



**Universidad de la República
Facultad de Ciencias
Instituto de Ciencias Geológicas**

TESIS DE MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS

***GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA
DE LA REGIÓN DE PEPE NÚÑEZ,
CUENCA NORTE (URUGUAY)***

MATÍAS SOTO NÚÑEZ

TUTOR: DR. HÉCTOR DE SANTA ANA

**MONTEVIDEO, URUGUAY
FEBRERO DE 2014**

Tutor: _____

Tribunal: _____

Fecha: _____

Calificación: _____

Autor: _____

***A los niños de
Pepe Núñez y Quintana,
porque de ellos es el futuro***

*You gotta try, don't stop
From the bottom, the bottom of your heart
You gotta try, don't give up
From the bottom, the bottom of your heart*

DJ BoBo, Try try try

*Seis en el quinto puesto significa:
El caldero tiene asas amarillas, argollas áureas
Es propicia la perseverancia*

I Ching (Libro de las Mutaciones), hexagrama nº 50 (Ting, El Caldero)

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mi tutor, Héctor de Santa Ana, quien hace años reconoció que en Pepe Núñez pasaba “algo raro” (geológica y estructuralmente hablando) digno de ser investigado... el tiempo le dio la razón. Gracias por el apoyo y por la autorización para emplear datos tan diversos como los que aquí figuran.

Gerardo Veroslavsky y Ethel Morales más que colegas han sido referentes para mí en los últimos años, en lo laboral y más allá. Las discusiones con ambos sobre la geología del área me dieron muchas buenas ideas. Con Gerardo, y también Enrique Masquelín y Valeria Mesa, tuvimos las primeras salidas de campo al área, en las que aprendí mucho. Esas salidas cristalizaron en un informe que constituyó para mí el puntapié inicial de este trabajo.

Un agradecimiento especial a Bruno Conti, Pablo Rodríguez y Roberto Pérez, con los que pasamos de las buenas y de las malas en varios meses de trabajo de campo. Fue junto con ellos que mapeamos, describimos testigos, cambiamos neumáticos, levantamos alambrados, madrugamos, cocinamos, dimos charlas a los niños de las escuela.... esta tesis no hubiera sido posible sin ellos. Bruno además encontró la mayoría de los fósiles aquí descritos. Los conocimientos de métodos geofísicos de Pablo y su manejo de ArcGis y Oasis Montaj fueron de gran ayuda.

Los aportes de Alejandro Oleaga, Fernando Corbo y Josefina Marmisolle (magnetotelúrica); de Rossana Muzio, Bruno Conti y Valeria Mesa (petrografía); y de Gloria Daners (palinología) fueron de gran ayuda.

Muchos datos aquí vertidos proceden de diversas empresas: GeoTech Labs (realización de láminas delgadas); Geolab Sur, Shell y Schuepbach (geoquímica orgánica); Ingesur y Regional Norte de la UDELAR (magnetotelúrica), Larriestra Geotecnologías (bacterias butanotróficas y elementos traza). Daniel Picchi realizó una lámina delgada adicional.

Los integrantes del Tribunal, Leda Sánchez Betucci, César Goso y Milton Scherer contribuyeron mucho con sus sugerencias a mejorar esta tesis.

Nicolás Soto y Mario Trindade, me abrieron los ojos en lo referente a la cultura charrúa, tan presente en el área de trabajo.

Grandes amigos que están siempre: Vale y Fabi, Quique y el Negro, Mariana, Verito, Ana Laura, Nati, Maca, la paleobarra en pleno, William y Yayne... *ai jing tao*.

Luis Itté y Liliana Mongrel me ayudaron a sobrellevar los altibajos que me deparó este proceso. El *I Ching* estuvo siempre a mano ante dudas existenciales.

Jamás podré reconocer lo suficiente el constante apoyo de mi familia, incluida mi familia política.

Finalmente, agradezco con amor infinito a Noe, mi esposa, última depositaria de mis alegrías y frustraciones. Ojalá sepa cómo compensarla por tantos días fuera de casa.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN / ABSTRACT	7
CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN	9
1. ANTECEDENTES	10
1.1. Marco geológico regional	10
1.2. Marco geológico local	15
1.3. Antecedentes exploratorios de la Cuenca Norte	25
2. OBJETIVOS	28
3. ÁREA DE ESTUDIO	29
3.1. Ubicación y accesos	29
3.2. Red de drenaje	29
3.3. Relieve y uso del suelo	30
3.4. Antecedentes geológicos del área	33
4. MATERIALES Y MÉTODOS	37
4.1. Materiales	37
4.2. Programas	37
4.3. Metodología	38
4.4. Métodos exploratorios	39
4.4.1. Gravimetría	39
4.4.1. Magnetotelúrica	43
4.4.3. Bacterias butanotróficas	49
4.4.4. Fluorescencia de rayos X	51
4.4.5. Geoquímica orgánica	54
4.4.6. Radiactividad gamma natural	63
4.4.7. Petrografía	65
4.4.8. Palinología	67
4.3.9. Perforaciones de estudio	68
CAPÍTULO II – RESULTADOS	71
1. GEOLOGÍA DE SUPERFICIE	72
1.1. Areniscas	72
1.2. Basaltos grises afaníticos	75
1.3. Basaltos negros afaníticos	77
1.4. Brechas volcánicas	79
1.5. Areniscas con clastos de basalto	80
1.6. Conglomerados y areniscas conglomerádicas	80
1.7. Interacción magma-sedimento	85
1.8. Rasgos estructurales	95
1.9. Perfiles estratigráficos	102

2. GEOLOGÍA DE SUBSUELO	106
2.1. Basamento cristalino	112
2.2. Formación San Gregorio	112
2.3. Formación Buena Vista	114
2.4. Formación Tacuarembó	115
2.5. Formación Arapey	116
2.6. Facies y asociaciones de facies	117
2.7. Sección geológica	118
3. PETROGRAFÍA	124
4. PALEONTOLOGÍA Y PALINOLOGÍA	136
4.1. Formación San Gregorio	136
4.2. Formación Tacuarembó	137
5. GRAVIMETRÍA	139
5.1. Estimación de profundidad de basamento	139
5.2. Mapa gravimétrico	139
5.3. Modelado de densidad	140
6. MAGNETOTELÚRICA	145
7. GAMMA RAY ESPECTRAL	157
8. GEOQUÍMICA ORGÁNICA	169
8.1. COT y pirólisis Rock Eval	169
8.2. Microscopía del kerógeno	185
9. BACTERIAS BUTANOTRÓFICAS	193
10. FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)	197
CAPÍTULO III – DISCUSIÓN	202
1. DISTRIBUCIÓN Y MAPAS DE ISÓPACAS DE UNIDADES DE LA CUENCA NORTE	203
2. INTERACCIÓN MAGMA-SEDIMENTO	213
3. COMENTARIOS SOBRE ALGUNOS ASPECTOS GEOLÓGICOS Y ESTRUCTURALES	222
4. CONSIDERACIONES SOBRE ALGUNOS MÉTODOS EXPLORATORIOS EMPLEADOS	227
5. EVOLUCIÓN TECTONOESTRATIGRÁFICA	229
6. SISTEMAS PETROLEROS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	233
7. CONSIDERACIONES FINALES	237
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	239

RESUMEN

El bloque Pepe Núñez se ubica en una zona estructuralmente compleja de la Cuenca Norte, en los departamentos de Salto y Tacuarembó. Allí, la presencia de bajos gravimétricos y resultados positivos de estudios microbiológicos sugerían la presencia de rocas potencialmente generadoras de hidrocarburos.

Por tanto, se realizó un mapeo geológico y posteriormente se ubicaron 70 sondeos magnetotelúricos y seis perforaciones de estudio, con el objetivo de establecer la estratigrafía de la cuenca. Se reconocieron las siguientes unidades de tope a base:

- Formación Arapey (hasta 120 m de espesor, reducida/ausente en el Sur): basaltos grises/verdes, masivos y amigdaloides; brechas volcánicas; peperitas; areniscas de *intertrap*; conglomerados tipo “La California”.

- Formación Tacuarembó (hasta 250 m): areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas, finas a medias, blanquecinas y anaranjadas, localmente fosilíferas, con estratificación horizontal y cruzada, y niveles de limolitas y areniscas conglomerádicas.

- Formación Buena Vista (hasta 70 m, exclusivamente presente en el Sur): areniscas rojas, cuarzo-feldespáticas, finas a medias, con estratificación cruzada o masivas.

- Formación San Gregorio (hasta 150 m, más desarrollada en el Sur): areniscas anaranjadas con estratificación deformada; diamictitas rojizas y grises; ritmitas y lutitas negras. Hacia la base de la Formación San Gregorio se describe una cuarcita de posición estratigráfica incierta.

- Basamento: al Sur, granito rosado equigranular e isótropo; al Norte, ortogneiss recortado por diabasas.

Se reconstruyó una sección geológica y se realizó un modelado de densidad que posee fuerte incidencia de una falla NO-SE (control del arroyo Matajojo Chico), que explicaría las diferencias existentes en cuanto

a distribución espacial y geometrías de las distintas unidades atravesadas y la naturaleza del basamento.

Las perforaciones demostraron la presencia de una roca potencialmente generadora para la cuenca, con 10 a 20 m de potencia. Son lutitas negras de la Formación San Gregorio localmente muy ricas en materia orgánica (COT máximo 16%) predominantemente amorfa, pero de calidad regular (IH relativamente bajo), y con condiciones en general de inmadurez térmica (reflectancia de vitrinita $<0,6$). No obstante algunas muestras incluyen componentes (incluso retrabajados) con mayor madurez (reflectancia de vitrinita $<0,8-1,0$) e incluso bitumen, implicando una compleja historia de soterramiento y denudación de cuenca.

Palabras clave. Estratigrafía, geoquímica orgánica, geofísica, Cuenca Norte.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

1.1. Marco geológico regional

Milani y Zalán (1998) reconocen cinco grandes cuencas sedimentarias intracratónicas que se desarrollaron en Sudamérica a partir del Paleozoico: las cuencas Solimões, Amazonas, Parnaíba, Chaco-Paraná y Paraná (Fig. 1). Se efectuarán consideraciones solamente sobre esta última dado el objeto de la presente tesis.

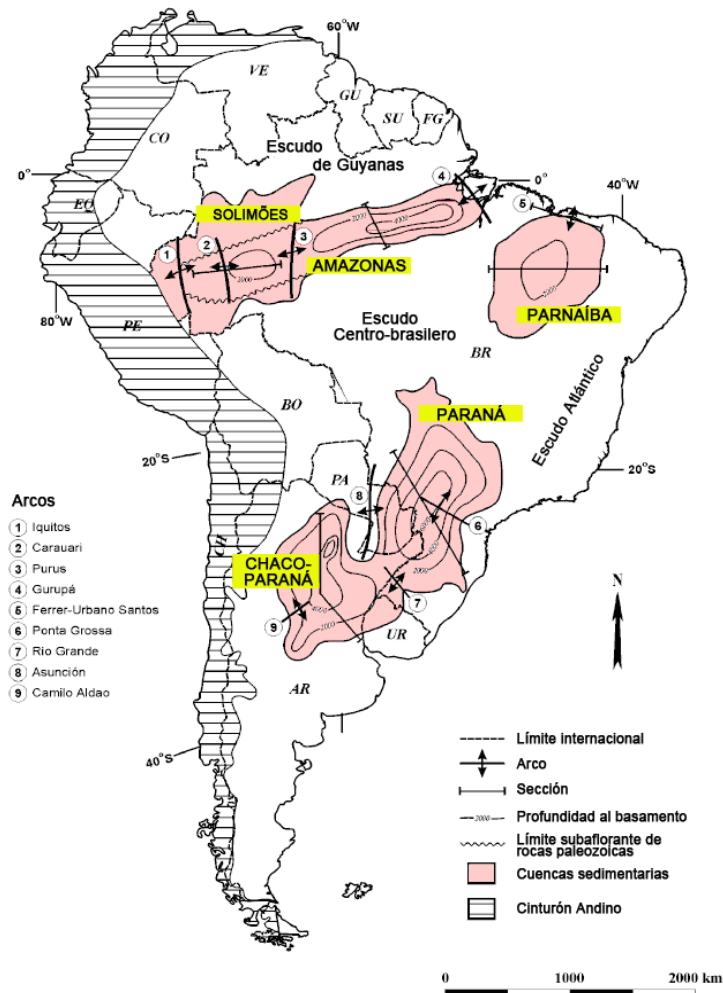


Figura 1. Ubicación de las cuencas intracratónicas paleozoicas de Sudamérica. Modificado de Milani y Zalán (1998).

La Cuenca Paraná constituyó un extenso ámbito de sedimentación gondwánico (presente en Brasil, Paraguay, Argentina y Uruguay, con co-

rrelatos en el SO africano), de naturaleza intracratónica y policíclica, donde se superpusieron a lo largo del tiempo varias cuencas sedimentarias con geometrías y límites variables (Milani, 1997; de Santa Ana y Veroslavsky, 2004; Milani, 2004; de Santa Ana *et al.*, 2006a,b; Milani *et al.*, 2007; Fig. 2).

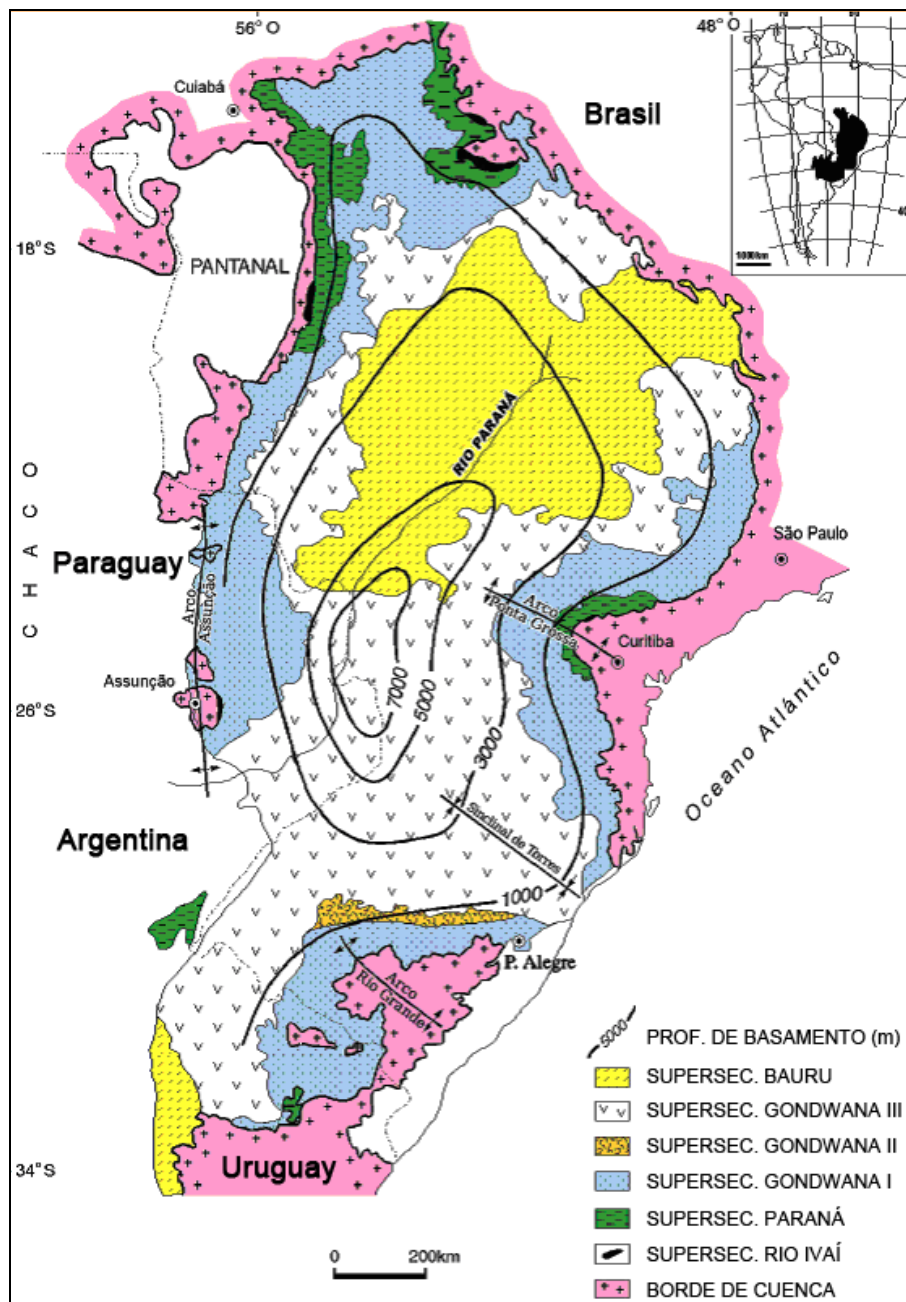


Figura 2. Distribución de las supersecuencias reconocidas para la Cuenca Paraná. Se indican las curvas de profundidad de basamento. Modificado de Milani (2004).

Su superficie total supera 1.700.000 km² y su relleno ígneo y sedimentario, que comprende casi todo el Fanerozoico, alcanza localmente los 7.000 m de potencia total. Milani (1997) reconoce seis supersecuencias en la Cuenca Paraná (Fig. 2):

- Supersecuencia Río Ivaí (Ordovícico Medio-Silúrico Inferior)
- Supersecuencia Paraná (Devónico Inferior-Devónico Superior)
- Supersecuencia Gondwana I (Carbonífero Superior-Triásico Inferior bajo)
- Supersecuencia Gondwana II (Triásico Medio-Triásico Superior)
- Supersecuencia Gondwana III (Jurásico Superior-Cretácico Inferior)
- Supersecuencia Baurú (Cretácico Superior)

La porción uruguaya de la Cuenca Paraná se denomina Cuenca Norte, y cubre una superficie de unos 100.000 km² en los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Rivera, Tacuarembó, Cerro Largo, Durazno y Río Negro. Su relleno volcanosedimentario (Figs. 3 a 5), de edad Devónico Temprano (Praguiense-Emsiense; Daners *et al.*, 2013) a Cretácico Tardío (Maastrichtiense; Goso y Perea, 2004), alcanza casi 2.400 metros de espesor según lo constatan perforaciones profundas en el NO del país (e.g. pozos Yacaré y Belén), aunque se estima que éste puede ser significativamente mayor en zonas no perforadas (e.g. bajos gravimétricos).

En efecto, recientes sondeos magnetotelúricos indican un espesor de más de 3.200 m en ciertas regiones de la cuenca (Oleaga, 2002; Corbo, 2006). Globalmente, la cuenca se profundiza hacia el NO (Fig. 4B).

Las supersecuencias Río Ivaí y Gondwana II no fueron depositadas o bien fueron erosionadas en Uruguay. El resto de las supersecuencias muestra una clara correlación con la Cuenca Norte. En efecto, en ésta se reconocen cuatro tectosecuencias (Figs. 4 a 5), de base a tope:

- la *tectosecuencia Eodevónica*, integrada por las formaciones Cerrezuelo, Cordobés y La Paloma, reunidas en el Grupo Durazno (Bossi, 1966; Veroslavsky, 1994; Veroslavsky *et al.*, 2006); con una potencia máxima combinada de 300 m, aflora en el sector Sur de la Cuenca Norte;

- la *tectosecuencia Permocarbonífera*, incluyendo las formaciones San Gregorio, Cerro Pelado, Tres Islas, Frayle Muerto, Mangrullo¹, Paso Aguiar, Yaguarí y Buena Vista, reunidas en el Grupo Cerro Largo (Bossi, 1966; Goso, 1995; Goso *et al.*, 1996; de Santa Ana *et al.*, 2006a); con una potencia máxima combinada de más de 1300 m; aflora en el sector este de la Cuenca Norte (habiéndose reconocido relictos neopaleozoicos en la plataforma continental; Veroslavsky *et al.*, 2003);

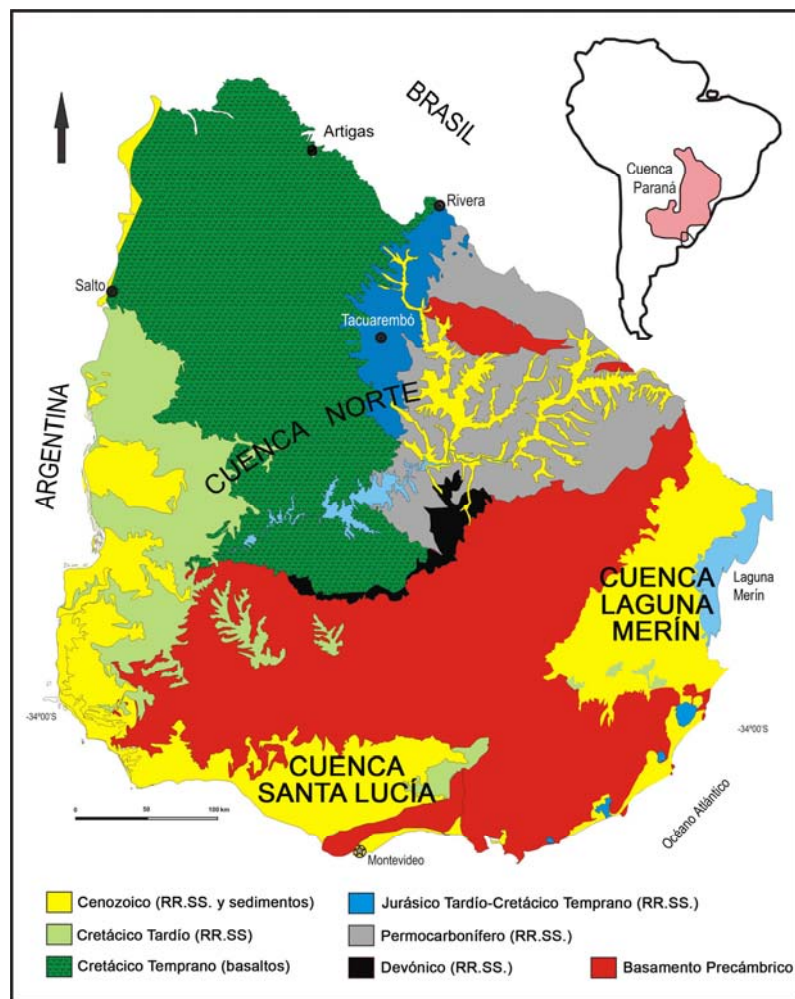
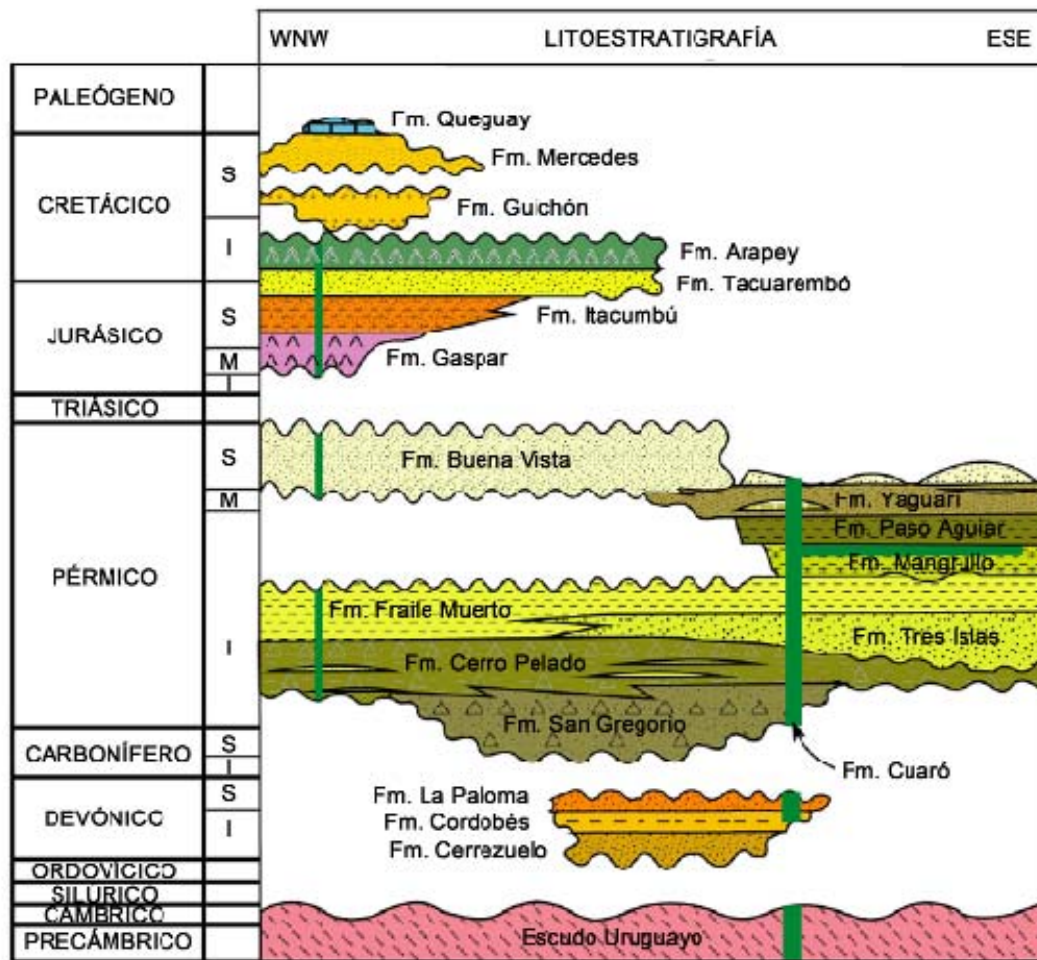


Figura 3. Cuencas sedimentarias *onshore* de Uruguay, con énfasis en Cuenca Norte. Modificado de Perea *et al.* (2009).

¹No se reconoce aquí a la Formación Melo (e.g. Bossi y Ferrando, 2001), que integra a las formaciones Fraile Muerto, Mangrullo y Paso Aguiar, dado que las mismas son separables, y de hecho tiene una utilidad práctica, dado que la Formación Mangrullo incluye los únicos recursos energéticos fósiles probados hasta el momento en Uruguay.

A



B

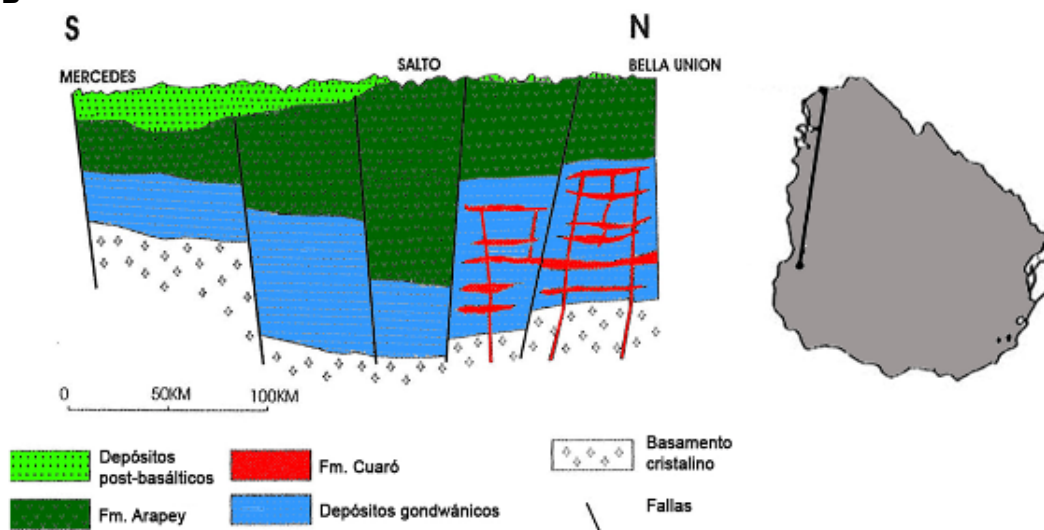


Figura 4. Columna estratigráfica de la Cuenca Norte. Modificado de Bossi (2006).

- la *tectosecuencia Jurásico-Eocretácica*, integrada por las formaciones Gaspar, Itacumbú, Tacuarembó, Arapey y Cuaró (Bossi, 1966; Preciozzi *et al.*, 1985; de Santa Ana y Veroslavsky, 2004); con una potencia máxima combinada superior a 1.400 m; aflora en el sector central y noroeste de la Cuenca Norte;

- la *tectosecuencia Neocretácica*, que abarca las formaciones Guichón, Mercedes y Asencio, reunidas en el Grupo Paysandú (Bossi, 1966; Goso, 1999; Goso y Perea, 2004); con una potencia máxima combinada de 200 m; aflora en el sector suroeste de la Cuenca Norte.

Estas tectosecuencias se hallan separadas por discordancias regionales, resultado de esfuerzos compresivos en el Paleozoico y de esfuerzos distensivos en el Mesozoico; las evidencias de las mismas y los correspondientes eventos se listan en la Tabla 2.

La evolución tectónica y sedimentaria de la Cuenca Norte estuvo gobernada por las reactivaciones de dos conjuntos de lineamientos: N315°-325° y N20° (de Santa Ana *et al.*, 2006b; Fig. 6), existiendo otras direcciones relevantes en la deformación y estructuración meso-cenozoica de la cuenca: N-S y E-O (de Santa Ana y Veroslavsky, 2002; Fig. 7).

1.2. Marco geológico local

Se efectuará una descripción, de base a tope, de las unidades litoestratigráficas que posteriormente se discutirán en este trabajo. Un mapa general de las mismas se presenta en la Fig. 8.

1.2.1. Terreno Nico Pérez

Dada la ubicación del bloque, el basamento cristalino corresponde al Terreno Nico Pérez (Bossi y Campal, 1992) o dominio central (Masquelin, 2006). Dicho terreno se caracteriza por una evolución polifásica y un complejo marco litotectónico, incluyendo rocas de edades arqueana (3,4 Ga), paleoproterozoica y mesoproterozoica (1,6 a 1,8 Ga), cabalgadas entre sí, posteriormente intruidas por granitoides y finalmente cubiertas

por sedimentos vinculados al *collage* orogénico Brasileño (e.g. Campal y Schipilov, 1999; Hartmann *et al.*, 2001; Mallman *et al.*, 2007).

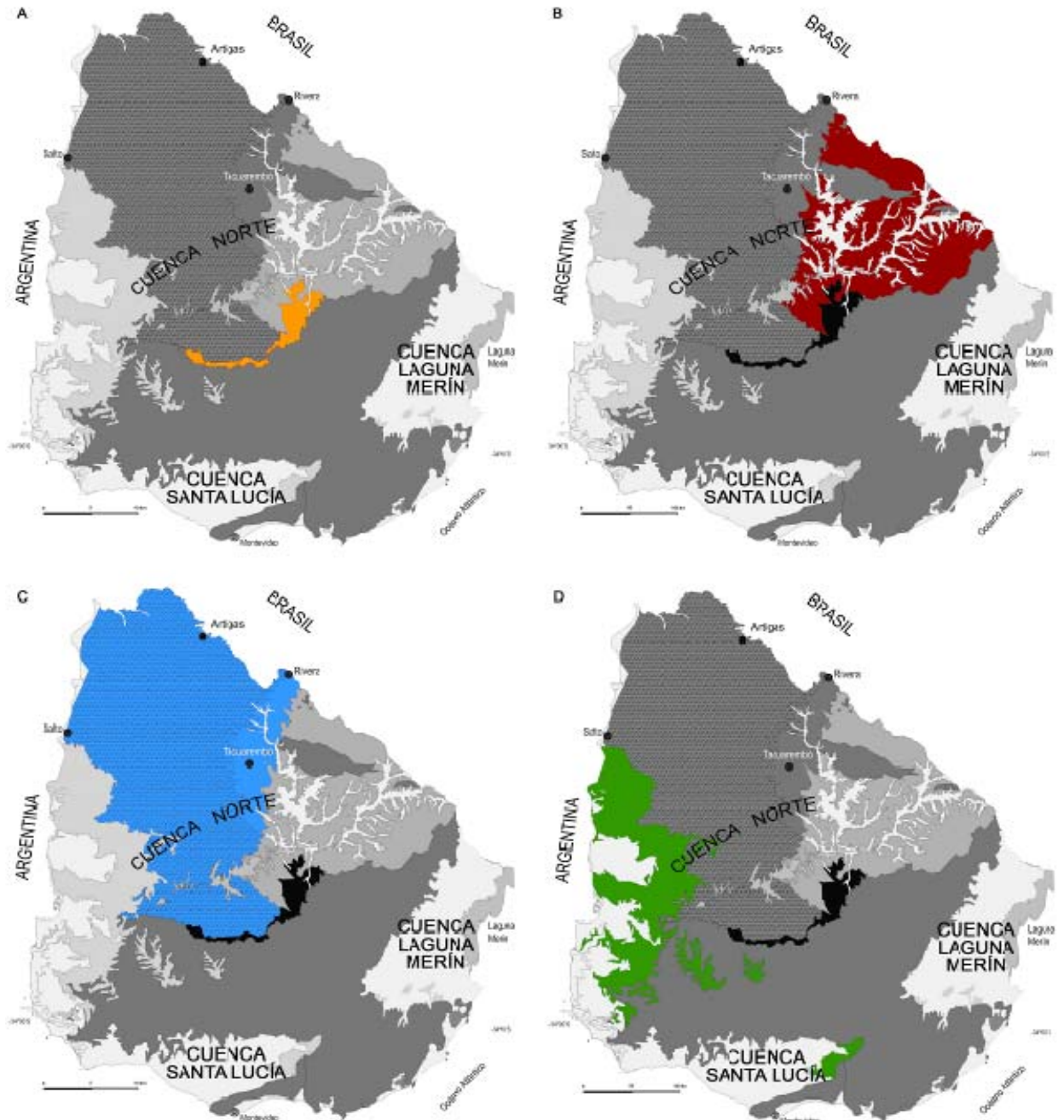


Figura 5. Distribución en superficie de las tectosecuencias Eodevónica (A), Permocarbonífera (B), Juro-Eocretácica (C) y Neocretácica (D). Modificado de Perea *et al.* (2009).

Tabla 1. Principales características de las unidades de rango formacional reconocidas en la Cuenca Norte. Basado en de Santa Ana y Veroslavsky (2004), Goso y Perea (2004), Veroslavsky *et al.* (2006) y de Santa Ana *et al.* (2006a, b). TS = tectosecuencia.

TS	Formación (edad)	Espesor máximo reportado	Principales litologías	Ambiente depositacional
Neocretácica	Mercedes (Cretácico S.)	>87	Areniscas feldespáticas y cuarzosas, finas a muy gruesas y conglomerados; color blanco, gris y rojizo; pelitas subordinadas; experimentó procesos de ferrificación, calcretización y silicificación. Fossilífera.	Fluvial torrencial
	Guichón (Cretácico S.)	>114	Areniscas feldespáticas, finas a medias, y conglomerados; color rosado y rojizo; subordinadamente conglomerados y pelitas. Fossilífera.	Fluvial
Jurásico-Eocretácica	Arapey (Cretácico I.)	955 m	Basaltos toleíticos Areniscas de intertrap	–
	Cuaró (Cretácico I.)	453 m (total)	Diabasas (diques y <i>sills</i>)	–
	Tacuarembó (Jurásico S.-Cretácico I.)	450 m (sobre-estimado)	Areniscas finas a medias, cuarzosas, amarillas, blanquecinas y rojizas, y pelitas de colores vivos. Fossilífera.	Fluvio-lacustre Fluvio-eólico Eólico
	Itacumbú (Jurásico M.)	248 m	Areniscas micáceas; color gris, naranja y marrón; subordinadamente niveles pelíticos, margosos y carbonáticos	Fluvial Eólico
	Gaspar (Jurásico M.)	147 m	Basaltos	–
Permo-Carbonífera	Buena Vista (Pérmico S.)	671 m	Areniscas finas a medias; color rojizo, rosado y blanquecino; también conglomerados y pelitas rojas. Septarias. Fossilífera.	Aluvio-fluvial Eólico
	Yaguarí (Pérmico M.)	100 m	Areniscas finas y pelitas; color verde, violeta y rojo. Calcretes. Niveles bentoníticos.	Planicies de marea
	Paso Aguiar (Pérmico I.)	200 m	Pelitas grises micáceas, areniscas calcáreas y ritmitas finas color gris verdoso	Marino plataformal epinerítico
	Mangrullo (Pérmico I.)	35 m	Lutitas pirobituminosas y pelitas micáceas grises a negras; calizas arenosas y dolomíticas. Muy fossilífera.	Marino restricto-lagoon
	Fraile Muerto (Pérmico I.)	350 m	Pelitas grises a negras laminadas, y areniscas muy finas a finas blancas y grises; niveles calcáreos.	Marino plataformal
	Tres Islas (Pérmico I.)	180 m	Areniscas finas a medias; color gris y rojizo; también areniscas conglomerádicas y pelitas.	Fluvio-deltaico
	Cerro Pelado (Pérmico I.)	165 m	Arcillitas y lutitas, diamictitas, pelitas y fangolitas; color gris, negro y castaño; ocasionalmente areniscas.	Glacio-marino
	San Gregorio (Permo-carb.)	255 m	Areniscas muy finas a gruesas, cuarzo-feldespáticas, diamictitas, conglomerados y ritmitas. Colores variados en general vivos. Fossilífera.	Glacio-fluvial Glacio-lacustre
Eodevónica	La Paloma (Devónico I.)	55 m	Areniscas finas a medias, cuarzo-feldespáticas a feldespáticas, micáceas; color rojizo y violáceo; también pelitas y conglomerados.	Planicies litorales
	Cordobés (Devónico I.)	92 m	Pelitas y lutitas micáceas; color gris y negro; también areniscas finas. Muy fossilífera	Marino plataformal
	Cerrezuelo (Devónico I.)	140 m	Areniscas finas a gruesas, cuarzo-feldespáticas a feldespáticas, micáceas; color gris, blanco, amarillento y rojizo; también pelitas y conglomerados.	Fluvial

Tabla 2. Principales eventos de la evolución de la Cuenca Norte y su manifestación en superficie y subsuelo. Basado en de Santa Ana (2004) y de Santa Ana *et al.* (2006a,b).

Régimen de esfuerzos	Evento asociado	Edad	Manifestación en superficie o subsuelo
Distensivo	Rift atlántico II	Cretácico Temprano	Efusión de basaltos (Fm. Arapey), intrusión de diques y <i>sills</i>
	Rift atlántico I	Jurásico Medio	Efusión de basaltos (Fm. Gaspar), creación de espacio de acomodación para la depositación de unidades suprayacentes
Compresivo	Orogenia finiherciniana I	Pérmico Inferior-Pérmico Superior	Discordancia entre Fm. Buena Vista y unidades subyacentes (Fms. San Gregorio, Cerro Pelado, Fraile Muerto). Pliegues sin-sedimentarios y niveles de ceniza en Fms. Mangrullo y Yaguarí.
	Orogenia tardiherciniana	Pérmico Inferior bajo	Discordancia entre Fm. Cerro Pelado y la suprayacente Fm. Tres Islas.
	Orogenia eoherciniana	Devónico Superior-Carbonífero Inferior	Discordancia (regionalmente denominada Chánica) entre la Fm. San Gregorio y las unidades subyacentes del Grupo Durazno

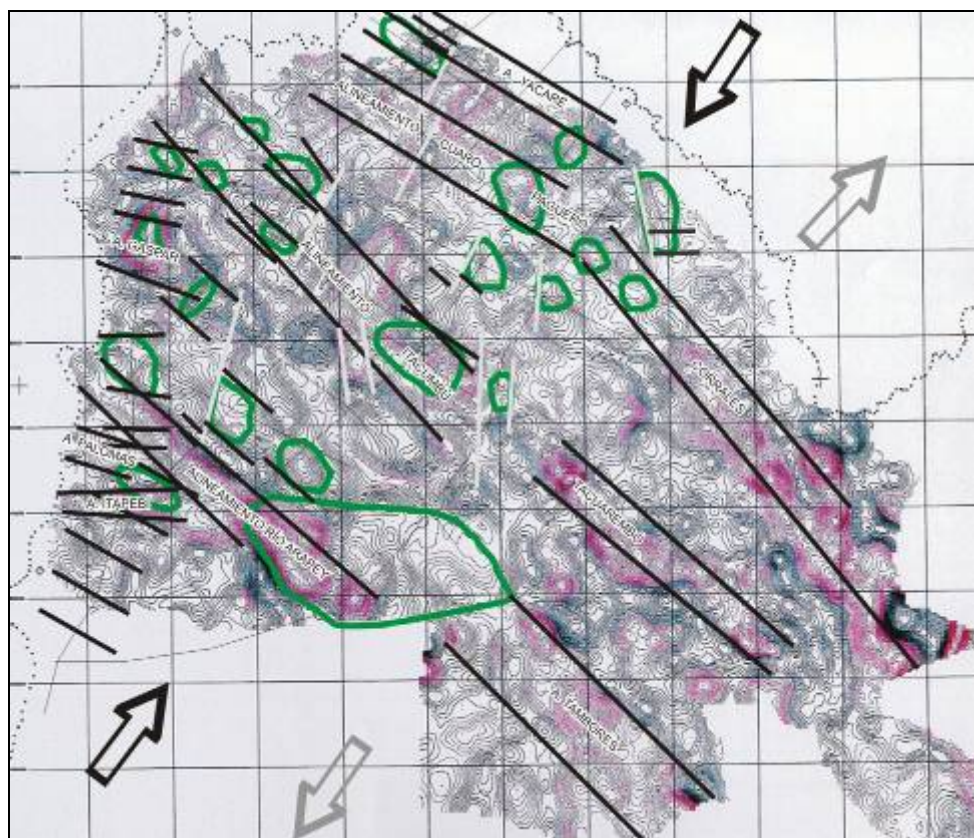


Figura 6. Lineamientos estructurales mayores de la Cuenca Norte. Tomado de Santa Ana *et al.* (2006b).

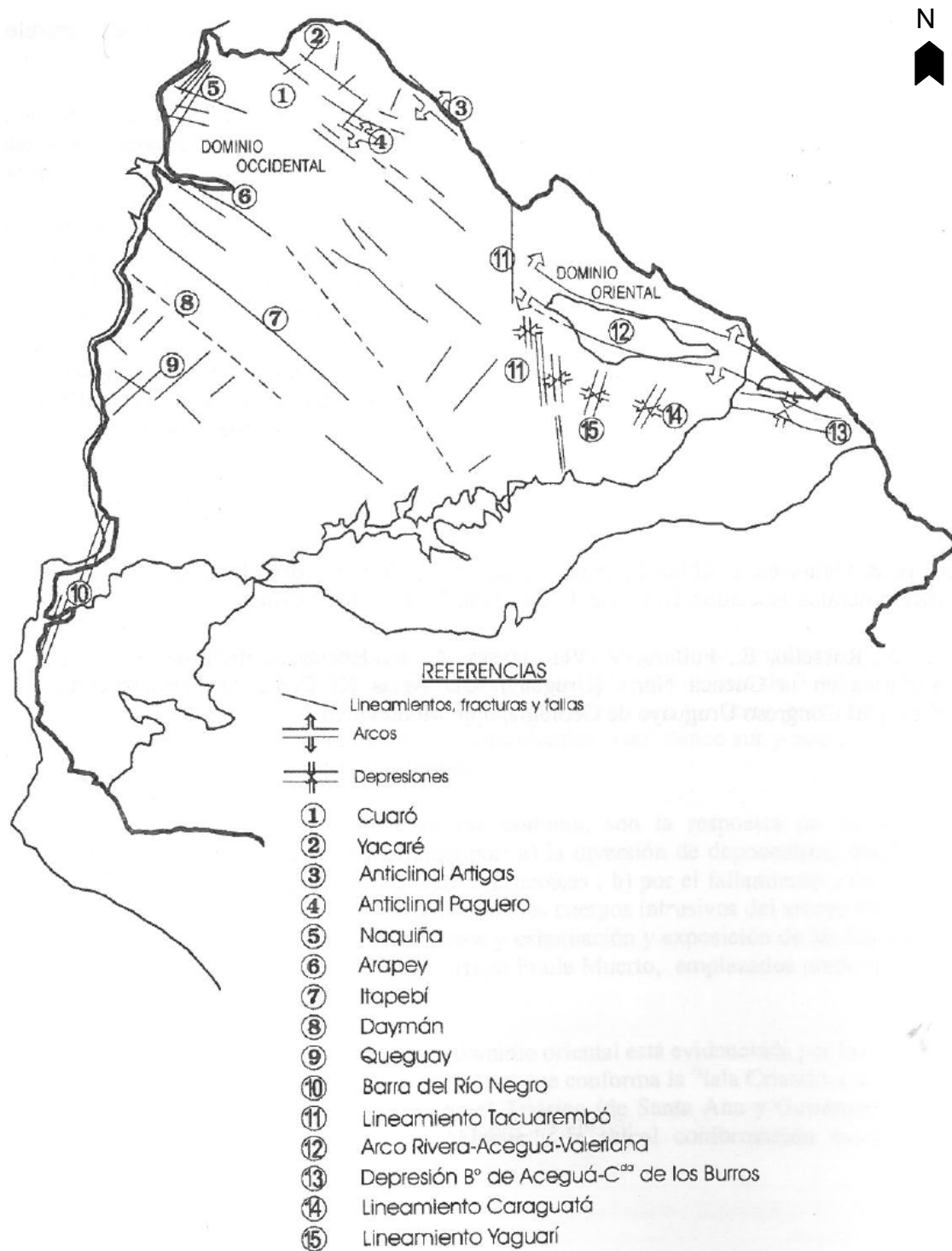


Figura 7. Rasgos estructurales de la Cuenca Norte durante la evolución cenozoica. Tomado de Santa Ana y Veroslavsky (2002).

El arreglo estructural es complejo, y resulta de una tectónica mesoproterozoica retrabajada en el Neoproterozoico (Campal y Schipilov, 1999).

Este terreno ha sido subdividido en forma tentativa en tres bloques corticales principales, denominados “Taquarembó-Valentines”, “Pavas” y “Villa Serrana” (Masquelín, 2006).

1.2.2. Formación San Gregorio

La Formación San Gregorio fue separada por Preciozzi *et al.* (1985), reuniendo litologías que Bossi (1966) incluyó dentro de la Formación Tres Islas. Posteriormente, se excluyeron de la Formación San Gregorio las “facies distales” (de Santa Ana, 1989), que fueron agrupadas bajo la denominación Formación Cerro Pelado por de Santa Ana (2004).

La Formación San Gregorio reúne a un conjunto de rocas sedimentarias caracterizadas por una gran variabilidad faciológica tanto en la lateral como en la vertical. En efecto, la unidad está representada por diamictitas (masivas y estratificadas), conglomerados, areniscas, pelitas y ritmitas (de Santa Ana *et al.*, 2006a).

Esta unidad está asociada a condiciones depositacionales glaciogénicas, y se desarrolla esencialmente en el borde Sur de la Cuenca Norte. Su potencia máxima supera los 250 m.

Los fósiles conocidos para esta unidad proceden fundamentalmente de concreciones fosfáticas y carbonáticas, las cuales contienen restos de poríferos, braquiópodos, peces y cefalópodos (Closs, 1967a, 1967b, 1969; Beltan, 1977, 1981, 1988), así como, en la matriz de las mismas, palinomorfos de notable preservación (Marques-Toigo, 1970, 1973a, 1973b, 1974).

La edad, no exenta de controversias, iría desde el Carbonífero Tardío al Pérmico Temprano bajo (de Santa Ana *et al.*, 2006a).

1.2.3. Formación Buena Vista

La Formación Buena Vista fue reconocida como unidad independiente por Goso y de Santa Ana (1986) y de Santa Ana (1989, 2004). Estos términos habían sido incluidos dentro de la Formación Yaguarí por Bossi (1966) y Preciozzi *et al.* (1985). La Formación Buena Vista está compuesta por una potente sucesión de areniscas finas a medias, rojas a blanquecinas, con intercalaciones de niveles pelíticos rojos y conglomerádicos, caracterizando ambientes esencialmente aluvio-fluviales y eólicos (de Santa Ana *et al.*, 2006a). La potencia máxima de esta unidad (unos 670 m) se alcanza en el NO de la cuenca.

De Santa Ana (2004) propuso la subdivisión de esta formación en dos miembros: Colonia Orozco (inferior) y Cerro Conventos (superior), este último incluyendo en su localidad tipo una excelente exposición de paleodunas.

Algunos autores (e.g. Ferrando y Andreis, 1986), al carecer de información de subsuelo, han separado erróneamente litologías aflorantes de la Formación Buena Vista para incluirlas dentro una nueva unidad (Formación Cuchilla Ombú), restringiendo a la anterior a afloramientos cercanos a la localidad tipo.

Los niveles de conglomerados con intraclastos pelíticos del miembro inferior han aportado en los últimos años importantes restos fósiles. La denominada “fauna local Colonia Orozco”, bien estudiada por Piñeiro *et al.* (2004, 2007a, b, c, 2012), comprende una asociación de sinápsidos pelicosaurios, anfibios temnospóndilos de gran tamaño (e.g. *Uruiella*, *Ara-chana*) y reptiles procolofónidos de pequeño tamaño (e.g. *Pintosaurus*). Esta fauna presenta características de transición entre faunas pérmicas y triásicas, aunque no se han hallado aún taxones exclusivamente triásicos.

1.2.4. Formación Tacuarembó

La Formación Tacuarembó (Bossi, 1996) se caracteriza por una sucesión de estratos de areniscas blanquecinas, rojizas y verdosas, cuar-

zosas a cuarzo-feldespáticas, de grano fino a medio. Las estructuras sedimentarias predominantes son estratificación cruzadas y horizontal. Se intercalan paquetes de pelitas y arcillitas, laminadas a macizas, de coloraciones y espesores variables.

Ocasionalmente, aparecen intercalaciones de niveles conglomerádicos arenosos con intraclastos de pelitas y areniscas. La potencia máxima reportada por de Santa Ana y Veroslavsky (2004) para esta unidad (450 m) ha sido probablemente sobrestimada.

Bossi *et al.* (1975) reconocieron dos miembros en esta formación, inferior y superior, que fueron denominados posteriormente por Perea *et al.* (2009) como miembros Batoví y Rivera, respectivamente. Si bien existen propuestas de dividir en tres formaciones a la Formación Tacuarembó (e.g. Bossi y Navarro, 1991; Bossi y Ferrando, 2001), en este trabajo se sigue la propuesta de de Santa Ana y Veroslavsky (2004: pp. 64-65), para quienes “dicha subdivisión no se entiende justificada desde el punto de vista litoestratigráfico, ya que resulta poco operativa en el mapeo geológico, e induce a interpretaciones erradas sobre la distribución espacial de la unidad en la cuenca”.

El Miembro Batoví ha aportado diversos fósiles tanto de invertebrados como de vertebrados: conostráceos (*Ortheastheria*), bivalvos (*Diplodon*, *Tacuarembaia*), gasterópodos, peces cartilagosos (*Prioxybodus*) y óseos (e.g. *Mawsonia*, ginglimodios), tortugas, crocodiliformes (*Meridiosaurus*) y dinosaurios (Walther, 1933; Mones, 1980; Perea *et al.*, 2001, 2003; Soto y Perea, 2008; Perea *et al.*, 2009; Soto y Perea, 2010; Soto *et al.*, 2012a, b).

En conjunto, la asociación indica un predominio de componentes de agua dulce, con fuertes similitudes con asociaciones del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano del África Sahariana (e.g. Perea *et al.*, 2009).

1.2.5. Formación Arapey

La Formación Arapey (Bossi, 1966) comprende principalmente basaltos de naturaleza toleítica, cubriendo gran parte de la Cuenca Norte. Estos derrames forman parte de una gran provincia ígnea (LIP, por sus siglas en inglés) denominada Provincia Paraná-Etendeka, de un millón de kilómetros cúbicos de volumen (Peate, 1997) vinculada a la fragmentación de Gondwana Occidental. Estos enormes volúmenes (que en Brasil incluyen también términos ácidos subordinados) derramados en el Cretácico Temprano extruyeron en un período relativamente breve, en torno a un millón de años (Renne *et al.*, 1992; Thiede y Vasconcelos, 2010)².

Los basaltos se disponen en coladas, en número de 5 a 22 según surge del estudio de pozos profundos (de Santa Ana y Veroslavsky, 2004), reconociéndose de base a tope en ocasiones niveles lajosos, masivos y amigdaloides. En la localidad de Salto, a partir de los datos del pozo Daymán, los basaltos alcanzan una potencia máxima de casi 1000 m.

La descripción original de la Formación Arapey también incluye delgados niveles de areniscas de *intertrap*, finas, rojizas, que aparecen intercalados con las coladas hacia la base de la unidad en determinados sectores de la cuenca (Bossi y Navarro, 1991), así como la ocurrencia de brechas volcánicas.

Bossi y Navarro (1991) también describen dentro de esta unidad conglomerados con clastos de granito y basalto, aflorantes en los cerros próximos al arroyo La California (“conglomerados de La California”).

Preciozzi *et al.* (1985) separaron los diques y diques capa (*sills*) como Formación Cuaró (aunque las diferencias con la Formación Arapey serían únicamente texturales), correspondiendo estas manifestaciones volcánicas e hipabisales al mismo evento. En conjunto, los *sills* pueden alcanzar entre 175 y 450 m de potencia, según datos de perforaciones (de Santa Ana y Veroslavsky, 2004; ver también Bossi, 2006).

² Es decir, diez veces menos que lo sugerido por otros autores (Turner *et al.*, 1994; Stewart *et al.*, 1996).

Bossi y Schipilov (1998) propusieron elevar la Formación Arapey al rango de grupo, dividiéndola en seis unidades formacionales.

