) - 188 La Dorada - 117 Amalfi*. INGEOMINAS (Actualmente Servicio Geológico Colombiano - SGC), Antioquia.
- Feininger, T.; Botero, G.;. (1982). *The Antioquian Batholith, Colombia*.
- Gerla, P. (1988). Stress and fracture evolution in a cooling pluton: An example from the Diamond Joe stock, western Arizona. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267-282.
- Golder . (2022). *SITE-SPECIFIC PROBABILISTIC - DETERMINISTIC SEISMIC HAZARD ASSESSMENT AND ACCELERATION TIME HISTORIES (Gramalote TSF Dam Site, Antioquia, Colombia)*. Atlanta: Golder.

Golder. (2020). *Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote.*

Golder Associates USA Inc. (2022). *SITE-SPECIFIC PROBABILISTIC - DETERMINISTIC SEISMIC HAZARD ASSESSMENT AND ACCELERATION TIME HISTORIES (Gramalote TSF Dam Site, Antioquia, Colombia).* Atlanta.

Gómez Londoño, E., & Catillo López, L. (2011). Análisis morfoestructural del cerro Manizales (Antioquia) y su relación con posibles manifestaciones auríferas en el Batolito Antioqueño. *Boletín de Ciencias de la Tierra.*

González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica.* Madrid: Pearson Educación.

González I, H. (2001). *Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000.* INGEOMINAS, Antioquia, Medellín.

Gramalote Colombia Limited. (2015). *Estudio de impacto ambiental. I-2250-EIA-R00.*

Gramalote Colombia Limited. (s.f.). *Documento técnico con estándar. Tomo I. Estimación de recursos minerales. Título Minero T1429211.*

Hall, R., Alvarez, J., & Rico, H. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-Zona II-A). *BOLETIN GEOLOGICO*, 0-95.

Hidrogeocol. (2012). *Estudio Hidrogeológico Para la Línea Base del Proyecto Gramalote, en el Municipio de San Roque-Departamento de Antioquia. Informe Técnico de Prefactibilidad. Bogotá, July 2012.*

INGEOMINAS. (1975). *Geología de la Plancha 132 - Yolombó.* INGEOMINAS (actualmente Servicio Geológico Colombiano-SGC), Antioquia. Medellín: Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS).

Integral S.A. (2015). *Estudio de Impacto Ambiental proyecto Gramalote. Descripción y caracterización ambiental del área de estudio.*

Integral S.A. (2015). *Estudio de Impacto Ambiental proyecto Gramalote. Descripción y caracterización ambiental del área de estudio.* Gramalote Colombia Limited - AngloGold Ashanti Colombia, Antioquia.

Integral S.A. (2018). *Respuesta de requerimientos de información adicional Modificación de licencia ambiental - I-0010208-GA_Resp_Autos_R00.*

Integral S.A. (2020). *Memorando Técnico - Diseño geotécnico obras de desviación.* Gramalote Colombia Limited, Antioquia.

INTEINSA. (2013). *ENSAYOS GEOFÍSICOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA DESVÍO DE LA QUEBRADA GUACAS - GRAMALOTE.*

INTEINSA. (2020). *SEISMIC REFRACTION AND MASW GEOPHYSICAL SURVEYS GRAMALOTE PROJECT.*

Lefebure, D. V., & Hart, C. (30 de May de 2005). Plutonic-related Au quartz veins & veinlets L02. *Mineral Deposit Profiles*, pág. 8.

Ordóñez, O., & Pimentel, M. (2001). Consideraciones geocronológicas e isotópicas del Batolito Antioqueño. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.

Page, W. D. (1986). *Seismic Geology and Seismicity of Northwestern Colombia*. Medellín.

Paris, G. M. (2000). *Map and database of Quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions*. USGS.

Pérez, A. (1967). Determinación de la edad absoluta de algunas rocas de Antioquia por métodos radiactivos. *Dyna*, 84, 27-31.

pHase Geochemistry. (2013). *Caracterización geoquímica Proyecto Gramalote*.

Price. (1997). *Guidelines and recommended methods for the prediction of metal leaching and acid rock drainage at mine sites in British Columbia*.

SARA. (2016). *South America Risk Assessment (SARA) Hazardous Crustal Fault Database*. Obtenido de <https://sara.openquake.org/start>

Servicio Geológico Colombiano - SGC. (06 de Julio de 2022). *Sismicidad histórica de Colombia*. Obtenido de Sismicidad histórica de Colombia: <http://sish.sgc.gov.co/visor/>

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Escala 1:25.000*. Servicio Geológico Colombiano - SGC, Bogotá D.C.

Vargas, G., & Amaya, C. (1990). Geología y petrografía de facies cataclásticas de la Formación Barroso e intrusivos y metamorfitas asociados en Cañafisto, Antioquia. *Boletín Geología*, 89-115.

Woodward & Clyde consultants. (1980). *Phase 1, Preliminary seismic hazard study Ituango Project, Colombia*. Medellín: Integral - ISA.

WSP. (2025). *Actualización del estudio geoquímico, Proyecto Gramalote Proyecto N° 24725192-D-2100-HQ-MEM-00001-1-0*.