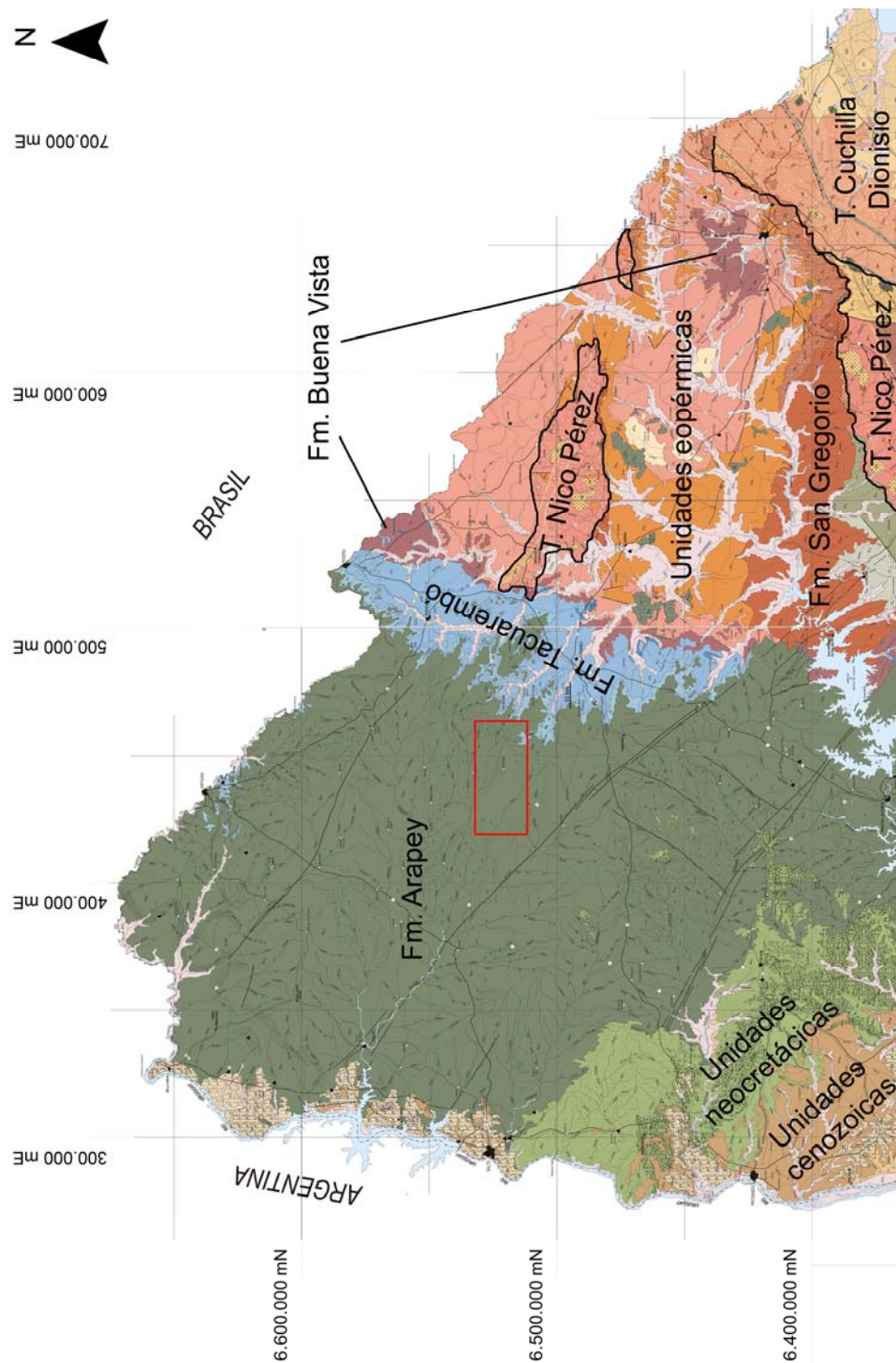


Figura 8. Mapa geológico de la región septentrional de Uruguay. Se indican las principales unidades mencionadas en el texto. Modificado de Bossi & Ferrando (2001). El área de estudio se indica con un recuadro rojo.

1.3. Antecedentes exploratorios de la Cuenca Norte

Con 10 pozos exploratorios (perforados por ANCAP en las décadas de 1950 y 1980), 1.650 km de líneas sísmicas 2D, así como estudios gravimétricos y magnetométricos realizados en un área de unos 30.000 km², básicamente concentrados en el sector NO de la misma (Figs. 9 y 10), la Cuenca Norte igualmente se encuentra subexplorada.

Esto se observa claramente en la región central, donde no se cuenta con pozos exploratorios ni sísmica 2D (Fig. 9), tan sólo con gravimetría (Fig. 10) y magnetometría, aunque esta última no es confiable dado que el magnetómetro empleado era muy sensible a mínimas variaciones locales del basalto en superficie (Pablo Rodríguez, com. pers.).

Por tanto, resulta de interés realizar una evaluación de los trabajos realizados recientemente en el bloque denominado Pepe Núñez, operado por ANCAP en el marco de un permiso de exploración.

Tabla 3. Pozos exploratorios de ANCAP en la Cuenca Norte.

Código de pozo	Nombre	Profundidad total	Campaña
NO_01_G_X1	Gaspar	2.297 m	1956-1958
NO_02_A_X2	Artigas	1.857 m	
NO_03_S_X1	Salto	2.206 m	
NO_04_Q_X1	Quebracho	1.107 m	
NO_05_G_X1	Guichón	924 m	
NO_06_Sp_X1	Salsipuedes	546 m	1986-1987
NO_07_P_X1	Pelado	1.996 m	
NO_08_Y_X1	Yacaré	2.387 m	
NO_09_B_X1	Belén	2.366 m	
NO_10_I_X1	Itacumbú	2.099 m	

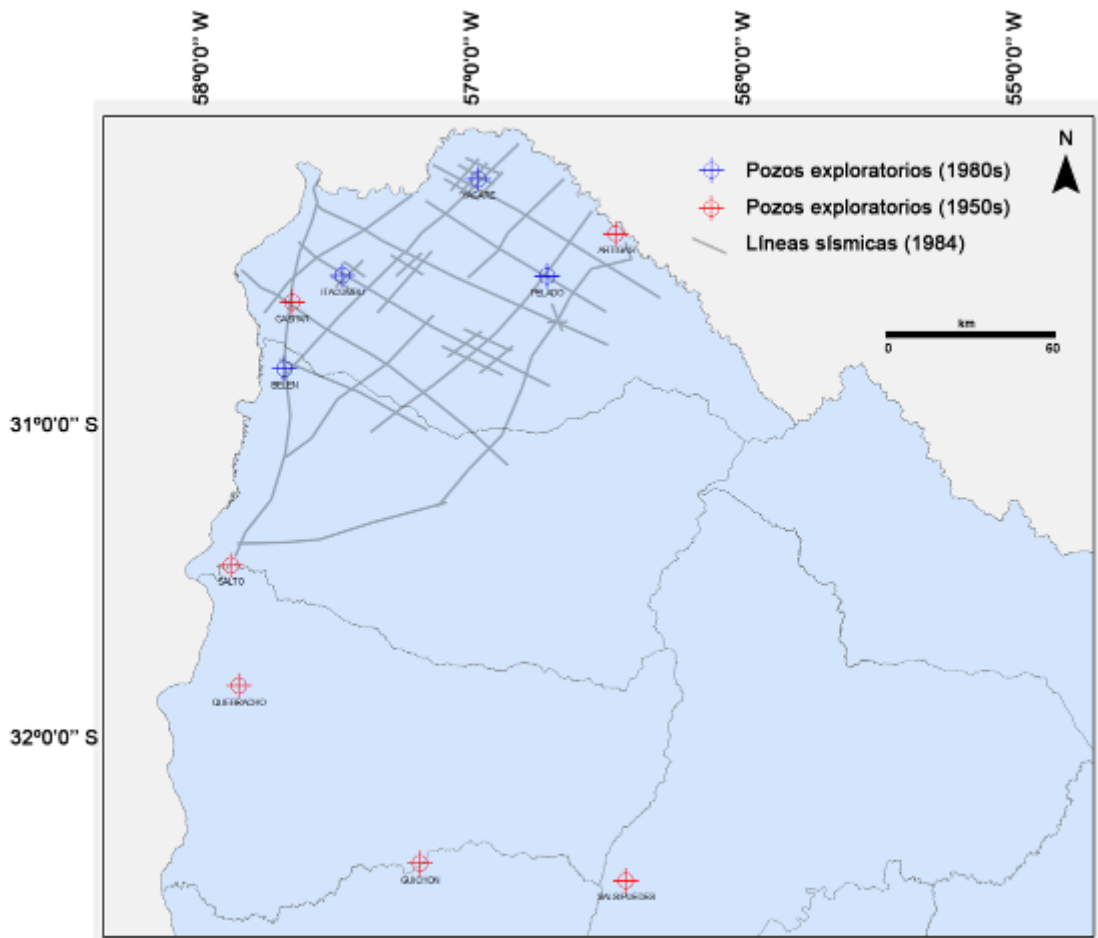


Figura 9. Distribución de pozos exploratorios y sísmica 2D en la Cuenca Norte, a partir de datos cedidos por ANCAP.

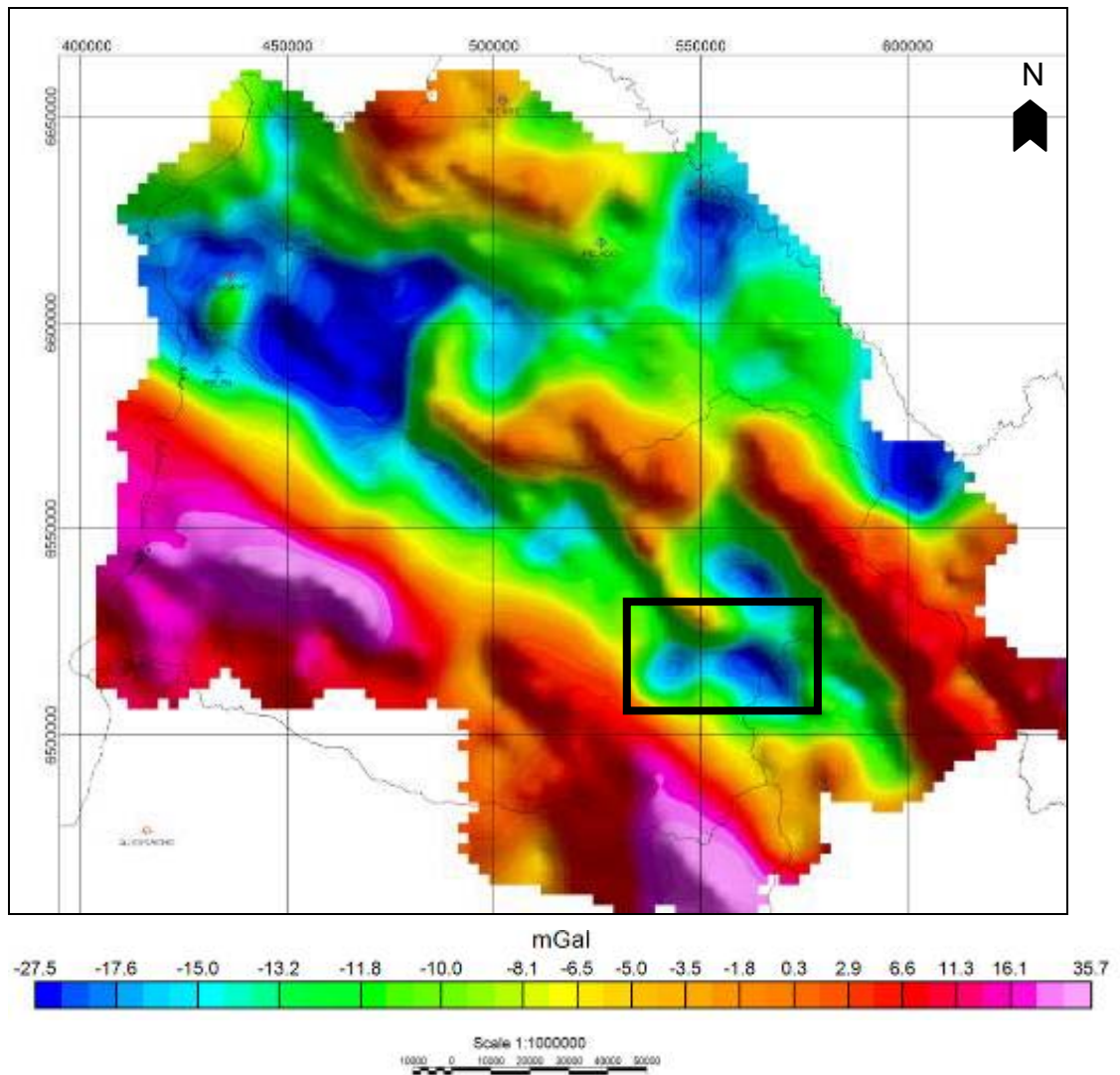


Figura 10. Mapa de anomalía gravimétrica de Bouguer de la porción septentrional de la Cuenca Norte. El recuadro indica el área de estudio. Basado en datos de ANCAP.

2. OBJETIVOS

El **objetivo general** del presente trabajo es realizar un mapa geológico general del área de Pepe Núñez (localizada al este del departamento de Salto; ver coordenadas en Tabla 4) a escala 1:50:000 y sendos mapas de detalle de las localidades donde se han realizado las últimas perforaciones por parte de la empresa estatal ANCAP (Quintana y Cañada del Charúa).

Los **objetivos específicos** incluyen:

- ▶ integrar datos e información de origen variado (descripción de testigos de perforación, *gamma ray* espectral, gravimetría, magnetotélúrica, paleontología, palinología) a efectos de procurar dilucidar la evolución tectono-estratigráfica del área
- ▶ describir y discutir las evidencias de interacción magma-sedimento
- ▶ identificar y caracterizar por medio de geoquímica orgánica las potenciales rocas generadoras de hidrocarburos de presentes.
- ▶ actualizar los mapas de isópacas de la Cuenca Norte en base a los nuevos datos de perforaciones, así como reinterpretar los datos de perforaciones antiguas.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación y accesos

El área Pepe Núñez³, de casi 900 km² de superficie, se ubica en la zona este del departamento de Salto y oeste del departamento de Tacuarembó (Fig. 11). Se accede al mismo desde la Ruta 31 que une Tacuarembó con Salto (Fig. 12).

Se accede a la localidad de Pepe Núñez (anteriormente denominada Pueblo Charrúa) tras recorrer 20 km por el camino que comienza en el km 160 de la Ruta 31. La localidad de Quintana se sitúa unos 12 km más al Norte, inmediatamente por fuera del límite Norte del bloque (Fig. 12). En la Tabla 4 se brindan las coordenadas del área de estudio.

Tabla 4. Coordenadas geográficas en Latitud-Longitud (UTM 21S) de los vértices del área de estudio.

Vértice	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)
NO	31° 21' 00''	56° 39' 00''
SO	31° 32' 00''	56° 39' 00''
SE	31° 32' 00''	56° 11' 00''
NE	31° 21' 00''	56° 11' 00''

3.2. Red de drenaje

La red de drenaje es radial, localmente subparalela, y está fuertemente controlada por estructuras geológicas NO y NE (Fig. 12). Los principales cursos de agua (arroyos Sopas, Mataojo Chico y Pintado) presentan una orientación NO, y reciben el aporte de cursos menores orientados en forma perpendicular (NE) u oblicua (N-S) a los primeros. En última instancia, los mencionados arroyos forman parte de la cuenca del Río Arapey (si-

³ Denominado así en virtud de la localidad homónima que se encuentra próxima al centro del mismo.

tuado fuera del área, al NO), el cual en su porción distal también muestra un fuerte control NO. No obstante, al SE del área de estudio se evidencian controles N-S, vinculado al río Tacuarembó y sus afluentes (Fig. 12).



Figura 11. Mapa político del Uruguay, tomado y modificado de Wikipedia. El recuadro rojo ubica el área estudio.

3.3. Relieve y uso del suelo

El relieve del área está influenciado por la Cuchilla de Haedo, con cotas que pueden superar localmente los 300 metros, particularmente en el sector centro y Este (Fig. 13).

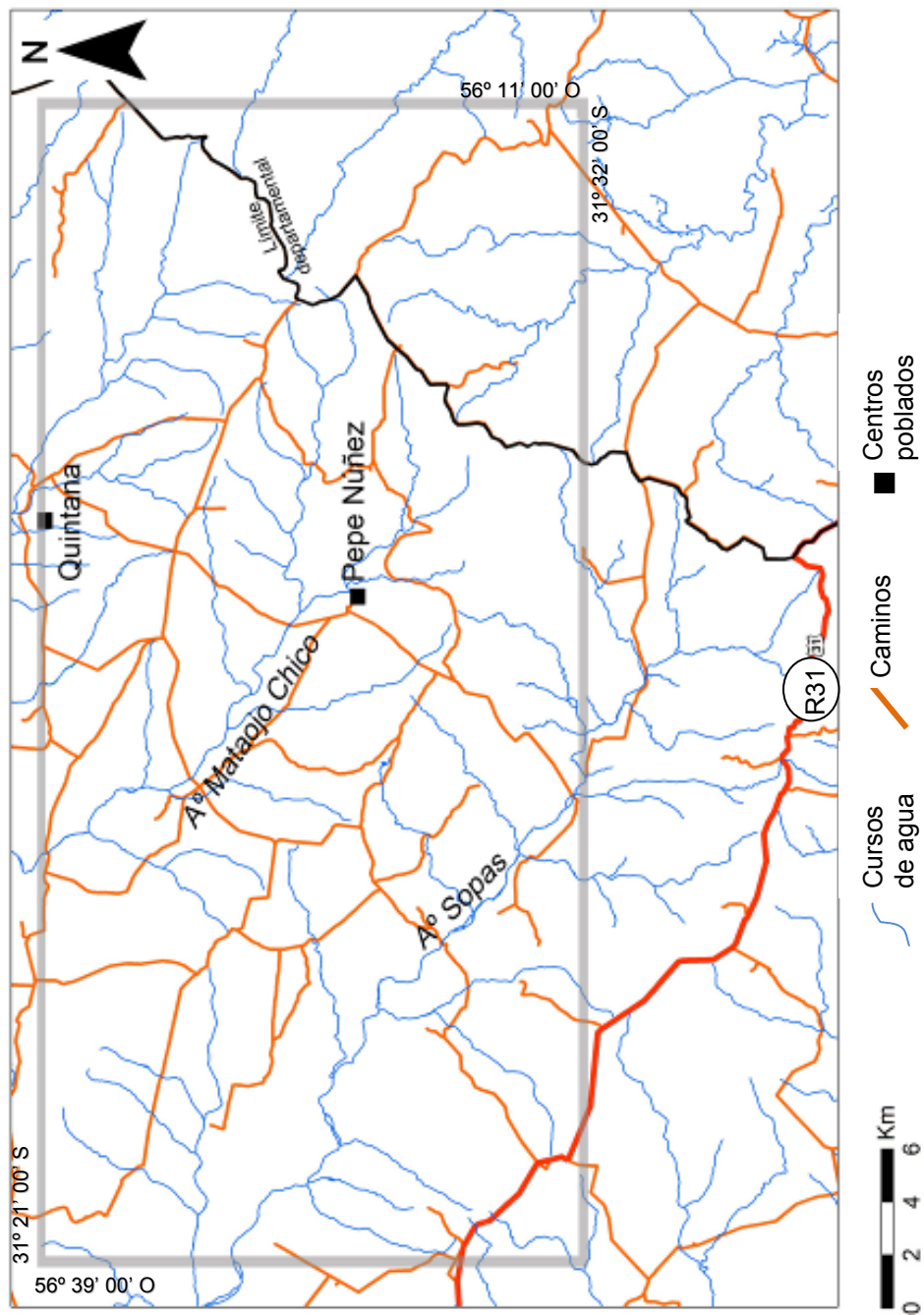


Figura 12. Accesos, caminos y cursos de agua en el área de estudio, digitalizados a partir de hojas topográficas del Servicio Geográfico Militar.

Los suelos, poco potentes y desarrollados fundamentalmente sobre basaltos, son predominantemente del tipo leptosoles éutricos, y se destinan básicamente a uso ganadero, pese a la muy baja aptitud pastoril de los mismos (De León y Cayssials, 2004).

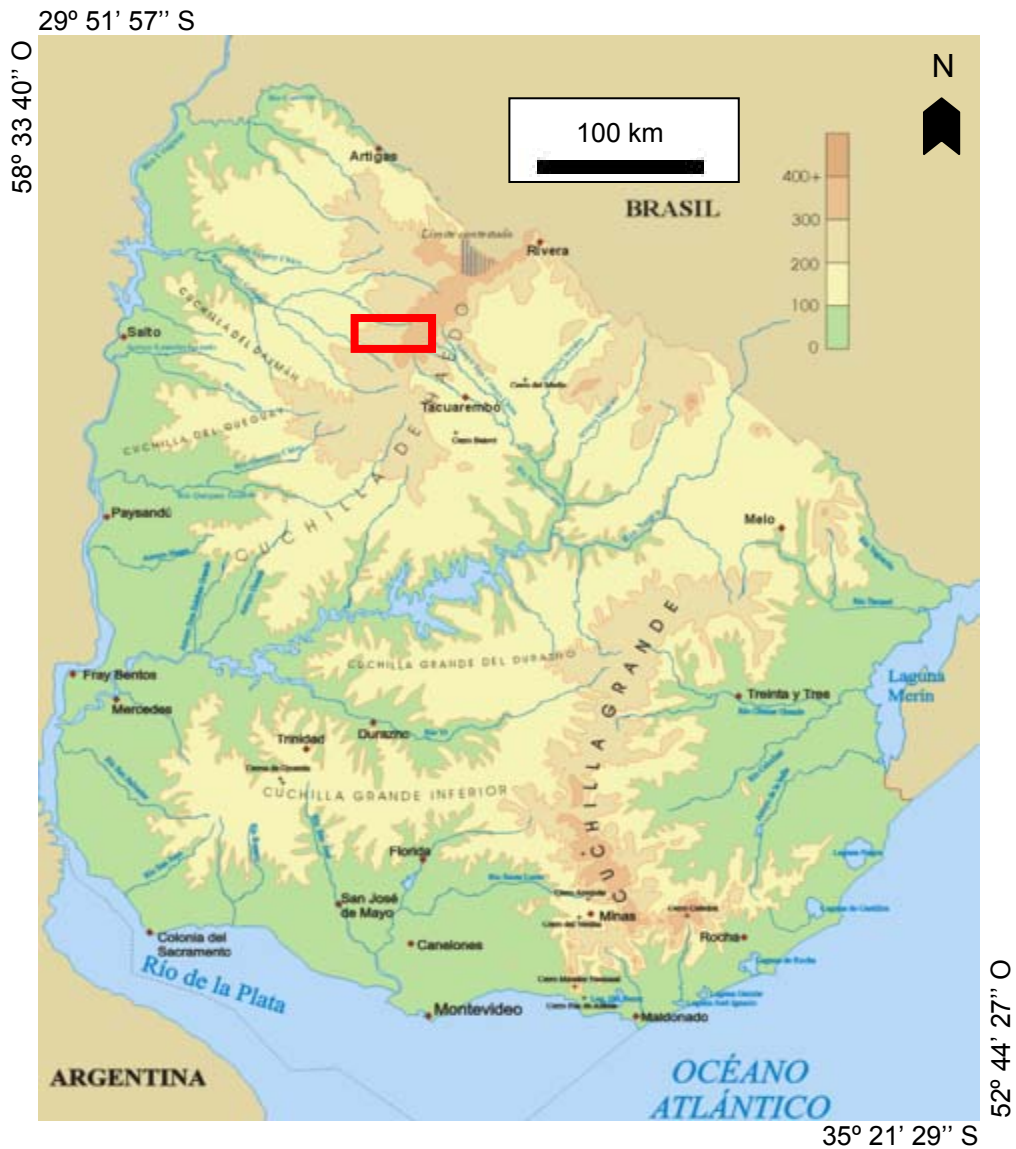


Figura 13. Mapa físico del Uruguay, tomado y modificado de Wikipedia. El recuadro rojo ubica el área estudio.

3.4. Antecedentes geológicos del área

Los primeros trabajos realizados en el marco de relevamientos regionales incluyeron estudios gravimétricos en la década de 1950, que mostraron una serie de bajos gravimétricos en el área (ver Fig. 10), los cuales combinados con afloramiento de areniscas permitían inferir la presencia de una ventana estructural.

Al respecto, Degolyer y MacNaughton (1950, pp. 30-31) expresaban: *“Tacuarembó Sandstone was found at an elevation of 235 meters above sea level in the Charrúa fenster, 45 kilometers northwest of Tacuarembó, but there is some possibility that this is a sandstone lens within the basalt”*.

La cartografía regional difiere levemente en cuanto a la geología de superficie. Preciozzi *et al.* (1985) reconocieron únicamente a la Formación Arapey (Fig. 13), en tanto que Bossi y Ferrando (2001) mapearon al sureste del área a la Formación Tacuarembó, unidades ambas que fueran definidas por Bossi (1966). El basamento del área (no aflorante) correspondería al Terreno Nico Pérez (Bossi y Campal, 1992).

Trabajos de mayor detalle (1:100.000) fueron realizados al Oeste del área (segmento Salto) por Bossi *et al.* (1969).

El único trabajo detallado que concierne específicamente al área de estudio que realizaron Veroslavksy *et al.* (2012) para ANCAP, que incluyó la realización de un mapa geológico de parte del área (Figs. 15 y 16). Dicho estudio, que se tomará como punto de partida para este trabajo, confirmó que se trata de una zona compleja desde el punto de vista geológico y estructural.

ANCAP consideró que comprender la geología y evolución tectono-estratigráfica de esta área era clave para el estudio de la Cuenca Norte. Es así que desde el año 2011 comenzaron diversos trabajos exploratorios, incluyendo: mapeo geológico, estudios de bacterias butanotróficas y elementos traza, más de medio centenar de sondeos magnetoteléuticos y seis pozos estratigráficos, con recuperación continua de testigos, sobre los cuales se han realizado diversos estudios (inéditos, ver más adelante).

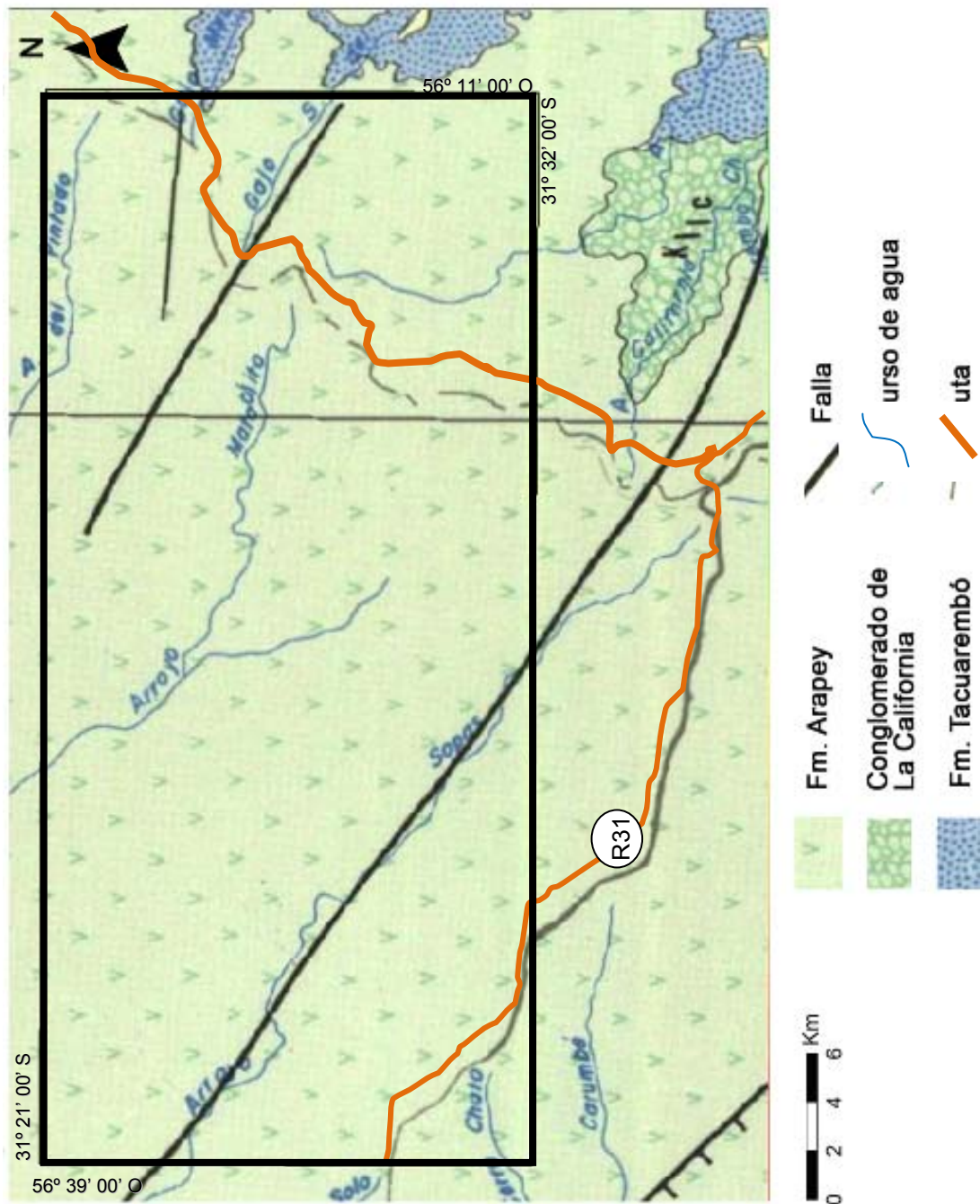


Figura 14. Detalle de la Carta Geológica 1:500.000 de Preciozzi *et al.* (1985), modificado. El Conglomerado de la California es parte según Bossi y Navarro (1991) de la Formación Arapey.

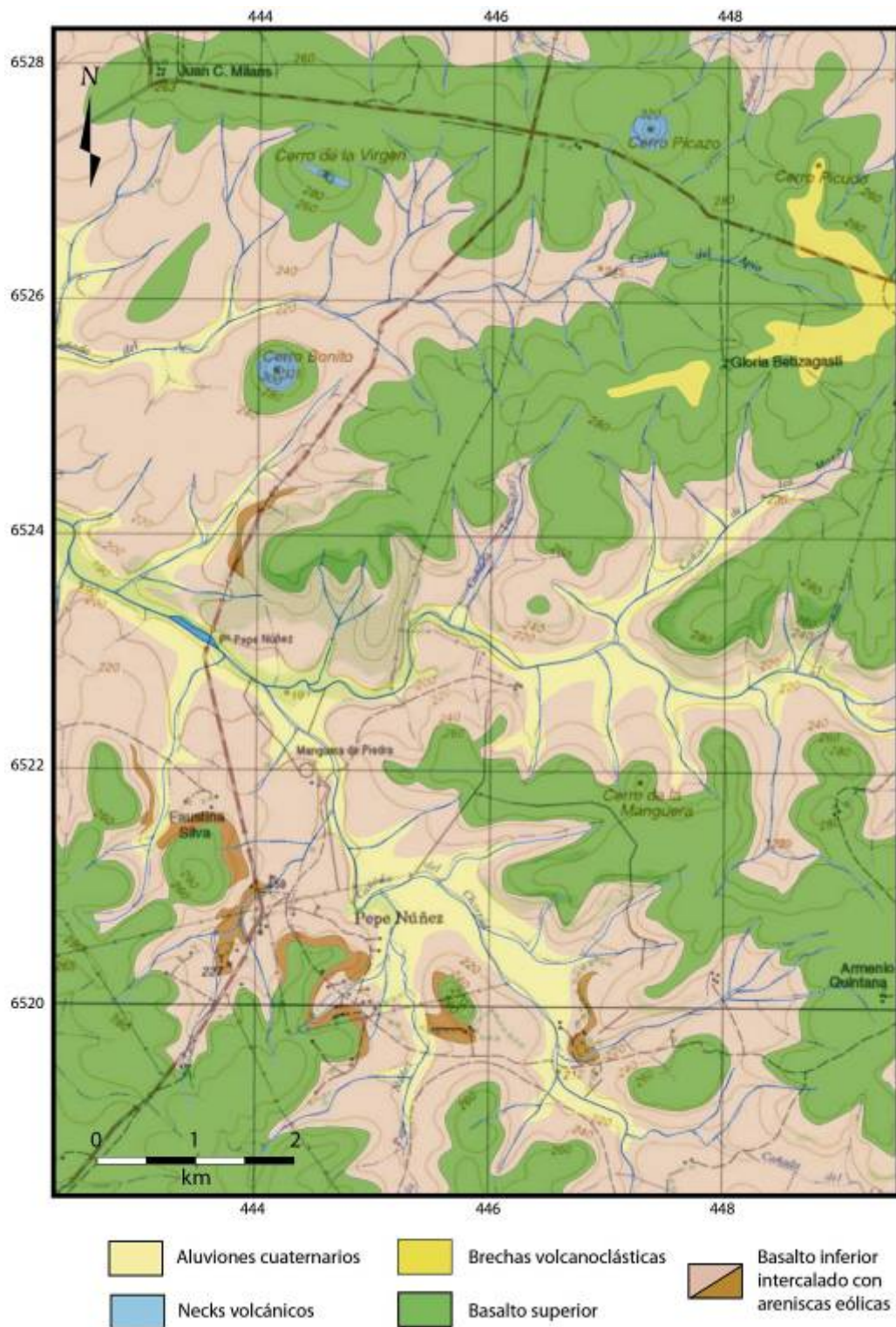


Figura 15. Mapa geológico general de la zona de Pepe Núñez. Tomado de Veroslavsky *et al.* (2012).

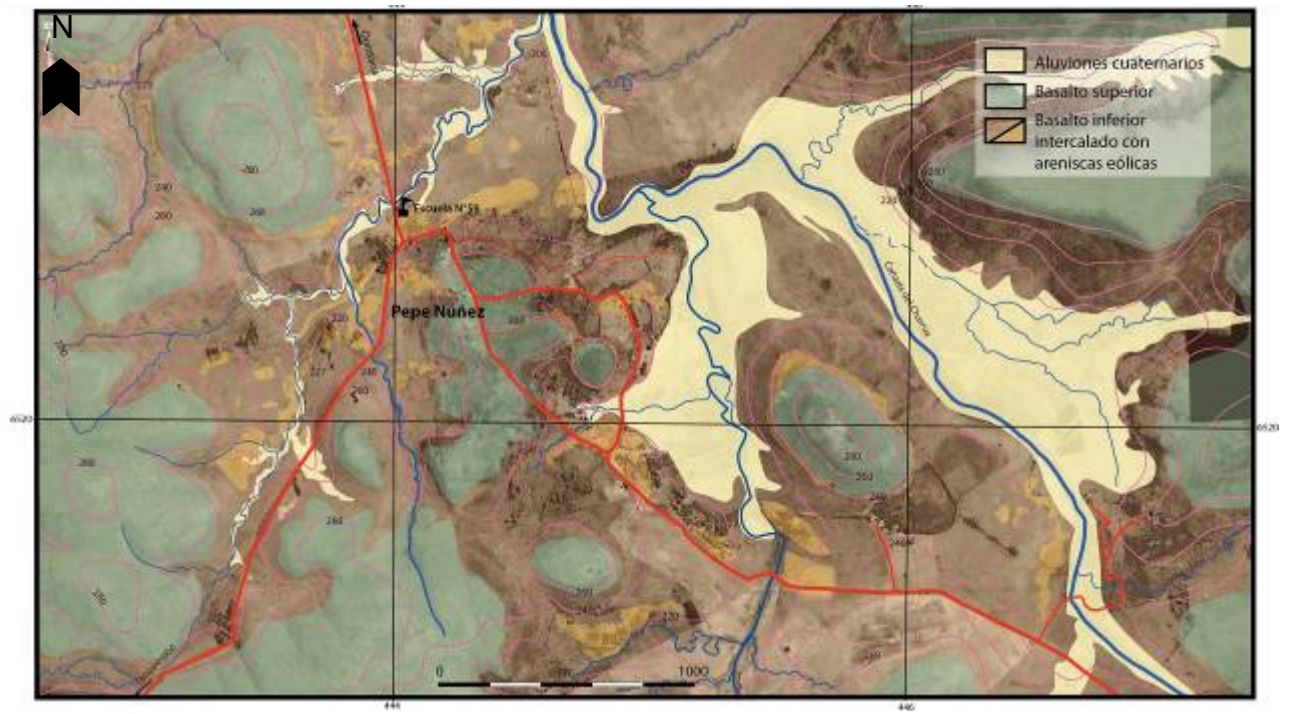


Figura 16. Mapa geológico de detalle de la localidad de Pepe Núñez y adyacencias. Tomado de Veroslavsky *et al.* (2012).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Se empleó material para trabajo de campo: brújula Brunton, GPS Garmin, piqueta Estwing, lupa de mano, comparador granulométrico, cinta métrica, HCl diluido, etc. La base cartográfica utilizada consistió en cuatro cartas topográficas del Servicio Geográfico Militar a escala 1:50.000: K-10 (Pepe Núñez), K-11 (Cuchilla de Haedo), L-10 (Sopas) y L-11 (Arerunguá).

El equipamiento empleado para trabajo de laboratorio consistió en:

- espectrómetro *RS-230 BGO Super Spec* (propiedad de ANCAP);
- microscopio petrográfico *Nikon Eclipse 50iPOL* (propiedad de PEDECIBA).

Los restantes trabajos fueron realizados por las empresas mencionadas empleando los siguientes equipos:

- pirolizador *Rock Eval 6* (Claxton Laboratories);
- equipo de magnetotelúrica *Metronix ADU-07* (Ingesur);
- equipo portátil de fluorescencia de rayos X *Niton XIt 500* (Larriestra Geotecnologías);
- sierras y demás equipamiento para confeccionar láminas petrográficas (GeoTech Labs y Facultad de Ciencias).

4.2. Programas

Se emplearon diversos programas de computación, de los cuales ANCAP posee licencia, incluyendo:

- *ArcGis* versión 10 (ESRI), para georeferenciamiento de datos (e.g. afloramientos relevados, sondeos magnetotelúricos, pozos);
- *The Kingdom Suite* versión 8.6 (IHS), para generación de grillas (mapas estructurales de basamento y mapas isopáquicos de diferentes unidades)
- *Oasis Montaj* versión 7.3 (Geosoft), para modelado gravimétrico.

- *Paleontological Statistics* versión 2.09 (Hammer *et al.*, 2001), para análisis estadísticos.

4.3. Metodología

En esta tesis se implementaron tres tipos de métodos: de campo (mapeo geológico, perforaciones), de laboratorio (bacterias butanotróficas, elementos traza, geoquímica orgánica, radiactividad gamma, láminas petrográficas) y de gabinete (procesado e interpretación de los datos).

La descripción de testigos de perforación y caracterización de las diferentes unidades que componen el relleno de la cuenca en el área de estudio fue llevada a cabo por el autor, así como las mediciones de radiactividad *gamma* natural sobre estos testigos, empleando un espectrómetro Super BGO-230.

La caracterización de rocas generadoras se basó en análisis de geoquímica orgánica llevados a cabo por Shell, Schuepbach Energy y Geolab Sur (informes inéditos), así como en estudios de elementos traza y bacterias butanotróficas realizados por Larriestra Geotecnologías (2011, 2012).

Tanto los datos de radiactividad *gamma* natural como de geoquímica orgánica se analizaron e interpretaron empleando estadística descriptiva, bivariada y multivariada (ver programas empleados más adelante).

Las dataciones relativas se basaron en estudios palinológicos realizados por Facultad de Ciencias, y en estudios paleontológicos realizados por el autor.

Las láminas delgadas para estudios petrográficos fueron realizadas mayormente en el laboratorio GeoTech Labs (aunque una de ellas fue confeccionada en la Facultad de Ciencias) y se describieron en forma preliminar para este trabajo.

Los estudios magnetotélúricos fueron realizados por la empresa INGESUR entre los años 2011 y 2013, y los datos (inversiones 1D y 2D) fueron tomados del informe final (INGESUR, 2013).

En este trabajo se analizaron por primera vez todos estos resultados con una visión de conjunto.

4.4. Métodos exploratorios

Se realizará a continuación una síntesis de los métodos exploratorios que se aplicaron en el bloque Pepe Núñez, comenzando por los métodos potenciales (siguiendo a Kearey *et al.*, 2002; Gluyas y Swarbrick, 2004; Ingesur, 2013), prosiguiendo con bacterias butanotróficas y fluorescencia de rayos X (basado en Larriestra Geotecnologías, 2011, 2012), geoquímica orgánica (siguiendo a Núñez-Betelu y Baceta, 1994; Peters y Cassa, 1994; Al-Mashramah, 2011; Allix *et al.*, 2011; McCarthy *et al.*, 2011) y la radiactividad natural gamma (Kearey *et al.*, 2002; López, 2013).

4.4.1. Gravimetría

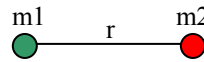
En la exploración geológica, particularmente de hidrocarburos, se emplea un gran abanico de métodos tanto directos como indirectos. Entre estos últimos destacan los relevamientos gravimétricos, magnetométricos y magnetotelúricos.

Estos métodos, llamados métodos potenciales, (dado que trabajan con campos potenciales), no poseen una única solución, esto es proveen resultados ambiguos (dado que cuerpos con diferentes combinaciones de parámetros pueden producir la misma respuesta) que deben combinarse con los de otros métodos exploratorios.

No obstante, dado su bajo costo en relación a otros métodos exploratorios como la sísmica de reflexión el método por excelencia para estudiar el subsuelo, reconocer secuencias y trampas, etc., los métodos potenciales poseen tres ventajas: poseen un bajo costo relativo, su adquisición es simple, y los equipos pueden ser aeroportados (permitiendo relevar amplias áreas, incluyendo zonas de difícil acceso), son muy empleados en las primeras etapas de la exploración de una cuenca o un sector de una cuenca, tanto en tierra como en mar.

Seguendo a Kearey *et al.* (2002), el método gravimétrico se basa en la Ley de Newton, que relaciona la fuerza de atracción mutua entre partículas (F) en términos de sus respectivas masas (m_1 y m_2) y de la separación entre sí (r); su formulación matemática es:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$



Se tiene pues que la fuerza de atracción gravitatoria es proporcional a las masas e inversamente proporcional al cuadrado del radio, siendo G la constante gravitacional universal. Por otro lado, la aceleración correspondiente se obtiene tras dividir la fuerza de atracción F por la masa del cuerpo que es atraído. La unidad de aceleración es el gal, aunque en exploración geofísica se emplea el miligal, para medir pequeñas variaciones de aceleración.

Los equipos empleados para medir dichas variaciones de aceleración se denominan gravímetros, que pueden ser protónicos o de precesión.

Las anomalías de gravedad están causadas por la distribución heterogénea de rocas de diferente densidad. No obstante, como la gravedad medida en un punto recibe la contribución de todos los tipos de rocas presentes en el subsuelo en ese punto, existe ambigüedad en relación a la forma y orientación del cuerpo causante de una anomalía particular.

Los datos gravimétricos se someten a diferentes tipos de correcciones o reducciones previamente a su interpretación, para corregir variaciones en el campo gravitacional que no provengan de diferencia de densidad de las rocas del subsuelo (Kearey *et al.*, 2002). Dichas correcciones consideran variaciones debidas a:

- deriva del instrumento en una misma estación;
- latitud, dado que la gravedad aumenta desde el Ecuador a los polos;
- efectos de mareas;
- movimiento del vehículo (Eötvös);

- elevación, incluyendo aire libre y Bouguer, sobre las que se profundizará.

La *corrección de aire libre* (FAC, por sus siglas en inglés) toma en cuenta la disminución de gravedad que ocurre al aumentar la altura en aire libre (Fig. 17A; Kearey *et al.*, 2002), como resultado de la mayor distancia al centro de la Tierra. Para reducir al *datum* una observación tomada a una altura h se tiene:

$$FAC = 3.086h$$

estando h expresada en m y FAC en gu (unidades de gravedad).⁴ Así, para una estación situada sobre el *datum* la FAC es positiva.

La *corrección Bouguer* (BC, por sus siglas en inglés) toma en consideración la masa entre la estación de muestreo y el nivel del mar (Fig. 17B; Kearey *et al.*, 2002), removiendo su efecto al aproximar la capa de roca debajo de la estación a un bloque horizontal infinito cuyo espesor es igual a la elevación de la estación. Si ρ es la densidad de la roca, se tiene:

$$BC = 2\pi G\rho h = 0.4191\rho h$$

estando h expresada en m, ρ en Mg/m³ y BC en unidades gu.

Los campos de anomalía Bouguer suelen estar caracterizados por una anomalía regional amplia y suavemente variable, en la que pueden estar impuestas anomalías locales de menor longitud de onda. Usualmente son dichas anomalías locales las que tienen mayor interés, por lo que se remueve el campo regional (e.g. mediante ajuste a una función polinómica o aplicando un filtro pasa-bajos) a efectos de aislar esas anomalías residuales (Fig. 17C; Kearey *et al.*, 2002).

Los datos gravimétricos pueden emplearse para definir el régimen tectónico regional, seleccionar áreas prioritarias para realizar posteriores

⁴1 gu = 1 $\mu\text{m/s}^2$ = 10 mgal.

relevamientos sísmicos e identificar estructuras potencialmente perforables (e.g. altos estructurales para acumulaciones convencionales de hidrocarburos).

En tierra y en sectores *offshore* someros se emplea anomalía Bouguer, mientras que para sectores *offshore* profundos es más conveniente el empleo de anomalía de aire libre.

La gravimetría Bouguer funciona muy bien en la Cuenca Santa Lucía, dada la escasa participación de basaltos; así, los altos (colores cálidos) y bajos (colores fríos) gravimétricos se corresponden con altos y bajos estructurales, como ha sido verificado mediante perforaciones y sísmica de reflexión. No obstante, el potente (pero variable) espesor de basaltos en la Cuenca Norte afecta fuertemente la respuesta gravimétrica (recuérdese que la densidad del basalto es significativamente superior a la del basamento granítico; Tabla 5), y por tanto es posible que en algunos sectores los altos y bajos gravimétricos estén reflejando no un basamento somero y profundo sino un espesor alto o bajo de basaltos, respectivamente.

Tabla 5. Densidades (ρ) típicas en diferentes tipos de rocas. Tomado de Gluyas y Swarbrick (2004).

Litología	Rango de ρ (g/cm ³)	ρ media (g/cm ³)
Granito	2,50-2,81	2,64
Basalto	2,70-3,30	2,90
Ígneas ácidas en general	2,30-3,11	2,61
Ígneas básicas en general	2,09-3,17	2,79
Metamórficas	2,40-3,10	2,74
Sal	2,10-2,50	2,22
Arenisca	1,61-2,76	2,35
Caliza	1,93-2,90	2,55
Dolomía	1,77-3,20	2,70
Lutita	2,58-3,42	2,40

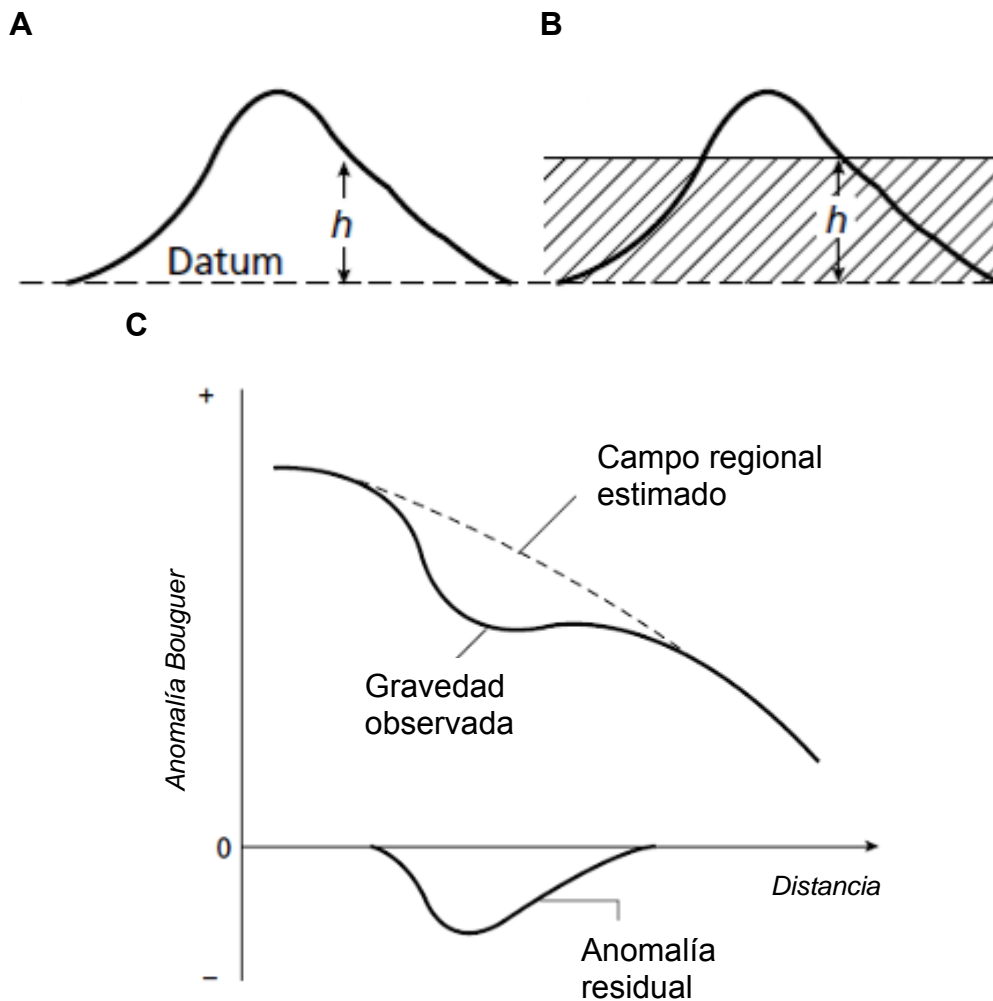


Figura 17. **A**, corrección de aire libre. **B**, corrección Bouguer. **C**, anomalías regionales vs. locales (residuales). Modificado de Kearey *et al.* (2002).

4.4.2. Magnetotelúrica

Dentro y alrededor de la Tierra existen campos magnéticos naturales de gran escala y baja frecuencia, conocidos como campos magnetotelúricos. Dichos campos magnetotelúricos penetran en el subsuelo e inducen el flujo dentro de la Tierra de corrientes eléctricas naturales (corrientes telúricas). Las fuentes naturales que generan los dichos campos en el subsuelo están asociadas principalmente a los fenómenos de interacción entre el viento solar y la magnetosfera de la Tierra y a las tempestades

meteorológicas que ocurren en la atmósfera del planeta (Cagniard, 1953; Vozoff, 1972).

Los sondeos magnetotelúricos (MT) se basan en la medición de los campos eléctricos y magnéticos naturales que fluyen en el subsuelo a diferente profundidad, los cuales dependen de la frecuencia, siendo que a menor frecuencia es mayor la profundidad de investigación y viceversa (Cagniard, 1953; Vozoff, 1972). Así, se distingue entre sondeos magnetotelúricos (0,001 a 100 Hz) y audiomagnetotelúricos (1 a 10.000 Hz).

Un sondeo MT consiste en la medición de las tres componentes del campo magnético H_x , H_y y H_z y de las componentes horizontales del campo eléctrico E_x y E_y (Fig. 18).

Estas componentes se miden en la forma de series de tiempo individuales que son transformadas al dominio de la frecuencia utilizando un algoritmo de transformada de Fourier. Posteriormente se obtiene el tensor de impedancia Z , también llamado función de transferencia magnetotelúrica.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

A partir de la estimación de la impedancia para cada una de las frecuencias analizadas, se procede a calcular las resistividades y los ángulos de fase entre los campos eléctrico y magnético. Del resultado de dicho procedimiento se obtienen dos curvas de resistividad y dos curvas de fase en función de la frecuencia (Fig. 19).

Cada una de dichas curvas se puede utilizar independientemente para la estimación de la estructura del subsuelo, pero de la interpretación conjunta de resistividad y fase se obtiene un ajuste mucho más robusto y por lo tanto más preciso (Ingesur, 2013).

Si el medio es isótropo (1D) las curvas de resistividad se solapan, no así sí el medio es anitótropo (2D), como se aprecia al comparar las Figs. 19A y 19B.

En la Fig. 20 se brinda un ejemplo de inversión 1D de un sondeo magnetoteléurico, diferenciándose claramente tres capas en el subsuelo en función de la resistividad, de tope a base: basaltos, rocas sedimentarias y basamento cristalino.

Por supuesto, la efectividad de estos sondeos depende en gran medida del contraste conductivo entre los materiales del subsuelo. La conductividad (o su inverso, la resistividad) depende no sólo de la litología sino también del contenido de fluidos; así, una roca sedimentaria con agua salada tendrá mayor conductividad (menor resistividad) que la misma roca con agua dulce (Tabla 6 y Fig. 21).

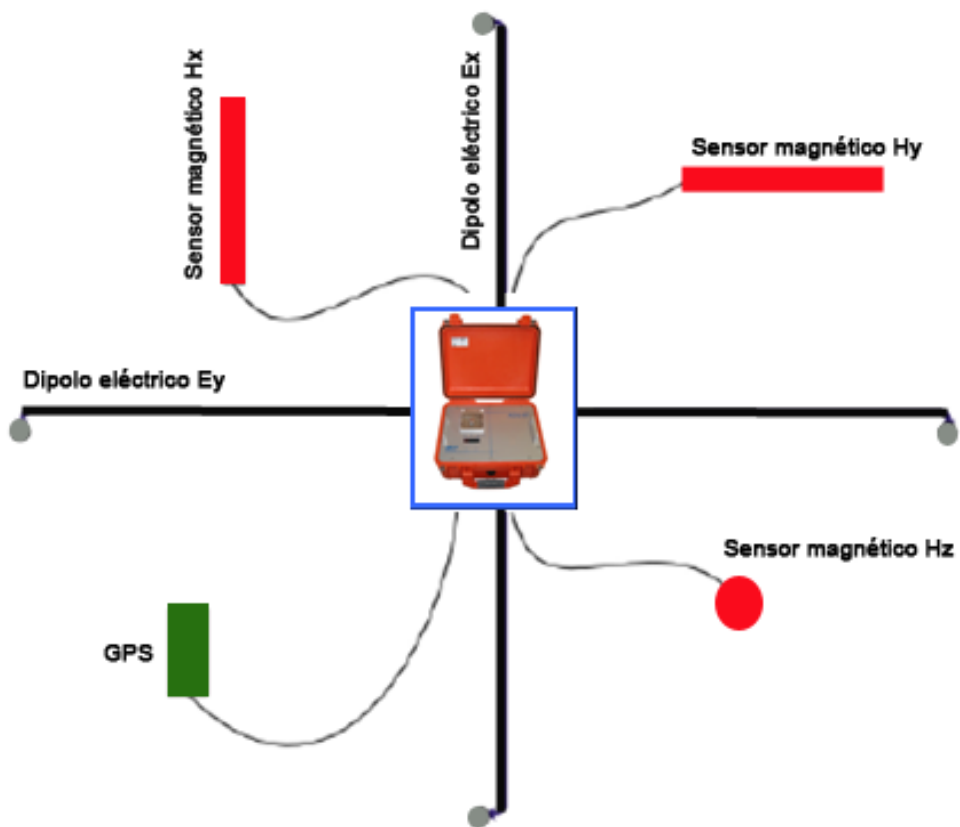
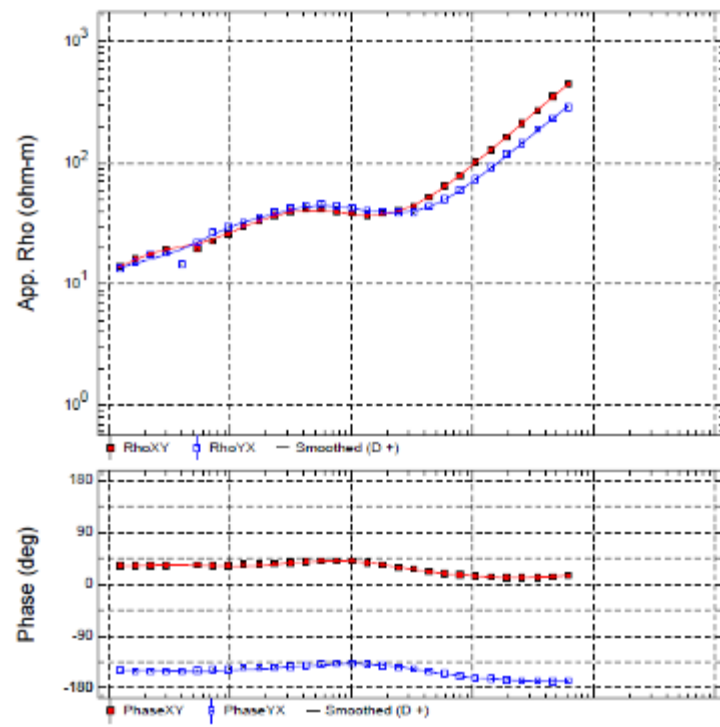


Figura 18. Arreglo esquemático de un equipo para la realización de un sondeo magnetoteléurico. Modificado de Ingesur (2013).

A



B

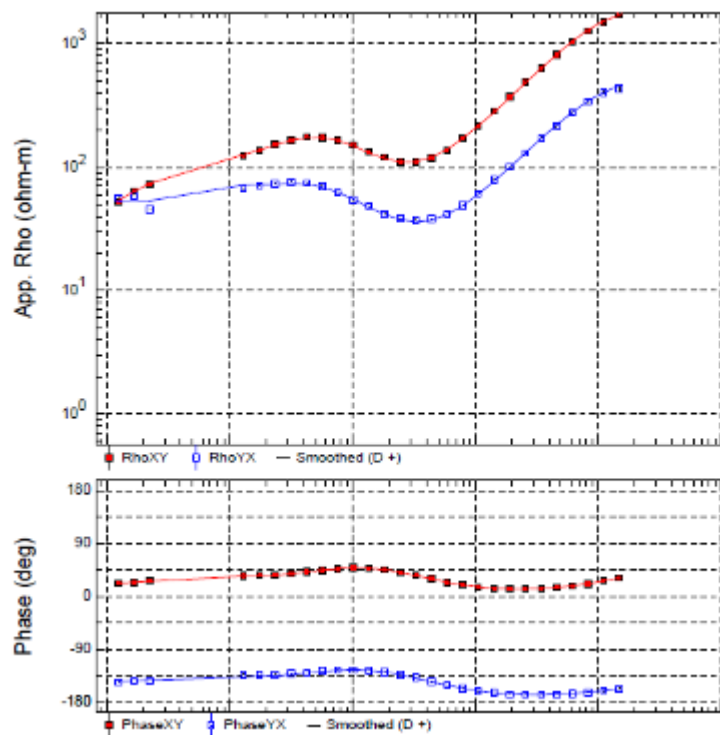


Figura 19. Ejemplos de curvas de resistividad aparente y fase. **A**, medio 1D. **B**, medio 2D. Tomado de Ingesur (2013).

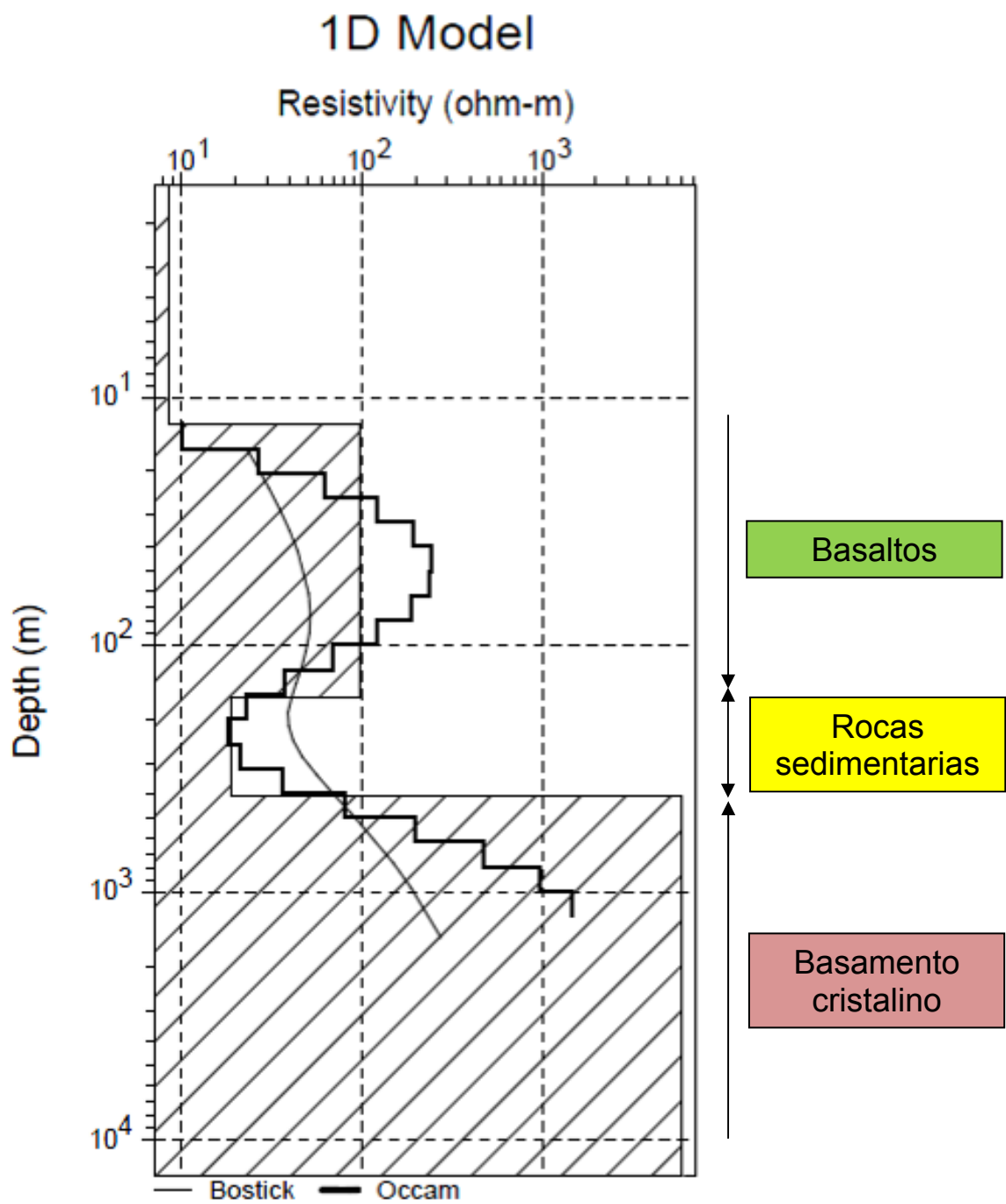


Figura 20. Ejemplo de inversión 1D. Se indican las litologías inferidas a partir de las resistividades de la Tabla 6. Tomado de Ingesur (2013).

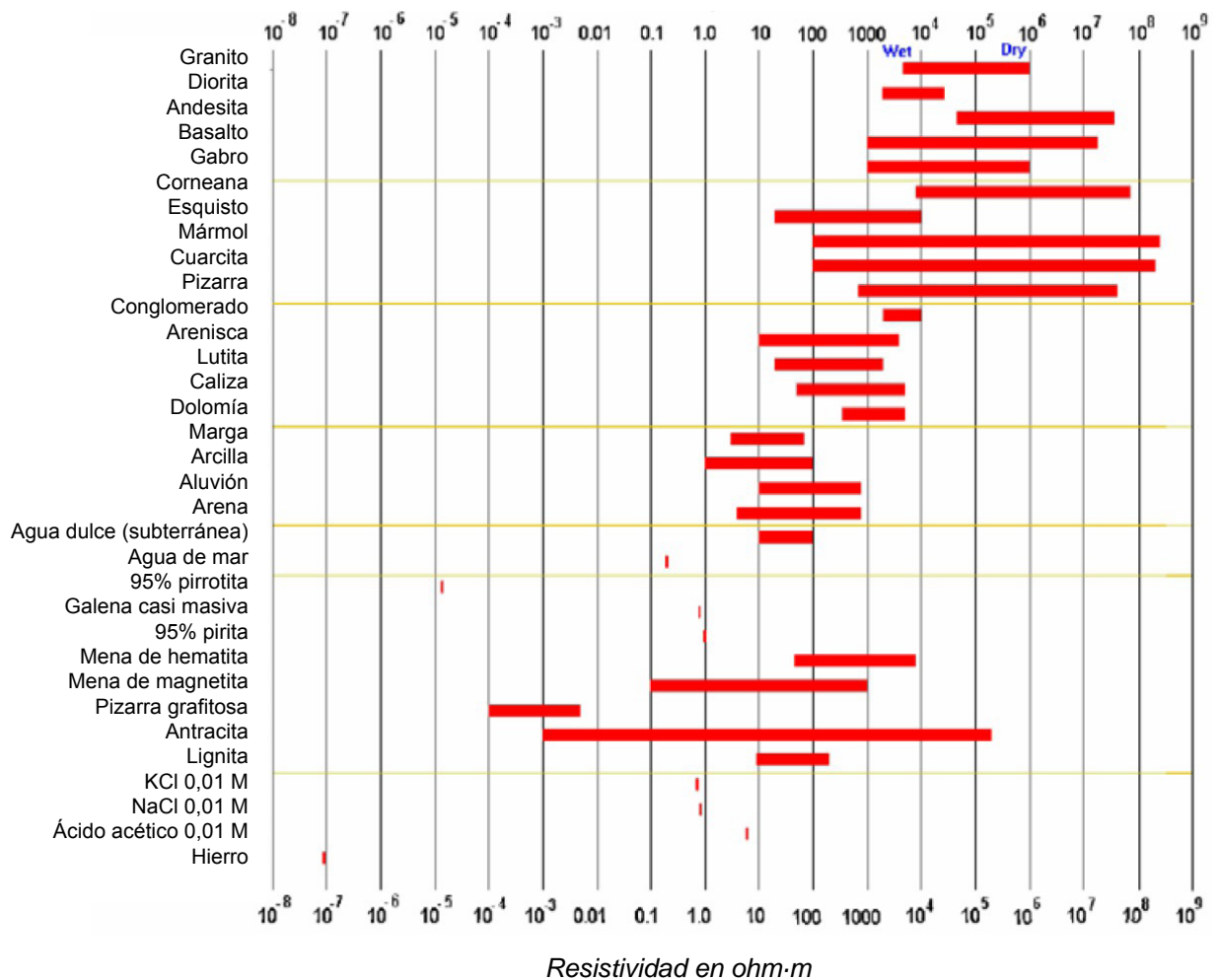


Figura 21. Resistividades de diferentes rocas, minerales y soluciones. Modificado de Palacky (1987) e Ingesur (2013).

Tabla 6. Resistividades típicas en la Cuenca Norte. Tomado de Oleaga (2002).

Litología	Período	Resistividad (Ohm-m)	
		Rango	Media
Sedimentos	Cretácico Sup.	11-15	12
Basalto	Cretácico Inf.	50-650	200
Rocas sedimentarias	Jurásico/Cretácico	17-70	30
Diabasas	Cretácico Inf.	450-600	500
Rocas sedimentarias	Devónico-Pérmico	3-14	9
Basamento	Precámbrico	480-520	500

4.4.3. Bacterias butanotróficas

El Modelo Biogeoquímico de Exploración se basa, según Larriestra Geotecnologías (2011), en que las relaciones entre gases, microbios, plantas vasculares y suelo son parte de un sistema integrado, que actuando en conjunto, adquieren una fisonomía y características particulares según las condiciones que impone el ambiente.

En las trampas donde se alojan reservorios de hidrocarburos bajo la forma de petróleo o gas, se producen microfugas de gases livianos como metano, etano, propano, butano, etc. que ascienden por el sistema de fracturas y el espacio poral de la columna geológica hasta alcanzar la superficie (Figs. 22 y 23). Estas migraciones producen condiciones particulares en la porción edáfica cercana a la superficie, que favorece la proliferación de microorganismos (bacterias propano-butano-tróficas) los cuales aprovechan estos recursos energéticos para mantener sus requerimientos de subsistencia. La actividad metabólica de estos microbios supone el consumo de ciertos iones en solución que genera un déficit en la concentración de nutrientes, el aumento de pH, disminución del Eh, baja presión de oxígeno y precipitación de sales.

Estos factores inciden en el ecosistema y en la fisiología de las plantas, produciendo patrones anómalos de distribución y distinto grado de cobertura vegetal, etc.

Bajo estas condiciones óxido-reductoras se generan modificaciones mineralógicas que favorecen la precipitación de uranio (uraninita), el empobrecimiento de potasio en arcillas (illita) o el enriquecimiento en halógenos como el yodo. También han sido documentadas acumulaciones de elementos traza como V, Cr, Mn, Ni, As, Co, Cu, Mo, U, Fe, Th, Zn y Pb formando halos, en asociación con reservorios de hidrocarburos (Fig. 23). El estudio de esta asociación de fenómenos permite confeccionar mapas de elementos indicadores y detectar la presencia de anomalías relacionadas a las microfugas mencionadas.

Estos elementos traza pueden ser producto residual de la actividad bacteriana en la oxidación de hidrocarburos o provenir directamente del reservorio y/o de la roca madre migrando en asociación compleja con las microburbujas de hidrocarburos. Además pueden ser arrastrados a la superficie por efecto de gases provenientes del manto que pasan a través de los reservorios y dejan improntas diferenciales en las concentraciones de elementos traza en la superficie.⁵

La existencia de fracturas y/o fallas activa en gran medida la expresión en superficie de las microfugas, produciendo anomalías locales temporales que es preciso diferenciar de las “paleoanomalías” producidas a lo largo de la historia del reservorio.

El análisis de Larriestra Geotecnologías se realizó siguiendo el método MPOG (Microbial Prospecting for Oil and Gas) modificado (Larriestra Geotecnologías, 2011). El muestreo se efectuó con un barreno manual tipo Edelman perforándose a 30 cm de profundidad donde lo permitía el desarrollo del suelo (Fig. 24). En total se extrajeron 54 muestras. Las muestras se conservaron en envases esterilizados para el análisis bacteriológico y en bolsas *ziploc* las muestras para análisis de elementos traza.

El objetivo del análisis microbiológico (Fig. 25) es poner en contacto a la flora presente en el suelo con una atmósfera mayoritaria de butano (incubación durante 5 días), previamente a la eliminación de toda fuente de carbono (para evitar falsos positivos), de manera que solamente pueda mantenerse viable aquella que sea capaz de utilizar el butano como fuente de carbono. Finalmente se efectúa el recuento. Para mayor seguridad el análisis bacteriológico se repite cuando se detectan valores anómalos.

⁵ Cabe aclarar que la presencia de halos minerales puede o no estar relacionada a actividad bacteriana reciente, ya que las condiciones que determinan la precipitación de minerales relacionados con plumas reductoras de gases migrantes, es un evento que puede haber tenido lugar en el pasado geológico. En cambio las anomalías apicales microbianas forman parte de un proceso dinámico que adquiere diferentes intensidades en relación directa con la presión del reservorio (Larriestra, 2011).

4.4.4. Fluorescencia de rayos X

Por otro lado, Larriestra Geotecnologías (2012) analizó elementos mayores, menores y traza sobre muestras de suelo (no consideradas en este trabajo), así como en testigos de lutitas negras del pozo Pepe Núñez E-1b. El análisis consistió en la exposición de cada muestra durante 2 minutos a los rayos X mediante un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés) marca Niton Xlt 500 (Fig. 26). Se midió cada cara de la muestra debido a posibles variaciones en la composición química.

Se midieron 32 elementos químicos por muestra (el máximo permitido por el equipo), a saber:

- elementos mayores: Fe, Mn, Ca, K y S
- elementos menores: Zr, Sr, Rb, Ti y Ba
- elementos traza: Mo, U, Th, Pb, Se, As, Hg, Zn, O, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sc, Cs, Te, Sb, Sn, Cd, Ag y Pd.

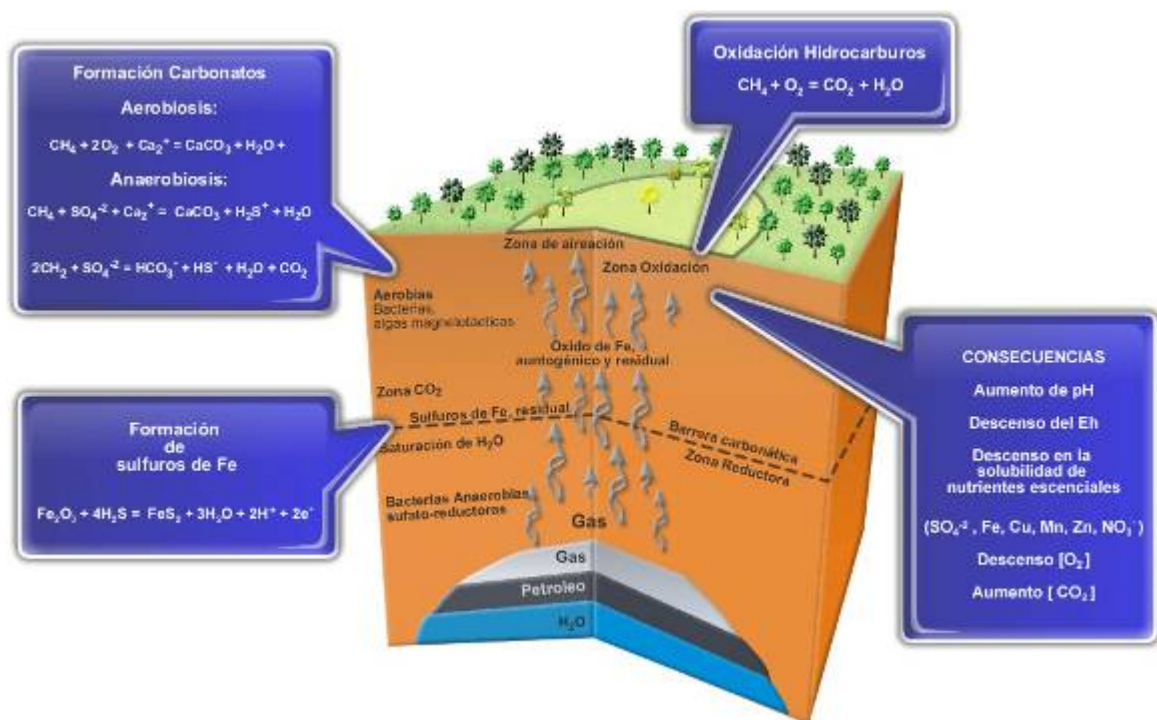


Figura 22. Modelo geoquímico orgánico de las microfugas de hidrocarburos. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2011).

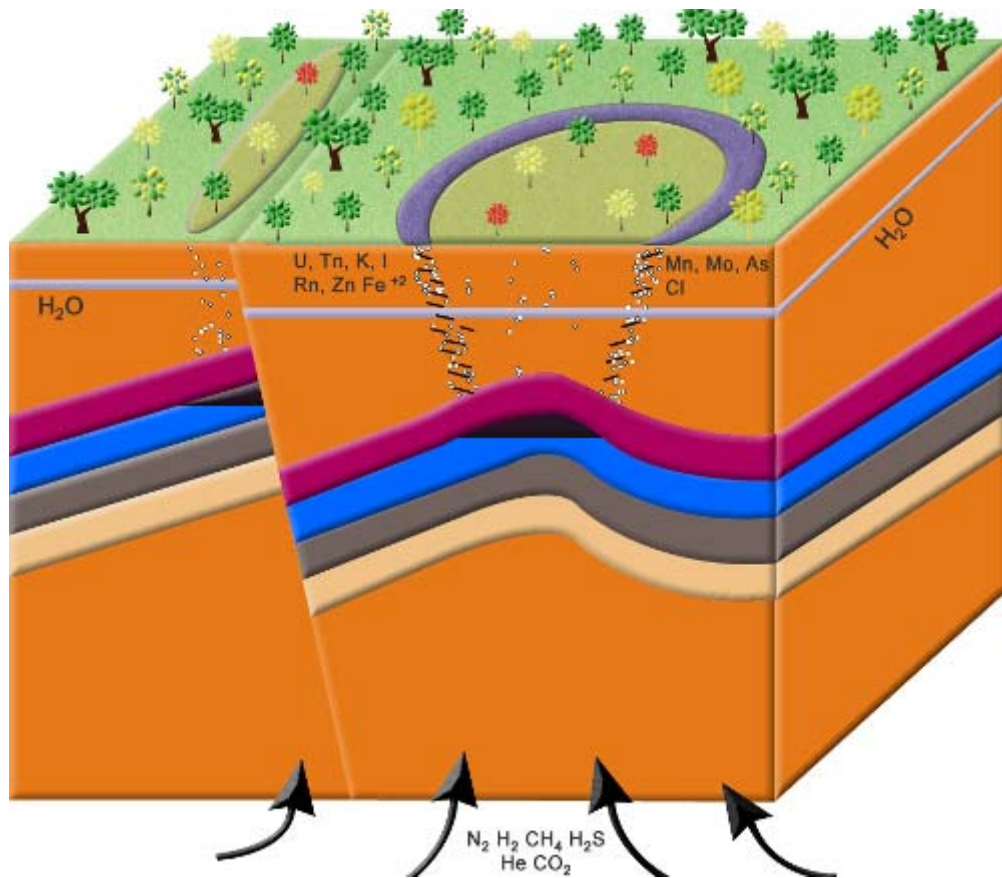


Figura 23. Halos de elementos asociados a acumulaciones de hidrocarburos, cuya presencia puede estar potenciada por gases del manto litosférico. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2011).



Figura 24. Obtención de muestras para geoquímica de suelo con barreno manual. Fotografía gentileza de Bruno Conti.



Figura 25. A, preparación de homogenato. B, eliminación de materia orgánica y siembra. C, incubación. D, recuento de colonias en cápsula de Petri. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2011).



Figura 26. Equipo de fluorescencia de rayos X. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2011).

4.4.5. Geoquímica orgánica

Carbono orgánico total. La materia orgánica existe en diversas formas (como material particulado, en solución, y en estado coloidal) que eventualmente se deposita; si lo hace en ambientes disódicos o anódicos (lagos estratificados, mares restringidos, oceános con eventos oceánicos anódicos) dicha materia orgánica experimenta degradación anaeróbica, que produce un residuo rico en hidrógeno (Núñez-Betelu y Baceta, 1994). El aporte clástico debe ser reducido para no “diluir” el contenido de materia orgánica.

Las rocas generadoras de hidrocarburos son típicamente rocas de grano fino con un contenido de carbono orgánico que usualmente oscila entre 0,5% y 5% (Núñez-Betelu y Baceta, 1994).

Pero es el hidrógeno el factor limitante en la formación de hidrocarburos, aunque sólo será activa la fracción que está ligada a moléculas orgánicas. Por ello, la medición del carbono orgánico total (COT) es el parámetro cuantitativo más empleado en la determinación del potencial hidrocarburiífero de una roca.

Maduración. La maduración de la materia orgánica es un proceso natural, continuo e irreversible que requiere tres factores: temperatura, presión y tiempo. A medida que dicho proceso avanza por el aumento de soterramiento (Fig. 27; Núñez-Betelu y Baceta, 1994; Allix *et al.*, 2011), se pasa de la *diagénesis*, en la que la materia orgánica está inmadura, generándose metano por degradación bacteriana, a la *catagénesis*, en la que se produce petróleo y posteriormente gas húmedo, y de ésta a la *metagénesis*, en la que se genera solamente gas seco (a la vez que productos tales como CO₂, N₂ y H₂S). La catagénesis corresponde aproximadamente a temperaturas de entre 50°C y 150°C. Nótese que el gas generado en la diagénesis es biogénico, consistiendo sólo en metano, mientras que el

gas producido durante la metagénesis es termogénico, e incluye también hidrocarburos más pesados (etano, propano, etc.).

Tipos de kerógeno. El kerógeno (materia orgánica insoluble en solventes orgánicos) puede ser dividido en cuatro tipos (Fig. 28; Núñez-Betelu y Baceta, 1994; Allix *et al.*, 2011), de contenido decreciente en hidrógeno orgánico:

- *Tipo I*: poco común, excelente generador de petróleo (*oil-prone*); de origen frecuentemente lacustre, deriva de restos principalmente algales;

- *Tipo II*: muy común, también generador de petróleo y, cuando aumenta la madurez, de gas; de origen frecuentemente marino, deriva de restos procedentes principalmente de fitoplancton;

- *Tipo III*: generador básicamente de gas (*gas-prone*), a menos que esté enriquecido en, por ejemplo, ceras; este kerógeno de origen terrestre deriva de restos de plantas superiores;

- *Tipo IV*: sin potencial de generación de hidrocarburos; deriva de material leñoso muy alterado por oxidación.

Pirólisis Rock Eval. La pirólisis Rock Eval (Fig. 29), desarrollada en la década de 1970 por el Instituto Francés del Petróleo, es la técnica estándar de la industria petrolera para la caracterización de rocas generadoras. Es un método sencillo (requiere sólo 100 mg de muestra pulverizada), rápido (una muestra se analiza en 20 minutos) y económico.

Siguiendo a Núñez-Betelu y Baceta (1994) y McCarthy *et al.* (2011) consiste en tres etapas: calentamiento de la muestra a 300°C durante 3-4 minutos en atmósfera inerte de helio, calentamiento programado hasta 600°C (a razón de 25°C/minuto), y enfriamiento. El análisis produce un gráfico, denominado pirograma (Fig. 29B), donde se observan diferentes picos correspondientes al carbono pirolizable:

- S1: corresponde a los miligramos de hidrocarburos libres originalmente contenidos en cada gramo de roca, producidos por vaporización durante la primera etapa del análisis (Fig. 29B);

- S2: corresponde a los miligramos de hidrocarburos por gramo de roca generados por el craqueo de la materia orgánica en la segunda etapa del análisis (la pirolisis propiamente dicha); representaría el potencial generador residual de la roca (Fig. 29B);

- S3: corresponde a los miligramos de CO₂ orgánico generados por gramo de roca (Fig. 29B); también puede expresarse en términos de CO.

A estos picos básicos se le agregan los picos S4 (expresados en términos de CO₂ y CO) y S5, relacionados al carbono residual correspondiente a la oxidación y el carbono mineral correspondiente a la descomposición de carbonatos, respectivamente (Fig. 29B). En este trabajo sólo se considerarán los picos S1, S2 y S3.

A su vez se definen o calculan los siguientes parámetros:

- Tmax: es la temperatura máxima del pico S2, e indica el grado de madurez térmica alcanzado por el kerógeno (aunque no se corresponde con la temperatura efectivamente alcanzada en la naturaleza por soterramiento). Según el tipo de kerógeno, una Tmax de 435°C (tipo II) a 445°C (tipo I) corresponde al inicio de la ventana del petróleo. La ventana del gas comenzaría a Tmax de 470 °C.

- S1/COT*100 (*contenido de petróleo normalizado*): es un indicador de la presencia de acumulaciones de hidrocarburos (ya sea en zonas productivas o como resultado de contaminación), así como de las condiciones de madurez de una roca generadora.

- S2/COT (*índice de hidrógeno, o IH*): expresa la cantidad de hidrocarburos pirolizables de S2 en relación al COT. Es un indicador de la calidad de la materia orgánica. Una roca con IH menor a 200 mg HC/g COT generará gas, entre 200 y 300 mg HC/g COT petróleo y gas, y mayor a 300 mg HC/g COT petróleo.

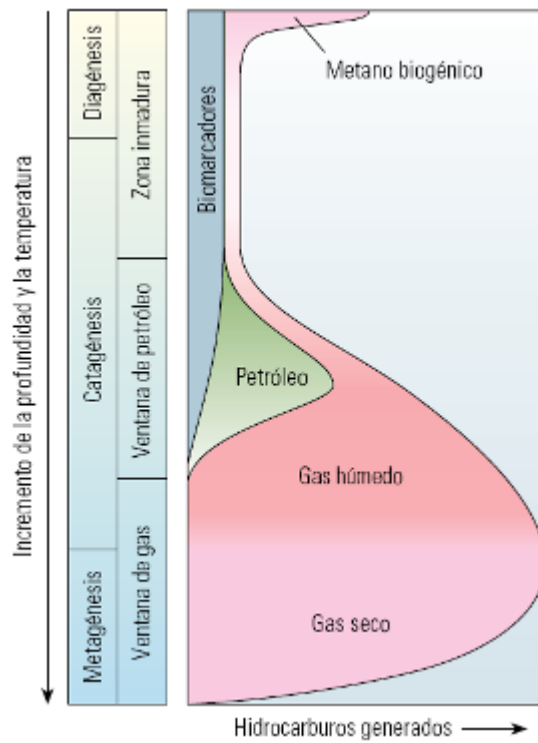


Figura 27. Transformación térmica del kerógeno. Tomado de McCarthy *et al.* (2011).

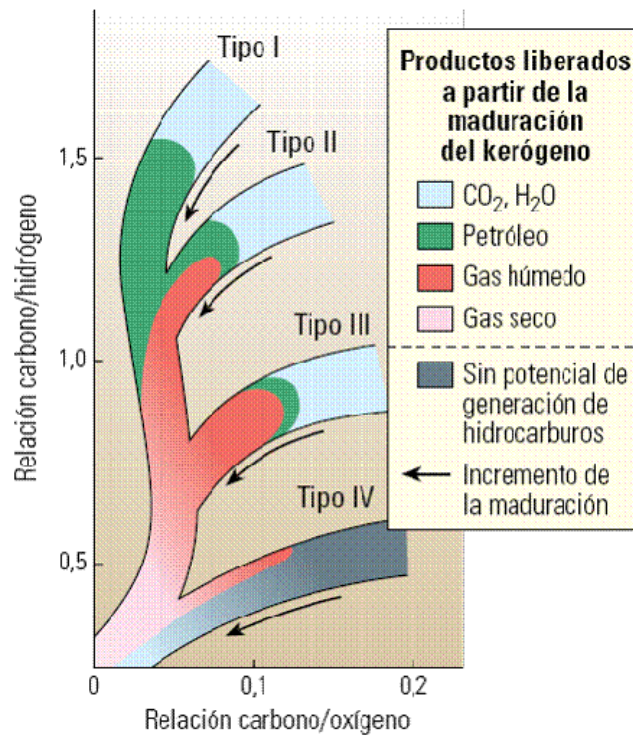


Figura 28. Diagrama de Van Krevelen, ilustrando los tipos de kerógeno, maduración y productos liberados. Tomado de Allix *et al.* (2011).

- S3/COT (*índice de oxígeno*, o *IO*): expresa la cantidad de CO₂ de S3 en relación al COT. La materia orgánica de origen terrestre presenta mayores valores de OI que los otros tipos.

- S2/S3: representa la cantidad de hidrocarburos que pueden ser generados por una roca en relación al CO₂ orgánico liberado en la primera etapa del análisis. La razón S2/S3 es considerablemente menor en el kerógeno tipo III, dado que la materia orgánica de origen terrestre contiene una cantidad de oxígeno significativamente mayor a la de los tipos I y II.

- S1/(S1+S2) (*índice de producción*, o *IP*): es un indicador de la cantidad de hidrocarburos que han sido producidos geológicamente en relación a la cantidad total de hidrocarburos que la roca es capaz de producir.

En el presente trabajo, se seguirán los valores de parámetros geoquímicos reportados por Peters y Casa (1994) para la caracterización de las rocas generadoras (Tablas 7 y 8).

Microscopía del kerógeno. La materia orgánica posee componentes, análogos a los minerales de las rocas, denominados *macerales* (concepto originalmente empleado para caracterizar los diferentes tipos de carbón), que pueden ser reconocidos por su química, morfología y reflectancia (Peters y Cassa, 1994). Los análisis de microscopía del kerógeno permiten determinar el tipo de kerógeno y la proporción de los diferentes macerales.

Determinación de madurez. Existen numerosos métodos para estimar la temperatura máxima a la que el kerógeno fue sometido, distinguiéndose entre paleotermómetros químicos y paleotermómetros biológicos. Entre los paleotermómetros químicos se encuentran el método de la tasa de carbono, la técnica de resonancia de *spin* de electrones, la pirólisis, el análisis de minerales de arcilla y estudios de inclusiones de fluidos.

Entre los paleotermómetros biológicos son muy valiosos para estudios de madurez tanto la vitrinita como diversos fósiles (conodontes, graptoliti-

tos, escolecodontes, acritarcas, polen y esporas; Fig. 30), dado los cambios consistentes que experimentan su color y reflectancia con la profundidad de soterramiento (por una revisión, ver Al-Mashramah, 2011). En la Fig. 31 se presenta una comparación entre diferentes técnicas. Según el ambiente depositacional y la edad será más apropiado emplear un grupo que otro. Por ejemplo, siguiendo a Al-Mashramah (2011):

- los graptolites son más comunes en clásticos finos del Ordovícico al Silúrico;
- los escolecodontes son más frecuentes en carbonatos marinos someros del Ordovícico al Devónico;
- los conodontes son más comunes en facies marinas carbonáticas del Cámbrico al Triásico, y proveen información incluso habiendo alcanzado temperaturas de 500°C.
- las esporas y el polen, así como la vitrinita, se emplean en ambientes continentales y marinos costeros del Devónico al Reciente;

En este trabajo se contemplarán solamente la reflectancia de vitrinita (Fig. 30A) y el índice de alteración térmica basado en el color de polen y esporas (Fig. 30B; Tabla 9).

La vitrinita es un maceral (correspondiente al kerógeno tipo III), cuyo número de anillos aromáticos aumenta a medida que se incrementa su madurez, lo que resulta en un aumento de su reflectancia (R_o) al microscopio. Valores de R_o menores a 0,6% corresponden a una materia orgánica inmadura; entre 0,6% y 1,1% a la ventana del petróleo; entre 1,1% y 1,4% a la ventana de gas húmedo y condensado; y entre 1,4% y 3,2% a la ventana de gas seco. Este método es la técnica estándar para determinación de madurez en la industria del petróleo.

A



B

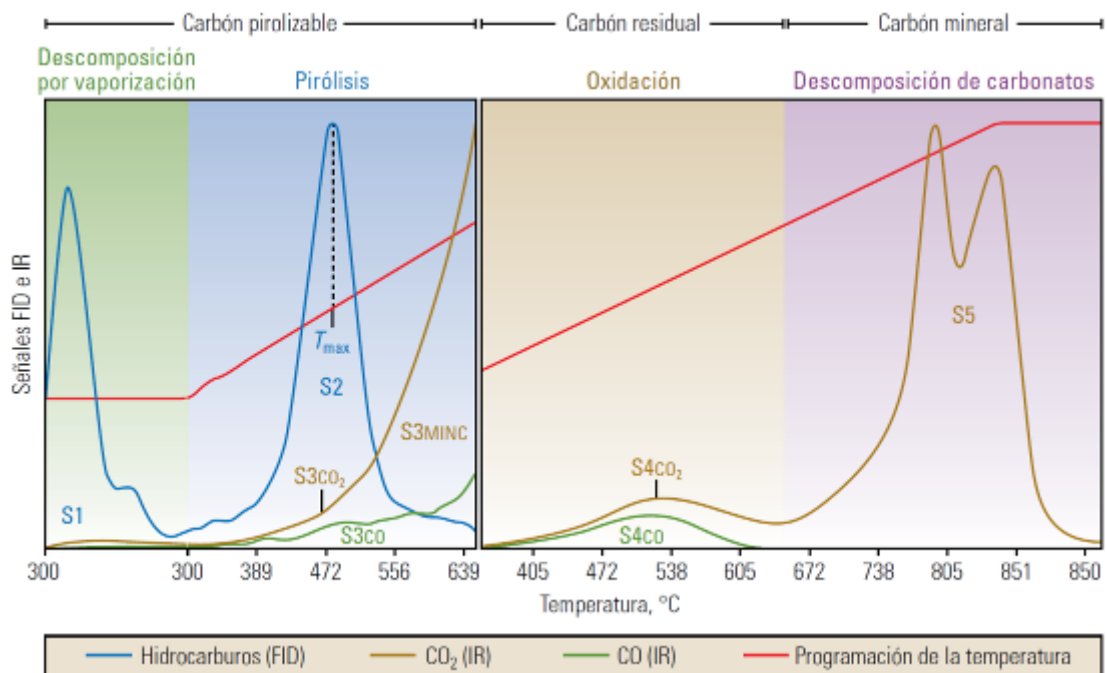


Figura 29. A, pirolizador Rock Eval 6. **B**, resultado de la pirólisis, indicándose los picos S1, S2 (cuya temperatura corresponde a T_{max}), S3 (desdoblado en CO y CO₂), S4 (idem) y S5. Tomado de McCarthy *et al.* (2011).

Tabla 7. Parámetros geoquímicos para rocas generadoras. Tomado de Peters y Cassa (1994).

Potencial de petróleo	COT (%)	S1 (mg HC/g roca)	S2 (mg HC/g roca)
Pobre	0-0,5	0-0,5	0-2,5
Regular	0,5-1	0,5-1	2,5-5
Bueno	1-2	1-2	5-10
Muy bueno	2-4	2-4	10-20
Excelente	>4	>4	>20

Tabla 8. Parámetros geoquímicos para tipos de kerógeno y sus productos asociados. Tomado de Peters y Cassa (1994).

Tipo de kerógeno	IH	S2/S3	Producto principal generado
I	>600	>15	Petróleo
II	300-600	10-15	Petróleo
II/III	200-300	5-10	Petróleo y gas
III	50-200	1-5	Gas
IV	<50	<1	Ninguno

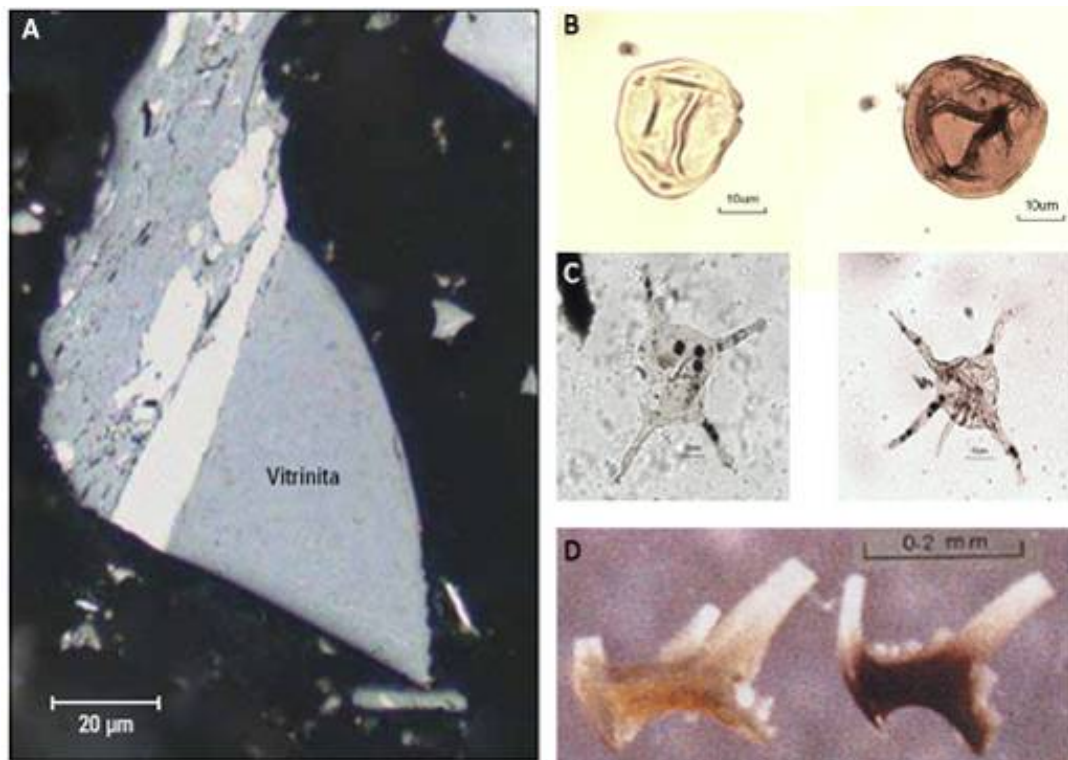


Figura 30. A, reflectancia de vitrinita. B, esporas. C, acritarcas. D, conodontes. En los casos B a D, la coloración (y por tanto la madurez) aumenta de izquierda a derecha. Modificado de Al-Mashramah (2011) y McCarthy *et al.* (2011).

Tabla 9. Comparación entre índice de alteración térmica (TAI), el color de esporas y polen y la generación de hidrocarburos. Modificado de Al-Mashramah (2011)

TAI	Color de esporas y polen	Etapas de madurez	Hidrocarburo asociado
1 (sin alteración)	Amarillo claro a amarillo	Diagénesis	Gas biogénico
2 (leve)	Amarillo a anaranjado	Catagénesis	Petróleo
3 (moderado)	Marrón		Gas húmedo
4 (intenso)	Negro amarronado a negro	Metagénesis	Gas seco
5 (intenso)	Negro vítreo		

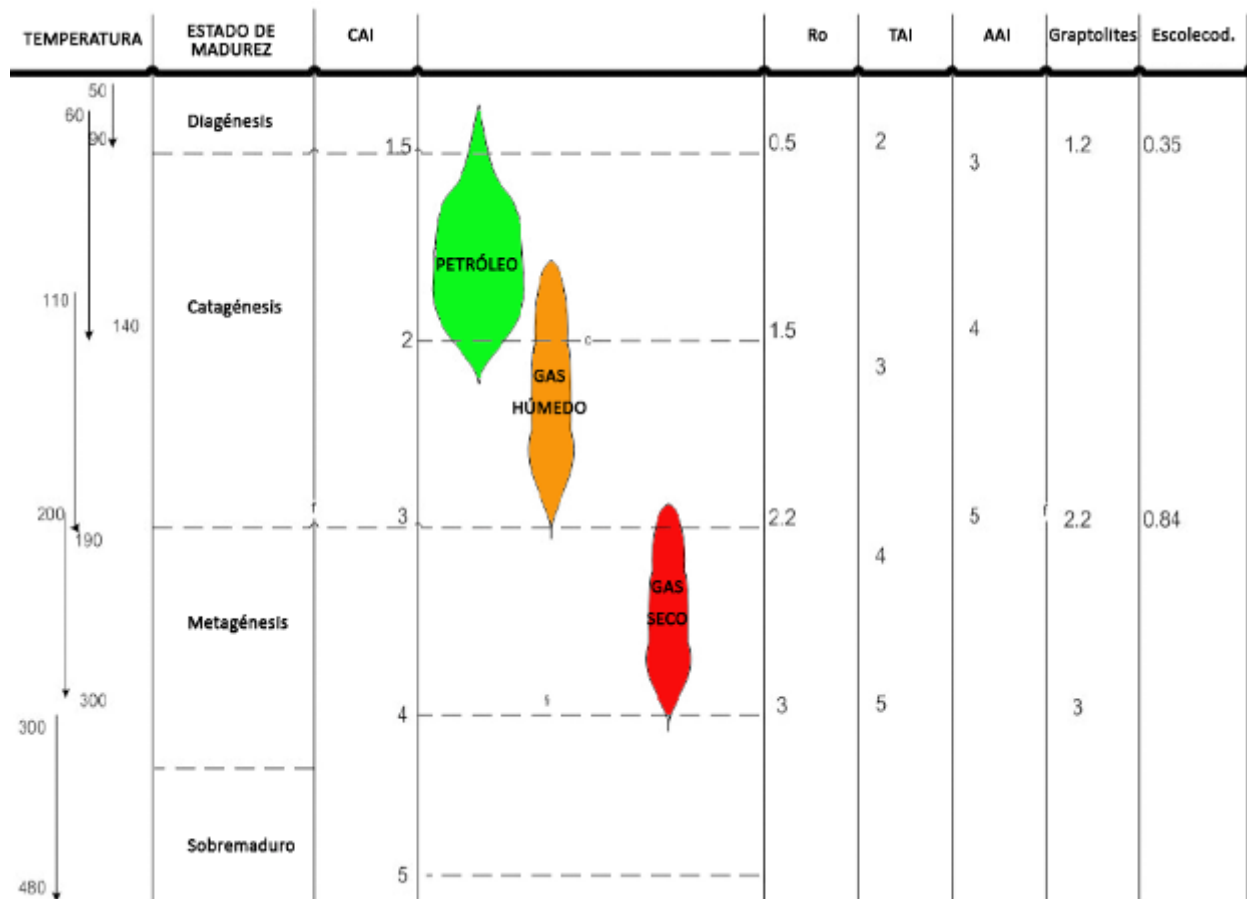


Figura 31. Ventanas del petróleo, gas húmedo y gas seco y comparación con diferentes medidas de madurez: índice de alteración de conodontes (CAI), reflectancia de vitrinita (Ro), índice de alteración térmica (TAI), índice de alteración de arcillas (AAI), graptolites y escolecodontes. Modificado de Al-Mashramah (2011)

4.4.6. Radiactividad gamma natural

En la naturaleza existen tres isótopos radiactivos que al decaer emiten radiaciones gamma: ^{40}K , ^{235}U y ^{232}Th , isótopos que mayormente provienen de minerales que suelen formar parte de granitos y pegmatitas (Tabla 10; Kearey *et al.*, 2002). La energía de dichas emisiones gamma es diferente en los tres casos, lo que permite diferenciarlas al ser registradas por un espectrómetro (Fig. 32).⁶

Las rocas sedimentarias pueden diferenciarse por su mayor o menor radiactividad natural gamma. Las arcillitas suelen tener altas lecturas debido al contenido en ^{40}K (y también en ^{235}U en los casos de elevado contenido en materia orgánica), mientras que areniscas maduras (cuarzosas) dan bajas lecturas. Valores intermedios se encuentran en areniscas micáceas, feldespáticas (arcósicas) o arcillosas. Esto permite inferir facies sedimentarias, aunque diferentes ambientes pueden tener respuestas similares.

ANCAP adquirió un espectrómetro de mano BGO Super Spec RS 230 (Fig. 33), que posee un cristal de germanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), de menores dimensiones y más sensible que los tradicionales cristales de yoduro de sodio (NaI).

Con dicho espectrómetro se midió metro a metro (con algunas excepciones en el basalto o tramos sin recuperación de areniscas) los testigos de todos los pozos (salvo el tramo final de algunos pozos de Quintana, por razones operativas), durando cada medida entre 40 segundos y 1 minuto. Se obtienen así medidas de conteo total y las correspondientes al K, U y Th, expresadas todas tanto en cuentas por segundo como en ppm (con la excepción del K, dado que su abundancia vuelve más conveniente expresarlo como porcentaje).

⁶ Estrictamente, lo que el espectrómetro registra son las contribuciones del ^{40}K , ^{214}Bi y ^{208}Tl (Fig. 35).

Tabla 10. Ocurrencia de los tres isótopos que emiten radiaciones gamma en la naturaleza. Tomado de Kearey *et al.* (2002).

Elemento	Ocurrencia
K	ortosa y microclina (ígneas ácidas y pegmatitas) muscovita (ígneas ácidas y pegmatitas) alunita (alteración de volcánicas ácidas) silvita y carnalita (evaporitas)
U	uraninita (granitos, pegmatitas y depósitos de venas) carnotita (areniscas) gummita (asociada a uraninita)
Th	monacita (granitos, pegmatitas, gneisses) torianita (granitos, pegmatitas, placeres) torita, uranotorita (granitos, pegmatitas, placeres)

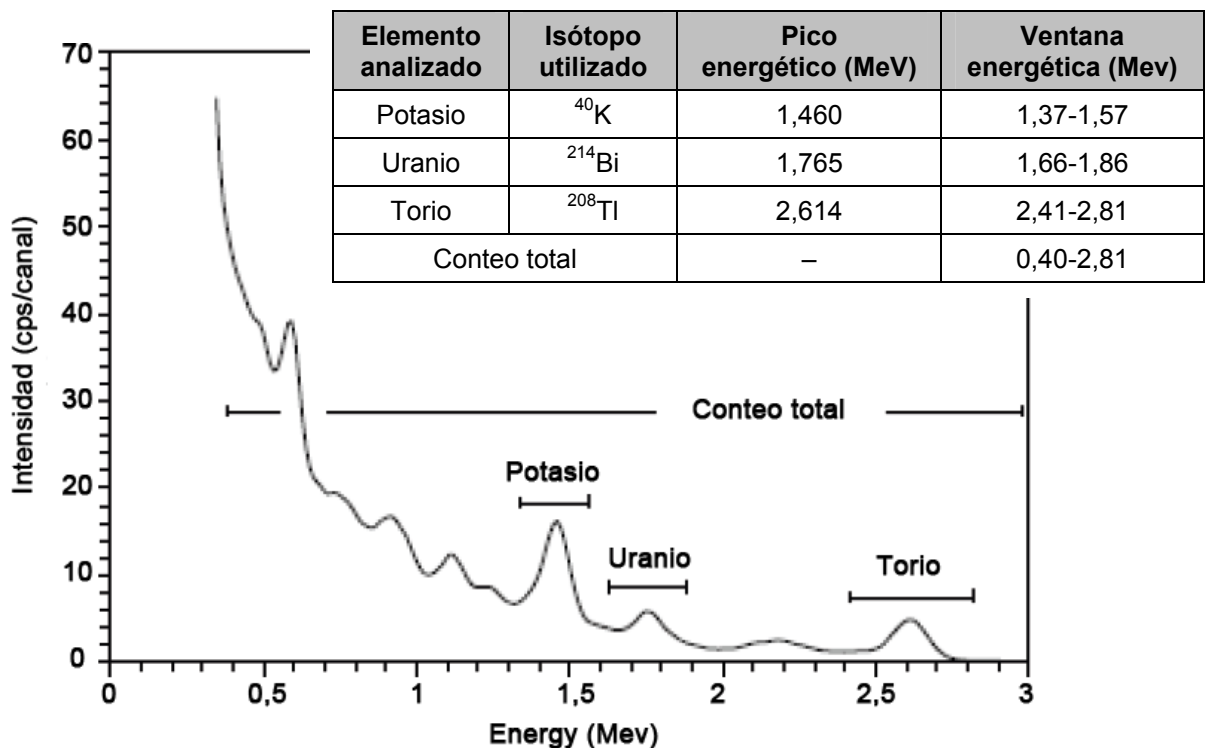


Figura 32. Picos y ventanas energéticas registradas por el espectrómetro, e isótopos correspondientes. Modificado de López (2013).



Figura 33. Espectrómetro BGO Super Spec RS 230 propiedad de ANCAP.

4.3.7. Petrografía

Las láminas delgadas para análisis petrográficos se confeccionaron según la técnica estándar, desarrollada en 1851 por Henry C. Sorby para estudiar calizas del Jurásico de Inglaterra (Adams *et al.*, 1997): la roca se corta, se monta y se pule hasta alcanzar un espesor de unas 30 micras.

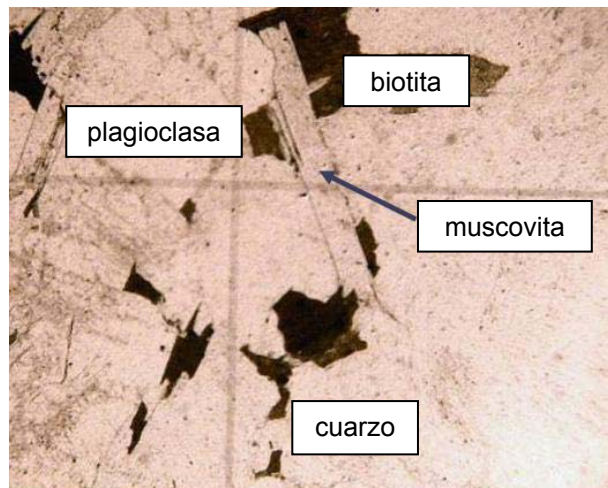
Las láminas delgadas se examinan luego en el microscopio petrográfico (Fig. 34A).

El microscopio petrográfico permite analizar interesantes propiedades de los minerales, tales como birrefringencia, pleocroísmo, ángulo de extinción, forma de los cristales, todo lo cual lleva a definir las especies minerales presentes (Fig. 34B-C).

A



B



C

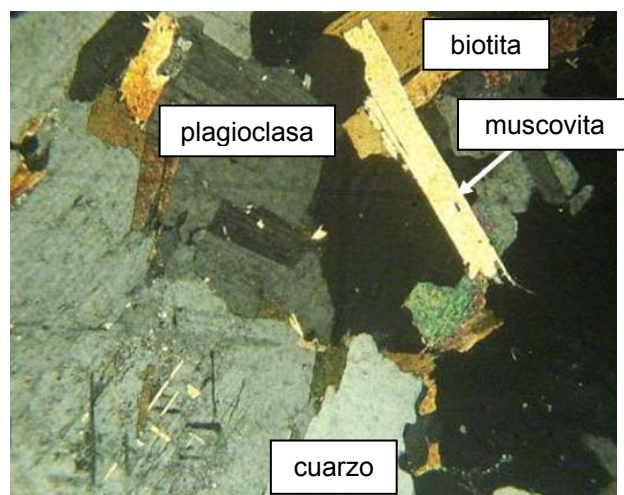


Figura 34. **A**, microscopio petrográfico. **B-C**, lámina de granito; se indican algunos minerales. **B**, “nícoles paralelos” (sin analizador, luz polarizada plana). **C**, “nícoles cruzados” (con analizador).

Asimismo es fundamental para estudiar la textura de las rocas; determinar la presencia de maclas, inclusiones, fracturas, cemento; realizar análisis de diagénesis, microtectónica, etc.

4.3.8. Palinología

La micropaleontología se ocupa de un grupo particular de fósiles denominado microfósiles (Fig. 35). La palinología, en particular, es una rama de la micropaleontología que tiene por objeto el estudio de los *palinomorfos*. Éstos son un variado grupo de restos que representan órganos, partes de órganos o tejidos, organismos solitarios, colonias, estructuras de resistencia de organismos, etc. (Daners y Verde, 2008). Los análisis palinológicos son fundamentales en estudios de:

- paleoecología, dado que contribuyen a determinar, por ejemplo, la salinidad de un ambiente y su cercanía al continente; como sintetizan Daners y Verde (2008), los palinomorfos marinos más frecuentes son las acritarcas, los quitinozoarios y los quistes de dinoflagelados, y entre los continentales, las esporas y los granos de polen;
- bioestratigrafía, dado que muchos microfósiles son excelentes fósiles guía;
- madurez de la materia orgánica (puesto que el color de los palinomorfos bajo luz UV es un indicador del grado de madurez alcanzado por la materia orgánica).

Las láminas para palinología fueron preparadas de acuerdo a la técnica descrita, entre otros, por Enciso-De la Vega (1992). Los pasos incluyen:

- molido de la muestra (si ésta es consolidada)
- acetólisis (digestión ácida empleando HCl y otros ácidos)
- centrifugado
- lavado
- teñido (para obtener mejores imágenes)
- montaje para observación al microscopio

Debe tenerse gran precaución para no contaminar la muestra, desde la colecta de la misma en el campo hasta su procesado en el laboratorio. Hay ciertas particularidades en el procedimiento dependiendo de si los microfósiles a estudiar son carbonáticos, silíceos, fosfáticos, etc.

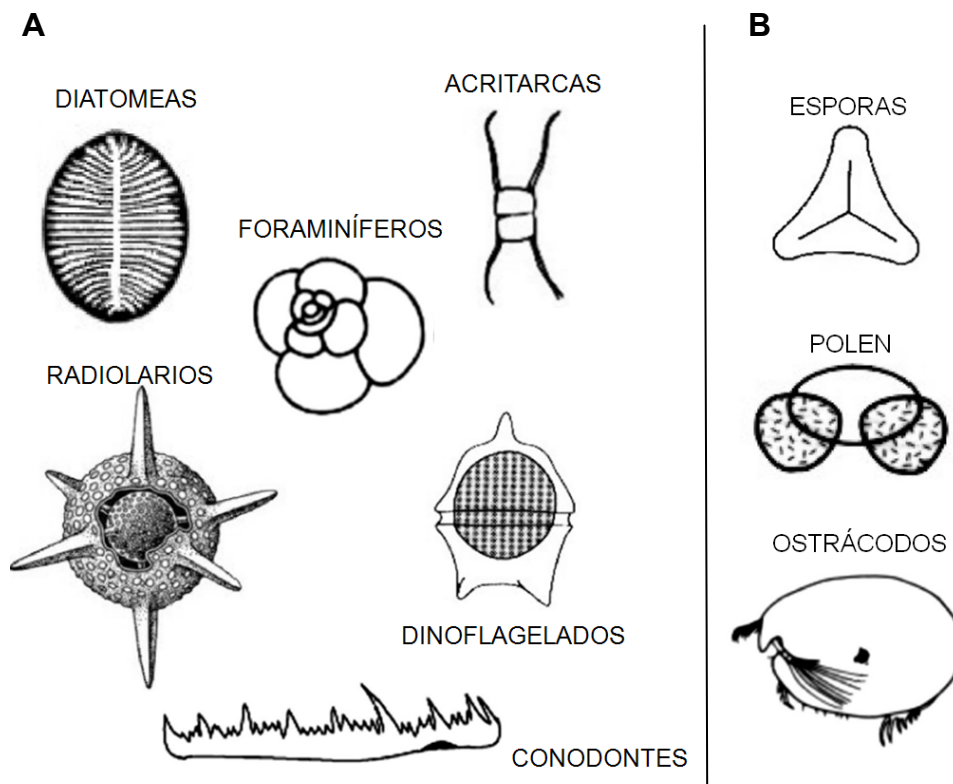


Figura 35. Ejemplos de microfósiles. **A**, microfósiles fundamentalmente marinos (aunque existen subordinadamente diatomeas, foraminíferos y dinoflagelados de ambientes salobres o dulceacuícolas). **B**, microfósiles continentales. Modificado de Daners y Verde (2008).

4.3.9. Perforaciones de estudio

Las seis perforaciones realizadas consistieron en pozos verticales de estudio, con extracción continua de testigos, alcanzando en todos los casos el basamento cristalino, permitiendo por tanto conocer toda la columna estratigráfica atravesada.

La duración de cada perforación osciló entre tres a seis semanas, incluyendo imprevistos tanto vinculados al equipo (rotura de piezas) como

naturales (lluvias copiosas, tormentas, etc.). Al término de cada perforación, la misma se selló con cemento para evitar tanto surgimiento de agua desde el pozo como pasaje de agua entre los diferentes niveles porosos y permeables atravesados.

Estas perforaciones presentaron características muy similares a las perforaciones que se realizan para alumbrar aguas subterráneas, no generando contaminación de napas freáticas, ni alteración significativa del terreno.

Para la realización de los pozos, se empleó una perforadora a diamantina Atlas Copco modelo CS14 (Fig. 36), con capacidad de perforación de hasta 1200 m en diámetro "N" y hasta 1500 m en diámetro "B", propulsada por un motor diesel con potencias que oscilan entre 150 a 240 CV, con sistema hidráulico, chasis fijo montado sobre 4 ruedas para transporte, cabezal giratorio 360°, *wire-line* accionado hidráulicamente, con torre inclinable, barras de perforación de 3 metros y bomba de lodo externa.

Las perforaciones se realizaron en diámetro "H" (diámetro corona: 95 mm, diámetro testigo: 64 mm) y, a mayor profundidad, "N" (diámetro corona: 75 mm, diámetro testigo: 47 mm), con barras, guías, revestimientos y herramientas correspondientes al diámetro definido y equipos perforadores diseñados para el fin propuesto. Para la operación se utilizaron coronas diamantadas y tubos saca testigos. Para alcanzar la profundidad pretendida (basamento) se van agregando barras (de 3 metros de largo) a medida que la perforación va avanzando.

La máquina perforadora fue comandada por un perforador senior, con 3 ayudantes. Se perforó a un ritmo de 40-50 metros por día durante 8 hs de trabajo diario efectivo. En las perforaciones básicamente se utilizó agua como fluido de perforación (entre 1.000 y 1.500 litros por día), para la lubricación de la corona y la estabilización del pozo. El agua se recirculó en un circuito cerrado, integrado por piletas de decantación (previamente excavadas) de 1,5 m de profundidad y 4 m² de superficie. En la pileta va

decantando la roca molida, cuyo volumen depende de la profundidad de la perforación, recuperándose el agua para ser utilizada nuevamente.

Finalizada la perforación, la roca molida permanece decantada en el tanque, procediéndose a la cobertura de la pileta con el propio material excavado durante su preparación. Todas las conexiones entre piletas, tanque y perforadora son a través de conexiones flexibles, del tipo plásti-ducto de alta resistencia, y con mangueras a la perforadora.

Los testigos de perforación obtenidos se acondicionaron en cajones de madera, según el diámetro en tres a cuatro tramos (de un metro de largo cada uno) por cajón. Se indicó en cada cajón y de forma sistemática la identificación de la perforación y las profundidades relativas de cada avance (en general cada 3 metros), así como referencia estratigráfica, tope y base de los tramos y trozos de roca obtenidos en los testigos recuperados, y la identificación de las secciones a muestrear.

Sobre los testigos se realizó descripción de litologías, estructuras sedimentarias y fósiles; determinación de radiactividad gamma espectral; láminas petrográficas y análisis de diversos tipos.



Figura 36. Máquina perforadora *Atlas Copco CS14*. Tomado de www.atlascopco.com.

CAPÍTULO II

RESULTADOS

1. GEOLOGÍA DE SUPERFICIE

Se realizó un mapa geológico general del área de estudio, así como dos mapas geológicos de detalle de las localidades perforadas (Cañada del Charrúa y Quintana). Estos tres mapas se presentan como Anexos.

Como resultado de los relevamientos de superficie, se distinguieron las siguientes unidades de rocas (denominadas de la misma manera que lo hicieran Veroslavsky *et al.*, 2012), de base a tope: basaltos inferiores (con areniscas intercaladas), basaltos superiores, brechas volcánicas y conglomerados aluviales.

A la lista anterior deben agregarse basaltos particulares (basaltos “B”), ignimbritas y areniscas con clastos de basalto vacuolar, estas últimas descritas por primera vez para este trabajo. A continuación se describirán los litotipos reconocidos en el área de estudio.

1.1. Areniscas

Los afloramientos de areniscas dominan en la zona centro y Sur del área de estudio (Fig. 37A), a cotas promedio de 229 m. Se caracterizan por afloramientos más generosos pero más discontinuos que los de los de la mayoría de los basaltos, con potencias de entre 0,5 y 5 m y extensiones laterales de decenas a centenas de metros (incluso conformando planchones en el caso de areniscas silicificadas). En fotos satelitales adquieren una tonalidad gris azulada que las hacen fácilmente identificables en imágenes Google Earth (Fig. 37B).

Las areniscas son en todos los casos de grano fino a medio, bien seleccionadas, redondeadas, de composición esencialmente cuarzosa (cuarzoarenitas), de color anaranjado o rojizo (Anexo A, Figs. A1 a A3), que se vuelve grisáceo superficialmente en zonas silicificadas (Anexo A, Fig. A3). La estructura sedimentaria omnipresente es estratificación cruzada de alto ángulo (en torno a 30°) y gran porte (Anexo A, Figs. A1 a A3). Estas areniscas se interpretan como depósitos de dunas eólicas (de

hecho el basalto ha preservado localmente el paleorelieve convexo original de las mismas). No se hallaron evidencias de rocas sedimentarias que pudieran atribuirse a un origen subacuático, ni fósiles.

El metamorfismo de contacto producto de la interacción de las lavas básicas con las areniscas infrayacentes provocó que los primeros decímetros de la arenisca experimentaran un intenso proceso de silicificación (Figs. A3 y A7).⁷ Estas areniscas silicificadas resisten diferencialmente a la erosión, conformando cornisas que constituyen un nivel guía en los cerros de la zona. Las cornisas ocasionalmente presentan un basculamiento de entre 14° y 27° hacia el SE (Anexo A, Figs. A4 y A5). Localmente aparecen planos silicificados inclinados en la arenisca buzando entre 18 y 40°. Estos planos pueden estar recorridos por estrías (ver más adelante).

Generalmente las areniscas infrayacen a los basaltos (Anexo A, Figs. A1 y A6); si también los suprayacen, litoestratigráficamente estos depósitos corresponden a areniscas de *intertrap* que, por definición, integran la Formación Arapey. De hecho se han identificado estratos tabulares de arenisca interestratificados con basaltos.

No obstante, algunas perforaciones del área (pozo Pepe Núñez-E-1 y molino) no cortaron basaltos infrayacentes a las areniscas, por lo que litoestratigráficamente otros depósitos (que presentan potencias y sobre todo extensiones laterales no despreciable) pueden ser referidos al Miembro Rivera de la Formación Tacuarembó (Perea *et al.*, 2009).

En algunos casos las areniscas están recortadas por numerosas venillas de origen hidrotermal (Anexo A, Fig. A8) o por diaclasas subortogonales (Anexo A, Fig. A9). El afloramiento más septentrional de areniscas (P84) presenta conspicuas evidencias de disolución (Anexo A, Fig. A10).

Es común la presencia de óxidos negruzcos, posiblemente de manganeso (Anexo A, Fig. A11).

⁷Precisamente, la fractura concoide de las areniscas silicificadas determina bordes cortantes, por lo que estos materiales fueron empleados por los charrúas para fabricar puntas de flecha (Fig. A1).

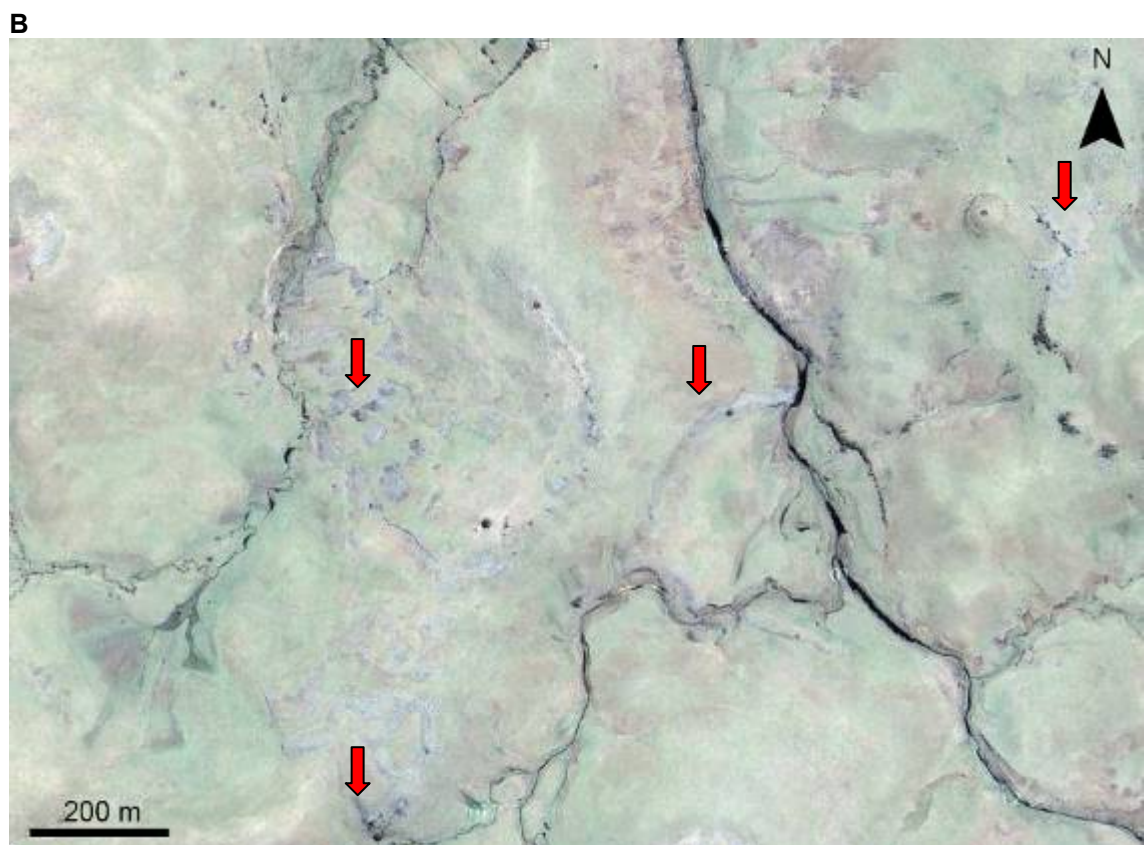
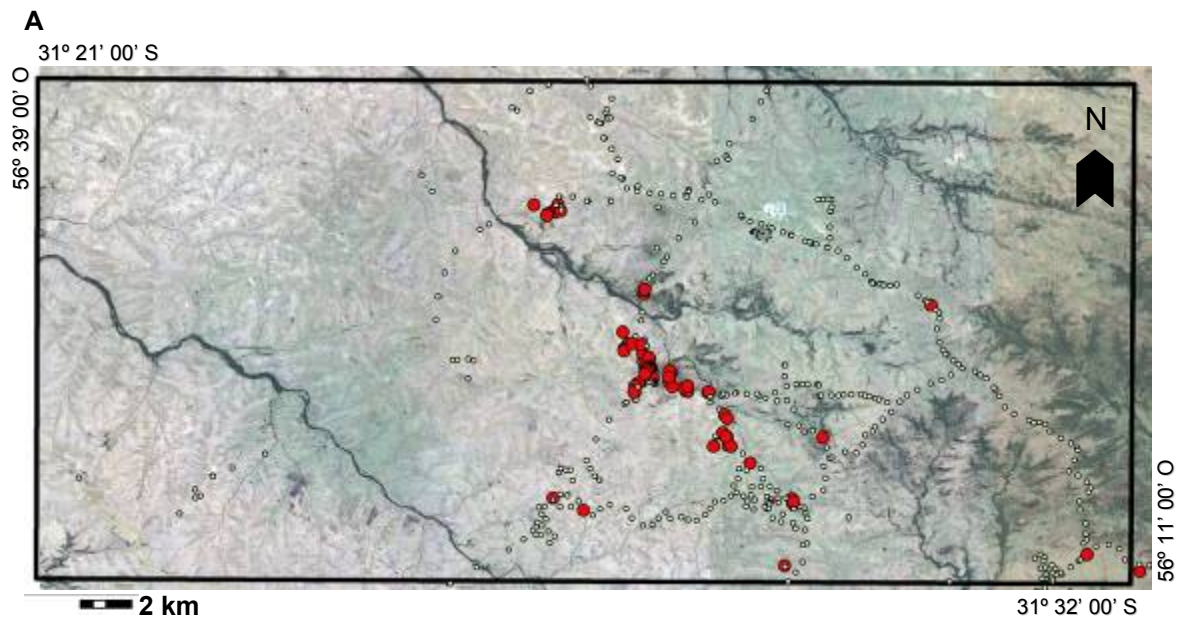


Figura 37. Areniscas. **A**, afloramientos mapeados en el área (puntos rojos). **B**, ejemplos de texturas de areniscas en imagen Google Earth.

1.2. Basaltos grises afaníticos

Éste es el litotipo más abundante del área de estudio (Fig. 38A), estando presente en los valores mínimos (159 m) y máximos (402 m) de cotas (promedio 268 m), representando obviamente diferentes coladas. Si bien cubren áreas mucho más extensas y continuas que otras litologías (areniscas, brechas) los afloramientos suelen estar poco desarrollados (Fig. 38^a y Anexo A, Figs. A12), muchas veces a ras del suelo, excepto en algunos cursos de agua (Anexo A, Fig. A14), canteras y desmontes.

El basalto puede aparecer fresco (en cuyo caso la coloración es gris verdosa o gris oscura; Anexo A, Figs. A13 y A15C) o, como suele ocurrir en desmontes carreteros, alterado (Anexo A, Figs. A18 a A20). La apariencia del basalto es generalmente masiva, como es típico de la porción media de una colada, aunque se ha observado tanto basalto amigdaloides, asociado al tope o base de las coladas basálticas (Anexo A, Fig. A18), como basalto lajoso (Anexo A, Fig. A18) que corresponde a la porción basal. Los basaltos amigdaloides, de color rojizo a violáceo, presentan vacuolas milimétricas a centimétricas rellenas de cuarzo, ceolita y calcita, presentando asimismo recortes de cuarzo cristalino y calcita (Anexo A, Fig. A16).

Cuando el basalto está expuesto en planta se observa diaclasado (Anexo A, Fig. A17), también apreciable en fotografías satelitales Google Earth. Ocasionalmente en desmontes puede observarse disyunción esferoidal (Anexo A, Fig. A19) o bien disyunción columnar pobremente definida (Anexo A, Fig. A20), consideradas producto del enfriamiento de la lava básica. Es común que el basalto esté recortado por diques clásticos.

En relación a las areniscas, el basalto puede aparecer en posición estratigráfica tanto inferior como superior, en cuyo caso el contacto está marcado por una cornisa de arenisca silicificada; por encima, el basalto exhibe un cambio de pendiente y de vegetación (Anexo A, Fig. A15). En relación a las brechas volcánicas, se ha observado basalto masivo y vacuolar suprayaciendo e infrayaciendo a las mismas.

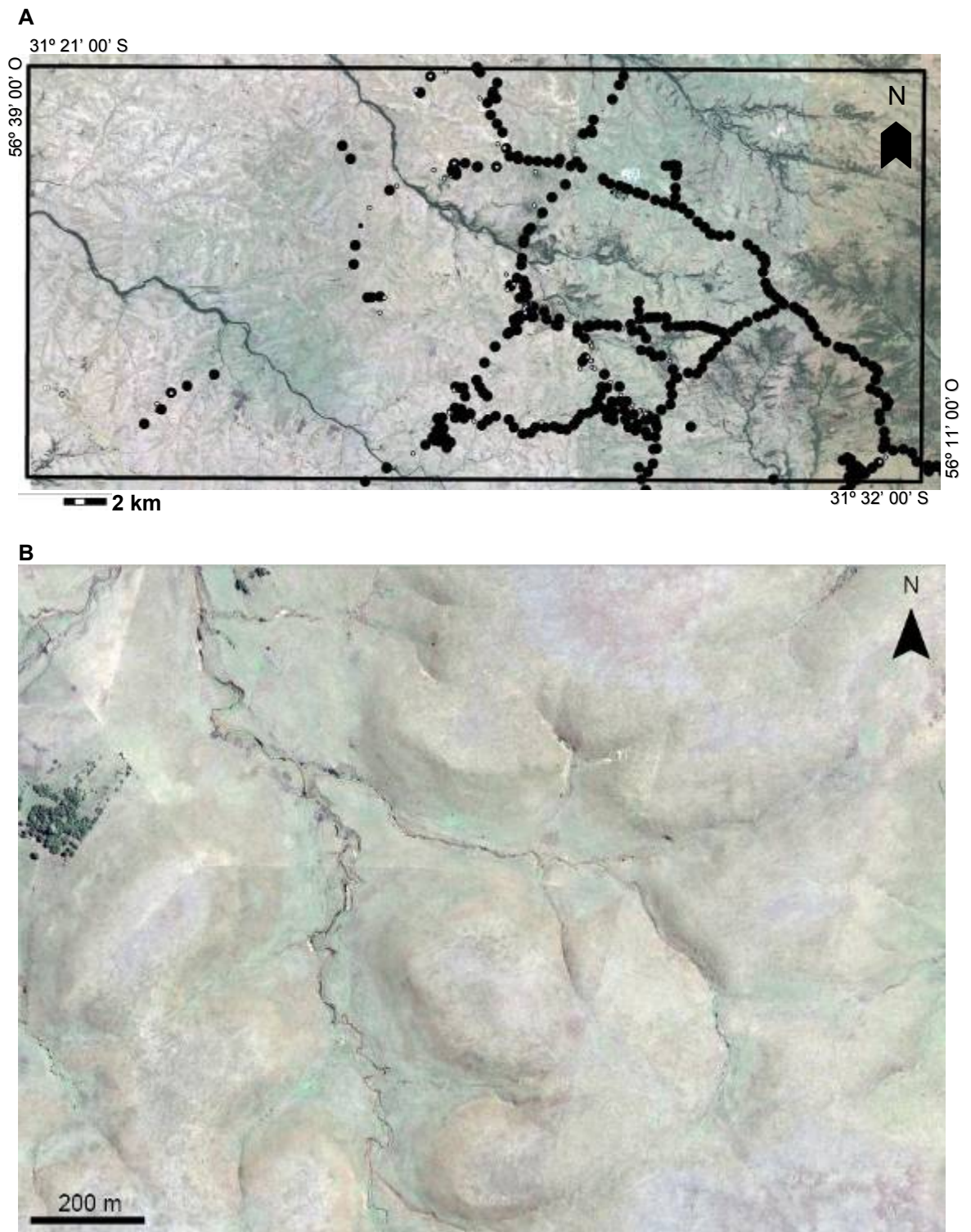


Figura 38. Basaltos. **A**, afloramientos mapeados en el área (puntos negros). **B**, ejemplo de texturas de basaltos en imagen Google Earth.

1.3. Basaltos negros afaníticos con disyunción columnar

Este litotipo es poco frecuente (Fig. 39A), y se desarrolla a cotas cercanas o superiores a 300 m. En imágenes satelitales sobresalen como cerros conspicuos en comparación con las zonas adyacentes, exhibiendo dos morfologías posibles: circular y tipo filón (Fig. 39B-C; Anexo A, Figs. A21 y A22). Los afloramientos mapeados presentan mayor desarrollo que en el caso de los basaltos anteriormente mencionados (Anexo A, Fig. A23).

Estos basaltos presentan en todos los casos prismas producto de disyunción columnar, bien definidos, que no son verticales sino que presentan un moderado basculamiento, en general hacia el NE (Anexo A, Fig. A23).⁸

Se trata de basaltos que se presentan siempre frescos, de color gris verdoso oscuro a negro (Anexo A, Fig. A24), afaníticos (a excepción de fenocristales centimétricos de feldespato alcalino observados en el Cerro del Charrúa: Anexo A, Fig. A24C).

Los cerros Bonito y Picazo, por un lado, y el Cerro de la Virgen por el otro, fueron interpretados por Veroslavsky *et al.* (2012) como *necks* cilíndricos y fisurales (fisura de N110), respectivamente. En este trabajo se interpretan como diques alimentadores (*feeder dikes*), adicionando el Cerro del Charrúa, un cerro innominado (Fig. 39C), y probablemente el Cerro Cololó (fuera del área, al Oeste de Quintana).

Veroslavsky *et al.* (2012) se refieren a estos basaltos como basaltos “B”, denominación que aquí se mantiene.

⁸ La fracturación de dichos prismas causa que las laderas de los cerros estén cubiertas por bloques de basalto, que eran aprovechados por los charrúas para construir círculos de piedra en la cima de esos mismos cerros (Anexo A, Fig. A25).

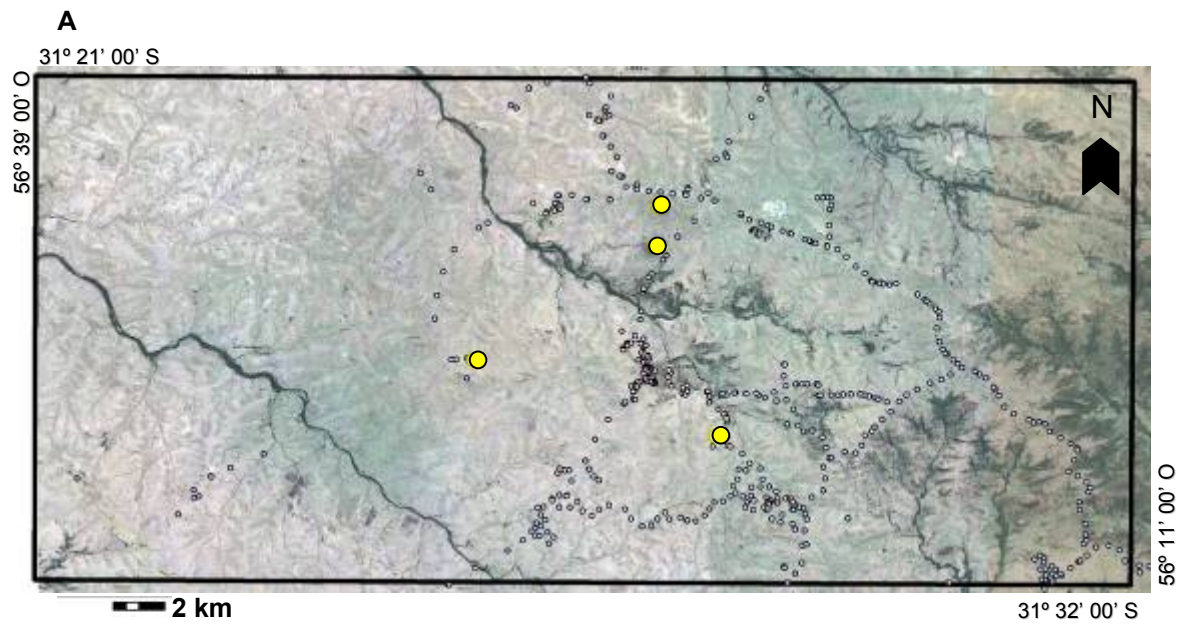


Figura 39. Basaltos "B". **A**, afloramientos mapeados en el área (puntos amarillos). **B-C**, ejemplo de cerros con basaltos "B" en imágenes Google Earth. **B**, cerros Bonito y de la Virgen. **C**, cerro innominado. La escala en B y C es la misma.

1.4. Brechas volcánicas y peperitas

Las brechas volcánicas se desarrollan a cotas medias de 249 m, aunque predominan a cotas más altas (hasta 333 m) que las de las areniscas y gran parte de los basaltos.

Veroslavsky *et al.* (2012) consideran que se desarrollan al Norte del pueblo Pepe Núñez, pero el mapeo de un área más extensa llevado a cabo en el presente trabajo demuestra que también están presentes en otras zonas del área del estudio, como ser en el propio pueblo y al Sur del mismo (Fig. 40A). Brechas similares se han observado fuera del área de estudio, por ejemplo en los Kms 140 y 162 de la Ruta 31, y en Valle Edén.

Los afloramientos en imágenes satelitales adquieren una coloración grisácea oscura (Fig. 40B). Si bien pueden no ser más extensos que los de los basaltos afaníticos, son más potentes, llegando a espesores de 2 o 3 metros. Típicamente las brechas afloran como una sucesión de “bochas” de dimensiones métricas y de textura “rugosa” (Anexo A, Figs. A26 y A27), debido a la alteración diferencial de los clastos de basalto vacuolar.

Las brechas volcánicas (Anexo A, Figs. A28 y A29) están compuestas de clastos centimétricos a decimétricos, angulosos, de basalto vacuolar (que presenta las mismas características del basalto vacuolar descrito más arriba) y menos frecuentemente afanítico, en una matriz de arenisca rojiza a anaranjada, de composición predominantemente cuarzosa, más o menos silicificada, y que puede exhibir estructuras de flujo. Las brechas suelen ser clasto-soportadas. Localmente puede existir abundante cemento de calcita.

En cuanto a la posición estratigráfica de las brechas, se ha observado que en general suprayacen a basaltos vacuolares (que son la fuente de los clastos), mientras que a su vez pueden infrayacer a basaltos masivos o bien ocupar las posiciones topográficas dominantes.

Al menos algunas de estas brechas volcánicas podrían ser consideradas como peperitas, ya sea peperitas *sensu stricto* (White *et al.*, 2000) o

bien “peperitas secas” (Petry *et al.*, 2007); ver discusión al respecto en pág. 87.

1.5. Areniscas con clastos de basalto

Este litotipo es poco común, y aparece en el Sur del área (Fig. 41A), generalmente próximos a basaltos (e.g. afloramientos P123 y P152; Anexo A, Fig. A30). Los escasos afloramientos observados ocupan cotas bajas, promedio 226 m. Uno de ellos muestra una clara tendencia ENE (Fig. 41B).

Comprende areniscas finas a medias, de color rojizo a amarillento, frecuentemente silicificadas, y que localmente contienen clastos angulosos principalmente de basalto vacuolar, de tamaño milimétrico a centimétrico, más raramente decimétrico (Anexo A, Figs. A31 a A35); dichos clastos a veces han sido meteorizados (Anexo A, Figs. A34 a A35). Cuando dichos clastos están presentes la textura es matriz soportada, a diferencia de las brechas volcánicas anteriormente descritas. En algunos afloramientos se observaron posibles estructuras de flujo (Anexo A, Fig. A36). No se descarta que este litotipo pueda representar una facies de las “peperitas” anteriormente mencionada.

En el punto n° 55 se colectó una muestra de ignimbrita silícea, desafortunadamente no *in situ*, con típicas estructuras de flujo (Anexo A, Fig. A37). Al Sur del área se observaron litologías similares.

1.6. Conglomerados y areniscas conglomerádicas

Este litotipo, bien expuesto en la Cañada del Charrúa (Fig. 42 y Anexo A, Figs. A38 a A40), se desarrolla a una cota promedio de 217 m. Consiste en un conglomerado matriz soportado (localmente clasto soportado) con clastos de hasta 90 cm de diámetro, angulosos a subredondeados, así como también areniscas gravillosas (Anexo A, Figs. A39 a A40).

Los clastos del esqueleto incluyen areniscas (silicificada y no silicificada), basaltos, calcedonia y brechas volcánicas. La matriz del conglomerado

do, compuesta por clastos de cuarzo, feldespato y mica, posee selección pobre y granulometría arena media a gruesa. En la matriz arenosa se aprecia estratificación grosera, horizontal a cruzada de bajo ángulo (Anexo A, Figs. A39 a A40). Estas litologías están poco consolidadas.

Estos conglomerados y areniscas gravilosas (de potencia máxima observada 1,60 m) se apoyan en discordancia erosiva (Figs. A38 a A40) sobre areniscas rojizas con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte (Miembro Rivera de la Formación Tacuarembó), estando el contacto marcado por costras negruzcas (posiblemente óxidos de manganeso).

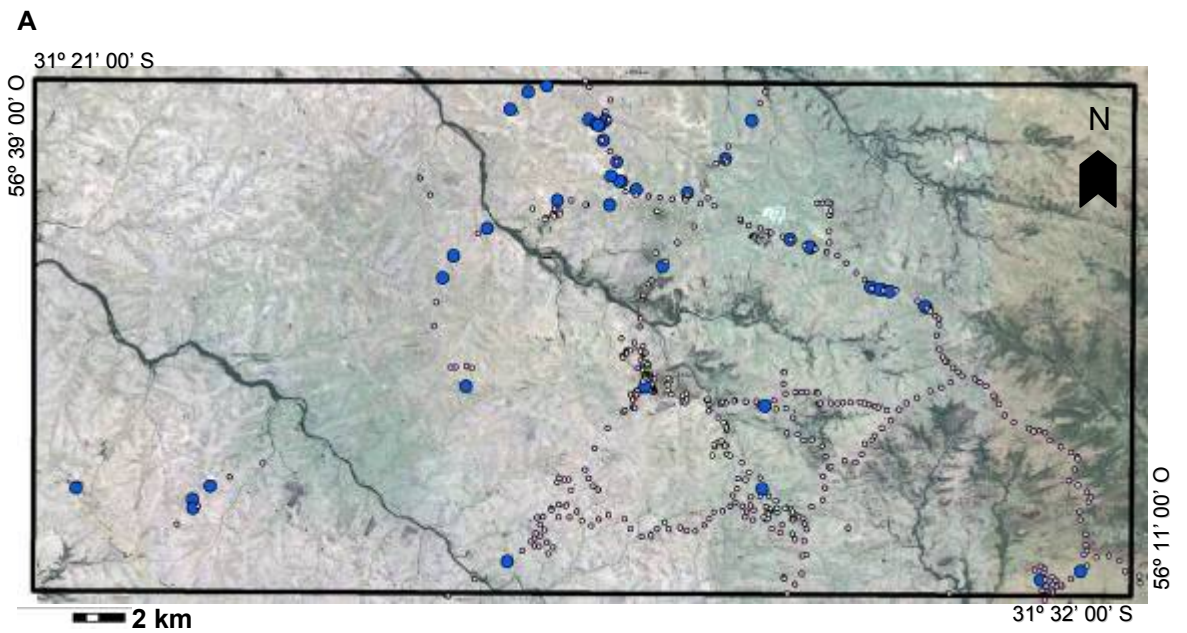


Figura 40. Brechas volcánicas. **A**, afloramientos mapeados en el área (puntos azules). **B**, ejemplo de textura de brechas volcánicas en imagen Google Earth.

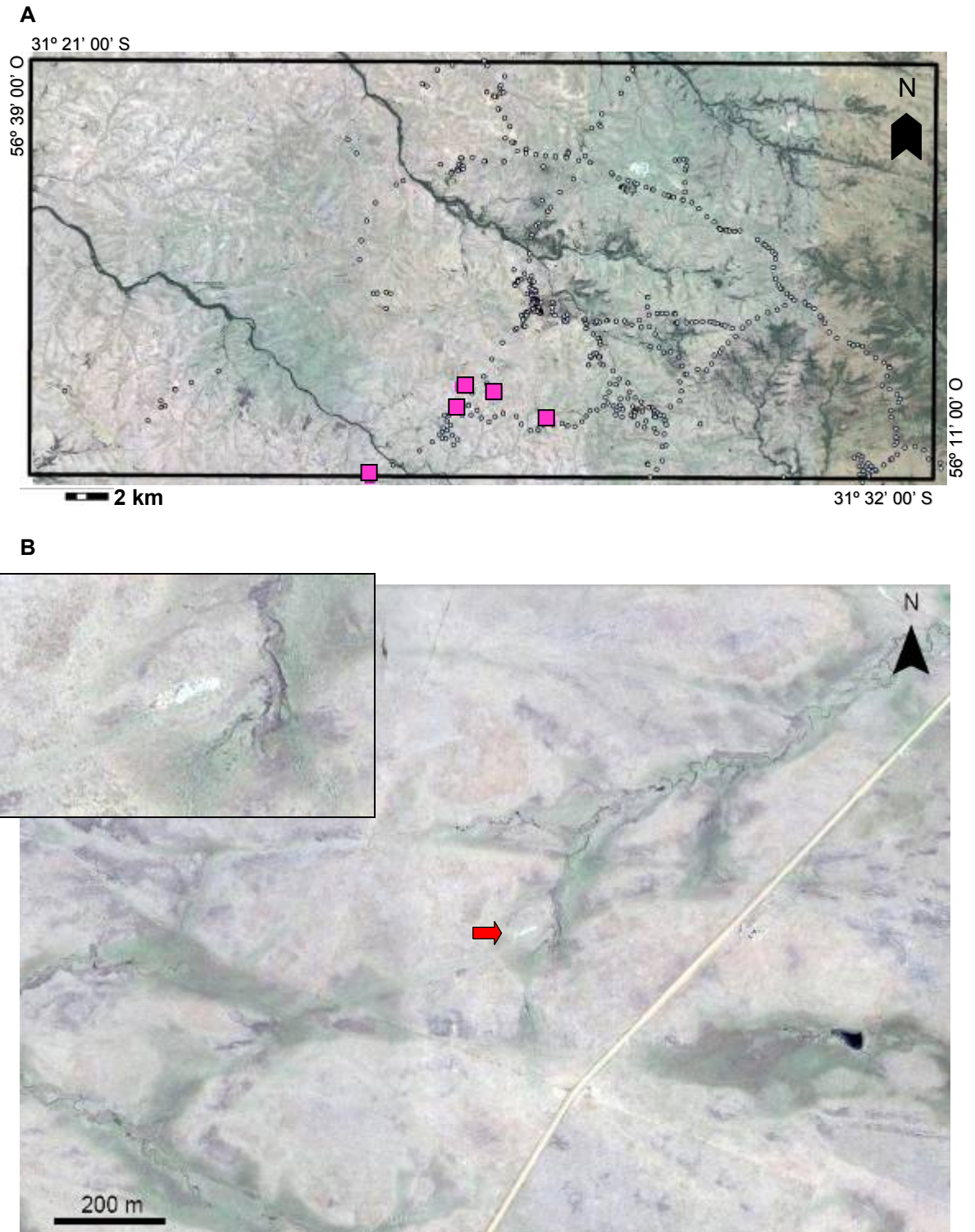


Figura 41. Areniscas con clastos de basalto. **A**, afloramientos mapeados en el área (cuadrados rosados). **B**, ejemplo de afloramiento (P123) con rumbo N70 en imagen Google Earth. El detalle muestra una ampliación de la textura del afloramiento.

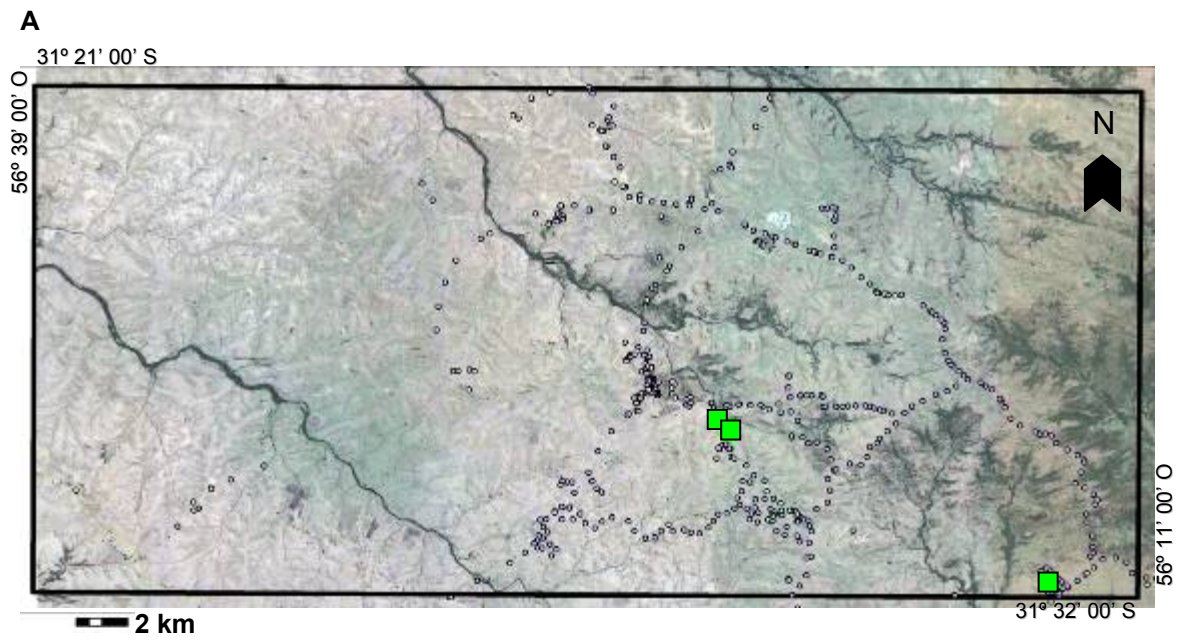


Figura 42. Conglomerados. **A**, afloramientos mapeados en el área (cuadrados verdes). **B**, ejemplo de afloramiento en la Cañada del Charrúa en imagen Google Earth.

1.7. Interacción magma-sedimento

Se constataron en campo y en pozo diversos rasgos producto de la interacción magma-sedimentos, que aconteció en el Cretácico Temprano (probablemente Valanginiense-Hauteriviense) cuando los grandes volúmenes de basalto de la Formación Arapey se derramaron colada tras colada sobre un desierto (paleodesierto de Botucatu; Assine *et al.*, 2004) que continuaba activo. Es decir, vulcanismo y sedimentación son contemporáneos.

1.7.1. Peperitas

El primer rasgo a destacar son litologías particulares que comprenden clastos milimétricos a decimétricos, angulosos, de basalto (frecuentemente basalto amigdaloides) en una matriz de arenisca, pudiendo ser clasto-sostén o matriz sostén.

Previamente debe definirse el término peperita, que fue empleado por primera vez en 1858 y posee un útil significado genético. Según White *et al.* (2000) “es aplicado a rocas formadas esencialmente *in situ* por desintegración de magma intruyendo y mezclándose con sedimentos típicamente húmedos, no consolidados o pobremente consolidados. El término también refiere a mezclas similares generadas por los mismos procesos operando en los contactos de lavas y otros depósitos volcánoclasticos calientes con dichos sedimentos”.

Según el mecanismo de formación y la textura resultante Busby-Spera y White (1987) reconocen dos grandes tipos de peperitas:

- peperitas con clastos angulosos tipo bloques (y son por eso denominadas *blocky peperites*; Fig. 43A)⁹, que pueden encajar a manera de puzzle, formados por fragmentación *in situ* de magma en estado frágil (el magma es enfriado en contacto con el agua);
- *peperitas fluidales*, ya sean globulares o microglobulares, cuyos clastos, por efecto de tensión superficial, son moldeados en estado dúctil du-

⁹Traducido como “peperitas blocosas” por Soto y Alvarado (2012).

rante la fragmentación, determinando formas irregulares (ameboidal, similar a una gota o indefinida; Fig. 43B); el sedimento frecuentemente rellena vesículas y fracturas en los clastos volcánicos.

Skilling *et al.* (2002) profundizaron en el estudio de las peperitas, demostrando la existencia de otras morfologías de clastos juveniles (e.g. *platy, tapered, ragged*; Fig. 43C) y de casos complejos con existencia simultánea de diferentes tipos de clastos. Existen diferentes procesos por los cuales estos clastos juveniles se mezclan con el sedimento (Fig. 43D).

Autores posteriores han descrito rocas con texturas similares a las de las peperitas, pero formadas al interactuar magma con sedimentos secos de ambientes desérticos, como fue es el caso del paleodesierto de Botucatu; a estas rocas se las han denominado “peperitas secas” (Petry *et al.*, 2007) o “pseudopeperitas” (Fernandes *et al.*, 2010), aunque otros autores sí hallaron evidencias de peperitas *s. str.* (Waichel *et al.*, 2007, 2008; Luchetti *et al.*, 2013).

Jerram y Stollhoffen (2002:p. 248) de hecho proponen ampliar el alcance del término peperita para describir una textura formada “esencialmente por desintegración *in situ* de magma juvenil intruyendo y mezclándose con sedimentos no consolidados o pobremente consolidados. No implicando [necesariamente] la presencia de agua”.

A la luz de todo lo anterior, es probable que algunas litologías observadas tanto en campo como en pozo correspondan a peperitas (lo que es inédito para la Cuenca Norte), ya sea del tipo *blocky* (Anexo A, Figs. A28 y A29) o del tipo fluidal (Anexo H, Fig. H19; nótese clasto similar al ilustrado en la Fig. 43C bajo el nombre de “single-clasts with fluidal and subplanar margins”).

Queda por determinar si estas texturas se produjeron en presencia o ausencia de agua, aunque esta última hipótesis parece ser más probable dado el ambiente desértico en el que extruyeron los basaltos. De ser este el caso se tratarían de “peperitas secas”.

1.7.2. Otros rasgos

Otros rasgos producto de la interacción magma-sedimento incluyen:

▶ formación de cornisas de arenisca silicificada (ya mencionadas) en el contacto arenisca-basalto por metamorfismo de contacto que genera cuarcitas; la zona silicificada no suele abarcar más de un metro de potencia. En algunos casos en que la cornisa pasa de horizontal a inclinada (Fig. 44) se interpreta que el paleo-relieve de los barjanes ha sido preservado; de hecho se observaron afloramientos de arenisca en forma convexa o de domo (Fig. 45).

▶ marcas hexagonales dejadas por la disyunción columnar del basalto (producto del enfriamiento del mismo) sobre la arenisca infrayacente (Fig. 46).

▶ diques clásticos inyectados en el basalto; el espesor de los mismos es centimétrico y su longitud decimétrica a métrica, pudiendo ser rectilíneos o curvos, e incluso bifurcarse (Figs. 47 a 48).

▶ planos silicificados en la arenisca, con conspicuos surcos acanalados (de ancho decimétrico y longitudes métricas) que pueden ser curvos y concéntricos (Fig. 49A) o más comúnmente rectilíneos y subparalelos (Figs. 49B a 50). Estas estrías son interpretadas como producto del flujo de las lavas básicas sobre la arenisca; en el caso de las acanaladuras curvas implicando rotación del flujo. En todos estos casos puede observarse una textura superficial irregular de la arenisca.

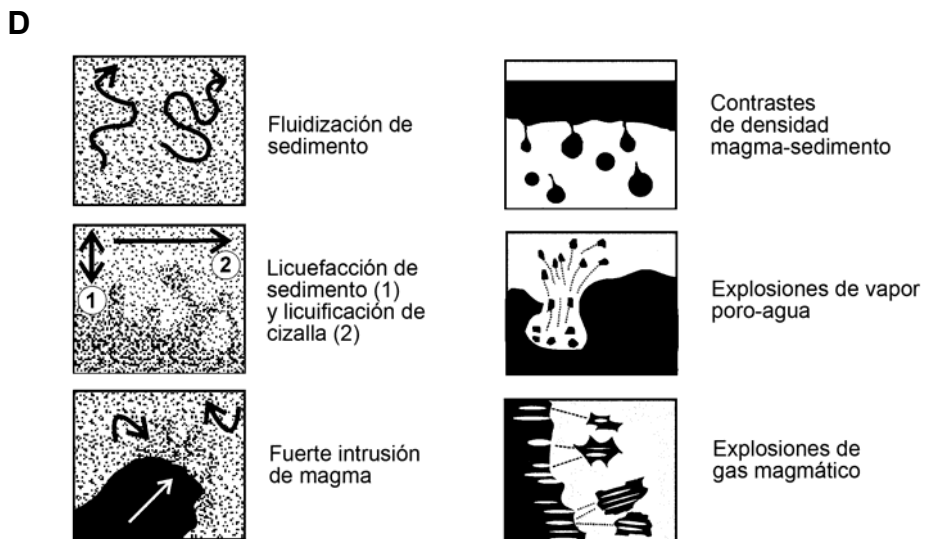
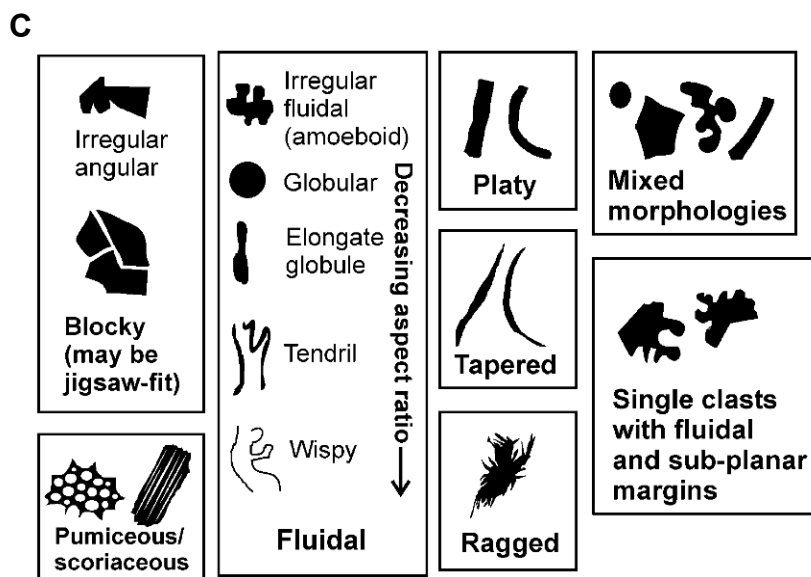
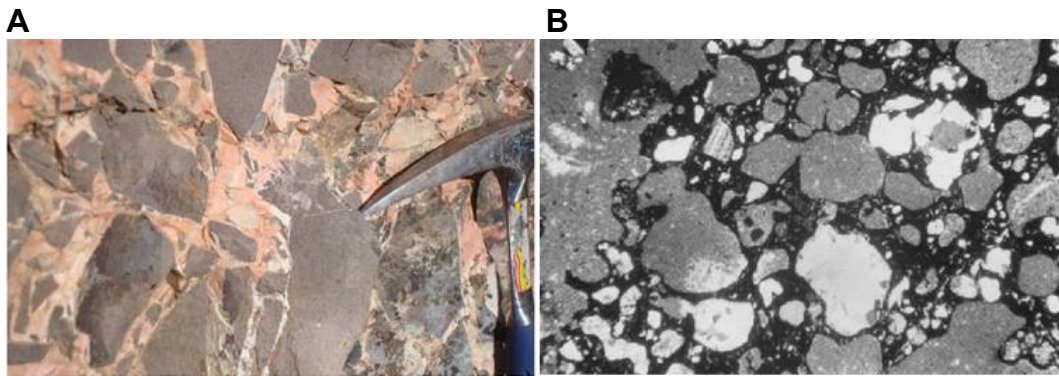


Figura 43. A, peperita *blocky*. B, peperita fluidal (en este caso, microglobular). C, diferentes morfologías de clastos juveniles (se ha optado por no traducir los términos). D, interacción entre clastos juveniles y sedimento. Tomado de Busby-Spera y White (1987) Skilling *et al.* (2002), Luchetti *et al.* (2013).



Figura 44. Cornisa de arenisca silicificada (próximo a la localidad de Pepe Núñez), pasando de subhorizontal a inclinada (posible preservación de paleotopografía dunar).



Figura 45. Posible paleoduna preservada en P21.



Figura 46. Marcas que dejó la disyunción columnar del basalto (actualmente erosionado) en la arenisca infrayacente, próximo a P72 y 73.



Figura 47. Ejemplos de diques clásticos de arenisca silicificada en afloramientos de basalto (P6, P7, P27 y P58). Nótese la bifurcación y el trazado curvo de algunos diques.



Figura 48. Ejemplos de diques clásticos en cantera de basalto, P52.

A



B



Figura 49. **A**, ejemplo de acanaladuras curvas concéntricas en afloramiento de areniscas silicificadas, P21. **B**, acanaladuras rectilíneas y subparalelas en afloramiento de areniscas, P58.

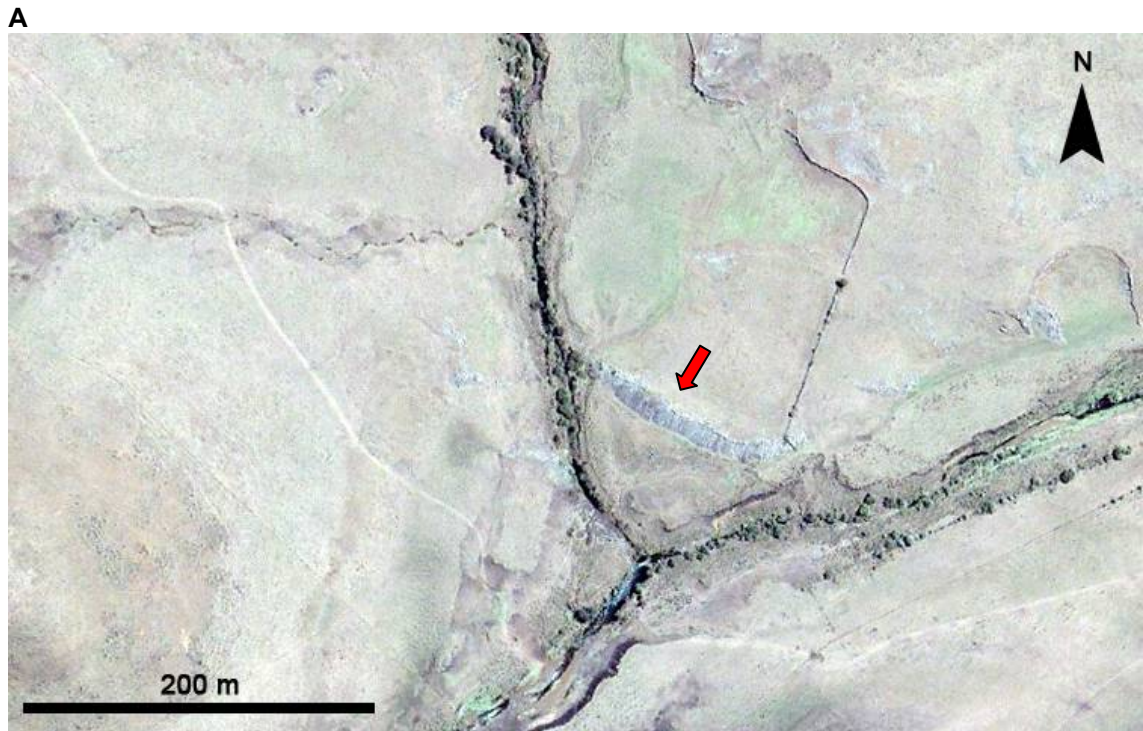


Figura 50. A, imagen de Google Earth de afloramiento de areniscas, P466. B, fotografía del mismo afloramiento mostrando plano buzando hacia el SO, con acanaladuras rectilíneas a levemente curvas, subparalelas, en afloramiento de areniscas a P466. Fotografía cortesía de Pablo Rodríguez.

1.8. Rasgos estructurales

Interpretación 2D de fotolineamientos

En todo el bloque Pepe Núñez se interpretaron 291 fotolineamientos (Fig. 51A). La rosa correspondiente (Fig. 51B) muestra un predominio de direcciones NNE (26% de los casos), y secundariamente NE (21,3%), NNO (18,2%) y NO (14,1%), siendo muy escasa la participación de direcciones ENE y ESE. Probablemente el número de fotolineamientos NNO y NE esté sobrerrepresentado. De hecho, cuando se consideran sólo los fotolineamientos de longitud mayor a 4 km ($n = 23$) aumentan su importancia relativa las direcciones NO (21,7%) y ENE (21,7%), manteniéndose la moda NNE (26,1%) y desapareciendo la dirección NNO (Fig. 51C).

Estos resultados de medidas 2D del bloque Pepe Núñez deberán chequearse en campo con datos 3D obtenidos de estaciones de medidas de fracturas, y verificar si se trata de diaclasas (como *a priori* parece ser la mayoría de los casos) o de fallas (y en ese caso determinar si se trata de fallas normales, inversas o transcurrentes).

Es interesante destacar que los lineamientos NE parecen dislocar a los lineamientos NO, como se observa en diversos cursos de agua importantes en el área (Fig. 52). Esto es coherente si se piensa que los primeros fueron primordialmente reactivados durante el *rifting* y posterior apertura atlántica, y los segundos durante el paleozoico.

Comentarios sobre algunos rasgos estructurales de interés

Es común en el área la presencia de planos silicificados inclinados en la arenisca. Dichos planos suelen buzarse entre 10 y 40° (Fig. 53A), con direcciones generalmente SE o SO. Estos planos pueden aparecer localmente dislocados por fallas de desplazamiento de rumbo, caso del afloramiento denominado informalmente la “N” por su semejanza con esa letra (Fig. 53B).

El dislocamiento es observado a distintas escalas, desde diques clásticos centimétricos, dislocados por fallas sinestrales en el afloramiento P48 (Fig. 54), hasta el dislocamiento de importantes cursos de agua por estructuras NE, más comúnmente sinestral (Fig. 52B-C).

Sobre los planos silicificados de arenisca y sobre basaltos es posible apreciar estrías de falla¹⁰ frecuentemente mal preservadas. Es el caso de los afloramientos P52 (Fig. 55A) y P123 (Fig. 55B). En este último caso se midió un plano N225/55SW con estrías de flujo de colada que inclinan 50° al NW..

¹⁰ Estas estrías de falla fueron inicialmente consideradas por Veroslavsky *et al.* (2012) como estrías producto del flujo de lavas sobre las areniscas; si fuera éste el caso, sugerirían un desplazamiento por flujo de magma hacia el SSW.

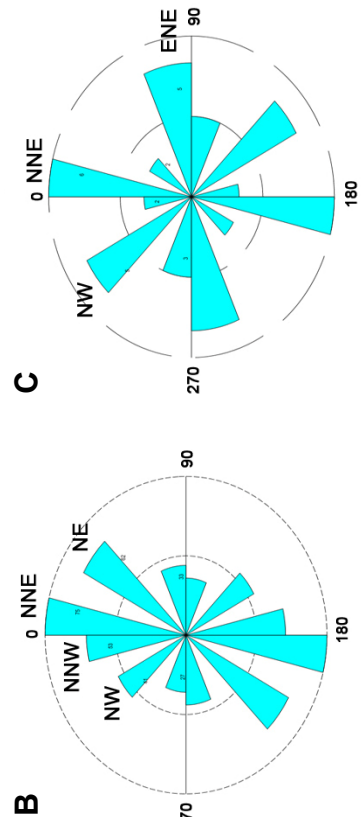


Figura 51. **A**, fotolineamientos interpretados en el bloque Pepe Núñez sobre imagen sobre imagen Google Earth. **B**, rosa sobre el total de fotolineamientos (n = 291). **C**, rosa considerando sólo los fotolineamientos de longitud mayor a 4 km (n = 23).

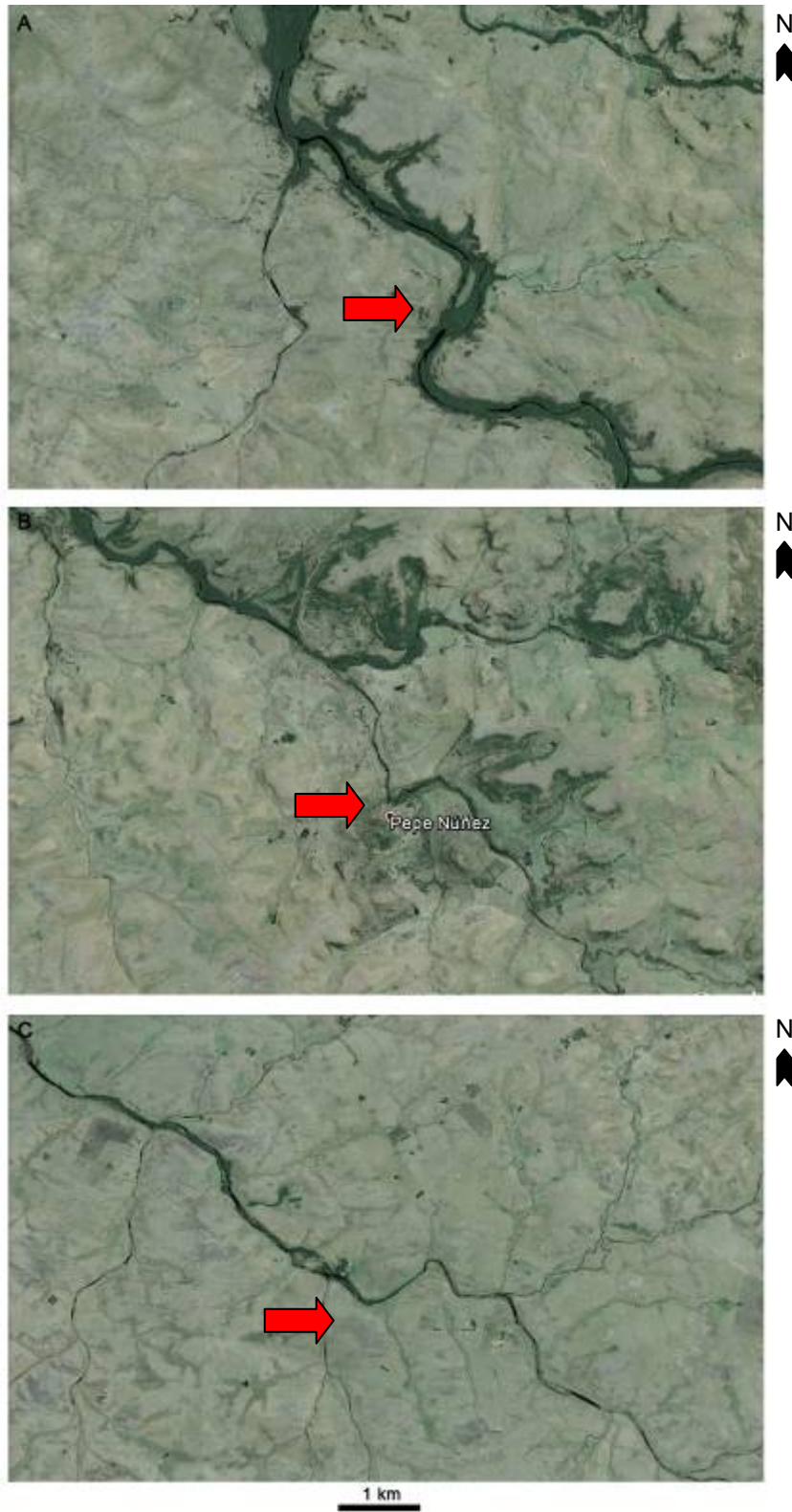


Figura 52. Dislocamiento de cursos de agua NO por estructuras NE en imágenes Google Earth. **A**, arroyo Matajojo Grande. **B**, arroyo Matajojo Chico. **C**, arroyo Sopas.



Figura 53. A, planos silicificados inclinados en arenisca. **B**, idem, dislocado por fallas con desplazamiento de rumbo (afloramiento denominado “la N”).

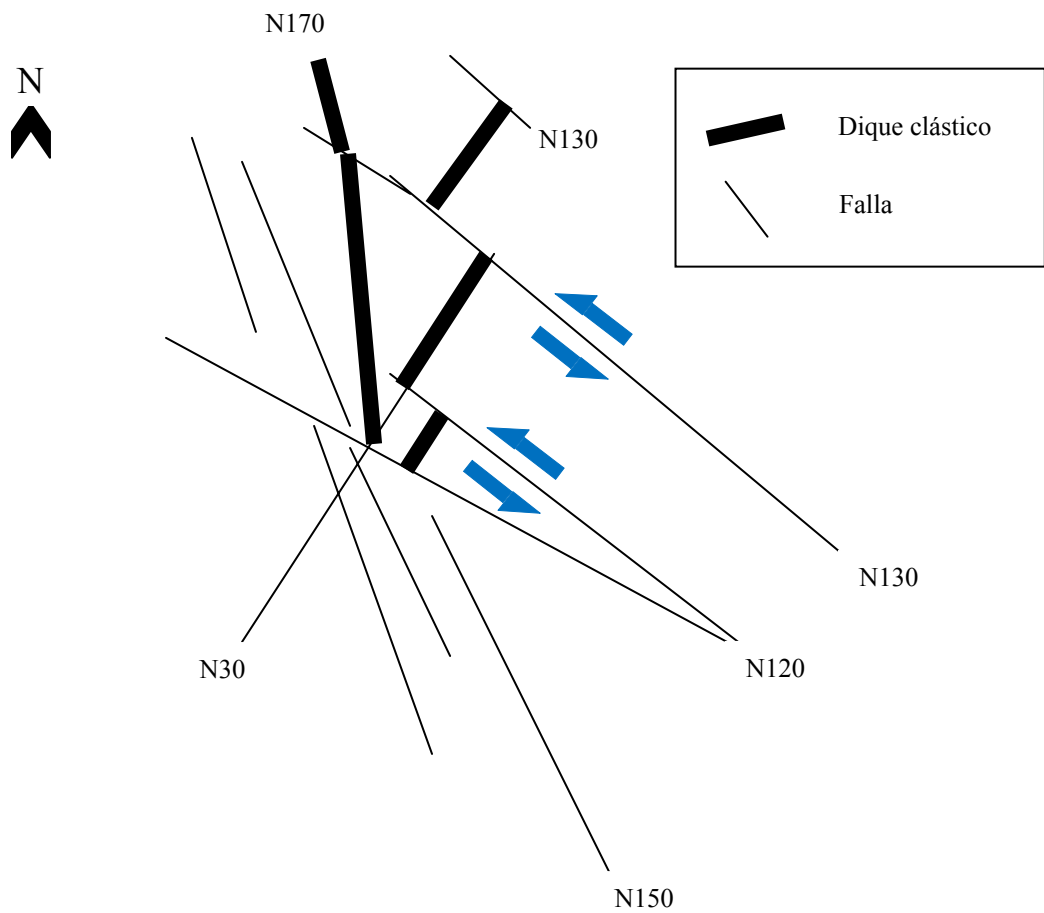


Figura 54. Ejemplos de diques clásticos afectados por microfallas sinestrales en P58. Esquema interpretativo basado en Veroslavsky *et al.* (2012).

A



B



Figura 55. Estrías de falla en P52 y P123.

1.9. Perfiles estratigráficos

Se levantaron tres perfiles estratigráficos en sendos afloramientos (ver ubicación en Fig. 56), por contruibir a esclarecer relaciones estratigráficas en el área de estudio.

Perfil nº 1

En el primer caso (P159; Fig. 58) el afloramiento comprende, de base a tope, tres metros de basalto amigdaloides, tres metros de brecha volcánica y dos metros de basalto masivo afanítico gris. La brecha incorpora clastos del basalto amigdaloides infrayacente, por lo que se ha colocado un contacto discordante entre ambas unidades.

Perfil nº 2

En el segundo caso (P113; Fig. 59), en la margen izquierda de la Cañada del Charrúa se exponen tres metros de areniscas finas anaranjadas, con estratificación cruzada de alto ángulo y porte al menos moderado.

Por encima, en la margen NE de la cañada (que se encuentra relativamente más hundida), se apoyan en discordancia angular al menos 1,60 m de conglomerados y areniscas gravillosas ya descritos (pág. 81). Los dos metros superiores del perfil se hallan cubiertos por la vegetación.

Perfil nº 3

En el tercer caso (P2; Fig. 60) sobre el camino que pasa en dirección SE-NO por la escuela de Pepe Núñez, se observó una sucesión de 9 metros de areniscas anaranjadas con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte, cubiertas por 17 metros de basaltos (en la base alterados, posiblemente amigdaloides, y lajosos).

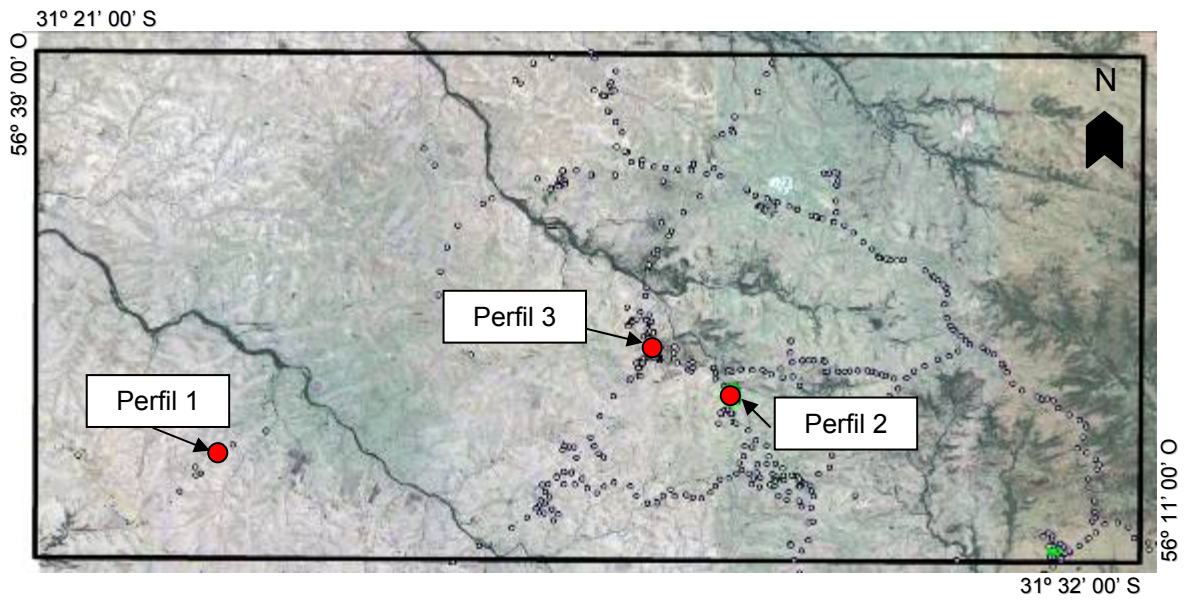


Figura 56. Ubicación de los tres perfiles estratigráficos levantados.



Figura 57. Afloramiento P159, donde se levantó el perfil n° 1. El pasaje de basalto vacuolar a brecha volcánica y de ésta a basalto masivo estaría marcando un límite de coladas.

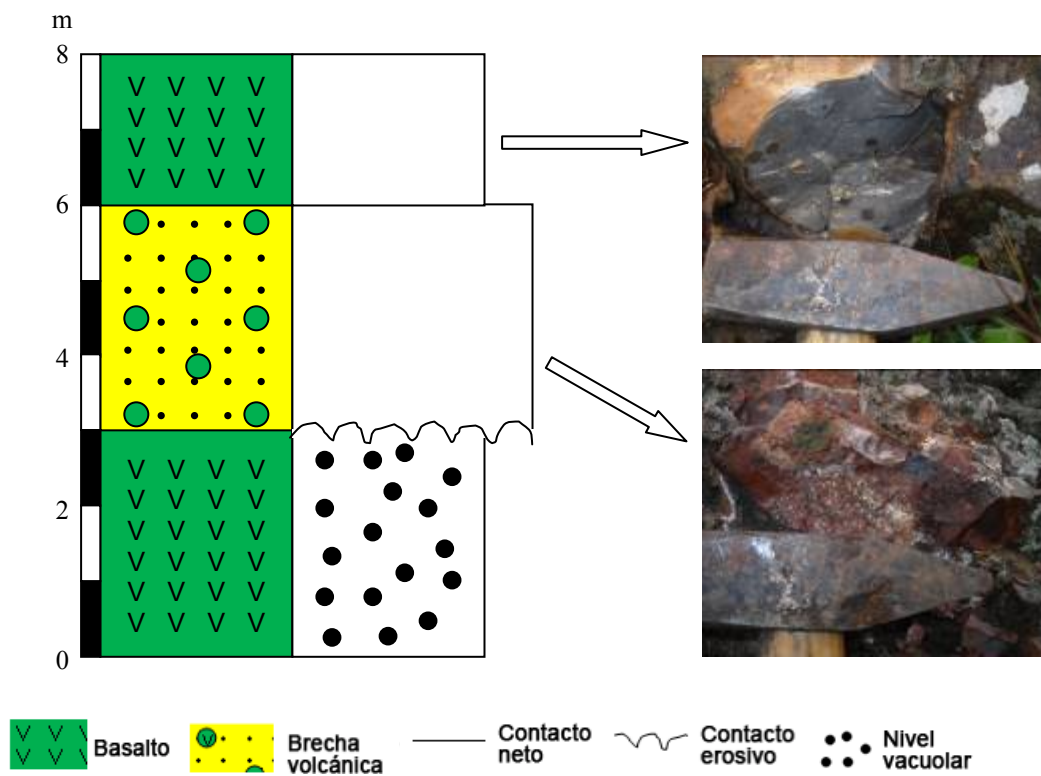


Figura 58. Perfil nº 1, afloramiento P159.

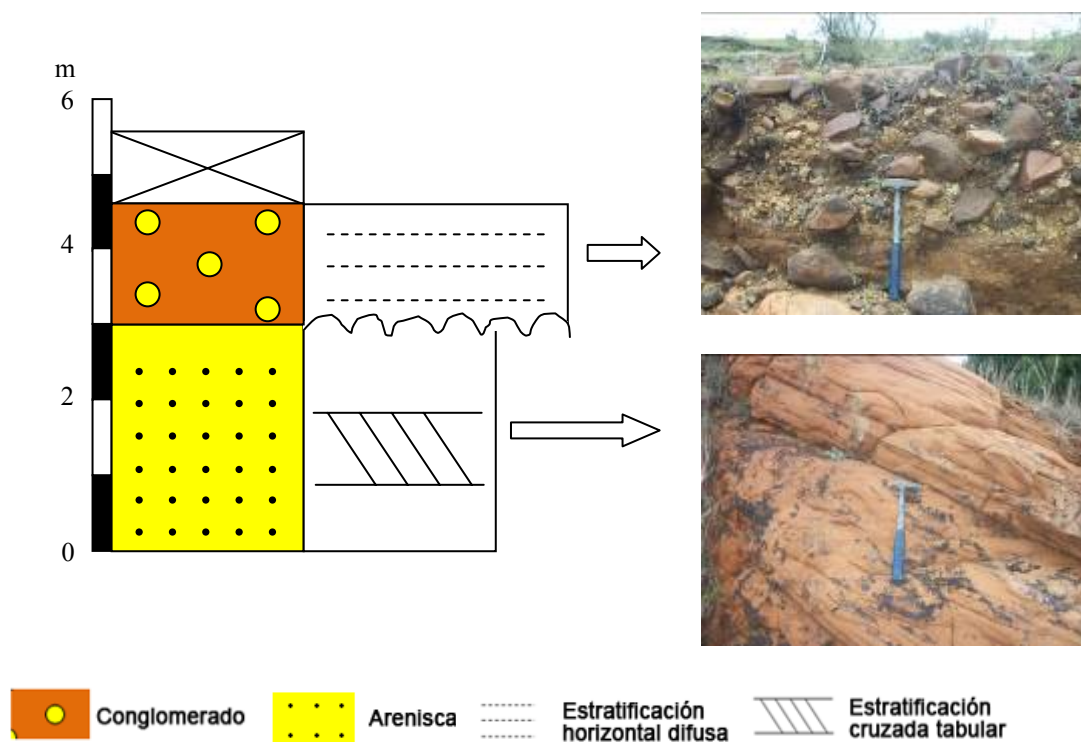


Figura 59. Perfil nº 2, afloramiento P159.

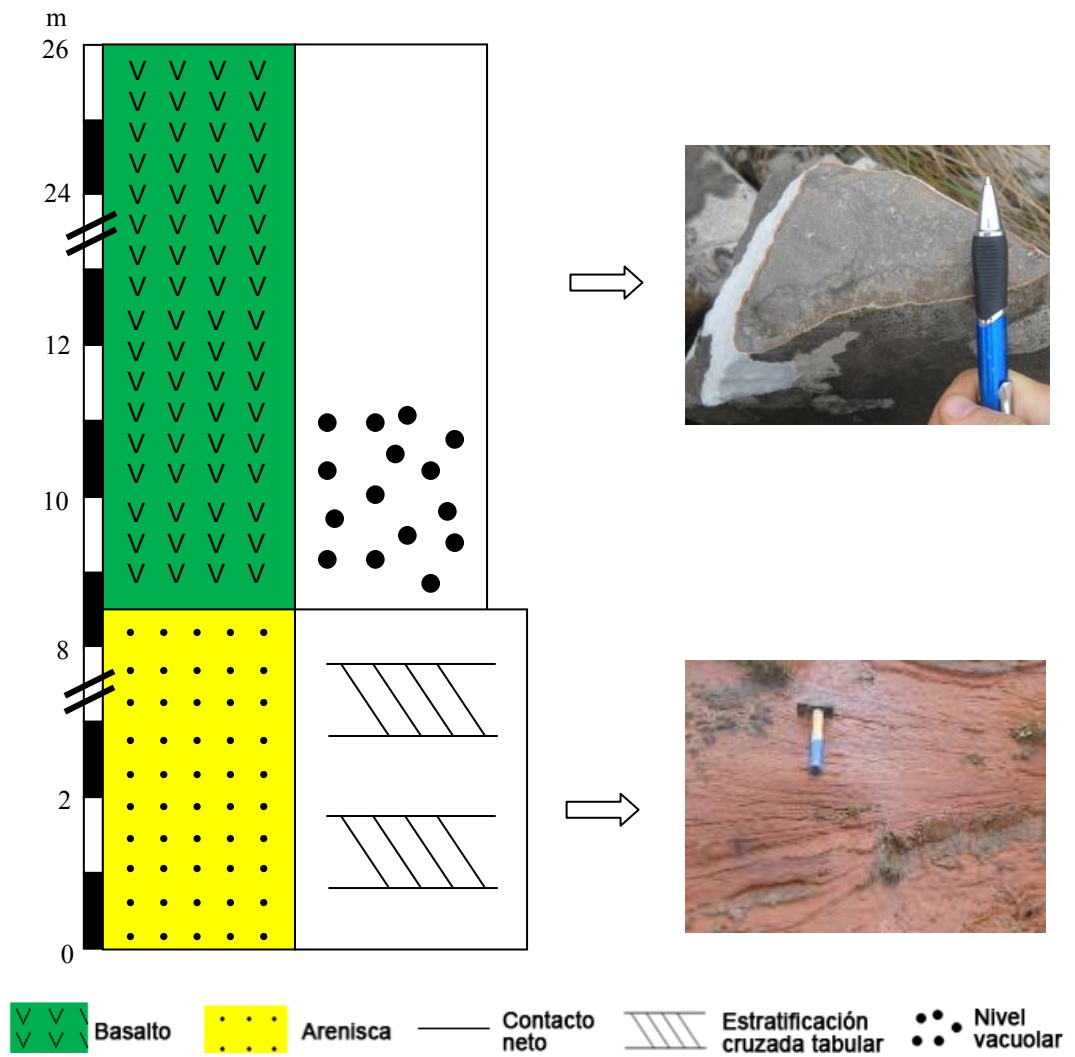


Figura 60. Perfil n° 3, afloramiento P2.

2. GEOLOGÍA DE SUBSUELO

En el período mayo de 2012 a febrero de 2013 ANCAP realizó seis perforaciones de estudio en el bloque Pepe Núñez, con el objetivo de comprender la estratigrafía del área y confirmar o no la presencia de las lutitas ricas en materia orgánica de la Formación Cordobés (Devónico). Todas ellas alcanzaron el basamento cristalino.¹¹

La ubicación y datos de dichas perforaciones se brindan en la Tabla 14 y Fig. 61. Una de ellas se ubica en la localidad de Pepe Núñez propiamente dicha (Pepe Núñez E-1b), zona que fuera estudiada en detalle por Veroslavsky *et al.* (2012). Como ya se ha mencionado, en dicha localidad afloran básicamente areniscas y basaltos, las primeras mostrando silicificación en el contacto con los basaltos suprayacentes.

Tres perforaciones se realizaron en el borde Norte del área, próximo a la localidad de Quintana, y fueron denominadas Quintana E-1, Quintana E-2 y Quintana E-3, realizadas a una distancia de entre 1 y 2 km entre sí. La geología de superficie muestra que se trata de una zona esencialmente basáltica, compuesta probablemente por dos coladas, y relativamente plana, con las cotas superiores dominadas por brechas volcánicas (Fig. 62A).

Unos 7 km al SE del pozo Pepe Núñez E-1b, cerca de la Cañada del Charrúa, se realizaron dos perforaciones: Cañada del Charrúa E-1 y Cañada del Charrúa E-2, aproximadamente a 1 km de distancia entre sí. Este último pozo es interesante dado que fue el que atravesó el mayor espesor de cuenca en el bloque, mayor a 500 m (Tabla 14A) En cuanto a la geología de superficie, la zona es muy similar a Pepe Núñez, observándose cerros basálticos y, a cotas más bajas, areniscas (Fig. 62B), localmente silicificadas en el contacto.

¹¹ En realidad fueron siete perforaciones, pero la primera de ella (Pepe Núñez E-1) debió ser abandonado a los 413,5 m cuando atravesaba la Formación Buena Vista por problemas técnicos, y se recomenzó nuevamente a pocos metros con el nombre de Pepe Núñez E-1b, esta vez sí alcanzando basamento cristalino.

Las unidades litoestratigráficas que componen el relleno de la cuenca en el conjunto de los pozos (salvo excepciones) fueron de base a tope las formaciones San Gregorio, Buena Vista, Tacuarembó y Arapey. En las Figs. 63 y 64 se presentan las columnas estratigráficas de dichos pozos, y en la Tabla 14B los topes formacionales (tentativos en el caso de la Formación Buena Vista, dada la dificultad de su separación de la Formación Tacuarembó).

Tabla 14. A, datos de las perforaciones de estudio. Coordenadas UTM 21S, en metros. **B**, topes formacionales (en metros bajo boca de pozo) en las perforaciones de estudio del bloque Pepe Núñez.

A

Pozo	X	Y	Z	Profundidad total (m)
Pepe Núñez E-1b	557990	6519776	223	469,50
Quintana E-1	556027	6529736	200,5	305,50
Quintana E-2	555825	6531309	183,4	371,50
Quintana E-3	554505	6530936	190	315,00
Cañada del Charrúa E-1	563343	6514840	250	479,50
Cañada del Charrúa E-2	562258	6514104	298	522,80

B

Pozo	Fm. Arapey	Fm. Tacuarembó	Fm. Buena Vista	Fm. San Gregorio	Basamento cristalino
Pepe Núñez E-1b	Ausente	0	≈250	316,00	464,75
Quintana E-1	0	104,57	Ausente	293,10	297,57
Quintana E-2	0	78,53	Ausente	310,71	353,10
Quintana E-3	0	146,40	Ausente	299,30	305,50
Cañada del Charrúa E-1	0	38,50	≈250	317,50	467,45
Cañada del Charrúa E-2	0	42,38	≈300	374,25	515,40

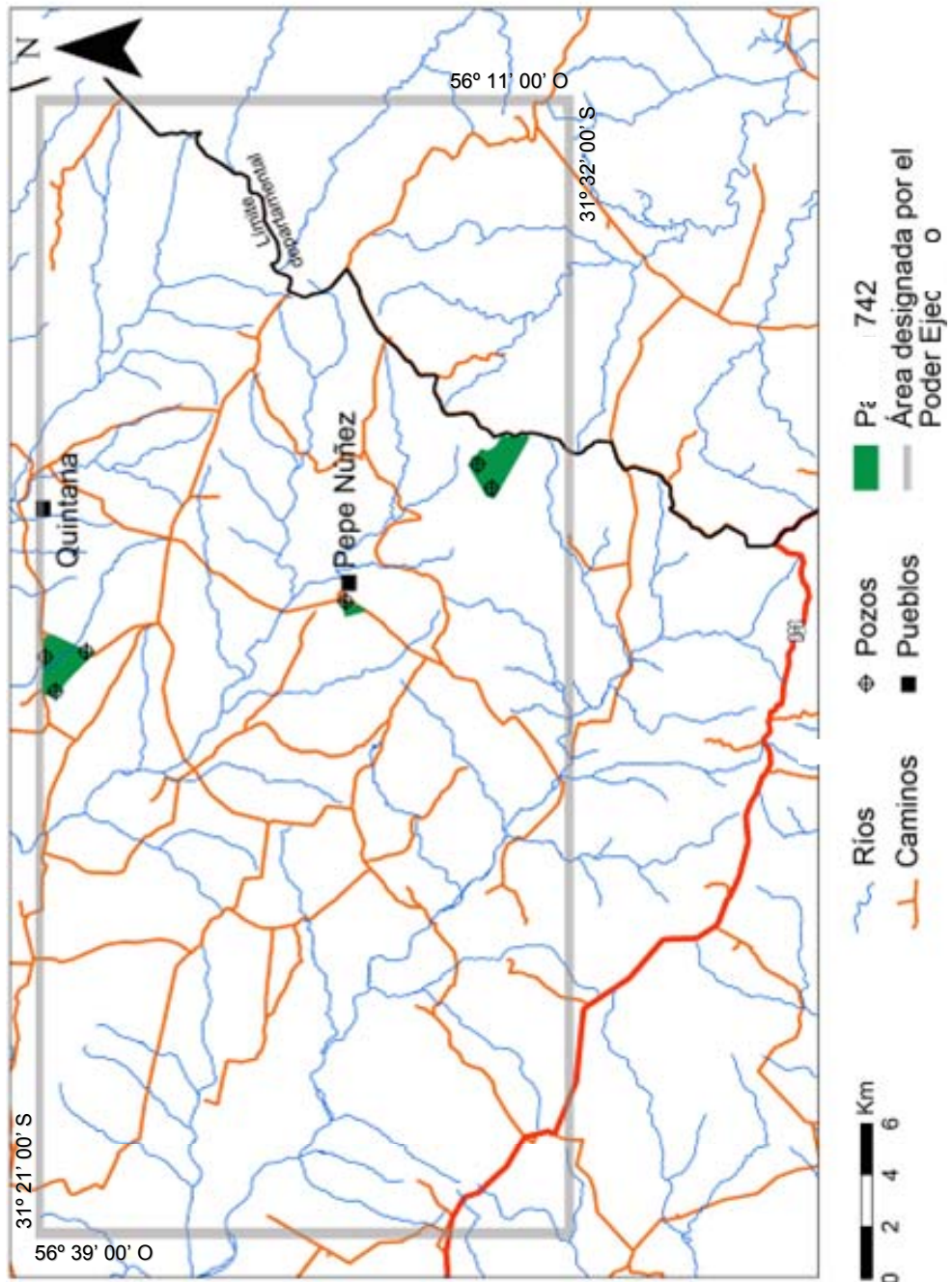


Figura 61. Ubicación de los seis pozos estratigráficos del área de estudio. Elaboración propia en base a datos de ANCAP.



Figura 62. **A**, aspecto general del área Quintana. Fotografía cortesía de Pablo Rodríguez. **B**, aspecto general del área Cañada del Charrúa. Vista desde los basaltos hacia el SE, donde afloran areniscas.

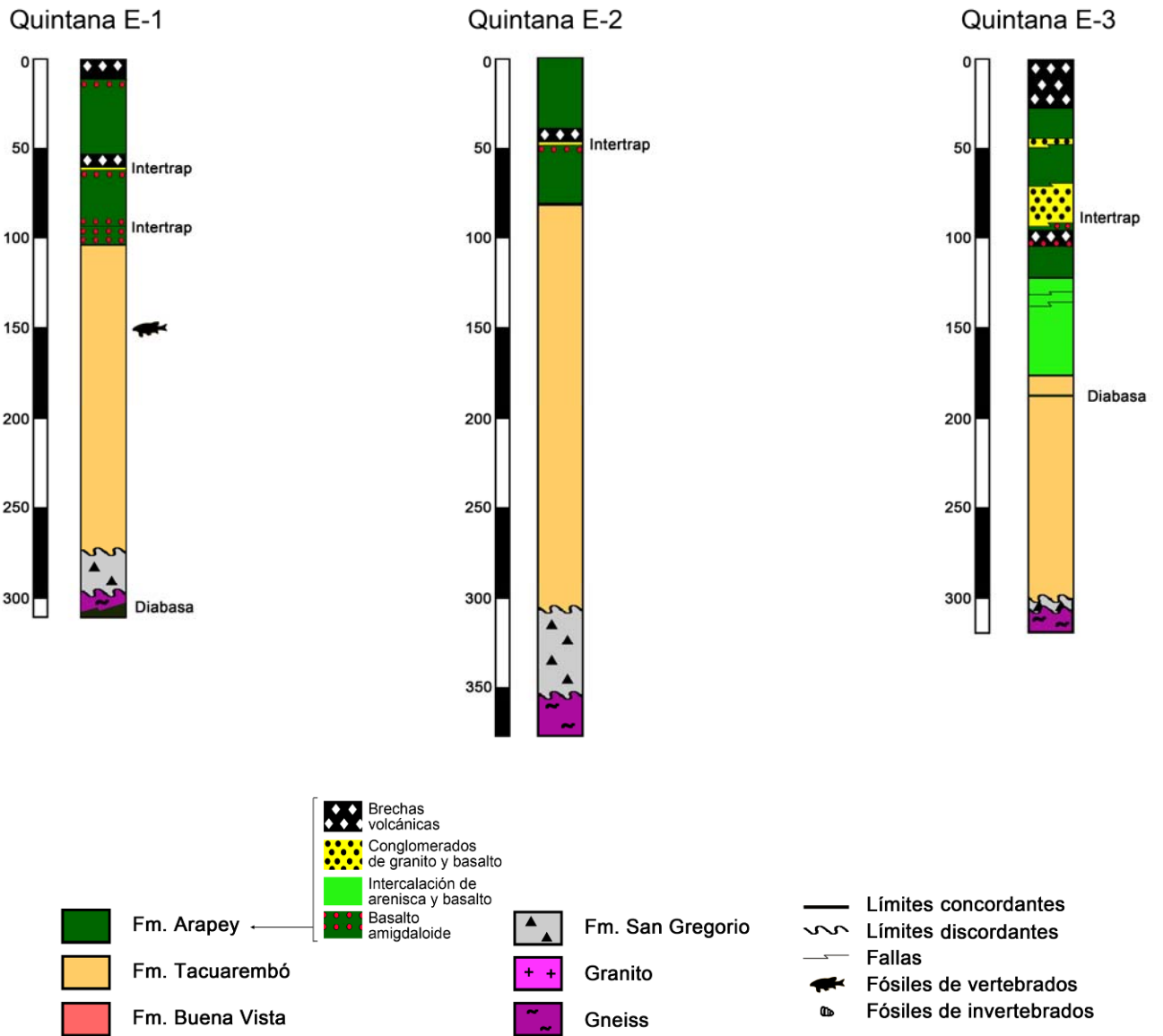
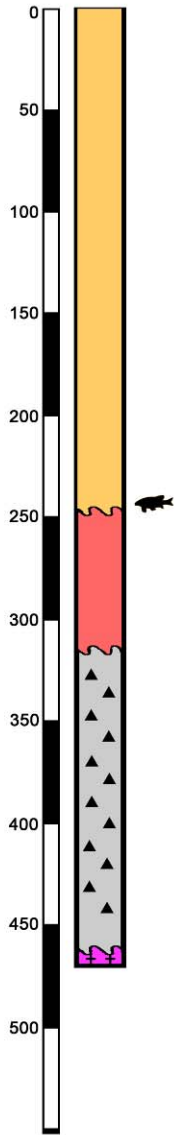
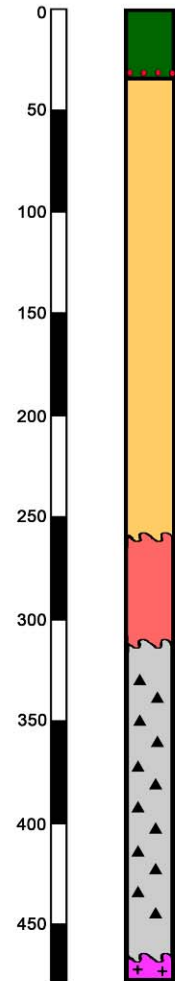


Figura 63. Columnas estratigráficas de los pozos del Norte del bloque (área Quintana). Ver perfiles detallados de la Formación Arapey en Fig. 66.

Pepe Núñez E-1b



Cañada del Charrúa E-1



Cañada del Charrúa E-2

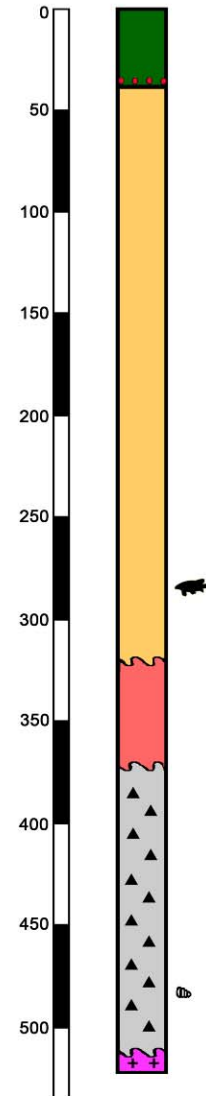


Figura 64. Columnas estratigráficas de los pozos del Sur del bloque (áreas Pepe Núñez y Cañada del Charrúa). Ver perfiles detallados de la Formación San Gregorio en Fig. 65.

2.1. Basamento cristalino

El basamento cristalino al Sur y Norte del área es diferente. En el primer caso (pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1 y E-2) se trata de un granito rosado de grano grueso, equigranular, isótropo, compuesto por cuarzo, feldespato potásico y biotita (Anexo H, Fig. H1). El granito en el pozo Cañada del Charrúa E-2 el granito aparece muy fracturado. En el pozo Cañada del Charrúa E-1 existe una intercalación por falla de un nivel de 18 cm de espesor de diamictita gris.

En el segundo caso (pozos Quintana E-1, E-2 y E-3) el basamento consiste en un gneiss máfico (Anexo H, Fig. H2), en el que alternan bandas claras (cuarzo) y oscuras (minerales ferromagnesianos). El gneiss presumiblemente es más antiguo que el granito del Sur.¹² En el pozo Quintana E-1 el gneiss aparece recortado en ángulo de 45° por una diabasa gris verdosa (Anexo H, Fig. H1).

2.2. Formación San Gregorio

Esta unidad se desarrolla con potencias cercanas a 150 m en el Sur del área de estudio (pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1 y E-2), estando su espesor muy reducido en el Norte (con la excepción del pozo Quintana E-2).

Como es típico de esta unidad, depositada en ambientes subacuáticos bajo influencia glacial, se observa una gran variabilidad faciológica (Anexo H, Figs. H3 a H10). El orden de las facies y su espesor es muy similar entre los diferentes pozos del Sur. Para el caso de Cañada del Charrúa E-1 se distinguen de base a tope (ver perfiles en Fig. 65):

- cuarcitas grises (cuyo protolito son diamictitas, areniscas y subordinadamente conglomerados), muy consolidadas, con fracturas verticales a subverticales, oxidadas (Anexo H, Fig. H3); en el pozo Cañada del Charrúa E-1 esta facie se desarrolla entre 430,50 y 467,45 m.

¹² Al momento de terminar este trabajo los análisis geocronológicos del granito, gneiss y diabasa aún están en proceso en el Centro de Pesquisas Geocronológicas del Instituto de Geociências (Universidade de São Paulo).

- diamictitas grises con clastos centimétricos de granito, intercaladas con láminas de pelitas *bordeaux* deformadas (Anexo H, Fig. H4); en el pozo Cañada del Charrúa E-1 esta facie se desarrolla entre 426,66 y 430,50 m;

- lutitas finamente laminadas, de color gris oscuro, localmente negro (e.g. hacia la base), con pirita (Anexo H, Fig. H5); en el pozo Cañada del Charrúa E-1 esta facie se desarrolla entre 413,78 y 426,66 m;¹³

- diamictitas rojizas que pasan a diamictitas grises (Anexo H, Fig. H6); en el pozo Cañada del Charrúa E-1 esta facie se desarrolla entre 395,86 y 413,78 m;

- lutitas con lentes de arenisca fina, y ritmitas (intercalación de niveles de arenisca muy fina, con ondulitas, y niveles arcillosos), de color violáceo, gris y marrón, localmente con laminación deformada por estratificación convoluta y microfallas (Anexo H, Fig. H7); en el pozo Cañada del Charrúa E-1 esta facie se desarrolla entre 390,30 y 395,86 m;

- diamictitas rojizas a *bordeaux*, con clastos de rocas ígneas y metamórficas de hasta 4 cm (Anexo H, Fig. H8); en el pozo Cañada del Charrúa E-1 esta facie se desarrolla entre 324,20 y 390,30 m;

- areniscas cuarzo-feldespáticas de grano fino, color pardo-anaranjado (localmente blanquecino), con estratificación localmente deformada (Anexo H, Fig. H9), con láminas pelíticas; en el pozo Cañada del Charrúa E-1 esta facie se desarrolla entre 317,50 y 324,20 m.

En los pozos del Norte la Formación San Gregorio, como ya se ha mencionado, se haya reducida en espesor. Sólo en el pozo Quintana E-2, con 42 metros de potencia, pueden distinguirse diferentes facies, pero no todas las anteriormente mencionadas para el Sur:

- cuarcitas similares a las descritas para el Sur, cuyo protolito son diamictitas y conglomerados (e.g. 352,00 m; Anexo H, Fig. H10A).

¹³ La única diferencia registrada en otros pozos digna de mencionarse es que las lutitas grises a negras en el pozo Cañada del Charrúa E-2 alcanzan 20 m de potencia (de 474 a 494 m de profundidad), es decir casi el doble de lo registrado en Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1.

- diamictitas semejantes pero con intercalaciones de pelitas (e.g. 340 m);
- lutitas pardas (e.g. 333 m; Anexo H, Fig. H10B);
- diamictitas rojizas con clastos de basamento de hasta 4,5 cm de diámetro en matriz pelítica (e.g. 330 m);
- arenisca muy fina rojiza que pasa a brechas clasto sostén (Fig. Anexo H, Fig. H10C), con clastos de basamento de hasta 7 cm de diámetro, de muy baja angulosidad y esfericidad (e.g. 323,50 m);

La posición estratigráfica de las cuarcitas basales, cuya intensa diagénesis parece ser diferente a la del resto de la unidad, es incierta. Se incluyen aquí tentativamente en la Formación San Gregorio, asumiendo que la silicificación puede ser producto de la circulación de fluidos y actividad hidrotermal en el contacto con el basamento, pero no se descarta que se trate de una unidad más antigua (inclusive más antigua que el granito, si es que éste es intrusivo, lo que podría explicar la silicificación como producto de metamorfismo de contacto).

2.3. Formación Buena Vista

Esta unidad se desarrolla con potencias cercanas a 70 m exclusivamente en el Sur del área de estudio (pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1 y E-2). La determinación del tope de esta unidad respecto a las areniscas suprayacentes no es nítida, por tanto los valores que aparecen en la Tabla 15 son tentativos.

En los pozos, la Formación Buena Vista comprende areniscas rojizas (localmente blanquecinas por decoloración), cuarzo-feldespáticas, de grano fino a medio, con estratificación cruzada y marcada bimodalidad (Anexo H, Fig. H11; interpretándose como depósitos de dunas eólicas), subordinadamente masivas. La alteración de los clastos de feldespato confiere un moteado blanquecino (Anexo H, Fig. H11). Se intercalan niveles de pelitas rojizas, a veces como capas rotas (e.g. en torno a 287 m y a 317 m en el pozo Cañada del Charrúa E-1).

2.4. Formación Tacuarembó

Esta unidad está presente en toda el área de estudio, presentando su mayor desarrollo (superior a 200 m de potencia) en los pozos del Sur: Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1 y E-2, lo que no se observa en el Norte (la excepción la constituye el pozo Quintana E-2).

En los pozos, la Formación Tacuarembó comprende areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas, de grano fino a medio, subredondeados, moderadamente a bien seleccionados, de coloración variables (blanquecino, amarillento, anaranjado, rosado grisáceo, pardo; Figs. H12 a H15) mayormente secundaria, localmente fosilíferas. Si bien algunos niveles tienen aspecto masivo (Fig. H13), predomina la laminación tanto cruzada (Figs. H12 y H14A; ángulo variable entre 20° y 30° aproximadamente, como horizontal (Fig. H14B). Localmente se observan ondulitas (e.g. 183,60 m en Cañada del Charrúa E-1) y probables niveles bioturbados (e.g. en torno a 180 m en el pozo Quintana E-1 o en torno a 154 m en Quintana E-2) que obliteran la estratificación original.

En algunos pozos (notablemente Cañada del Charrúa E-2) es clara la presencia de facies interpretadas como dunas eólicas (Fig. H12), correspondientes al miembro superior de la unidad (Miembro Rivera; Perea *et al.*, 2009). En otros (Quintana E-2), sin embargo, las facies son típicas del miembro inferior (Fig. H13), depositadas en ambiente subacuático (Miembro Batoví; Perea *et al.*, 2009). Sin embargo en la mayoría de los pozos no es clara la separación en miembros.

Intercalados con las areniscas existen delgados niveles (milimétricos a decimétricos) y lentes de limolitas verdosas, rojizas y violáceas (Fig. H13), y subordinadamente areniscas conglomerádicas con intraclastos pelíticos milimétricos (e.g. entre 215,14 y 217,21 m en el pozo Quintana E-1).

También se observan areniscas conglomerádicas con intraclastos centimétricos a decimétricos de la propia arenisca; esto ocurre tanto en el pozo Quintana E-2, asociado a los límites de un dique básico (que se desarrolla entre 156,53 a 157,11 m; Fig. H15) como, de manera mucho más

frecuente, en el pozo Quintana E-3 (222,00 a 224,70 m; 231,60 a 239,00 m; 239,70 a 246,00; 248,00 a 255,50 m).

Algunos niveles de areniscas presentan cemento carbonático, lo que le confiere a éstas cierta tenacidad.

En todos los pozos en los que la Formación Arapey está presente, el tope de la Formación Tacuarembó se presenta silicificado por metamorfismo de contacto. El nivel silicificado no suele superar 1 a 2 m de potencia, coincidiendo con lo que se ha constatado en campo.

2.5. Formación Arapey

Esta unidad está ausente o reducida en el Sur del área de estudio (0 m en el pozo Pepe Núñez E-1b a 42,38 a en el pozo Cañada del Charrúa E-2) y presenta su mayor desarrollo al Norte (78,53 m en el pozo Quintana E-2 a 146,40 m en el pozo Quintana E-3; ver perfiles en Fig. 66). Se adopta aquí el criterio definido por Bossi (1966) de determinar la base de la unidad por la base de la primera colada basáltica.

En los pozos, la Formación Arapey comprende mayormente basaltos grises oscuros, afaníticos, masivos (Fig. H16A), similares a los que se presentan aflorando o subaflorando en la mayor parte del área. Algunos niveles presentan fracturas de espesor milimétrico a centimétrico, que pueden estar rellenas por calcita y calcedonia (Fig. H16B). Subordinadamente aparecen niveles amigdaloides poco potentes (de menos de 1 m hasta 6 m), con vacuolas milimétricas a centimétricas también rellenas por calcita y calcedonia (Fig. H17). Dichos niveles amigdaloides coinciden con los topes de coladas (notablemente en los pozos Quintana E-1 y E-2), y también con la base de la unidad, aunque en el contacto con la unidad infrayacente el basalto aparece alterado y de color *bordeaux*. Raramente aparecen diques clásticos en el basalto (e.g. en torno a 71 m y a 86 m en el pozo Quintana E-1).

En algunos pozos se observan también niveles de brechas volcánicas (similares a las descritas en afloramientos) correspondiendo al tope y ba-

se de las coladas. Se trata de brechas clasto soportadas, compuestas por clastos angulares, policentimétricos, de basalto amigdaloides en una matriz de arenisca (Fig. H18). Es el caso de los pozos Quintana E-1 (5,5 a 12,70 m y 60,74 a 61,23 m), Quintana E-2 (45,47 a 46,06 m) y Quintana E-3 (0 a 28,50 m y 93,70 a 95,60 m).

También existen niveles poco potentes (de menos de 1 m hasta 2 m) de areniscas finas, anaranjadas, cuarzosas, bien redondeadas y bien seleccionadas, con clastos ameboidales de basalto vacuolar, interpretados como peperitas fluidales. Estas peperitas suprayacen a niveles de basalto amigdaloides e infrayacen a niveles de brechas volcánicas, marcando una interrupción temporaria en la efusión de lavas (Fig. H19). Esto se observa en los pozos Quintana E-1 (61,23 a 62,50 m y 94,11 a 94,64 m), Quintana E-2 (46,06 a 48,06 m) y Quintana E-3 (en torno a 91 m).

El pozo Quintana E-3 presenta además ciertas particularidades. Por un lado, la presencia de niveles de potencia variable (2 a 26 m) de conglomerados/brechas, con clastos centimétricos angulosos a subredondeados de basalto y granito (Fig. H20), en una matriz fina de color gris oscuro (probablemente proveniente del propio basalto); estos niveles se intercalan por contacto con falla (Fig. H22B) con los basaltos masivos anteriormente descritos en las siguientes profundidades: 46,9 a 49 m, 67,10 a 93,00 m y 95,60 a 103,10 m). Por otro lado, se observa entre 127,10 y 146,40 m una conspicua transición hacia la unidad infrayacente caracterizada por una intercalación cíclica de niveles mayormente métricos de basalto de color violáceo, con niveles de areniscas finas anaranjadas con clastos centimétricos-decimétricos de areniscas y basalto vacuolar violáceo (Fig. H23).

2.6. Facies y asociaciones de facies

En base a las facies descritas hasta el momento para las diferentes unidades sedimentarias atravesadas en los pozos, se identificaron cinco asociaciones de facies (Tabla 15), de base a tope:

- asociación de facies glacio-lacustre y asociación de facies glacio-fluvial, materializadas en la Formación San Gregorio;
- asociación de facies eólica, materializada en la Formación Buena Vista;
- asociación de facies fluvio-eólica/fluvio-lacustre y asociación de facies eólica, materializadas en la Formación Tacuarembó.

Por mayores detalles ver Tabla 15.

2.7. Sección geológica

Se reconstruye una sección geológica orientada groseramente SSE-NNO (Fig. 67), desde el pozo Cañada del Charrúa E-2 al pozo Quintana E-2, pasando por los pozos Pepe Núñez E-1b y Quintana E-1. Resulta evidente que la región de Quintana, particularmente del pozo Quintana E-1, sería un alto donde las formaciones San Gregorio y Buena Vista prácticamente no se depositaron o bien se erosionaron.

Se propone que una falla NO-SE (control del arroyo Mataojo Chico) explicaría las diferencias existentes en el área de estudio:

- en lo referente a la distribución espacial y espesores de las distintas unidades atravesadas (menor espesor de la Formación Arapey al Sur; ausencia de la Formación Buena Vista al Norte; mayor espesor de las formaciones Tacuarembó y San Gregorio al Sur), como resultado de lo cual la profundidad de la cuenca es diferente (entre 464,57 m y 515,40 m al Sur; entre 297,57 y 353,10 m al Norte);
- en lo referente a la naturaleza del basamento (granito al Sur; gneiss máfico al Norte, con gran diferencia composicional y de deformación).

A su vez, en el Norte del área existiría otra falla, también NO-SE (control de la Cañada Grande, afluente del Arroyo Mataojo Grande) que explicaría:

- la diferencia en la profundidad del basamento entre los pozos Quintana E-1 y E-2, que es de unos 100 m en pozos separados tan sólo 1,6 km;

- el hecho de que la diabasa cortada en el pozo Quintana E-1 no aparezca en Quintana E-2.

La edad del movimiento principal de la falla sería pre-cretácica, dado que el límite de coladas¹⁴ continúa prácticamente a la misma cota en ambos pozos (unos 137 m sobre el nivel del mar). Además, la diferencia de profundidad de la base de la Formación Arapey entre estos pozos es de sólo 10 m (explicables por la paleotopografía imperante previa a la efusión de los basaltos, más que por una leve reactivación post-basáltica).

Esta hipótesis del control ejercido por las mencionadas fallas NO-SE en el área será testeada en el capítulo siguiente con el modelado de densidad y las secciones magnetoteléuricas.

Otros resultados que pueden inferirse de la sección geológica, esta vez para el Sur del área, incluyen:

- el aumento de potencia de las lutitas grises a negras de la Formación San Gregorio en el pozo Cañada del Charrúa E-2 por comparación con Pepe Núñez E-1b (20 m vs. 13 m);

- a la inversa, la disminución de potencia de la base de la Formación San Gregorio en el pozo Cañada del Charrúa E-2 por comparación con Pepe Núñez E-1b (21 m vs. 33 m);

- la posible correlación de niveles fosilíferos (dislocados por falla) de la base de la Formación Tacuarembó entre los pozos Cañada del Charrúa E-2 y Pepe Núñez E-1b.

¹⁴ Marcado en ambos pozos por la siguiente sucesión, de base a tope: 5 a 6 m de basaltos amigdaloides – 1,3 a 2 m de areniscas de *intertrap* – 0,5 a 0,6 m de brechas volcánicas.

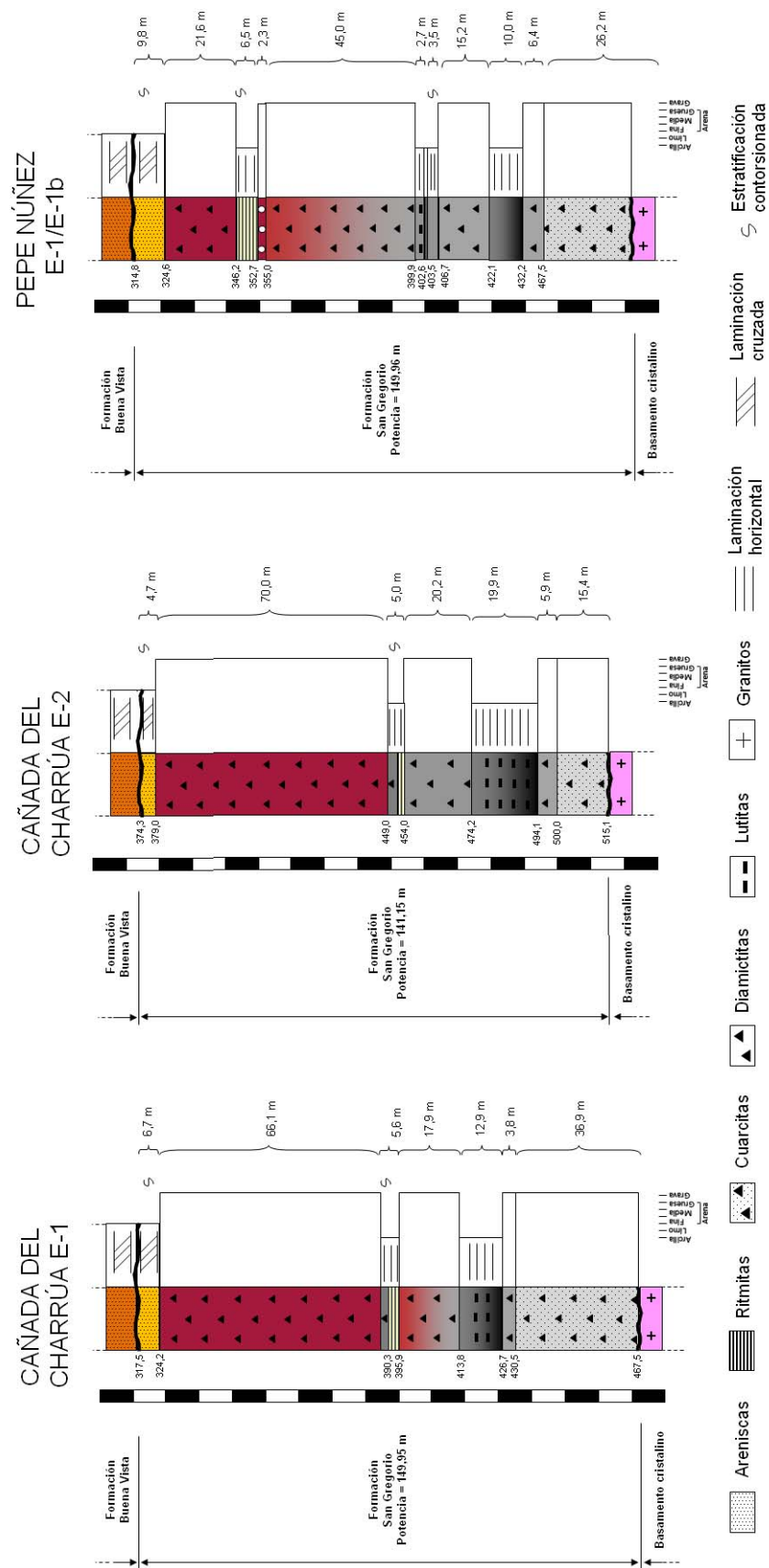


Figura 65. Columna estratigráfica de la Formación San Gregorio en los pozos Cañada del Charrúa E-1 y E-2 y Pepe Núñez E-1/E-1b.

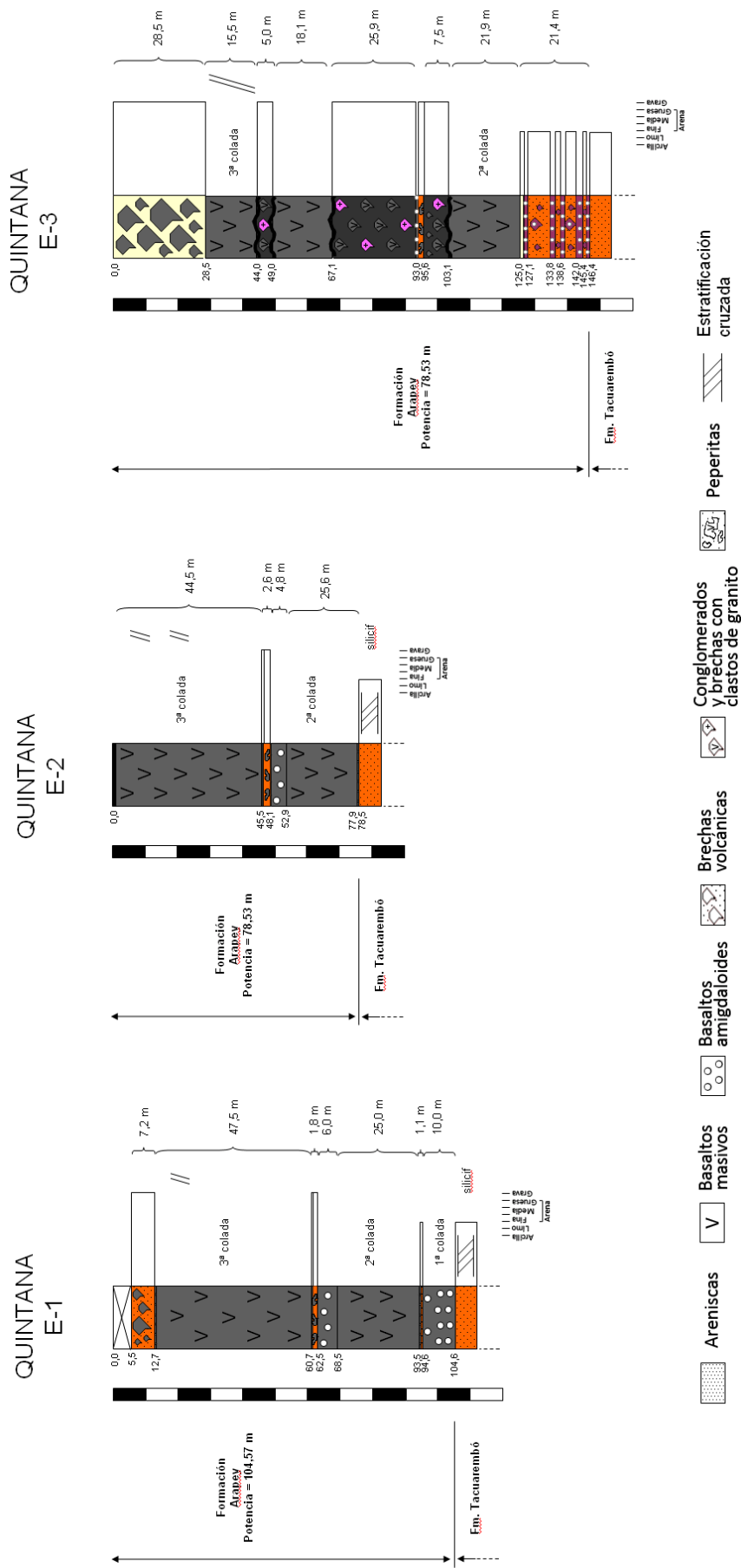


Figura 66. Columna estratigráfica de la Formación Arapey en los pozos Quintana E-1, E-2 y E-3.

Tabla 15. Resumen de facies y asociaciones de facies identificadas en las unidades sedimentarias de los pozos.

Unidad	Asociaciones de facies	Facies	Mejores ejemplos en pozo
Formación Tacuarembó	Asociación de facies eólica	Areniscas rojizas finas con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte	Cañada del Charrúa E-2
		Areniscas rojizas finas con estratificación sub-horizontal a horizontal	
	Asociación de facies fluvio-eólica/ fluvio-lacustre	Areniscas amarillentas y verdosas masivas o con estratificación horizontal, con delgados niveles pelíticos masivos	Quintana E-1, Cañada del Charrúa E-2
		Areniscas pardas y anaranjadas con estratificación cruzada horizontal y de ángulo bajo a medio	
Areniscas conglomerádicas con intra-clastos pelíticos			
Formación Buena Vista	Asociación de facies eólica	Areniscas rojizas finas con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte	Pepe Núñez E-1b, Cañada del Charrúa E-2
		Areniscas rojizas finas con estratificación sub-horizontal a horizontal	
Formación San Gregorio	Asociación de facies glacio-fluvial	Areniscas anaranjadas con estratificación cruzada	Pepe Núñez E-1b, Cañada del Charrúa E-1 y E-2
		Diamictitas	
		Conglomerados	
	Asociación de facies glacio-lacustre	Ritmitas	Pepe Núñez E-1b, Cañada del Charrúa E-1 y E-2
		Lutitas grises a negras	
		Diamictitas con niveles pelíticos	

3. PETROGRAFÍA

Se realizaron nueve secciones delgadas de diferentes litologías, sobre muestras tanto de afloramientos como de pozos (ver Tabla 14). Dichas láminas (Figs. 68 a 76), que se encuentran en el repositorio de la litoteca de ANCAP, son descritas a continuación.

► Brecha volcánica (Fig. 68) con clastos centimétricos de basalto de grano fino (con textura subofítica, incluyendo numerosos fenocristales de plagioclasa de hasta 0,3 mm de largo), en una matriz de arenisca muy fina a fina compuesta fundamentalmente por clastos de cuarzo. Litoestratigráficamente corresponde a la Formación Arapey.

► Basalto (Fig. 69) de grano fino, porfirítico. Se observan fenocristales automorfos de plagioclasa, piroxeno y olivino (e.g. centro y vértice superior derecho), estos últimos con fracturas, en una matriz de textura subofítica a intersertal de plagioclasa y óxidos. Abundantes opacos. Litoestratigráficamente corresponde a la Formación Arapey.

► Conglomerado (Fig. 70) de clastos policentimétricos de basalto masivo (con plagioclasa y olivino subordinado) y granito, aunque en la lámina sólo se aprecia la matriz de dicho conglomerado. Ésta posee tamaño variable (mayormente arena muy fina a media), y está compuesta por clastos de basalto, cuarzo y feldespato (incluyendo microclina). Litoestratigráficamente corresponde a la Formación Arapey.

► Arenisca (Fig. 71) moderadamente seleccionada (esqueleto: arena media, matriz: arena muy fina), compuesta mayormente por clastos de cuarzo; se observan clastos de feldespatos subordinados. Los clastos muestran una pátina ferruginosa. La mayoría de los clastos exhiben mayor grado de redondez y esfericidad que en la arenisca descrita a continuación. En este mismo nivel se recobraron escamas de peces ganoides. Litoestratigráficamente corresponde a la base de la Formación Tacua-rembó.

► Arenisca (Fig. 72) bien seleccionada (mayormente arena fina), compuesta por clastos de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. Los clastos muestran una pátina ferruginosa. La mayoría de los clastos exhiben menor grado de redondez y esfericidad que en la arenisca de la Formación Tacuarembó (ver debajo). Litoestratigráficamente corresponde a la Formación Buena Vista.

► Diamictita (Fig. 73) con matriz tamaño limo, compuesta al menos en parte por cuarzo y sericita, y clastos de cuarzo, feldespato (localmente sericitizado) y granito de tamaño variable (arena muy fina a grava). Opacos en importante proporción (>10%). Existen intercalaciones de láminas ricas en micas y minerales de arcilla que se disponen en torno a los clastos mayores. Litoestratigráficamente corresponde a la base de la Formación San Gregorio.

► Cuarcita (Fig. 74) con selección moderada (esqueleto: arena media, matriz: limo grueso) compuesta por clastos (mayormente de cuarzo) con contactos largos y cóncavo-convexos entre sí. Se asigna tentativamente a la base de la Formación San Gregorio, aunque no se descarta que corresponda a una unidad más antigua, como fue discutido anteriormente.

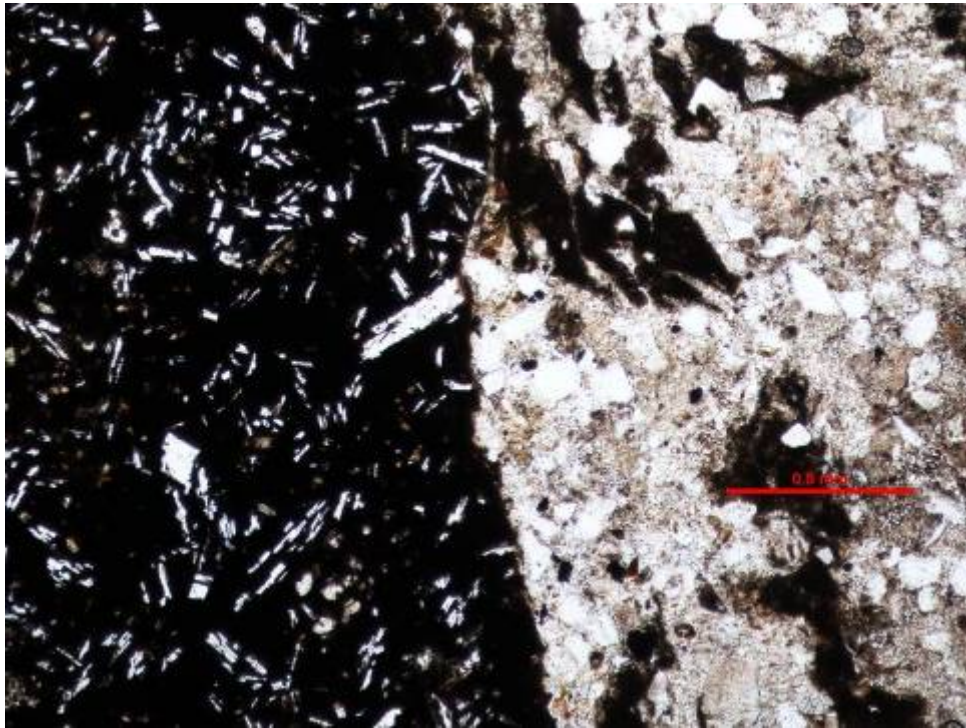
► Granito (Fig. 75) de grano grueso y textura inequigranular compuesto por cristales subautomorfos a xenomorfos de feldespato (mayormente plagioclasas, pero también feldespato potásico; algunos de ellos alterados a mica), cuarzo (policristalino) y biotita.

► Gneiss (Fig. 76) con bandas de minerales félsicos como cuarzo (mono y policristalino) y feldespato potásico perfitico, y máficos como anfíbol (probablemente hornblenda, en cristales automorfos) y olivino.

Tabla 14. Secciones delgadas realizadas en este trabajo.

Código	Litología	Tipo de muestra	Profundidad
<i>Outcrop</i> n° 3	Brecha volcánica	Afloramiento	–
<i>Outcrop</i> n° 4	Basalto B	Afloramiento	–
QE3	Conglomerado	Testigo (pozo Quintana E-3)	46,5 m
PNE1	Arenisca	Testigo (pozo Pepe Núñez E-1)	248,5 m
PNE1	Arenisca	Testigo (pozo Pepe Núñez E-1)	314,5 m
PNE1b	Diamictita con láminas pelíticas	Testigo (pozo Pepe Núñez E-1b)	433,7 m
CCE2	Cuarcita	Testigo (pozo Cda del Charrúa E-2)	512 m
PNE1b	Granito rosado	Testigo (pozo Pepe Núñez E-1b)	465,7 m
QE1	Gneiss máfico	Testigo (pozo Quintana E-1)	300,5 m

A



B

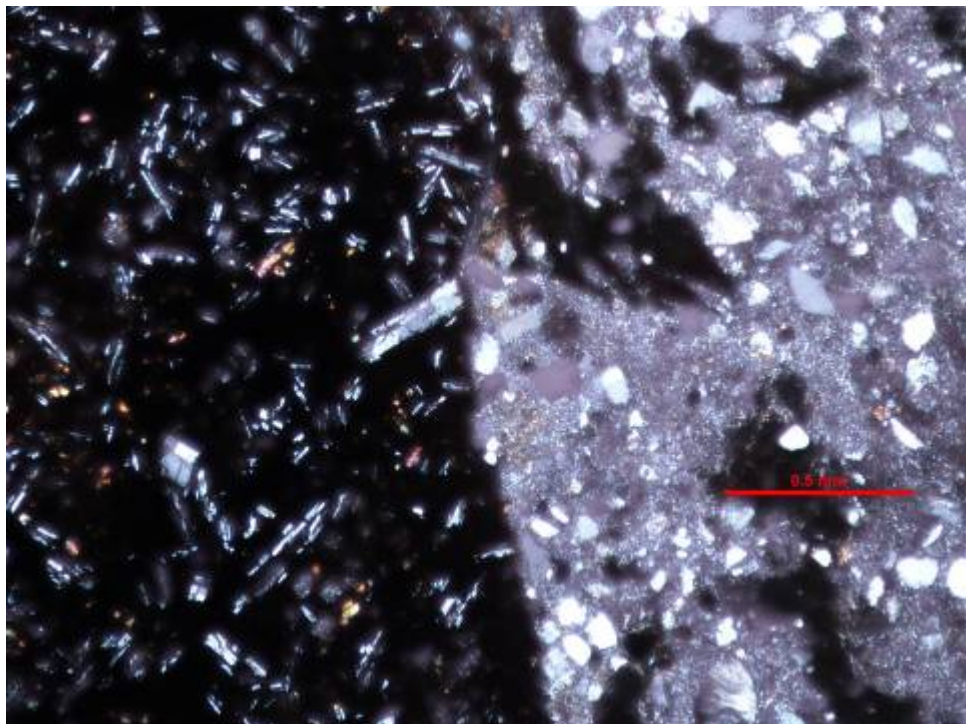


Figura 68. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de afloramiento de una brecha volcánica (Formación Arapey, ver Fig. 66). Se aprecia a la izquierda un clasto policentimétrico de basalto (con fenocristales de plagioclasas), y a la derecha la matriz (areniscas cuarzosa muy fina). **A**, nicols paralelos. **B**, nicols cruzados.

A

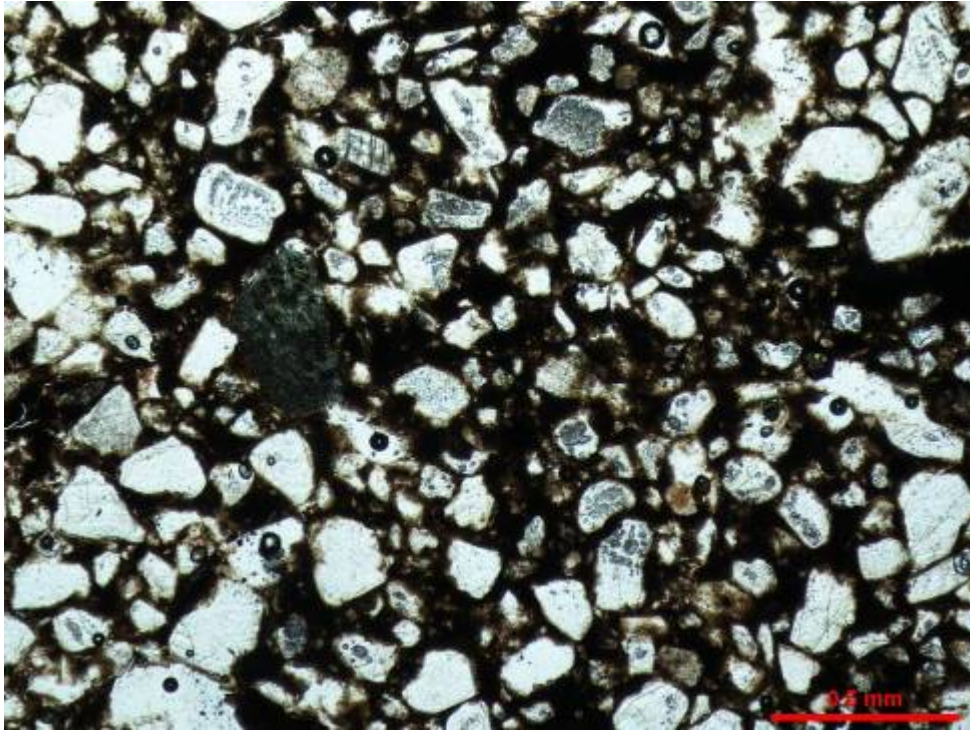


B



Figura 69. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de afloramiento de un basalto gris (Formación Arapey; ver Figs. 51 y 52). Nótese el grano fino y la textura porfirítica, con fenocristales automorfos de plagioclasa, piroxeno y olivino (e.g. centro y vértice superior derecho). **A**, nicoles paralelos. **B**, nicoles cruzados.

A



B

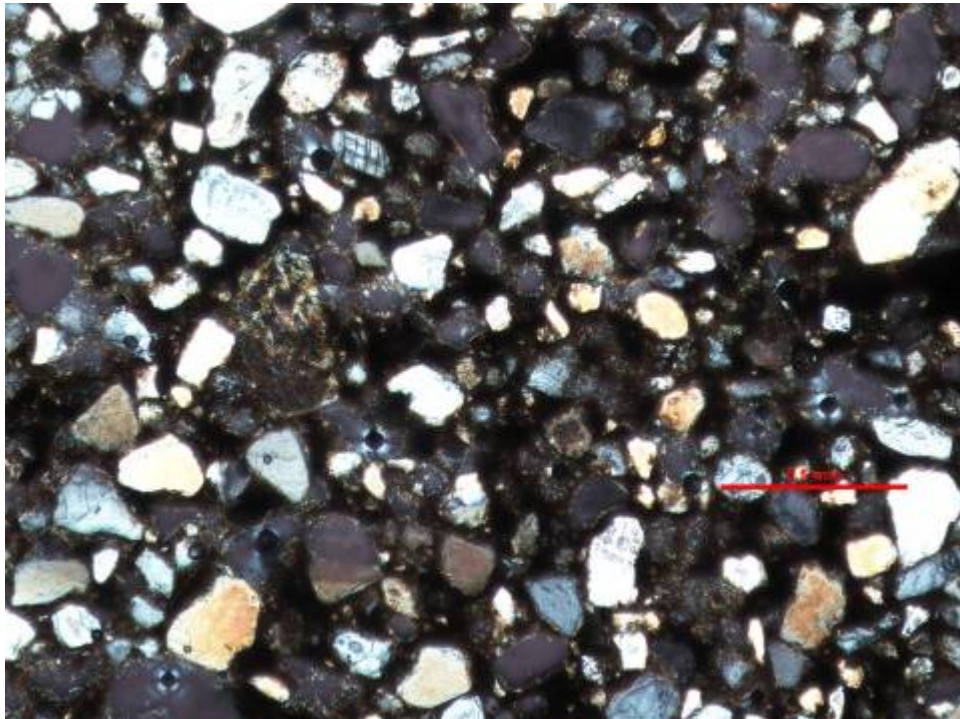
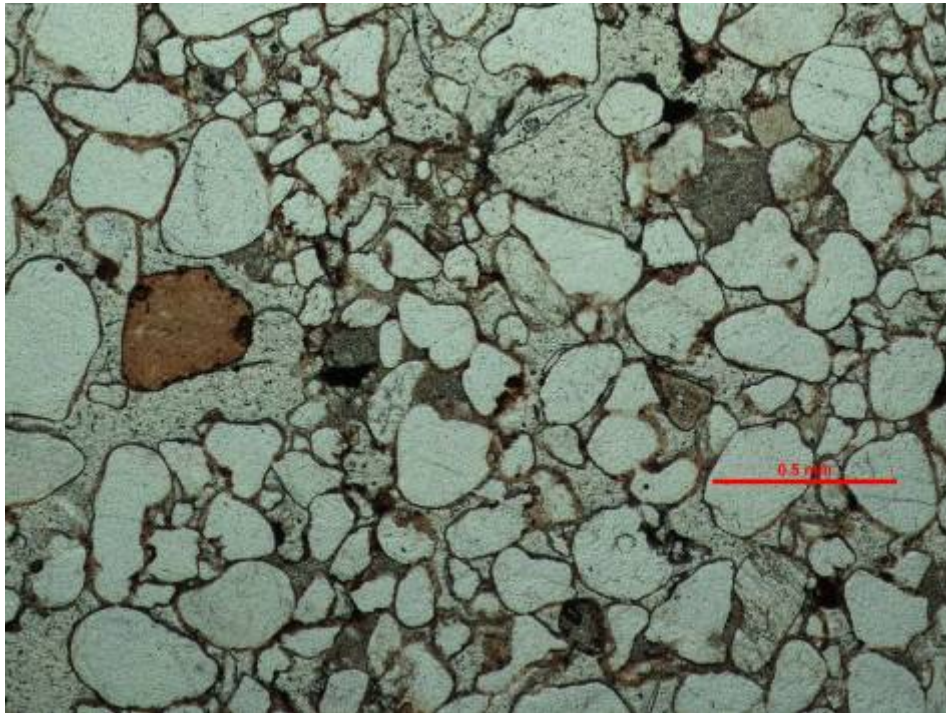


Figura 70. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de testigo de conglomerado (Formación Arapey; ver Fig. 122). Se aprecia la matriz de arena muy fina a fina, compuesta por clastos de cuarzo, feldespato (ver microclina arriba a la izquierda) y líficos. **A**, nicols paralelos. **B**, nicols cruzados.

A



B

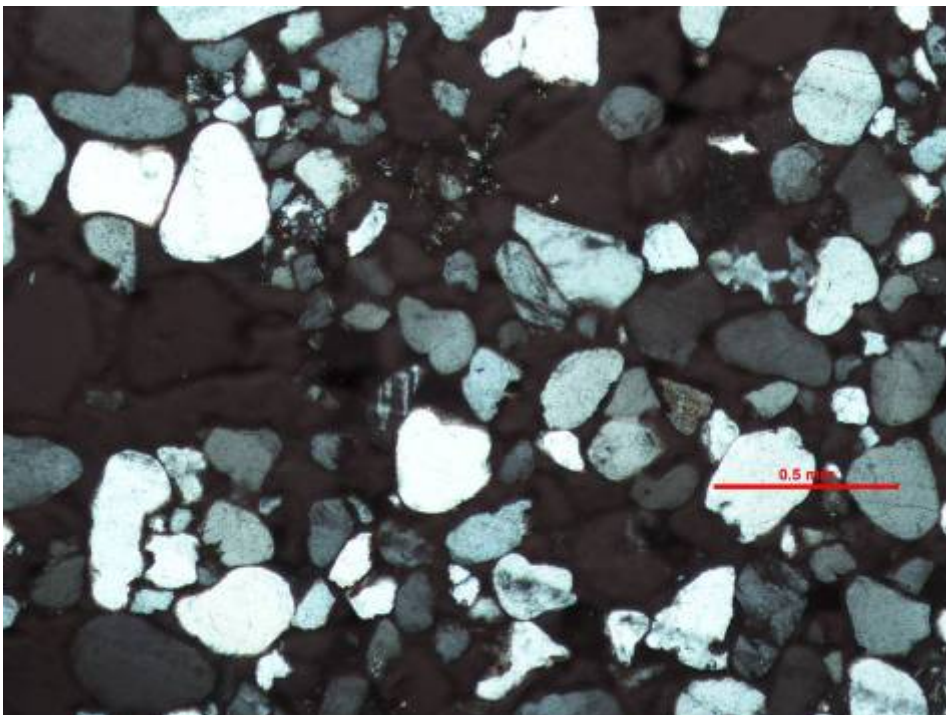
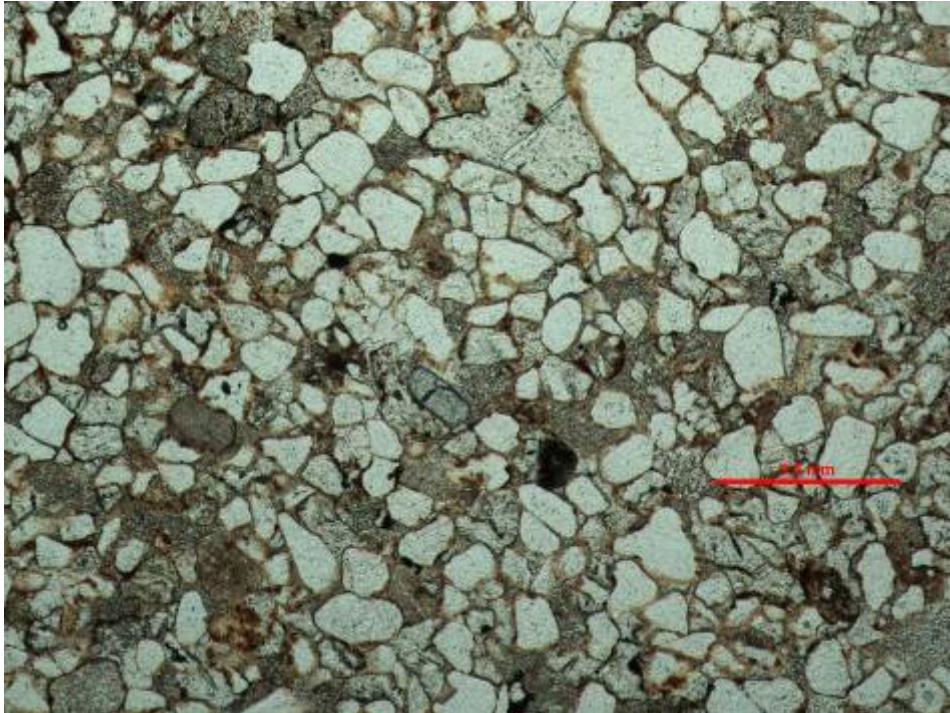


Figura 71. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de testigo de arenisca fina (base de la Formación Tacuarembó; ver Fig. 135b). Nótese composición mayoritariamente cuarzosa (se observa un clasto de feldespato a la izquierda del centro), selección moderada (arena muy fina a media) y alto grado de redondez. **A**, nicoles paralelos. **B**, nicoles cruzados.

A



B

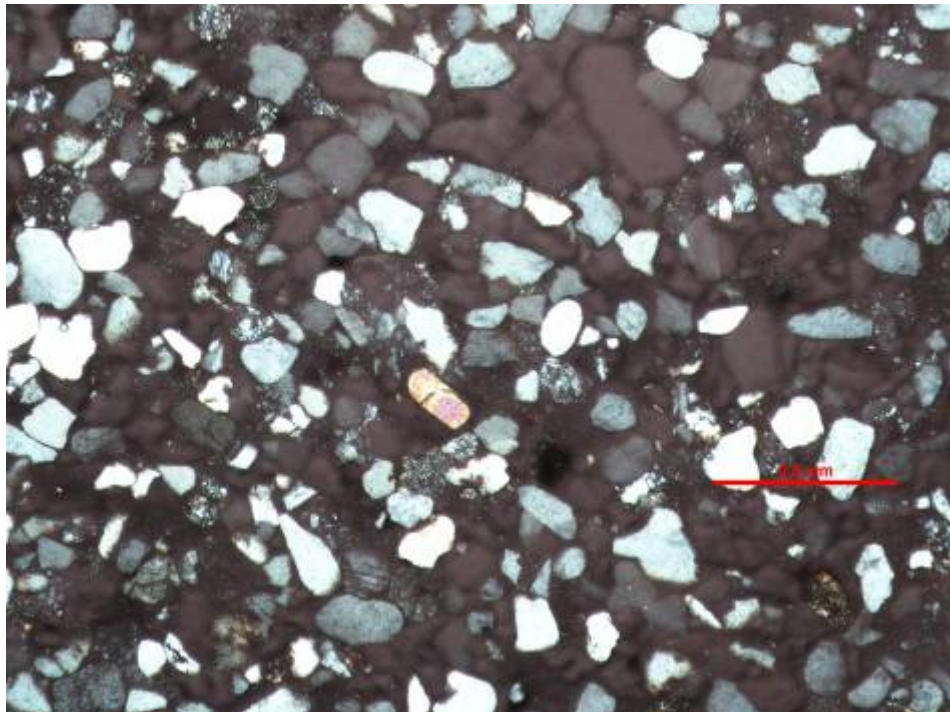
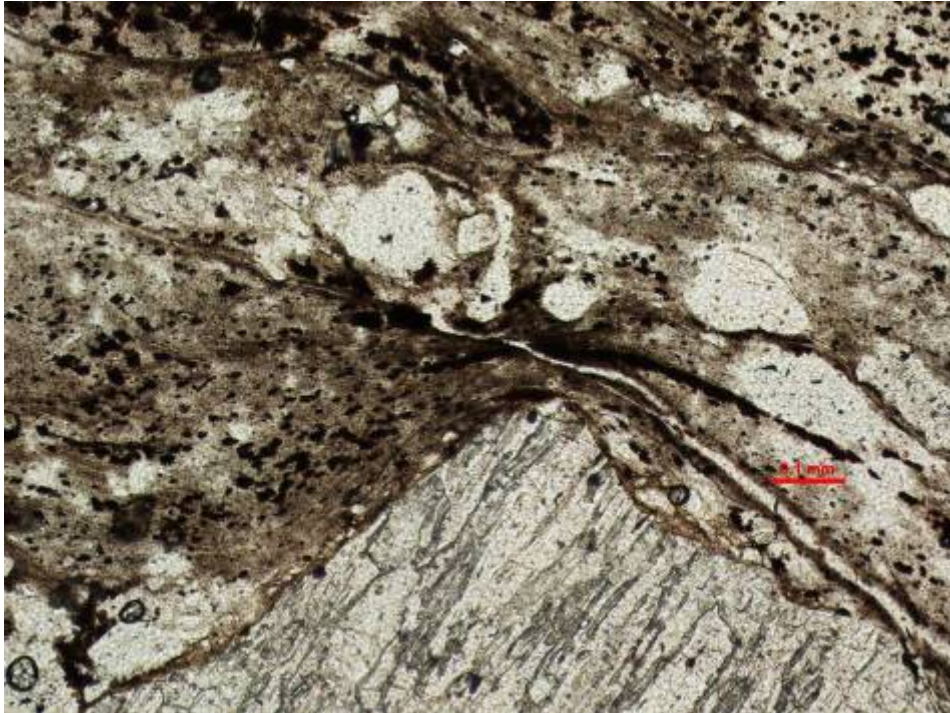


Figura 72. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de testigo de arenisca fina (base de la Formación Buena Vista; ver Fig. 113). Se aprecian clastos de cuarzo y feldspatos (con pátina de óxidos de hierro), subredondeados a subangulosos, buena selección (mayormente arena fina). **A**, nicoles paralelos. **B**, nicoles cruzados.

A



B

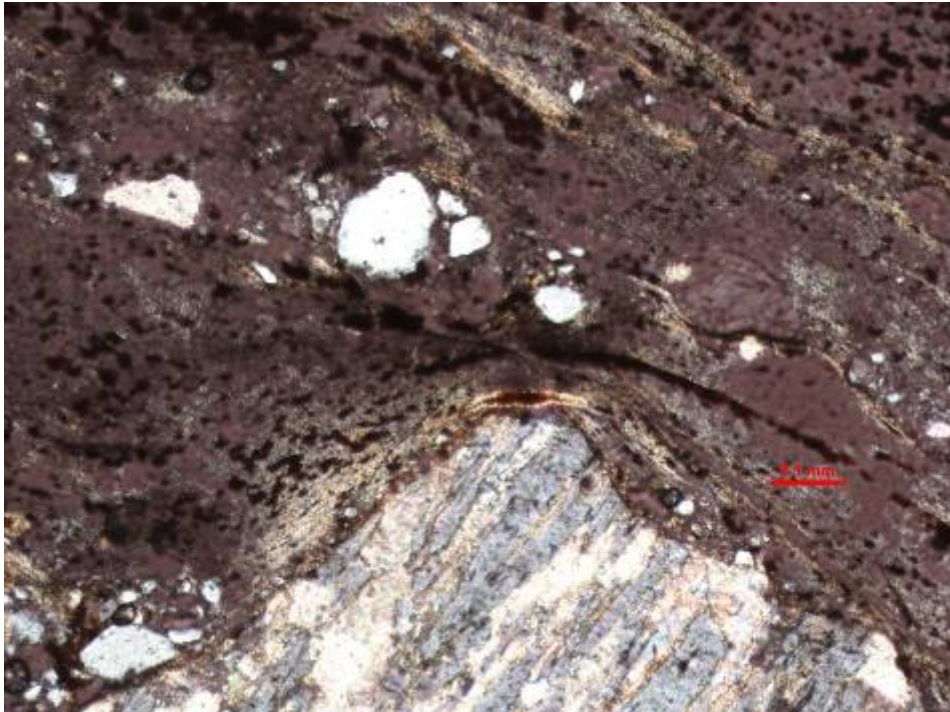
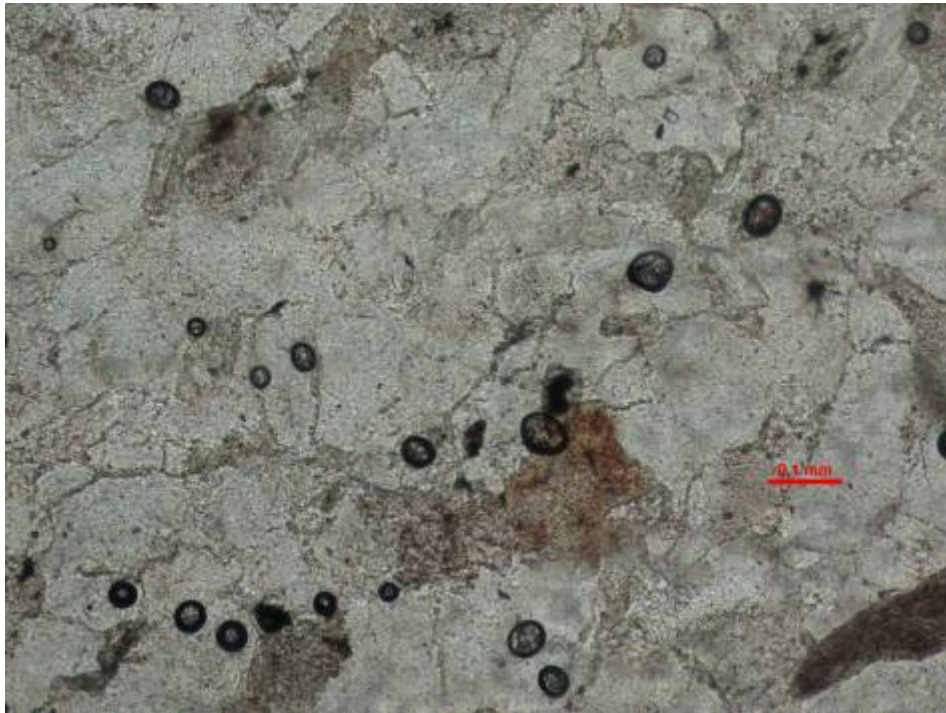


Figura 73. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de testigo de diamictita (Formación San Gregorio; ver Fig. 105). Diamictita de matriz limosa (compuesta por cuarzo y sericita), con clastos de cuarzo, feldespato y granito (éstos últimos tamaño grava). **A**, nicoles paralelos. **B**, nicoles cruzados.

A



B

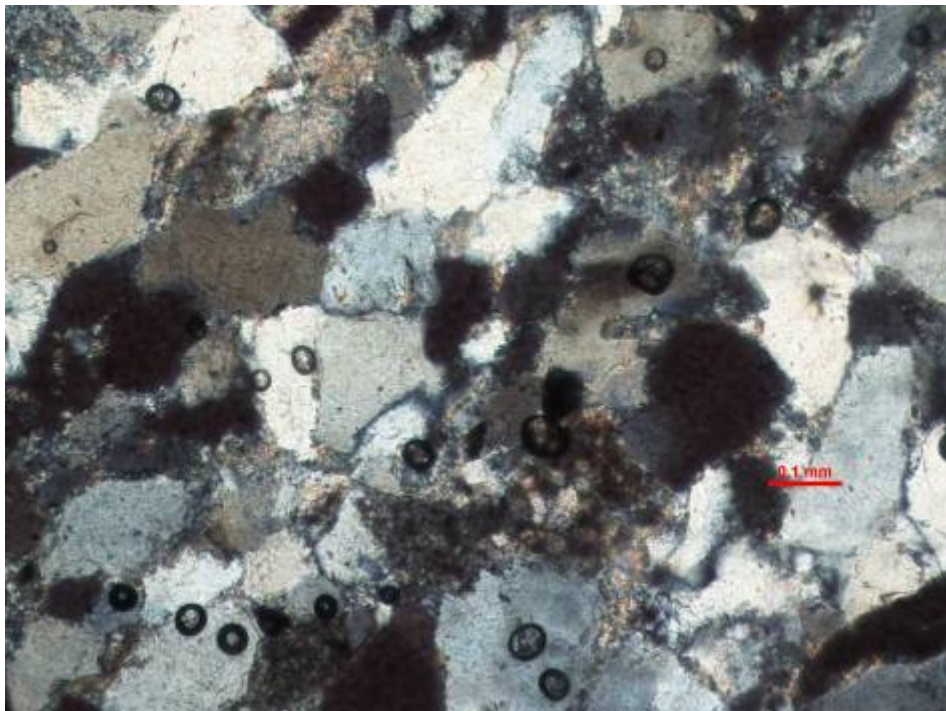
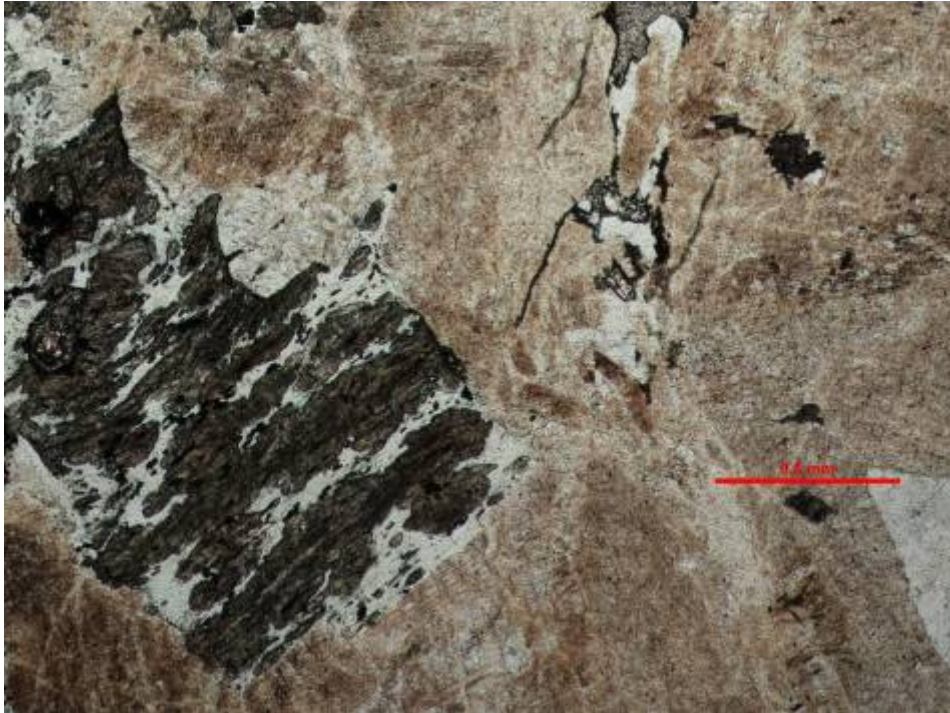


Figura 74. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de testigo de cuarcita (¿base de Formación San Gregorio?; ver Fig. 104). Se observan clastos de cuarzo mayormente tamaño arena fina a media, con contactos largos y cóncavo-convexos. **A**, nicoles paralelos. **B**, nicoles cruzados.

A



B

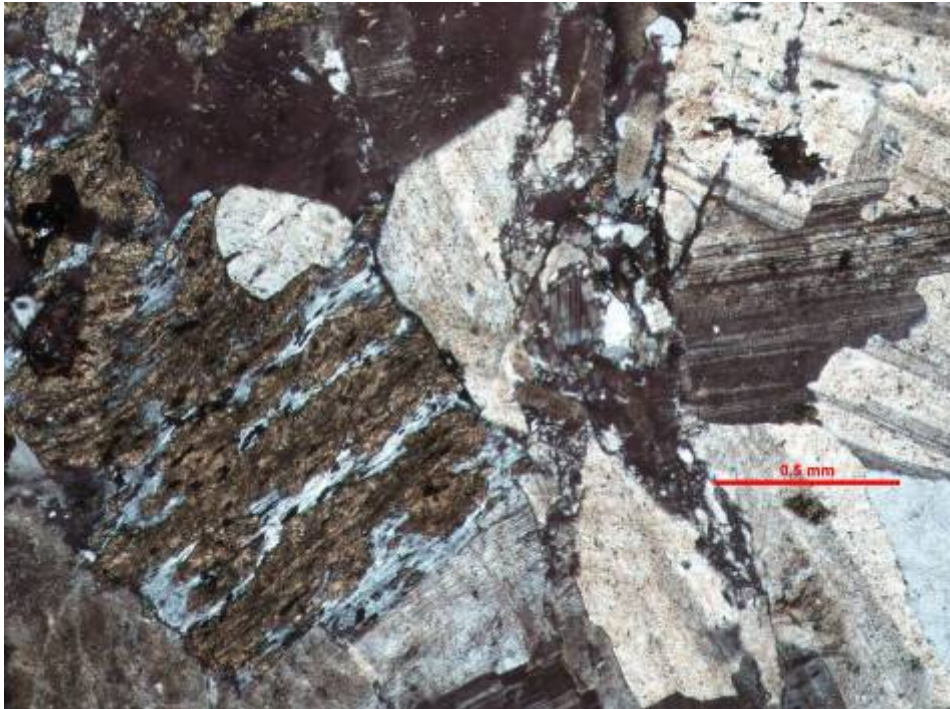
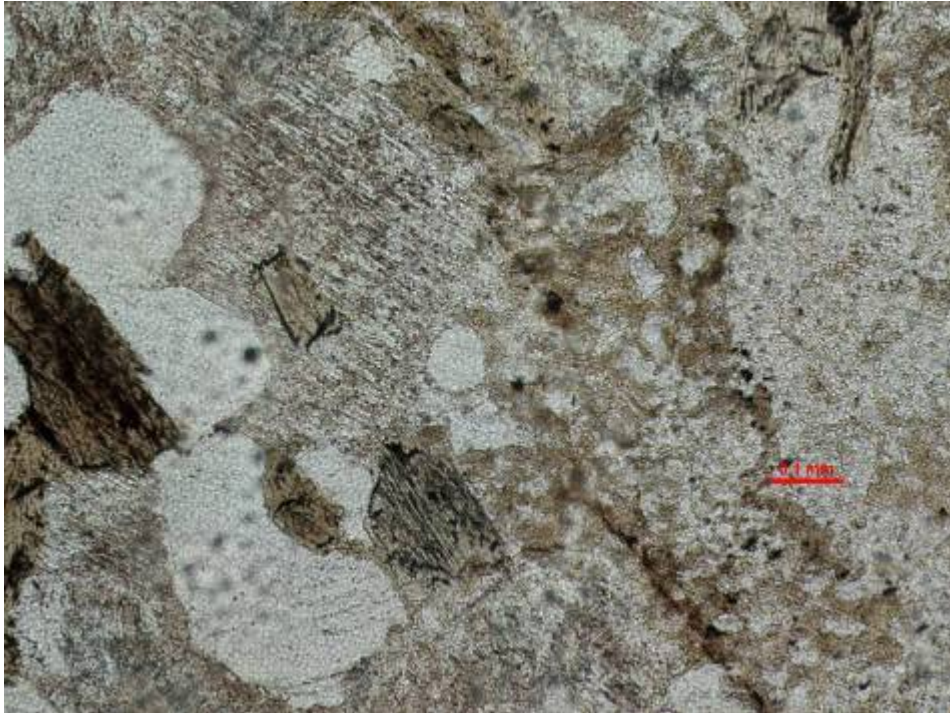


Figura 75. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de testigo de granito (basamento cristalino; ver Fig. 102). El tamaño de grano es grueso. La textura es inequigranular. Se observan cristales subautomorfos de plagioclasas, feldespato potásico, biotita y cuarzo policristalino. **A**, nicoles paralelos. **B**, nicoles cruzados.

A



B

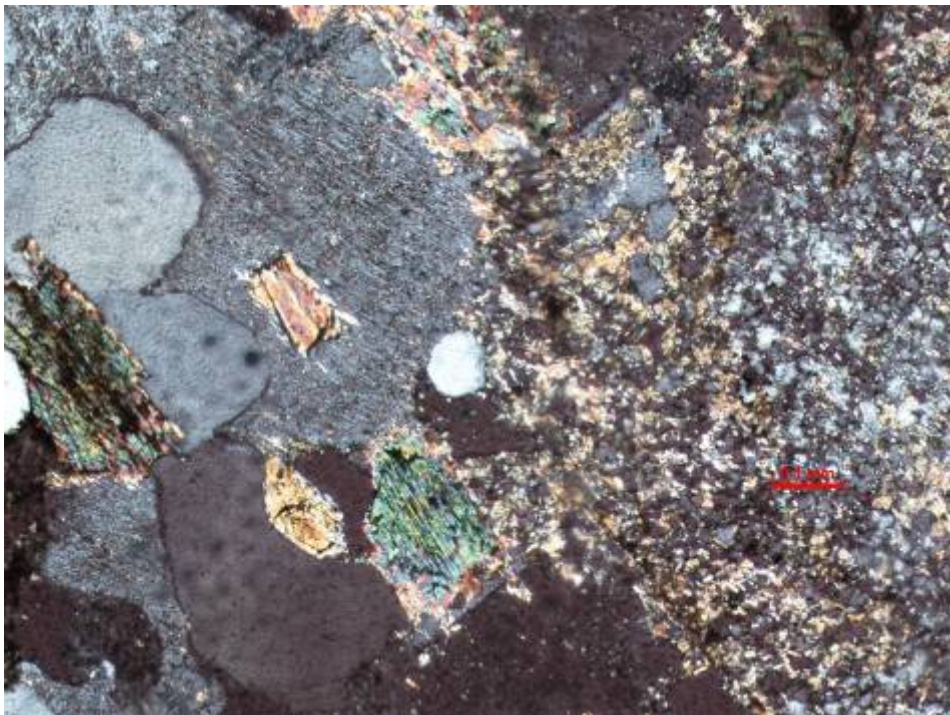


Figura 76. Fotomicrografías de sección delgada de muestra de testigo de gneiss (basamento cristalino; ver Fig. 103). Se observan cristales automorfos de anfíboles y olivinos, así como cristales de feldespato potásico perfitico. **A**, nicoles paralelos. **B**, nicoles cruzados.

4. PALEONTOLOGÍA Y PALINOLOGÍA

A nivel de superficie, no se observaron fósiles en el área. La única excepción es un posible icnofósil consistente en una serie de tubos paralelos excavados en arenisca (Fig. 78A), cuya edad y organismo productor no están aún descritos. Por otro lado, en algunos de los testigos de perforación se han observado microfósiles y palinomorfos, como se detalla a continuación.

4.1. Formación San Gregorio

Estudios palinológicos realizados sobre diamictitas y lutitas grises de los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1 y E-2 han permitido identificar abundantes palinomorfos, incluyendo elementos mayormente de origen continental, bien preservados (restos vegetales, polen, esporas), con raros elementos acuáticos (acritarcas y quistes algales).

Estas asociaciones palinológicas se asemejan a las del Pérmico Temprano de las cuencas Paraná y Chaco-Paraná. A título de ejemplo, la prasínofícea *Deusilites tenuistriatus* (e.g. a 403,5 m en Pepe Núñez E-1b; Fig. 77A) y el alga *Botryococcus* (e.g. a 424 m de profundidad en Pepe Núñez E-1b; Fig. 77C) es común en las mismas (Beri y Daners, 1996; Beri y Goso, 1996, 1998; Beri *et al.*, 2010). La presencia de ambos taxones sugiere ambientes no marinos para la unidad.

Se observaron escasos elementos Devónicos retrabajados, mayormente acritarcas (G. Daners, com. pers., 2013), situación similar a la reportada en unidades pérmicas atravesadas tanto en pozos exploratorios y estratigráficos del *onshore* (de Santa Ana *et al.*, 2006b; G. Daners, com. pers., 2013) como en pozos exploratorios del *offshore* (Veroslavsky *et al.*, 2003).

El único microfósil recobrado para esta unidad consiste en un gasterópodo aplanado, en lutitas grises a 490 m de profundidad del pozo Cañada del Charrúa E-2 (Fig. 78D), que podría ser el primer gasterópodo reportado para la unidad.

4.2. Formación Tacuarembó

En todos los casos, la morfología, tamaño, coloración y preservación de los restos son idénticos a los de los fósiles hallados en afloramientos de la Formación Tacuarembó (e.g. Perea *et al.*, 2009), proporcionando al menos en el caso de Pepe Núñez E-1 y Cañada del Charrúa E-2 un criterio objetivo para reconocer la base de la unidad.

En el pozo Pepe Núñez E-1 se recobró una escama ganoide de forma romboidal en areniscas rojizas a 245,91 m de profundidad (Fig. 78B). En el pozo Cañada del Charrúa E-2 se observó un nivel fosilífero en areniscas rosado-grisáceas entre 290,88 y 291,06 m de profundidad, que incluye fragmentos de huesos y escamas de peces. En el pozo Quintana E-1 se recobró un fragmento de hueso de pez en areniscas rosadas a 150,07 m de profundidad. La preparación de este hueso reveló debajo del mismo un diente de crocodiliforme, preservando tanto la corona como la raíz (Fig. 78C).

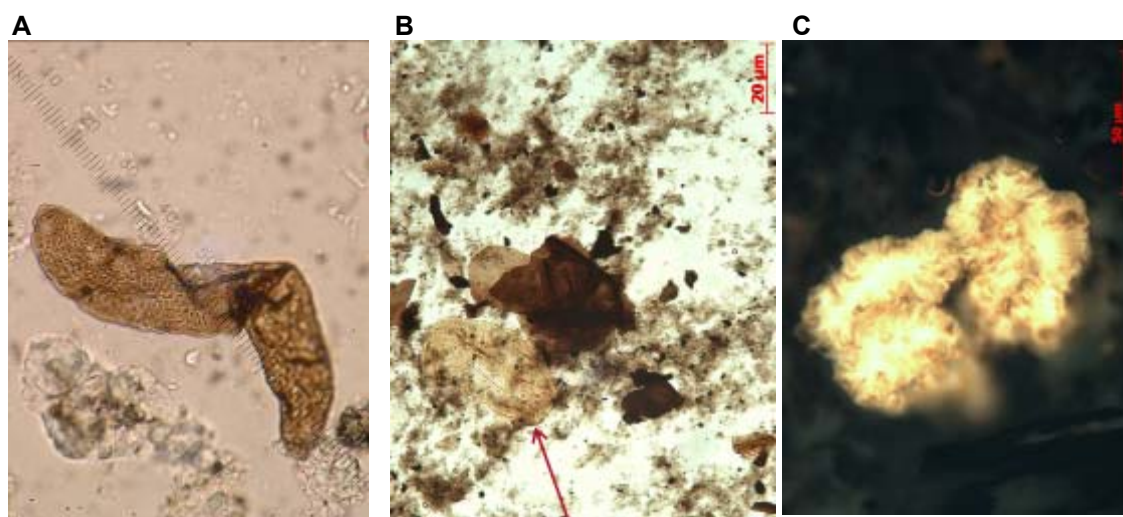


Figura 77. Palinomorfos en el pozo Pepe Núñez E-1b. **A**, alga *Deusillites tenuistriatus* (profundidad: 403,5 m). **B**, grano de polen bisacado (profundidad: 423 m). **C**, alga *Botryococcus* (profundidad: 424 m). Fotografías gentileza de Shell y Gloria Daners.



Figura 78. **A**, posible icnofósil. **B**, escama ganoide en areniscas de la Formación Tacuarembó. **C**, diente de crocodiliforme en areniscas de la Formación Tacuarembó. **D**, gasterópodo en pelitas grises de la Formación San Gregorio. Escala en C y D = 1 cm.

5. GRAVIMETRÍA

5.1. Estimación de profundidad de basamento

La primera aproximación de Ingesur (2013) al área de estudio fue realizar una estimación de la profundidad del basamento para el área de Pepe Núñez, considerando la mínima anomalía gravimétrica registrada (-21,4 mGal) y asumiendo, respecto al valor medio de densidad de la Tierra ($2,67 \text{ g/cm}^3$), un contraste de densidad de $-0,48 \text{ g/cm}^3$ para las rocas sedimentarias, de $0,38 \text{ g/cm}^3$ para el basalto y de $\pm 0,067 \text{ g/cm}^3$ para el basamento. El análisis de Ingesur (2013) consideró dos capas planas (rocas sedimentarias y basamento), despreciándose el espesor del basalto.

Los resultados indican que el espesor de la cuenca en el área oscilaría aproximadamente entre 700 y 1300 metros, siendo que a mayor densidad de los sedimentos y del basamento mayor es el espesor de la cuenca (Fig. 79).

No obstante, este escenario resultó ser demasiado optimista, dado que el pozo más profundo perforado en el área alcanzó el basamento a los 515,40 m, por lo que deben efectuarse ajustes en el modelo.

5.2. Mapa gravimétrico

ANCAP realizó recientemente un grillado de datos de anomalía gravimétrica Bouguer de variada procedencia (datos de la propia ANCAP y de la Dirección Nacional de Minería y Geología), obteniéndose el mapa inédito de la Fig. 137, que presenta mayor resolución que mapas previos realizados por la propia ANCAP (e.g. ver Fig. 9). Los gravímetros empleados en su momento fueron de las marcas *Worden* y *Lacoste & Romberg*. Las correcciones efectuadas comprendieron deriva instrumental, mareas lunisolares, latitud, aire libre y Bouguer.

Si se observa en detalle el área de Pepe Núñez se aprecia la estructuración NO y SE del área (Fig. 80). Asimismo, se distinguen tres bajos gra-

vimétricos relativos (colores fríos en la Fig. 80), aquí denominados Quintana (al noreste, prácticamente por fuera del área), Carumbé (al SO del área) y Pepe Núñez (centro-Sur), alcanzándose en este último valores de -23 mGal, así como un alto relativo (colores cálidos en la Fig. 80) de dirección NO-SE, de unos -5 mGal, situado al Norte del área. Este alto estaría asociado al alto de Gaspar-Biassini (de Santa Ana, 2004). La ubicación de las estaciones empleadas en el grillado se muestra en la Fig. 80.

Las seis perforaciones realizadas fueron emplazadas en dos situaciones diferentes, como se observa en la Fig. 80: en el bajo gravimétrico relativo de Pepe Núñez (entre -19 mGal en el pozo Pepe Núñez E-1b y -22 mGal en el pozo Cañada del Charrúa E-2) y en el alto gravimétrico relativo situado al O de Quintana (entre -9 mGal en el pozo Quintana E-3 y -12 mGal en el pozo Quintana E-1).

5.3. Modelado de densidad

Sobre la transecta Cañada del Charrúa-Pepe Núñez-Quintana (ver Fig. 144) se realizó un modelado de densidad (Fig. 81) empleando el software Oasis Montaj.

Las densidades empleadas fueron calculadas a partir de testigos, tras medir su masa en una balanza y calcular su volumen a partir de la fórmula de volumen de un cilindro (con la excepción del gneiss félsico, que se asumió igual a la del granito).

La densidad de las rocas sedimentarias es un promedio entre las densidades de las formaciones Tacuarembó, Buena Vista y San Gregorio (para las dos primeras se asumió que se trataba esencialmente de areniscas con porosidad media de 20%, saturada en agua). La unidad basal de cuarcitas es tan densa como el granito, pero posee un reducido espesor (en torno a 20 metros). Se despreció el efecto de los reducidos niveles de intertraps sobre la densidad del basalto.

El resultado del modelado fue un ajuste muy bueno entre las respuestas gravimétricas observadas (datos gravimétricos) y las calculadas, don-

de las oscilaciones de baja frecuencia corresponden al basamento y las oscilaciones de alta frecuencia al relieve del área. El mayor desajuste, observado en la región del pozo Quintana E-2, podría explicarse por una subestimación de la densidad del gneiss félsico.

El modelado confirma la importancia del lineamiento Mataojo Chico, que como ya lo había adelantado la geología de campo y de subsuelo, separan situaciones muy diferentes al Sur (bloque Cañada del Charrúa) y al Norte (bloque Quintana).

Las diferentes respuestas gravimétricas del bloque Cañada del Charrúa (bajo gravimétrico) y del bloque Quintana (alto gravimétrico) pueden explicarse por la combinación de tres factores:

- diferente profundidad del basamento (entre 465 y 515 m en bloque Cañada del Charrúa, entre 298 y 353 m en bloque Quintana)
- diferente densidad del basamento ($2,7 \text{ g/cm}^3$ en bloque Cañada del Charrúa, $2,9 \text{ g/cm}^3$ en bloque Quintana)
- diferente espesor de basaltos (entre 0 y 42 m en bloque Cañada del Charrúa, entre 79 y 127 en bloque Quintana¹⁵)

El buen ajuste de este modelado (Fig. 81) estimula la extrapolación de los mismos parámetros al resto del área e incluso fuera de ellas. Se infiere, por ejemplo, que los bajos gravimétricos observados al SO del arroyo Sopas (Carumbé) y, ya fuera del área, al Norte del arroyo Mataojo Grande, corresponderían a una situación semejante a la del bloque Cañada del Charrúa. En apoyo de esta interpretación preliminar puede citarse la presencia de areniscas al Norte del arroyo Mataojo Grande (no obstante aparentemente ausentes al SO del arroyo Sopas).

¹⁵ Debiendo agregarse en Quintana E-1 un espesor no determinado de diabasa, de densidad similar a la del basalto, y en otras zonas del bloque Quintana el importante espesor asociado a algunos cerros (e.g. Bonito, de la Virgen).

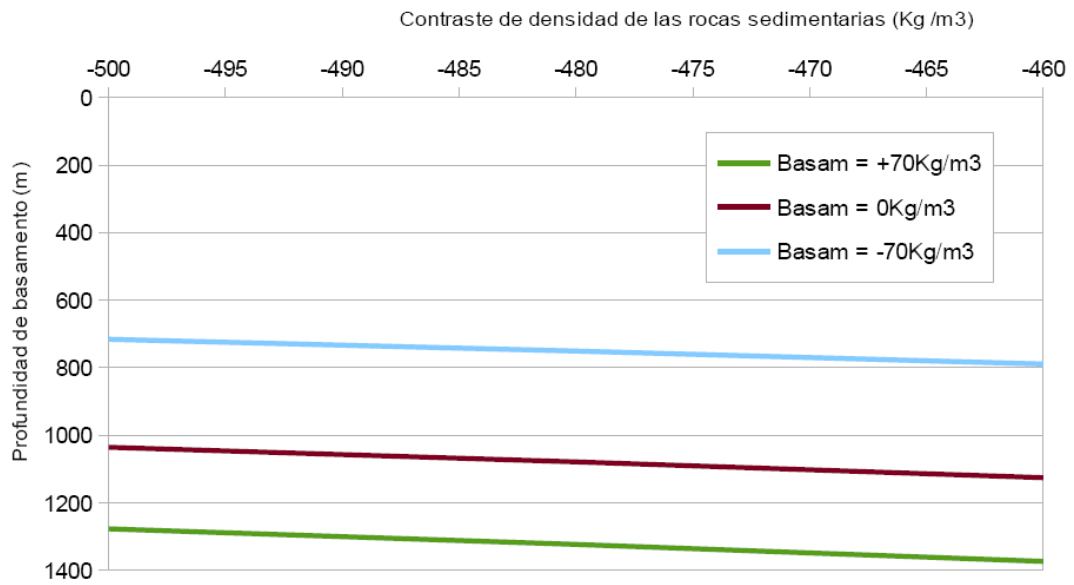


Figura 79. Estimación de profundidad de basamento en el área de Pepe Núñez en función del contraste de densidad del basamento cristalino (tres escenarios) y de las rocas sedimentarias. Tomado de Ingesur (2013).

Tabla 15. Densidades de las principales litologías del bloque Pepe Núñez, empleadas en el modelado de densidad.

Litología	Densidad (g/cm ³)
Rocas sedimentarias	2,3
Basalto	3,0
Granito	2,7
Gneiss máfico	2,9

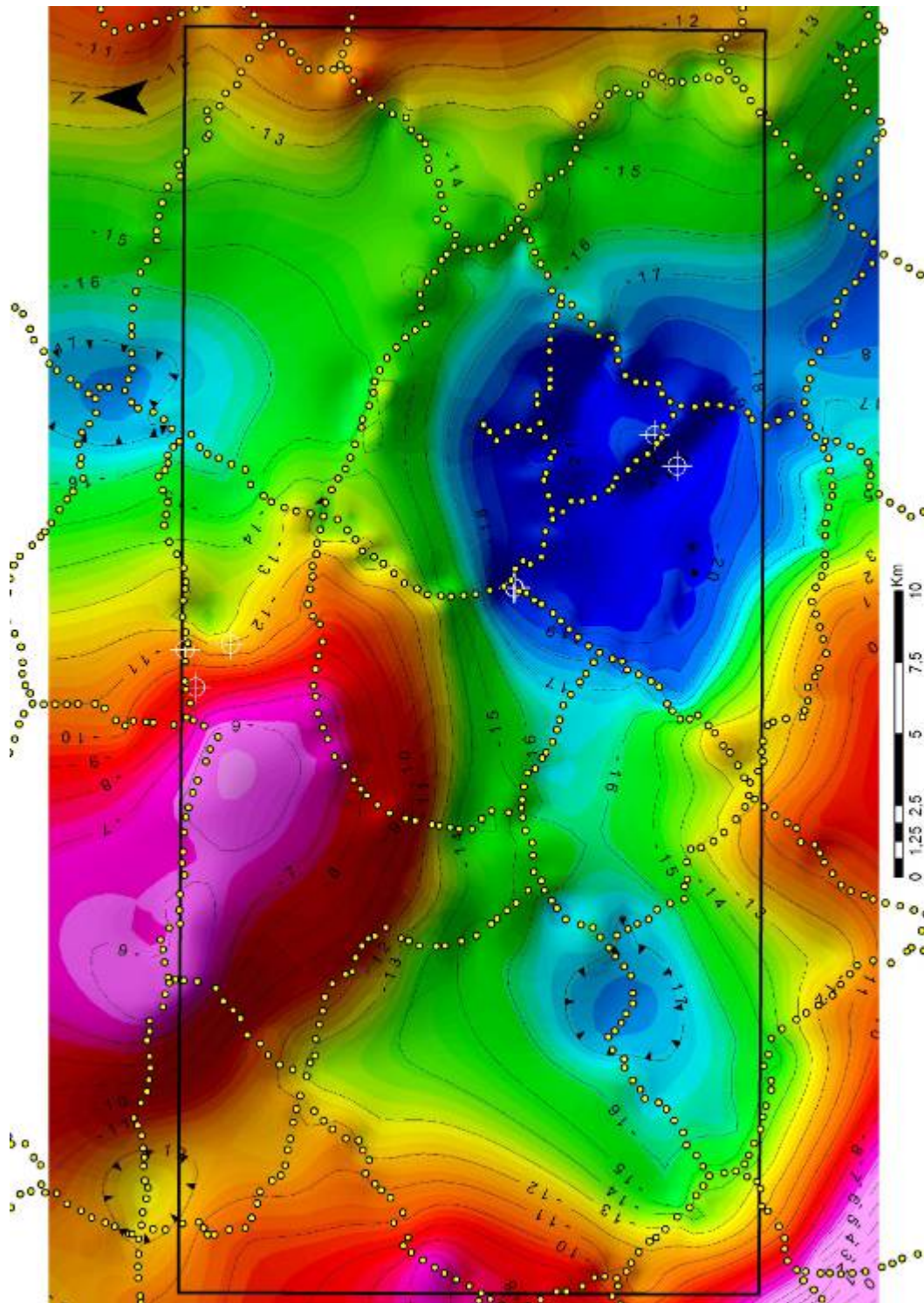


Figura 80. Mapa de anomalía gravimétrica Bouguer (en mgal) del bloque Pepe Núñez, basado en datos de ANCAP y DINAMIGE. Imagen gentileza de Pablo Rodríguez. Se incluye la ubicación de las seis perforaciones de estudio y de las estaciones gravimétricas.

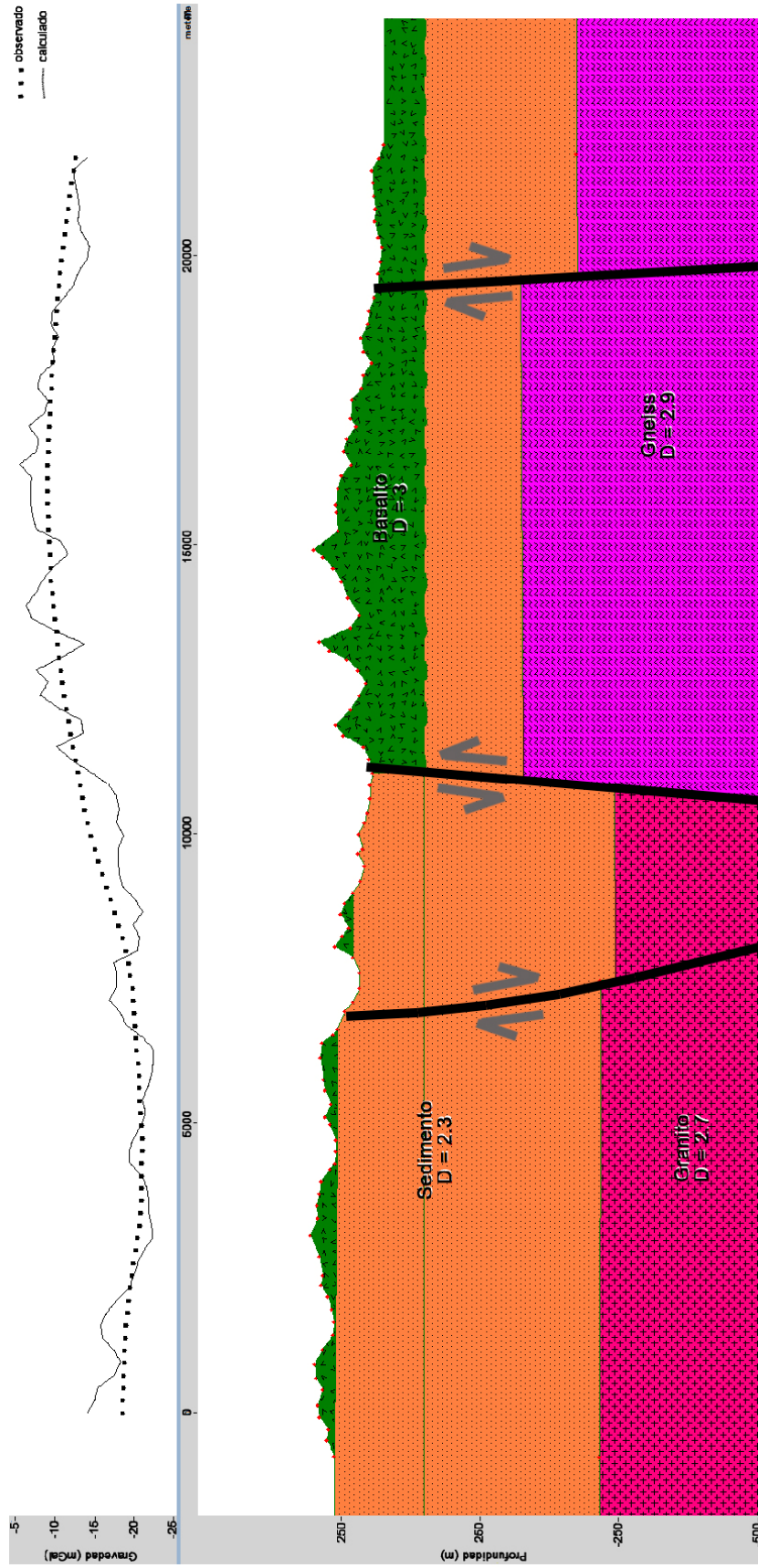


Figura 81. Modelado de densidad sobre la transecta de la Fig. 67 el software Oasis Montaj.

6. MAGNETOTELÚRICA

La empresa Ingesur realizó entre los años 2011 y 2012, en el marco de un proyecto con ANCAP del Fondo Sectorial de Energía, 71 sondeos magnetotelúricos situados mayormente en el área de estudio (ver Tabla 16 y Fig. 83). El equipo empleado fue el ADU-07, de la empresa Metronix.

Si se descartan los sondeos ruidosos, los que poseen mayor incertidumbre o aquellos que presentan un comportamiento 2D, restan 34 sondeos, para los cuales es posible estimar, a través de un inversión 1D, una profundidad al basamento con cierto grado de certeza (verificado al existir un error menor al 10% respecto a la profundidad al basamento en las localidades perforadas). Dicha profundidad varía de 221 a 766 m (media = 479 m; ver Fig. 82 y Tabla 16).

Si se realiza un grillado (Fig. 84A) de la profundidad al basamento con los datos de las 6 perforaciones (claramente inapropiado dado la falta de datos en amplias zonas del área) se obtienen curvas en la que la profundidad va aumentado desde el Norte (Quintana) hacia el Sur (Cañada del Charrúa). Si se agregan los datos de profundidad de los 34 sondeos más confiables (que cubren gran parte del área) el grillado mejora sensiblemente (Fig. 84B), esbozándose groseramente la ventana de areniscas del área centro-Sur.

El gran número de sondeos con comportamiento 2D está vinculado a la complejidad estructural del área; probablemente muchos sondeos están próximos a una o más estructuras.

Cuando un medio no se comporta como 1D para un frecuencia dada, el análisis del *strike* permite estimar la dirección¹⁶ del conductor eléctrico principal que genera dicha anisotropía; dicho conductor suele ser una estructura geológica. En la mayoría de los 71 sondeos se observó un *strike* casi homogéneo para todas las frecuencias. Las direcciones principales observadas en el mapa de *strikes* (Fig. 85) son N310° (= N130°) y N40°,

¹⁶ Aunque con una ambigüedad de 90°.

es decir, similar a los resultados ilustrados en las Figs. 51B. Subordinadamente se observaron direcciones prácticamente N-S y E-O (como en la Fig. 51C). El control NO-SE es evidente en los sondeos próximos al Arroyo Mataojo Chico.

De manera similar al *strike* ya mencionado, existe una herramienta incomplementaria para detectar estructuras en el subsuelo a una determinada frecuencia: los vectores de inducción, que apuntan hacia el conductor principal (siendo éste perpendicular a aquéllos). A mayor cercanía del sondeo respecto al conductor, mayor es la magnitud del vector. Es interesante destacar que los vectores de inducción para rocas sedimentarias son prácticamente nulos (ver Fig. 86), lo que permite diferenciarlas de otros tipos de rocas (en el caso del área de estudio, basaltos suprayacentes y granitos o gneisses infrayacentes).

Un análisis particular de utilidad evidente es el análisis de los vectores de inducción para altas frecuencias (mayores a 0,1 Hz) de manera de estudiar la estructuración del basamento. El correspondiente mapa de vectores de inducción (Fig. 87), pese a evidenciar variaciones en su magnitud y dirección, indica direcciones predominantes NO-SE al Sur del Arroyo Sopas, direcciones NE-SO para la zona comprendida entre los arroyos Sopas y Mataojo Chico, y nuevamente direcciones NO-SE para al Norte del Arroyo Mataojo Chico. Como las estructuras geológicas son perpendiculares a los vectores de inducción, la dirección de las primeras es NO-SE en la zona de los arroyos Sopas y Mataojo Chico, y NE-SO para las zonas al Sur y al Norte de esta faja central, lo que nuevamente coinciden con lo observado en fotolineamientos (Fig. 51).

En la mayoría de los sondeos con comportamiento 1D se da el pasaje, de tope a base, de un medio resistivo a un medio más conductivo, y de éste a un medio muy resistivo (Fig. 86), interpretándose respectivamente como basaltos, rocas sedimentarias y basamento cristalino, lo que permite realizar una interpretación similar a la ilustrada en la Fig. 20.

Existen algunas particularidades dignas de mención, si se comparan los resultados de sondeos del área con las resistividades de diferentes unidades reportadas para la Cuenca Norte (ver Oleaga, 2002 y Tabla 6). Por un lado, dentro del basalto puede a veces reconocerse una caída en la resistividad que puede estar asociado a basaltos alterados y/o *intertraps*. No obstante, aquí se considera que el reducido espesor de los *intertraps* (al menos los constatados en las perforaciones de Quintana) se encuentra por debajo del límite de resolución del método. Por otro lado, en algunos sondeos se identifica un cuerpo con resistividades de entre 50 y 90 $\Omega\cdot\text{m}$ que, cuando suprayace al basamento, aumenta la incertidumbre a la hora de estimar la profundidad del basamento. Aquí se propone como explicación para al menos algunos de dichos sondeos que se trate de las cuarcitas basales descritas en las págs. 113-115.

Finalmente, Ingesur (2013) realizó algunas inversiones 2D que proveen información de utilidad sobre la profundidad del basamento, composición del relleno de la cuenca y presencia de estructuras importantes. Se seleccionaron aquí cinco transectas (Anexo I, Figs. 1 a 5). Para todas ellas, el tope de basamento coindiría con el pasaje de resistividades bajas (colores cálidos) a altas (colores fríos), lo que coincidiría aproximadamente con la zona de color verde (cuyo ancho es proporcional a la incertidumbre en la determinación de dicho tope):

- Transecta A (Anexo I, Fig. 1): dirección NE-SO; es la transecta de mayor longitud, y muestra que la cuenca es más profunda en el centro del área, con unos 600 m de espesor, disminuyendo hacia el NE, donde se alcanzan valores de 400 m o menos. Esta situación ha sido comprobada por los pozos, aunque la transecta no pasa por ninguno de ellos. La capa superior resistiva se interpreta como basalto, y se ve interrumpida en la porción centro-Sur, correspondiendo a una zona de areniscas aflorantes.

- Transecta B (Anexo I, Fig. 2): dirección NO-SE; la cuenca se adelgaza hacia el NO, con 200 m de espesor (llamando la atención una zona más conductiva por debajo del basamento), alcanzando casi 500 m en su

porción central (pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1), donde se hacen más potentes las capas poco resistivas; la situación hacia el SE es ambigua dado el gran espesor de la zona verde. Se visualiza una estructura importante precisamente al O del pozo Pepe Núñez E-1b.

- Transecta C (Anexo I, Fig. 3): dirección groseramente N-S: la cuenca se adelgaza marcadamente de S a N, pasando de 700 a unos 300 m de espesor, esto último comprobado por los pozos de Quintana que están sobre la transecta. Se visualiza una estructura importante al S del pozo Quintana E-1, otra estructura sobre el extremo S de la transecta, y una tercera de menor entidad entre los pozos Quintana E-1 y E-2.

- Transecta D (Anexo I, Fig. 4): dirección ENE-OSO; se aprecia una profundización gradual y constante del basamento hacia el SO, aunque el espesor de la cuenca se mantiene casi constante en torno a 600-700 m.

- Transecta E (Anexo I, Fig. 5): dirección NE-SO; la cuenca pasa de 350 m en el NE a casi 500 m en su porción central (pozo Pepe Núñez E-1b); la situación hacia el SO es ambigua dado el gran espesor de la zona verde, pero parece aumentar la profundidad de la cuenca. Se visualiza una estructura importante precisamente en la zona de localización del pozo.

Resulta de interés destacar la presencia de estructuras que afectan tanto al basamento como la cuenca en las transectas B, C y E. La estructura más importante (cortada en distintos ángulos por estas transectas) tendría orientación NO-SE, y coincide espacialmente con el Arroyo Mataojo Chico, corroborando la hipótesis presentada en la Fig. 67. Estructuras de menor entidad también corroboran lo propuesto para explicar las diferencias entre los pozos Quintana E-1 y E-2, y sugieren la posibilidad (aunque aún ambigua y con escasos datos) de que el Arroyo Sopas también coincida aproximadamente con una estructura de relevancia.

En general las estructuras NO-SE controlan el desarrollo de un bajo en el sector central entre los arroyos hacia cuyos flancos asciende el basamento. Estas estructuras generan ascensos más abruptos en los flancos

NE. Las estructuras NE-SO también muestran fuerte influencia, generándose bajos y altos importantes, con bloques mayormente basculados hacia el NO, donde se encontrarían los mayores espesores.

Se detecta un bajo de aproximadamente 700 m de espesor al Sur de Pepe Nuñez que no coincide con el mínimo gravimétrico.

Otras particularidades son las siguientes:

- las transectas muestran, de manera general, una división tripartita basaltos-rocas sedimentarias-basamento y una profundización de la cuenca hacia el Sur. No obstante, como ya se ha mencionado, en las transectas B y E el ancho de la zona de color verde es tal que no existe una única solución para la ubicación del tope de basamento.

- asimismo, en las transectas B y C se aprecia una zona más conductiva por debajo del basamento, para lo que no se encuentra una explicación geológica sencilla.

- las transectas B y E muestran que el pozo Pepe Núñez habría sido perforado en el flanco de un alto, mientras que la transecta C muestra claramente un alto en el área de Quintana.

Tabla 16. Coordenadas de los sondeos magnetoteléuticos realizados en el bloque Pepe Núñez por la empresa Ingesur. Coordenadas UTM 21S, en metros. Modificado de Ingesur (2013).

Nº de	X	Y	Z	Profundidad al basamento
1	557655	6520915	221	382
2	557993	6521317	205	Sondeo ruidoso
3	557133	6521532	202	Comportamiento 2D
4	558089	6519406	235	468
5	557260	6519460	238	466
6	561103	6517603	227	411
7	560065	6515725	301	507
8	555235	6516851	254	446
9	556404	6516474	256	491
10	557983	6516278	285	Comportamiento 2D
11	555997	6522500	207	426
12	552968	6521748	197	412
13	556801	6518372	250	400
14	559586	6518600	215	Comportamiento 2D
15	557710	6519675	217	382
16	561799	6518889	240	Comportamiento 2D
17	561305	6516643	261	Comportamiento 2D
18	556323	6520908	229	417
19	558193	6520184	202	Comportamiento 2D
20	554379	6523326	189	Comportamiento 2D
21	559538	6524111	269	555
22	557536	6523958	225	Mayor incertidumbre
23	563054	6514172	263	Comportamiento 2D
24	551568	6503495	273	425
25	565502	6516445	319	602
26	567386	6518503	334	594
27	565820	6519517	267	Comportamiento 2D
28	562471	6520086	253	548
29	563399	6521403	220	463
30	560921	6526160	273	Sondeo ruidoso
31	557469	6525439	231	Mayor incertidumbre
32	555117	6526814	232	221
33	555560	6530660	181	Comportamiento 2D
34	564682	6523250	246	Comportamiento 2D
35	553572	6506682	226	Comportamiento 2D
36	554642	6509631	183	446
37	553635	6506400	232	469
38	558262	6513554	222	505
39	562436	6515628	241	Comportamiento 2D
40	563053	6514171	262	475
41	565238	6524434	283	249
42	555524	6513973	213	Comportamiento 2D
43	557371	6514179	239	Comportamiento 2D
44	557730	6513667	217	Comportamiento 2D
45	557677	6510740	213	521

46	557697	6511989	228	597
47	561519	6515926	248	566
48	562300	6517018	276	523
49	566887	6514822	260	Comportamiento 2D
50	568485	6514057	235	Comportamiento 2D
51	560607	6517440	246	Comportamiento 2D
52	562050	6511166	244	589
53	562945	6512339	268	549
54	562311	6513268	271	Comportamiento 2D
56	568630	6513477	218	Comportamiento 2D
57	567481	6512177	236	Comportamiento 2D
58	564059	6523192	226	Comportamiento 2D
59	534820	6528818	175	Comportamiento 2D
61	537646	6514570	214	Comportamiento 2D
62	545953	6527537	195	Comportamiento 2D
63	548115	6520893	242	Comportamiento 2D
64	547230	6513400	183	Comportamiento 2D
65	544143	6516304	178	766
66	541523	6526029	196	Comportamiento 2D
67	551601	6518951	238	472
68	554241	6518473	251	Comportamiento 2D
69	563289	6531097	196	Comportamiento 2D
70	574261	6530221	315	Comportamiento 2D
71	574678	6519658	304	620
72	568428	6525787	244	332
73	550613	6529229	166	Comportamiento 2D

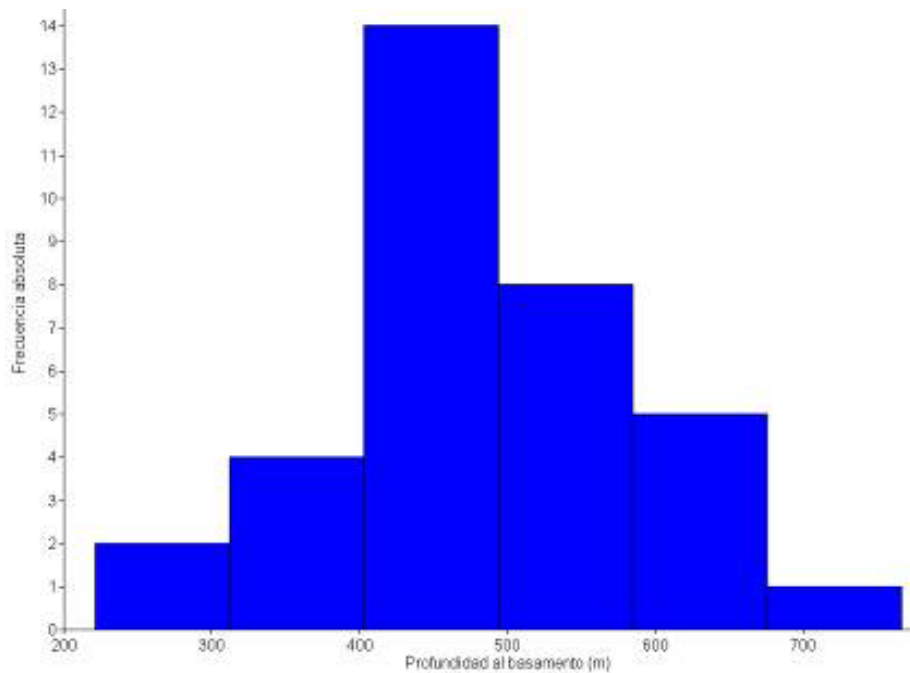


Figura 82. Histograma de profundidades al basamento tomando en cuenta datos de sondeos MT confiables con comportamiento 1D.

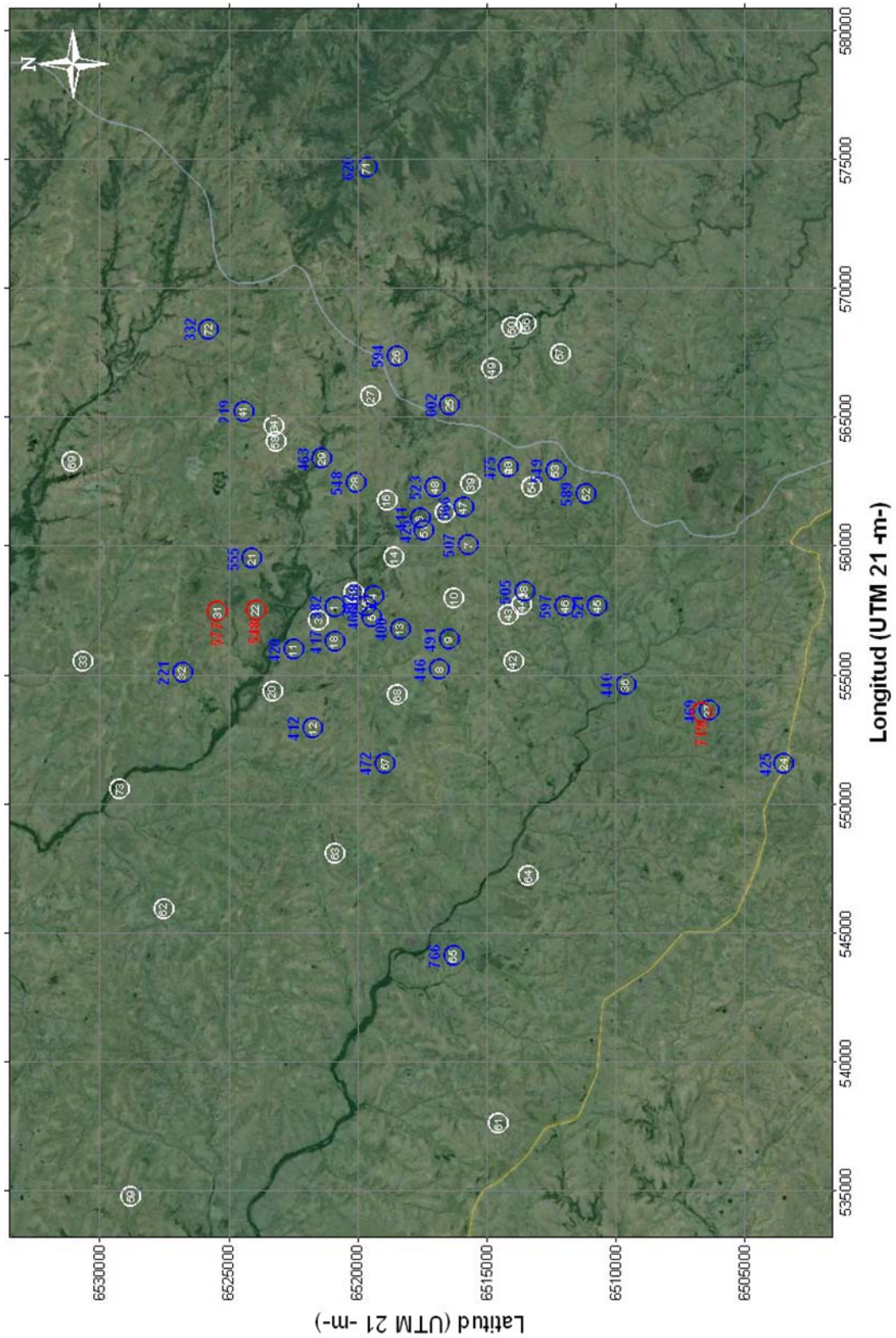


Fig. 83. Sondeos realizados en el bloque Pepe Núñez y adyacencias. Se indica el número de sondeo encerrado por un círculo y por encima, si corresponde, la profundidad al basamento. Azul = sondeos con comportamiento 1D, rojo = sondeos con mayor incertidumbre, blanco = sondeos con comportamiento 2D. Tomado de Ingesur (2013).

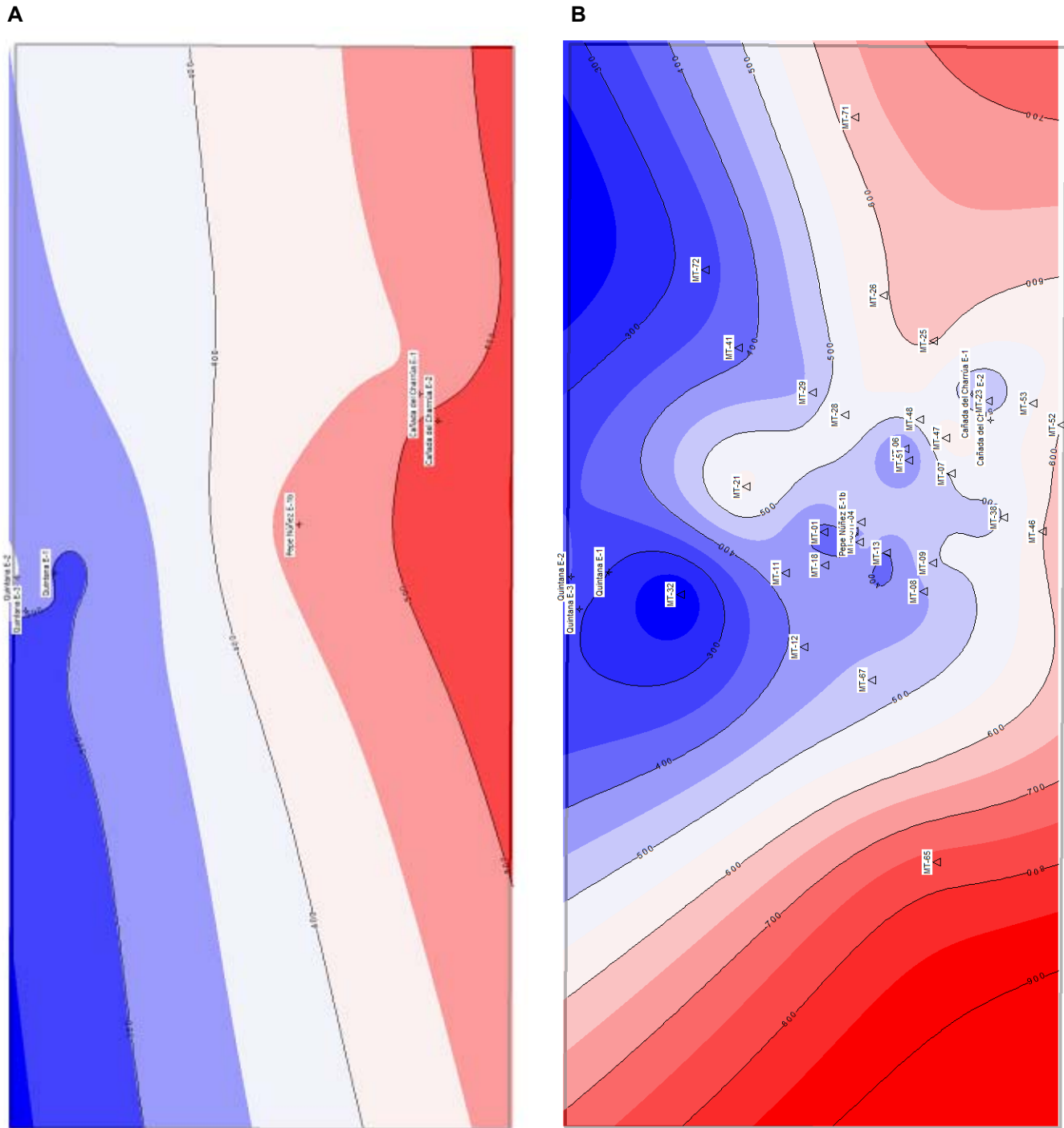


Figura 84. A, grilla de profundidad al basamento considerando solamente los datos de pozo. **B**, grilla de profundidad al basamento considerando datos de pozo más sondeos magnetotéluricos confiables con comportamiento 1D.

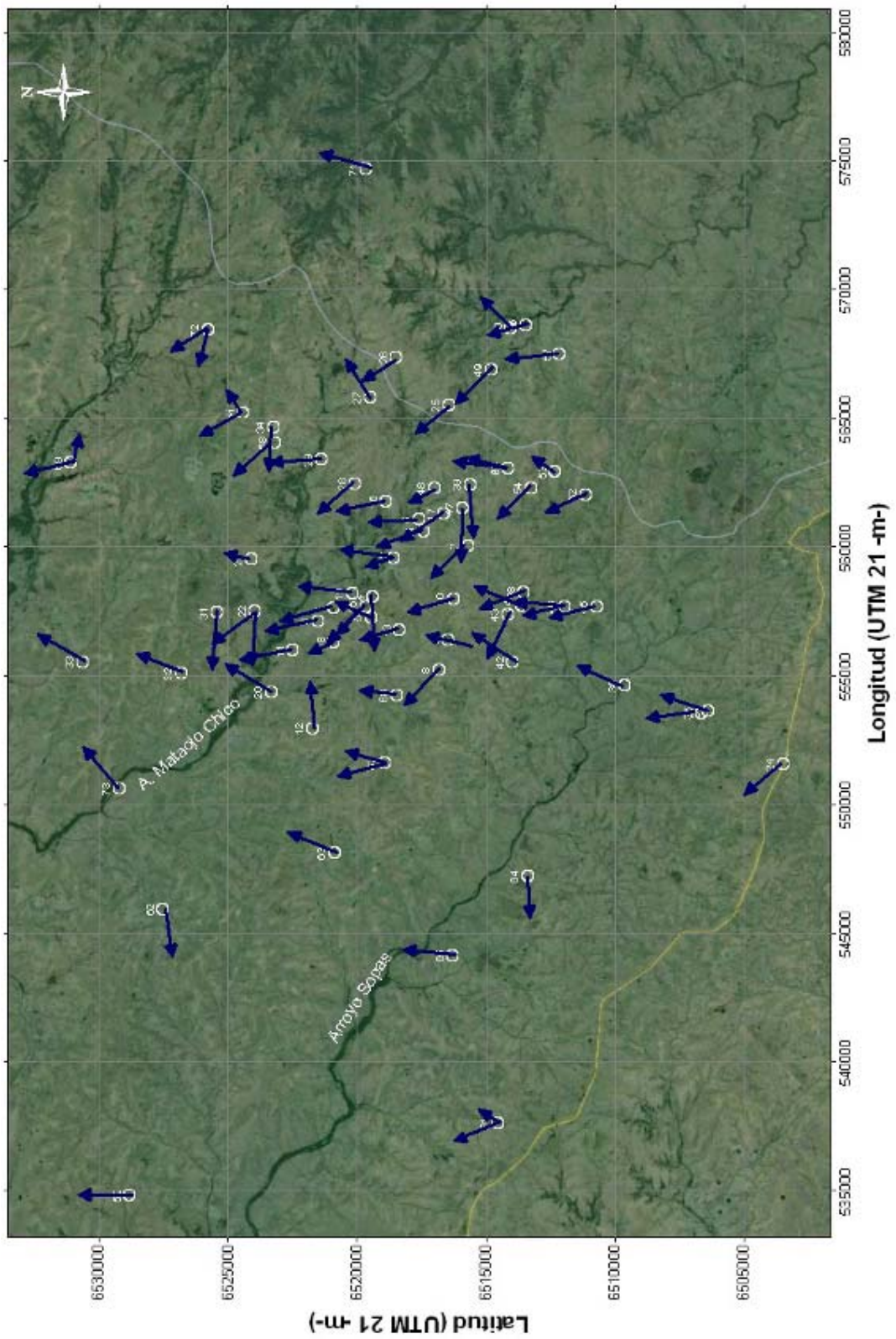


Figura 85. Principales direcciones obtenidas del *strike*. Tomado de Ingesur (2013).

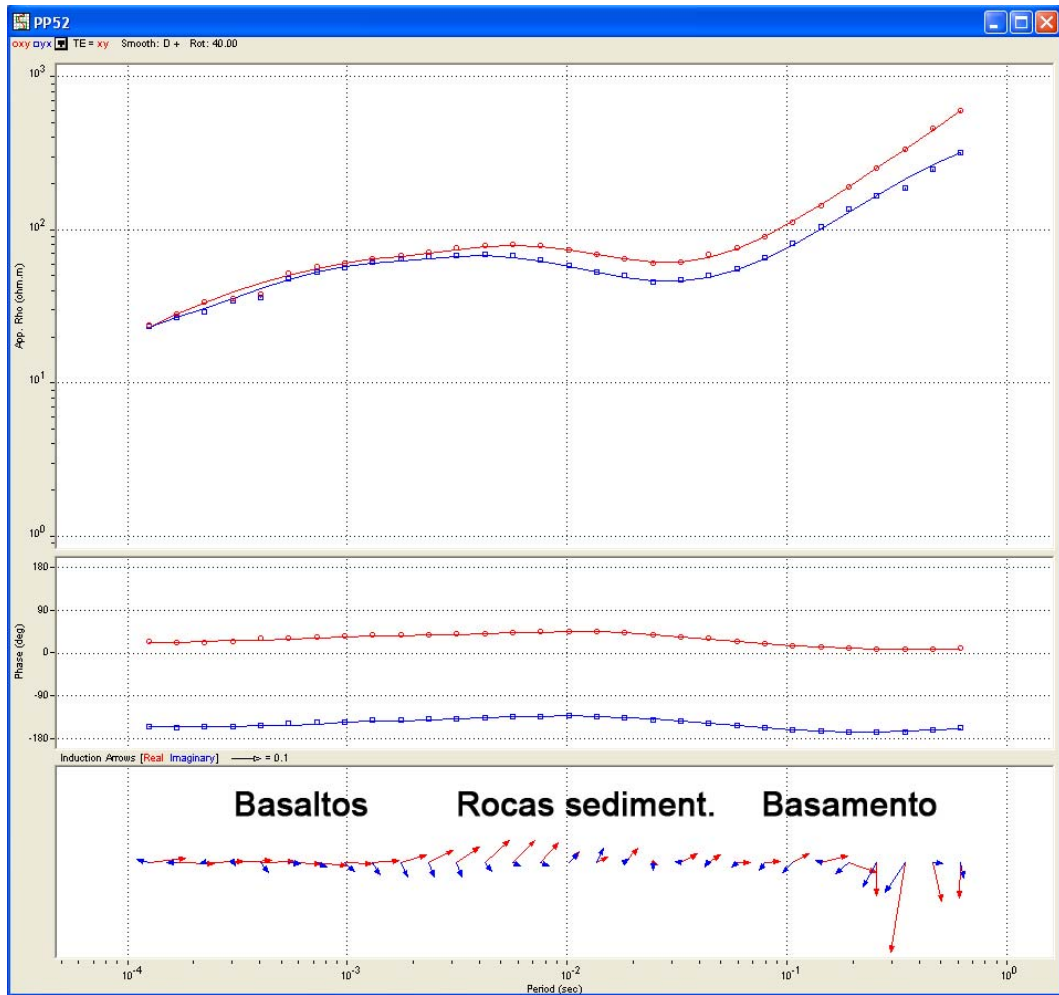


Figura 86. Ejemplo de sondeo del bloque Pepe Núñez. Se aprecian: arriba, las dos curvas de resistividad aparente; en el medio: las dos curvas de fase; y abajo, el diferente comportamiento de los vectores de inducción en relación a la litología (basaltos, rocas sedimentarias y basamento). Modificado de Ingesur (2013).

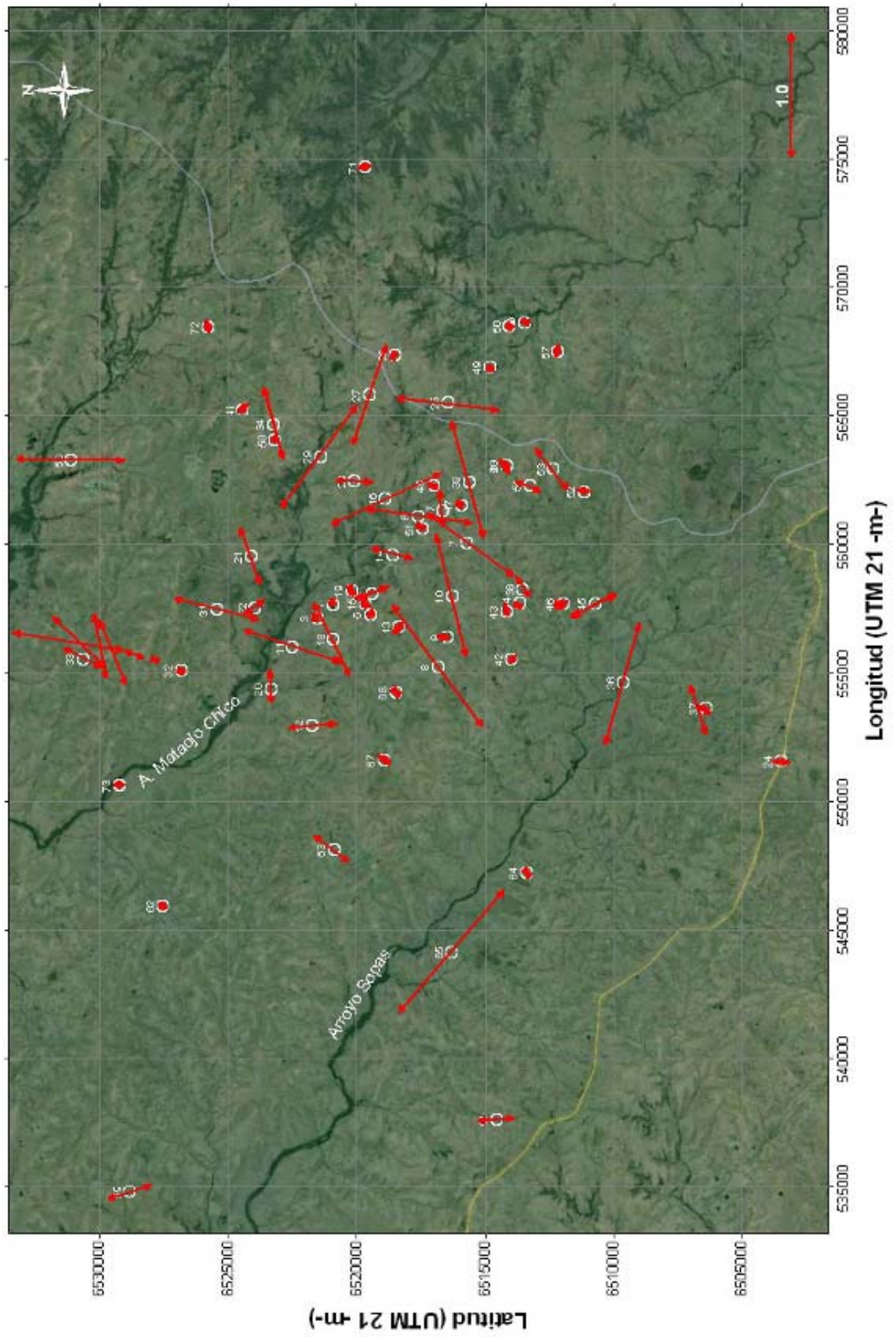


Figura 87. Vectores de inducción (para frecuencias de basamento) para los sondeos realizados. Tomado de Ingesur (2013).

7. GAMMA RAY ESPECTRAL

Con las mediciones de *gamma ray* espectral realizadas en los pozos estratigráficos (excepto para Cañada del Charrúa E-1 y el tramo final de los pozos Quintana E-2 y E-3) se construyeron perfiles o *logs* de radiactividad (Figs. 88 a 93).

La comparación con los topes formacionales de la Tabla 15 y las columnas litoestratigráficas de las Figs. 64 y 65 arrojó resultados interesantes, que se comentarán aquí desde el punto de vista cualitativo (y, para Cañada del Charrúa E-2, desde el punto de vista cuantitativo):

- la Formación Arapey posee una radiactividad gamma (total, K y Th) superior a la de la Formación Tacuarembó (Figs. 88, 90 y 91). No obstante, la base de la Formación Arapey no se distingue de la unidad infrayacente, probablemente debido (al menos en parte) a la alteración que experimenta el basalto en contacto con la arenisca. Por otro lado, en el pozo Quintana E-1 es posible identificar el límite entre coladas basálticas (marcado de base a tope por la sucesión basaltos amigdaloides-areniscas de *intertrap*-brechas volcánicas) por una caída en la radiactividad (particularmente total y K), como se observa en la Fig. 90.

- las formaciones Tacuarembó y Buena Vista no se diferencian marcadamente en su radiactividad gamma, aunque parece existir (al menos en Cañada del Charrúa E-2; Fig. 88) una ligera tendencia al incremento de la radiactividad gamma (total, K, U y Th) con el aumento de profundidad.

- la Formación San Gregorio muestra un aumento constante de radiactividad gamma (total, K, U y Th, aunque las lecturas en los últimos dos casos son más erráticas) respecto a las unidades suprayacentes, superando en su tramo inferior los valores registrados por el basalto (Figs. 88, 89 y 91). Esto permite corroborar la identificación de la Formación San Gregorio en el pozo Quintana E-2 y su virtual ausencia en Quintana E-1, por comparación con los pozos del Sur. Las cuarcitas basales muestran sin embargo una marcada una caída en la radiactividad respecto al resto

de la Formación San Gregorio, llegando a valores similares a los del tope de la unidad.

- finalmente, el basamento cristalino se caracteriza por un brusco aumento de la radiactividad gamma (total, K y Th), alcanzando o superando los máximos valores registrados en unidades suprayacentes (Figs. 88 a 90). La caída brusca de los mismos (total, K y Th) en el pozo Quintana E-1 (Fig. 90) se correlaciona con la presencia de la diabasa que recorta el basamento del tramo final del pozo.

Tomando en consideración lo discutido hasta el momento, se hizo un ensayo de correlación (Fig. 93) en base a *logs* entre algunos pozos (Cañada del Charrúa E-2, Quintana E-1 y Quintana E-2), mostrando un buen ajuste respecto a la litoestratigrafía (siendo la excepción más notoria la ya comentada caída de radiactividad en la base de la Formación Arapey).

Dado que se considera que la columna estratigráfica del pozo Cañada del Charrúa E-2 (Fig. 94) es la más representativa del área de estudio (dado que es el pozo más profundo y uno de los únicos que atravesaron todas las unidades), se pondrá a prueba la hipótesis de que es posible separar unidades en base a los valores de radiactividad gamma. Se consideraron para ello los topes formacionales brindados en la Tabla 15. Los estadísticos básicos de las diferentes variables (radiactividad total, K, U, Th) para cada unidad se brindan en la Tabla 16. Se recuerda que K se expresa en %, mientras que las otras tres variables se expresan en ppm.

Se construyeron diagramas de caja (*box-plots*) para cada una de las cuatro variables (Figs. 95 a 98), de modo de visualizar gráficamente la diferencia entre el rango de valores y la mediana entre las diferentes unidades. En ellos se aprecia que las unidades presentan valores de radiactividad creciente en este orden: formaciones Tacuarembó, Buena Vista, Arapey, San Gregorio y basamento, siendo particularmente útiles para diferenciar entre las tres primeras el valor de radiactividad total y, en segundo lugar, de K. Sin embargo, es de destacar el solapamiento de valores entre las diferentes unidades en algunos casos, e.g. formaciones Ara-

pey y Buena Vista; formaciones Arapey y (en parte) Formación San Gregorio; Formación San Gregorio y (en parte) basamento. El gráfico de U parece ser especialmente poco útil a la hora de diferenciar entre diferentes unidades; de hecho la mediana para las formaciones Tacuarembó y Buena Vista no es significativamente diferente.

Finalmente, se realizó un análisis canónico de poblaciones. El mismo, siguiendo a Soto (2010), procura representar un conjunto dado de individuos (o poblaciones) de forma óptima a lo largo de ejes ortogonales, de manera que la dispersión entre estos grupos sea máxima con relación a la dispersión dentro de los grupos. La distancia euclídea entre dos individuos expresados en función de los ejes canónicos coincide con la distancia de Mahalanobis entre estos individuos expresados en función de las variables originales. Para la representación simultánea de la estructura de los grupos y de las variables responsables de la separación se emplea un biplot canónico (Fig. 99).

Este análisis retuvo dos ejes canónicos, explicando el primero de ellos más del 98% de la varianza. La variable que más contribuye a la discriminación de las diferentes formaciones es la radiactividad gamma total, como ya se había adelantado al examinar los *box-plots*.

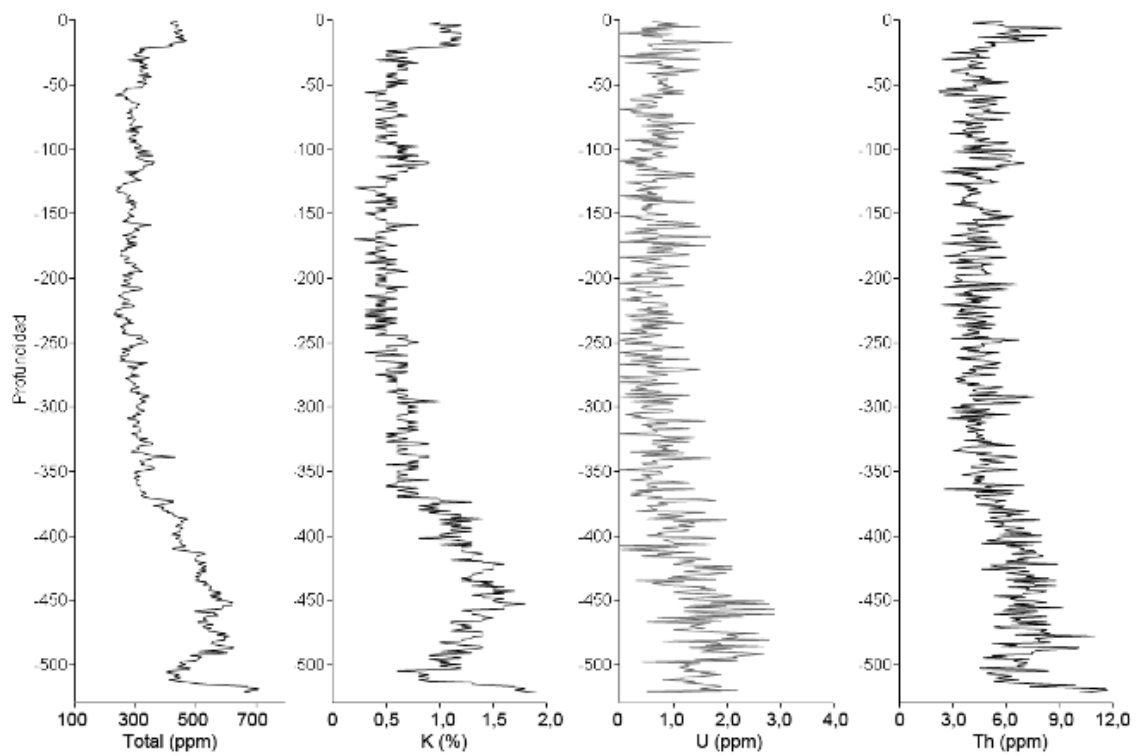


Figura 88. Resultados de la espectrometría en el pozo Cañada del Charrúa E-2.

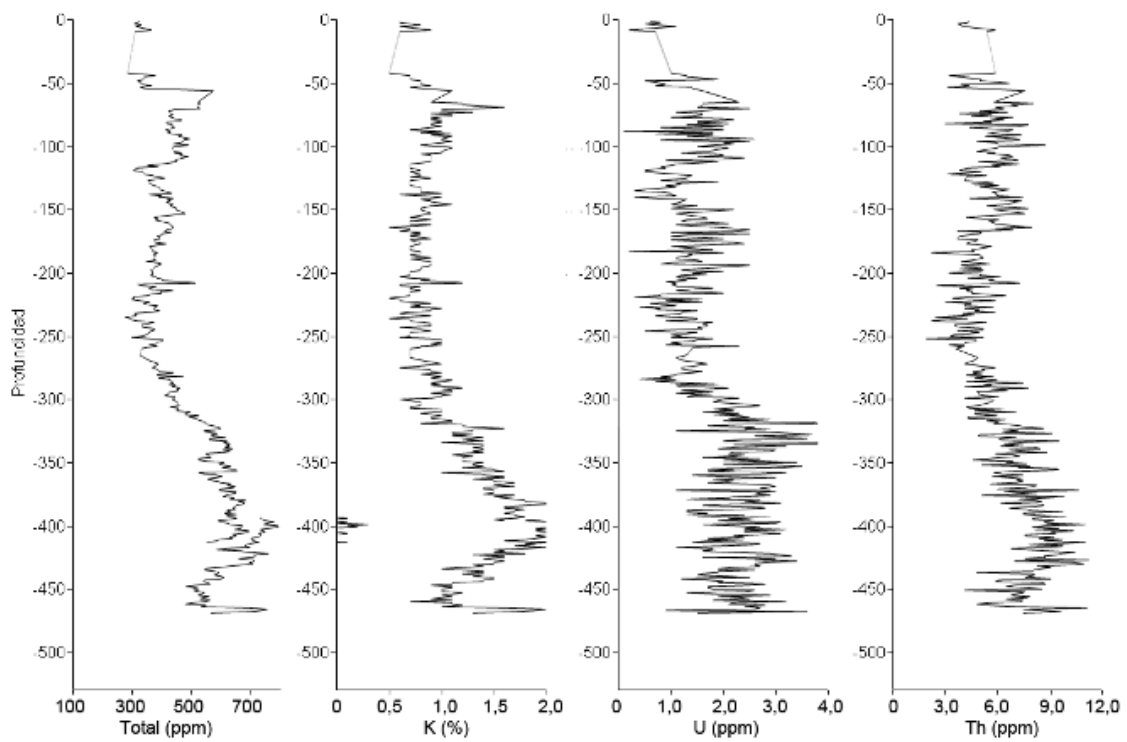


Figura 89. Resultados de la espectrometría en los pozos Pepe Núñez E-1 y E-1b (ver nota al pie de pág. 153).

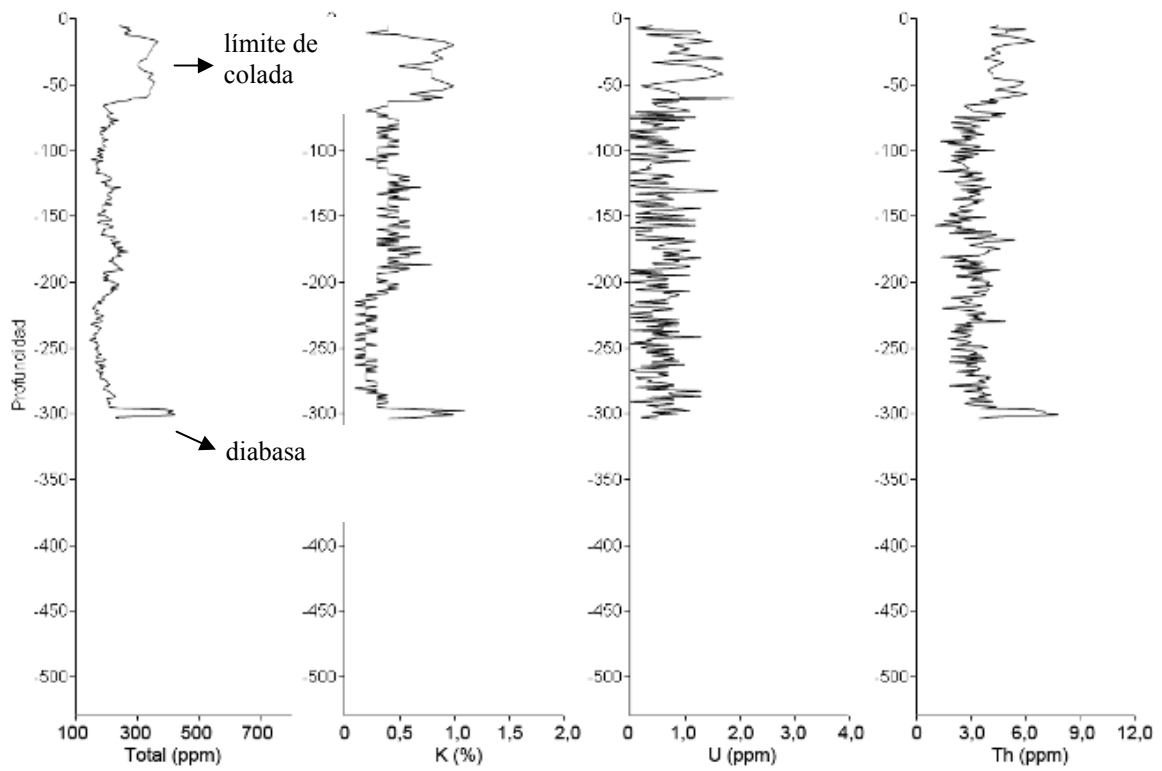


Figura 90. Resultados de la espectrometría sobre testigos del pozo Quintana E-1.

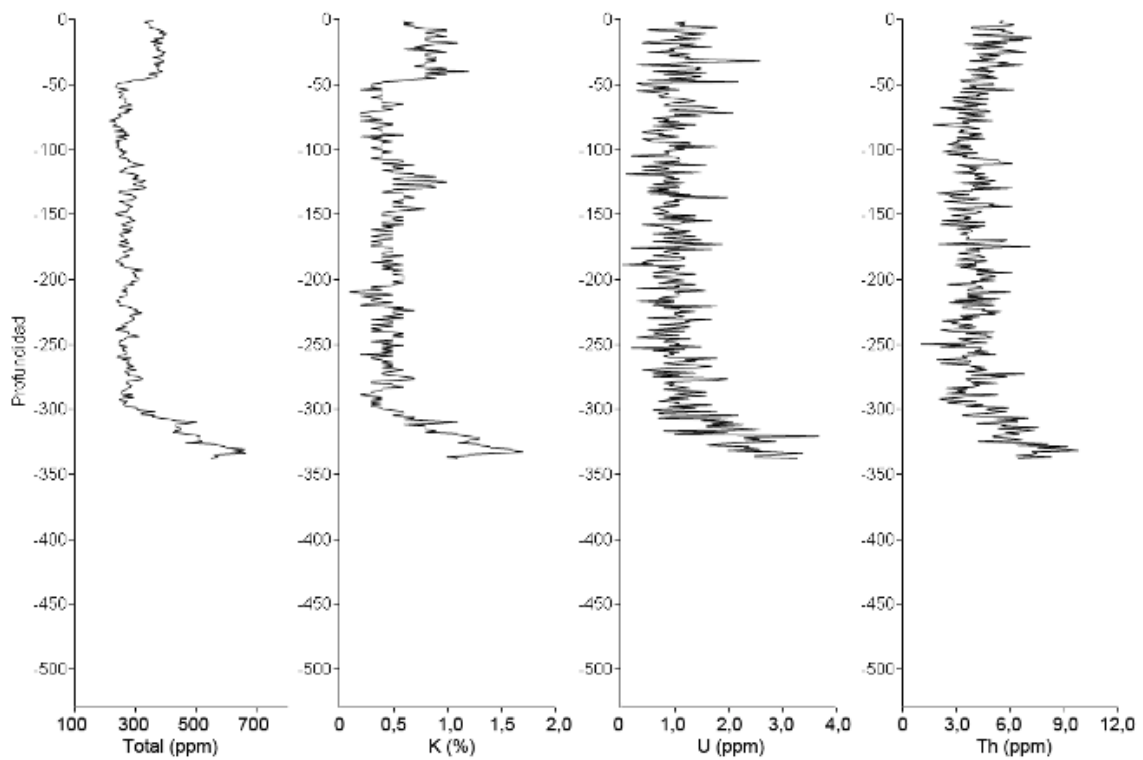


Figura 91. Resultados de la espectrometría sobre testigos del pozo Quintana E-2. Restaron por analizarse algo más de 30 m de pozo.

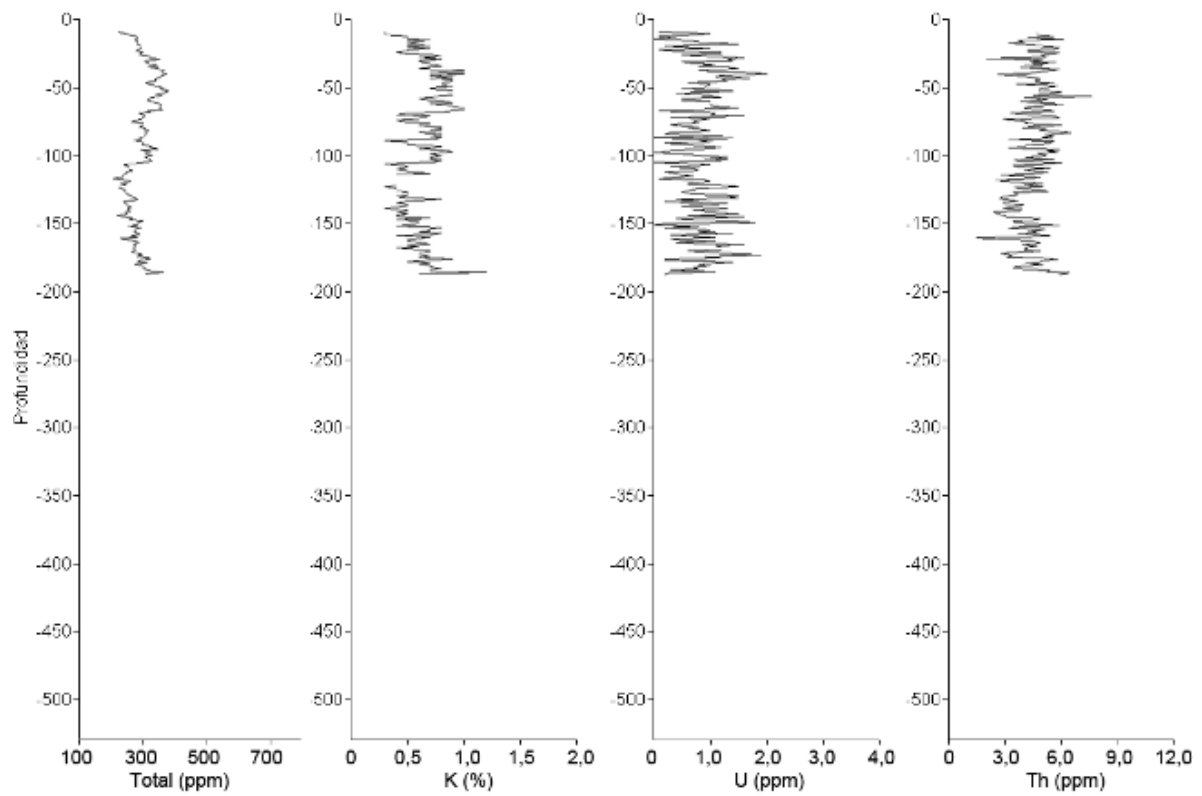


Figura 92. Resultados de la espectrometría sobre testigos del pozo Quintana E-3. Restaron por analizarse algo más de 100 m de pozo.

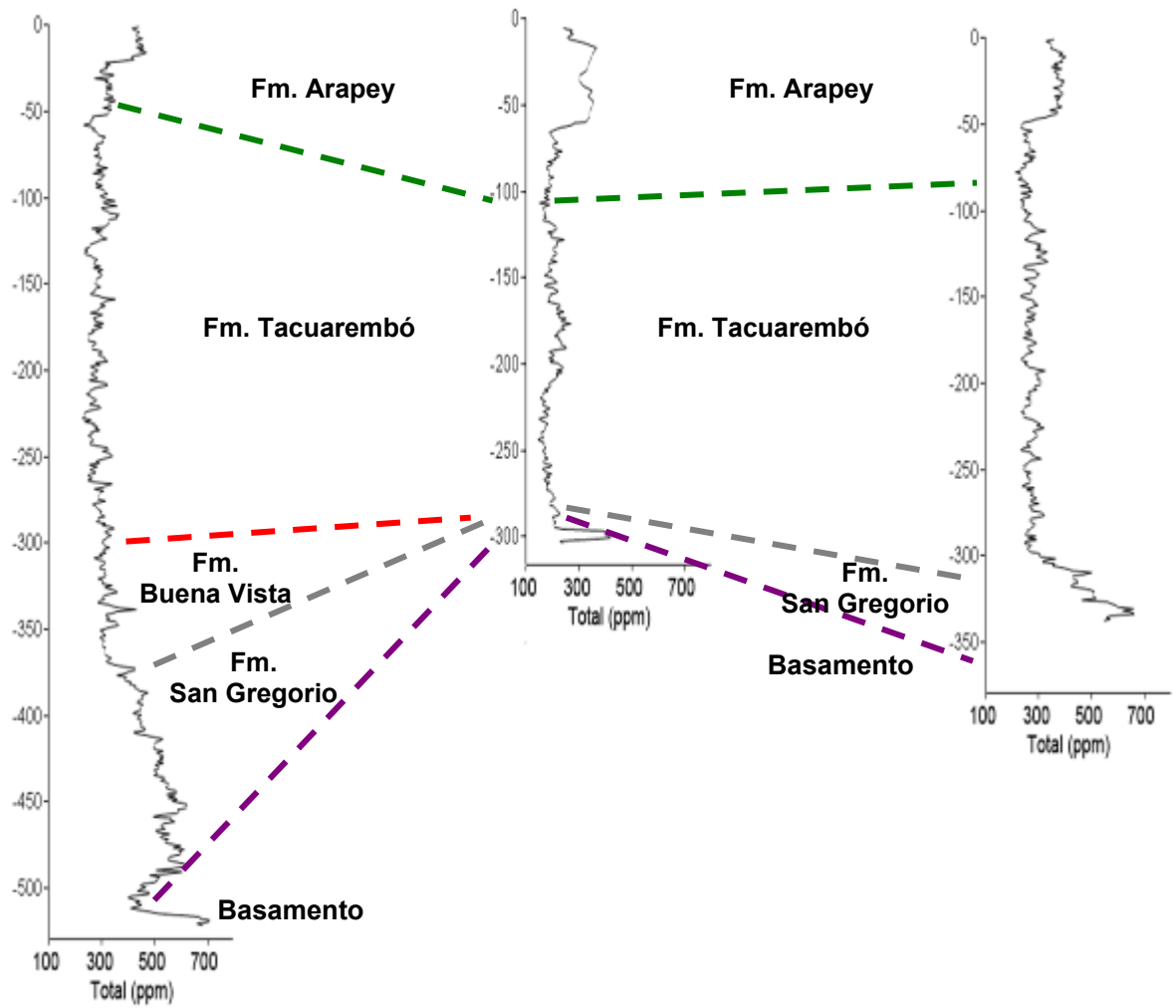


Figura 93. Correlación en base a espectrometría (conteo total) de los pozos Cañada del Charrúa E-2, Quintana E-1 y Quintana E-2 (de izquierda a derecha), colocados a la misma cota. Las líneas punteadas muestran los topes formacionales identificados por criterios litológicos.

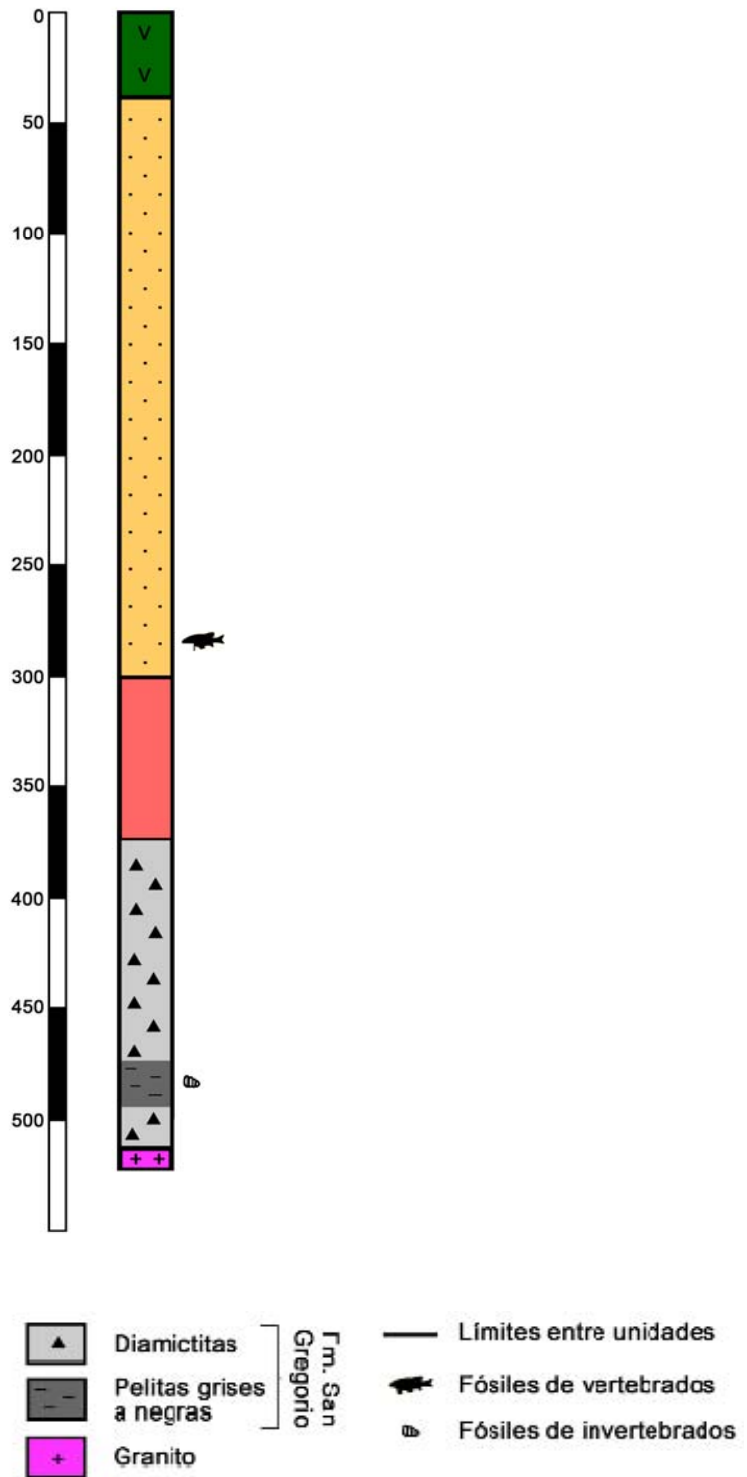


Figura 94. Columna litoestratigrafica del pozo Cañada del Charrúa E-2. Las diamictitas infrayacentes a las pelitas grises a negras se han en gran parte convertido en cuarcitas.

Tabla 17. Estadísticos básicos de los valores de radiactividad gamma natural (total, K, U y Th) para las diferentes unidades litoestratigráficas del pozo Cañada del Charrúa E-2.

Variable	Estadístico	Fm. Arapey	Fm. Tacuarembó	Fm. Buena Vista	Fm. San Gregorio	Basamento
Total	Mínimo	274,4	227,8	272,6	358,9	512,8
	Máximo	471,6	367,7	432,3	628,9	711,9
	Media	449,2	347,6	371,2	509,4	693,1
	Mediana	347,4	286,4	315,1	510,5	689,1
	Moda	–	290,6	304,8	444,1	–
	Varianza	3758,3	753,1	782,6	4008,7	4846,5
	D. estándar	61,3	27,4	28,0	63,3	69,6
	C. variación	13,6	7,9	7,5	12,4	10,0
K	Mínimo	0,4	0,2	0,5	0,6	1,3
	Máximo	1,2	1,0	1,0	1,8	1,9
	Media	1,1	0,8	0,9	1,4	1,8
	Mediana	0,8	0,5	0,7	1,3	1,8
	Moda	0,7	0,5	0,6	1,3	1,7
	Varianza	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
	D. estándar	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2
	C. variación	24,8	15,9	14,3	16,1	11,5
U	Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
	Máximo	2,1	1,7	1,8	2,9	2,2
	Media	1,6	1,3	1,3	1,9	2,1
	Mediana	0,8	0,6	0,7	1,3	1,8
	Moda	0,8	0,6	0,5	1,2	1,5
	Varianza	0,2	0,1	0,2	0,4	0,3
	D. estándar	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5
	C. variación	27,2	27,3	30,4	31,8	24,7
Th	Mínimo	2,4	2,2	2,5	4,3	7,3
	Máximo	9,1	7,6	7,0	11,0	11,7
	Media	7,3	6,1	6,1	7,7	9,5
	Mediana	4,8	4,3	4,6	6,6	10,5
	Moda	5,4	4,1	4,3	7,6	–
	Varianza	2,1	1,0	0,9	1,5	2,8
	D. estándar	1,4	1,0	1,0	1,2	1,7
	C. variación	19,8	16,7	15,8	16,0	17,6

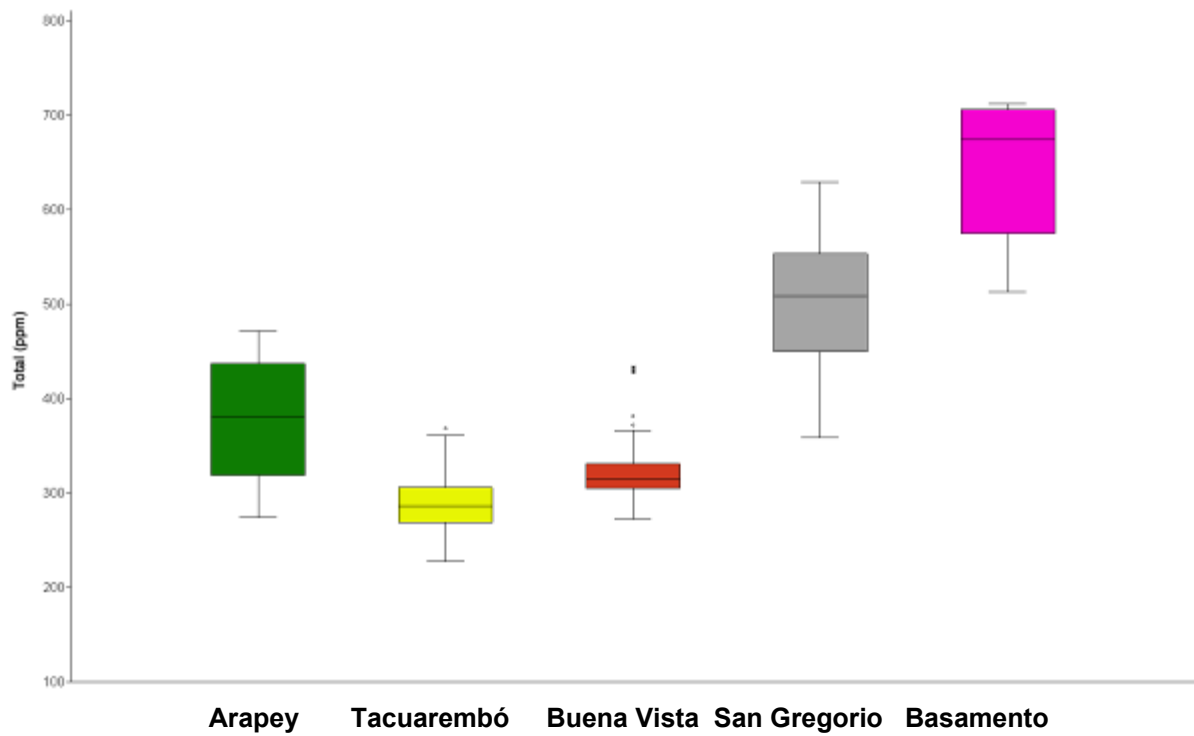


Figura 95. *Box-plots* de valores de radiactividad *gamma* total (ppm) para las diferentes unidades reconocidas en el pozo Cañada del Charrúa E-2.

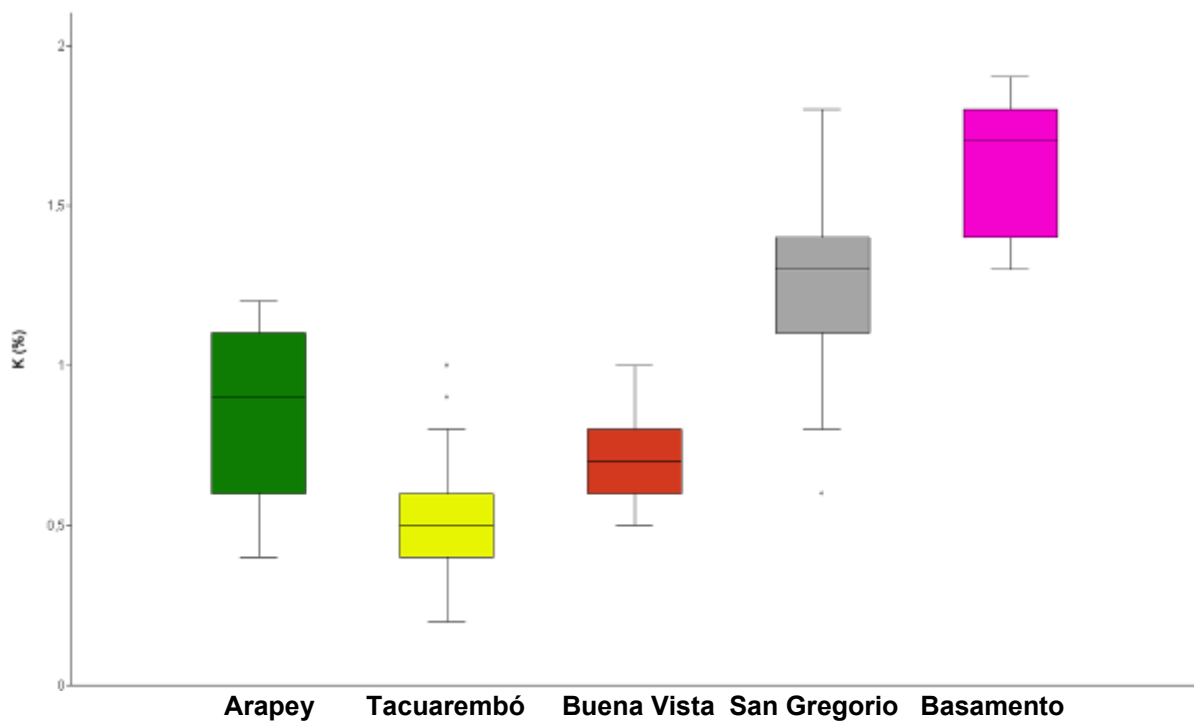


Figura 96. *Box-plots* de valores de radiactividad *gamma* correspondiente al K (%) para las diferentes unidades reconocidas en el pozo Cañada del Charrúa E-2.

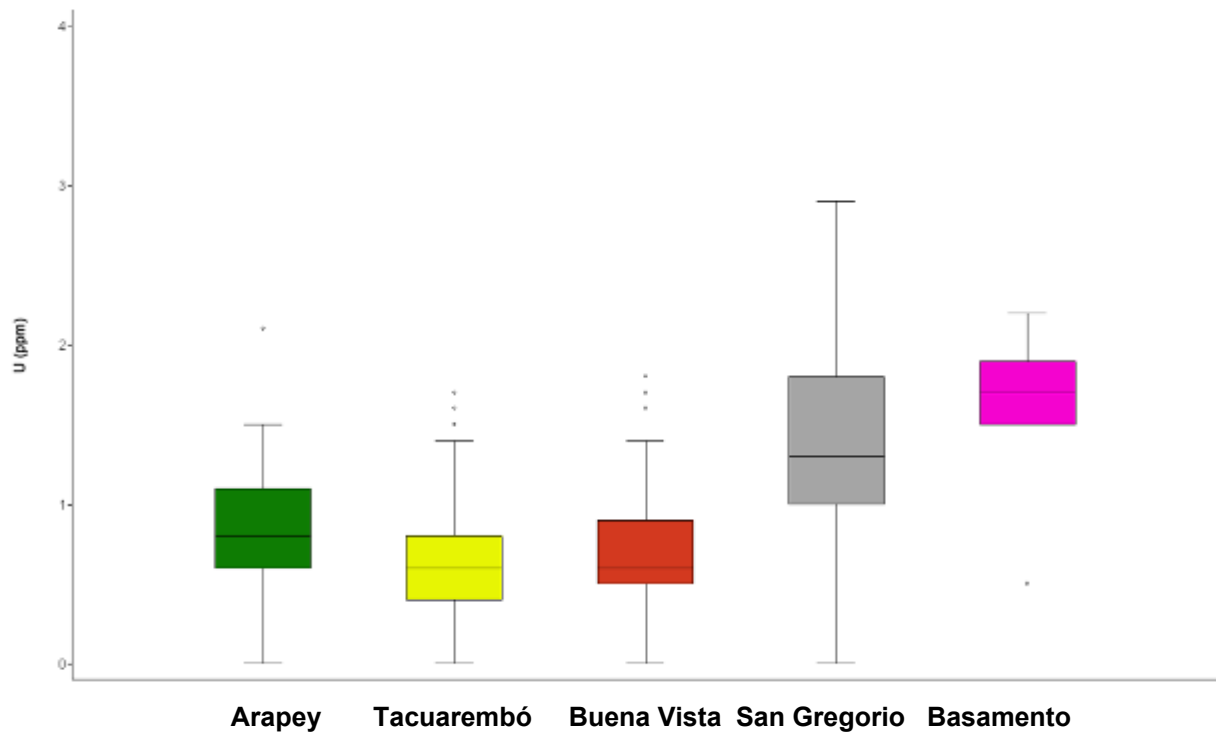


Figura 97. *Box-plots* de valores de radiactividad *gamma* correspondiente al U (ppm) para las diferentes unidades reconocidas en el pozo Cañada del Charrúa E-2.

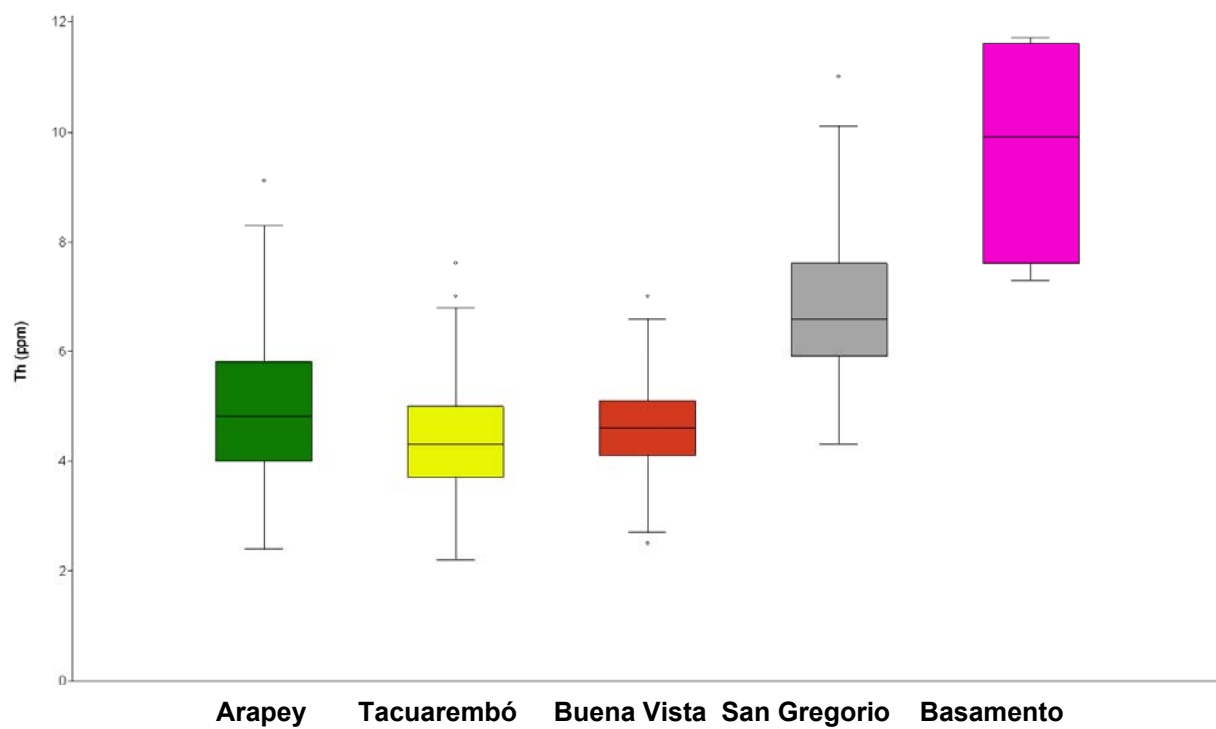
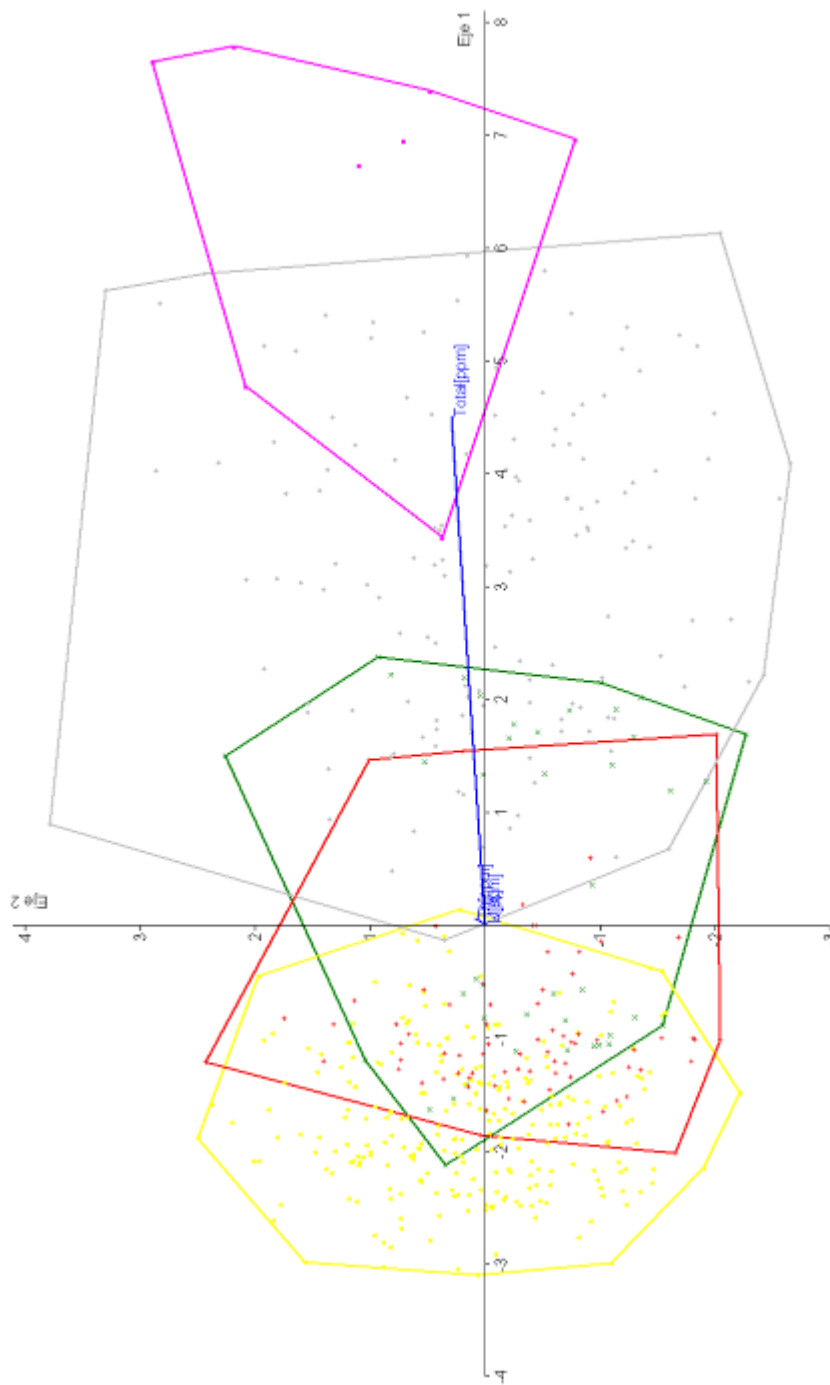


Figura 98. *Box-plots* de valores de radiactividad *gamma* correspondiente al Th (ppm) para las diferentes unidades reconocidas en el pozo Cañada del Charrúa E-2.



Wilks' lambda:	0,1505
df1:	16
df2:	1568
F:	84,15
p(same):	1,537E-197
Eigenvalue 1:	5,057
Eigenvalue 2:	0,05788

Figura 99. Análisis canónico de poblaciones (CVA) para los datos de radiactividad gamma natural en el pozo Cañada del Charrúa E-2. Verde = Fm. Arapey, amarillo = Fm. Taquarembó, rojo = Fm. Buena Vista, gris = Fm. San Gregorio, rosado = basamento.

8. GEOQUÍMICA ORGÁNICA

8.1. COT y pirólisis Rock Eval

Para caracterizar la roca generadora, en esta sección se emplearon los datos de Schuepbach Energy (dado el gran número de muestras disponibles), y los parámetros de Peters y Cassa (1994).

Del pozo Pepe Núñez E-1b (Tablas 18 y 19) se puede destacar:

- los valores de COT indican una roca generadora pobre a buena (promedio 2,38%), con sendos picos de calidad muy buena (3,19%) a excelente (15,76%) en 424 y 432 m, respectivamente (Fig. 100).

- los valores de S1 son generalmente bajos o muy bajos (promedio 0,31 mg HC/g roca), correspondiendo a una roca de calidad pobre, aunque alcanza 0,94 mg HC/g COT en la muestra más profunda (432 m). El S1 exhibe una tendencia a decrecer de la base hacia el tope de la sección pelítica (Fig. 101).

- los valores de S2 son consistentes con el COT, indicando una roca generadora pobre a regular (promedio 5,22 mg HC/g COT), a excepción de dos picos claramente marcados (Fig. 102): un intervalo de calidad buena a muy buena, entre 7,18 y 11,31 mg HC/g roca (entre 423 y 424 m), y un pico de calidad excelente, superior a 33 mg HC/g roca (432 m).

- los valores de S3 son generalmente bajos (promedio 0,27 mg CO₂/g roca (Fig. 103). La muestra más profunda muestra un pico de 0,90 mg CO₂/roca (432 m).

- los valores de IH (promedio 155,64 mg HC/g COT) indican una roca mayormente con potencial de generador nulo (menor a 50 mg HC/g de COT) o bien de hidrocarburos gaseosos (entre 50 y 200 mg HC/g de CO₂), a excepción del tope y la base de la sección (Fig. 104). En efecto, existe un intervalo de entre 259 y 384 mg HC/g COT que corresponde a una roca con potencial de generación mixto (425 m) y de petróleo (423 a 424 m), y un pico de 212 mg HC/g COT que indica potencial de generación mixto (432 m).

- los valores de IO son generalmente bajos (promedio 27,73 mg CO₂/g COT), aunque en sendas muestras alcanzan 49 y 64 mg CO₂/g COT (422 y 430 m, respectivamente; Fig. 105).

- los valores de Tmax indican que la roca generadora es inmadura (promedio 429,67 °C), alcanzando sólo en un caso (424 m) la temperatura mínima necesaria para generar hidrocarburos (esto es, 435 °C; Fig. 106).

- los valores de IP indican materia orgánica inmadura. El mayor valor (0,16 mg HC/g roca) se da en el centro de la sección (427 m; Fig. 107).

- los valores de contenido de petróleo normalizado o “petróleo libre” (Fig. 107) son generalmente menores a 50 mg HC/g roca, indicando condiciones de inmadurez. No obstante, existen un intervalo con hasta 78 mg HC/g roca (430 a 431 m), que correspondería a una roca madura con impregnación.

- los valores de S2/S3 (Fig. 108) mayormente corresponden a kerógenos generadores de gas (1-5 mg HC/mg CO₂) o mixtos (5-10 mg HC/mg CO₂), aunque se alcanzan valores de generación de petróleo en un intervalo al tope (423 a 424 m) con (35,90 a 49,17 mg HC/mg CO₂) y en la base de 37,19 mg HC/mg CO₂ (432 m).

Del pozo Cañada del Charrúa E-2 (Tablas 18 y 19) se puede destacar:

- los valores de COT indican una roca generadora mayormente regular a muy buena (promedio 1,83%), con dos intervalos de calidad excelente (COT mayor a 4%), entre 132 y 133 m (alcanzando 7,24%) y entre 142 y 144 m (alcanzando 8,11%). El COT exhibe una tendencia a decrecer de la base hacia el tope de la sección pelítica (Fig. 100).

- los valores de S1 son bajos (promedio 0,27 mg HC/g roca), correspondiendo a una roca generadora pobre, con sólo un valor superando levemente 0,50 mg HC/g COT (476,4 m). El S1 exhibe una tendencia a crecer de la base hacia el tope de la sección pelítica, aunque se registra un pico de 0,48 mg HC/g COT en 484,2 m (Fig. 101).

- los valores de S2 indican una roca generadora mayormente pobre a regular (promedio 1,31 mg HC/g roca), aunque se alcanza calidad buena

a muy buena en los intervalos 483,9 a 484,2 m (hasta 12,14 mg HC/g roca) y 489,5 a 489,8 m (hasta 6,31 mg HC/g roca), y en el pico de 492,7 m (6,01 mg HC/g roca; Fig. 102).

- los valores de S3 son generalmente bajos (promedio 0,10 mg CO₂/g roca). Hacia la base hay un intervalo que llega a superar 0,50 mg CO₂/roca (492,7 a 493,3 m). El S3 exhibe una tendencia a decrecer de la base hacia el top de la sección pelítica (Fig. 103).

- los valores de IH indican una roca mayormente sin potencial generador o con potencial de generador de gas (promedio 62,58 mg HC/g de COT), aunque existe un intervalo (483,9 a 484,2 m) con potencial de generación mixto (226 mg HC/g de COT) o de petróleo (399 mg HC/g COT; Fig. 104).

- los valores de IO son generalmente menores a 15 mg CO₂/g COT. Existe un pico aislado en 486,9 m donde se alcanza el valor 57 mg CO₂/g COT (Fig. 105).

- los valores de Tmax indican que la roca generadora sólo alcanza o supera la temperatura mínima necesaria para generar hidrocarburos (esto es, 435 °C) en algunas muestras: 474,0 m, 478,5 a 479,1 m, 482,7 m, 483,9 a 484,2 m, 490,3 m y 494,2 m (Fig. 106).

- los valores de IP generalmente indican materia orgánica inmadura (Fig. 107), aunque algunas muestras poseen más de 0,3 mg HC/g roca (472, 477 y 491 m), coincidiendo con picos de Tmax. La muestra de 491 m, con un valor de 0,44 mg HC/g roca, correspondería a materia orgánica madura, aunque los picos de S1 y S2 para la misma son muy bajos.

- los valores de contenido de petróleo normalizado o "petróleo libre" son generalmente menores a 50 mg HC/g roca, indicando condiciones de inmadurez. No obstante, existen picos de 55 mg HC/g roca (476,1 m) y 62 mg HC/g roca (486,9 m), que corresponderían a una roca madura con impregnación (Fig. 108).

- los valores de S2/S3 (promedio 15,82 mg HC/g CO₂) corresponden según el intervalo a una roca con potencial de generación de gas, mixto o

petróleo (Fig. 109). En este último caso destacan por la elevada relación S2/S3 los intervalos 478,8 a 479,1 m (hasta 77,17 mg HC/mg CO₂) y 483,0 a 484,2 (hasta 173,43 mg HC/mg CO₂).

Para ambos pozos se tiene lo siguiente:

El diagrama de Van Krevelen indica que el tipo de kerógeno es II, III y IV, similar al gráfico de IH vs Tmax, que indica kerógenos tipo II, II-III, III y IV (Fig. 111).

Este último gráfico permite visualizar que la mayoría de las muestras de ambos pozos están inmaduras térmicamente, a excepción de algunas muestras del pozo Pepe Núñez E-1b que estarían entrando en la ventana del petróleo. Como se comentó anteriormente, las muestras que poseen elevados valores de Tmax (correspondientes a generación de condensado/gas húmedo o incluso gas seco) no deben ser tenidas en cuenta.

El gráfico de S2 vs COT (Figs. 112 y 113) también indica kerógeno tipo II, II-III, III y IV. Curiosamente, las escasas muestras con kerógeno tipo II caen en el campo de los kerógenos usualmente marinos, lo que no es sostenido por los análisis palinológicos.

Tabla 17. Resultados de análisis de COT y pirólisis Rock Eval en el pozo Pepe Núñez E-1b. Basado en datos de Schuepbach Energy. Se marca en amarillo el intervalo de lutitas grises a negras.

Profundidad	COT	S2	S1	S3	IO	IH	CPN	IP	Tmax	S2/S3
-374,3	0,17	0,05	0,08	0,17	101	30	47	0,63		0,29
-382,2	0,18	0,04	0,03	0,15	83	22	17	0,45		0,27
-389,9	0,25	0,06	0,03	0,18	72	24	12	0,38		0,33
-400,2	0,45	0,08	0,04	0,2	45	18	9	0,37	426	0,40
-400,7	0,48	0,09	0,04	0,17	35	19	8	0,31	427	0,53
-401,1	0,49	0,04	0,03	0,18	37	8	6	0,36	428	0,22
-401,5	0,51	0,06	0,03	0,2	39	12	6	0,35	428	0,30
-401,85	0,47	0,06	0,03	0,15	32	13	6	0,37	429	0,40
-402,55	0,35	0,07	0,03	0,15	42	20	8	0,31	429	0,47
-403,1	0,41	0,08	0,03	0,17	41	19	7	0,26	430	0,47
-403,35	0,45	0,11	0,16	0,23	51	24	35	0,6	429	0,48
-403,8	0,48	0,07	0,03	0,16	33	15	6	0,3	428	0,44
-404,25	0,48	0,06	0,03	0,2	42	13	6	0,34	433	0,30
-405,1	0,49	0,07	0,07	0,33	67	14	14	0,49	423	0,21
-405,5	0,4	0,12	0,04	0,15	38	30	10	0,24	430	0,80
-405,75	0,44	0,14	0,05	0,15	34	31	11	0,26	429	0,93
-406,45	0,39	0,12	0,09	0,47	122	31	23	0,42	424	0,26
-407	0,27	0,11	0,04	0,18	67	41	15	0,24	431	0,61
-408	0,25	0,1	0,07	0,17	69	40	28	0,41	428	0,59
-409	0,29	0,12	0,08	0,2	69	41	28	0,39	429	0,60
-410	0,26	0,15	0,19	0,21	81	58	73	0,55	428	0,71
-411	0,3	0,11	0,22	0,22	73	36	73	0,68	428	0,50
-412	0,26	0,11	0,21	0,18	70	43	81	0,65	426	0,61
-413	0,27	0,14	0,2	0,18	66	51	73	0,58	430	0,78
-413,5	0,44	0,14	0,07	0,21	48	32	16	0,32	430	0,67
-420	0,25	0,11	0,05	0,18	71	44	20	0,33	428	0,61
-421	0,65	0,43	0,11	0,21	32	66	17	0,21	430	2,05
-422	0,49	0,48	0,15	0,24	49	98	31	0,24	429	2,00
-423	1,87	7,18	0,28	0,2	11	384	15	0,04	433	35,90
-424	3,19	11,31	0,27	0,23	7	355	8	0,02	435	49,17
-425	0,66	1,71	0,17	0,2	30	259	26	0,09	431	8,55
-426	0,66	0,38	0,18	0,2	30	57	27	0,32	428	1,90
-427	0,56	0,15	0,16	0,21	37	27	28	0,52		0,71
-428	0,56	0,24	0,18	0,2	35	43	32	0,42	425	1,20
-429	1,16	1,63	0,31	0,18	16	141	27	0,16	431	9,06
-430	0,42	0,22	0,33	0,27	64	52	78	0,6	424	0,81
-431	0,8	0,67	0,49	0,16	20	84	61	0,42	431	4,19
-432	15,76	33,47	0,94	0,9	6	212	6	0,03		37,19

Tabla 18. Resultados de análisis de COT y pirólisis Rock Eval en el pozo Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy. Se marca en amarillo el intervalo de lutitas grises a negras.

Profundidad	COT	S2	S1	S3	IO	IH	CPN	IP	Tmax	S2/S3
-462,5	0,57	0,21	0,38	0,04	7	37	67	0,65	431	5,25
-462,8	0,56	0,19	0,4	0,04	7	34	72	0,67	432	4,75
-463,1	0,64	0,17	0,41	0,07	11	27	64	0,71	431	2,43
-463,4	0,51	0,2	0,43	0,06	12	40	85	0,68	431	3,33
-463,7	0,57	0,18	0,4	0,06	11	32	70	0,69	431	3,00
-464	0,57	0,2	0,44	0,07	12	35	77	0,69	432	2,86
-464,3	0,59	0,2	0,4	0,07	12	34	68	0,66	429	2,86
-464,6	0,41	0,23	0,28	0,06	15	56	68	0,55	431	3,83
-464,9	0,38	0,19	0,22	0,08	21	50	58	0,53	436	2,38
-465,2	0,74	0,19	0,19	0,08	11	26	26	0,49	434	2,38
-465,5	0,75	0,21	0,19	0,1	13	28	25	0,48	432	2,10
-465,8	0,57	0,23	0,2	0,05	9	40	35	0,47	435	4,60
-466,1	0,72	0,24	0,26	0,07	10	34	36	0,52	435	3,43
-466,4	0,78	0,2	0,17	0,07	9	26	22	0,47	434	2,86
-466,7	0,54	0,24	0,18	0,06	11	44	33	0,43	435	4,00
-467	0,77	0,19	0,15	0,06	8	25	19	0,44	434	3,17
-467,3	0,82	0,22	0,18	0,08	10	27	22	0,45	434	2,75
-467,6	0,84	0,22	0,19	0,07	8	26	23	0,46	433	3,14
-467,9	0,9	0,25	0,2	0,06	7	28	22	0,44	433	4,17
-468,2	0,94	0,23	0,17	0,06	6	25	18	0,43	436	3,83
-468,5	0,96	0,21	0,16	0,06	6	22	17	0,43	434	3,50
-468,8	1,06	0,23	0,16	0,04	4	22	15	0,41	434	5,75
-469,1	0,87	0,22	0,16	0,05	6	25	18	0,41	435	4,40
-469,4	0,91	0,2	0,16	0,07	8	22	18	0,44	433	2,86
-469,7	0,82	0,42	0,16	0,05	6	51	20	0,27	434	8,40
-470	1,03	0,46	0,16	0,05	5	45	16	0,26	434	9,20
-470,3	0,97	0,49	0,2	0,06	6	51	21	0,29	434	8,17
-470,6	1,2	0,4	0,16	0,08	7	33	13	0,28	433	5,00
-470,9	0,82	0,45	0,18	0,06	7	55	22	0,29	433	7,50
-471,2	1,49	0,45	0,17	0,09	6	30	11	0,27	435	5,00
-471,4	1,04	0,42	0,17	0,05	5	40	16	0,28	434	8,40
-471,7	0,92	0,37	0,17	0,06	7	40	19	0,31	433	6,17
-472	0,95	0,38	0,11	0,05	5	40	12	0,22	436	7,60
-472,3	1,18	0,2	0,12	0,05	4	17	10	0,37	426	4,00
-472,5	1,03	0,45	0,15	0,05	5	44	15	0,25	434	9,00
-472,8	0,99	0,41	0,13	0,05	5	42	13	0,23	434	8,20
-473,1	1,94	0,32	0,14	0,08	4	16	7	0,31	431	4,00
-473,4	1,01	0,39	0,13	0,08	8	39	13	0,24	434	4,88
-473,7	1,07	0,39	0,12	0,1	9	36	11	0,24	433	3,90
-474	1,48	0,43	0,43	0,05	3	29	29	0,5	435	8,60
-474,3	1,41	0,35	0,45	0,06	4	25	32	0,57	432	5,83
-474,6	0,93	0,35	0,39	0,03	3	38	42	0,52	433	11,67
-474,9	0,93	0,35	0,44	0,04	4	38	47	0,56	433	8,75
-475,2	1,82	0,2	0,43	0,04	2	11	24	0,68	425	5,00

-475,5	0,84	0,22	0,42	0,03	4	26	50	0,65	429	7,33
-475,8	1,01	0,24	0,48	0,06	6	24	47	0,67	432	4,00
-476,1	0,76	0,28	0,42	0,11	14	37	55	0,6	422	2,55
-476,4	1,3	0,4	0,51	0,07	5	31	39	0,56	430	5,71
-476,7	1,1	0,33	0,35	0,05	5	30	32	0,51	433	6,60
-477	2,27	0,31	0,32	0,06	3	14	14	0,51	433	5,17
-477,3	2,1	0,32	0,3	0,04	2	15	14	0,48	432	8,00
-477,6	1,44	0,94	0,49	0,06	4	65	34	0,34	433	15,67
-477,9	2,3	0,51	0,4	0,09	4	22	17	0,44	431	5,67
-478,2	0,96	0,72	0,43	0,04	4	75	45	0,37	434	18,00
-478,5	1,41	1,07	0,36	0,06	4	76	26	0,25	437	17,83
-478,8	2,21	4,32	0,4	0,06	3	196	18	0,08	437	72,00
-479,4	1,39	0,33	0,24	0,05	4	24	17	0,42	434	6,60
-479,7	1,66	2,8	0,35	0,08	5	169	21	0,11	437	35,00
-480	1,43	0,34	0,25	0,09	6	24	17	0,42	435	3,78
-480,3	1,19	0,1	0,29	0,03	3	8	24	0,74	318	3,33
-480,6	1,12	0,32	0,29	0,05	4	29	26	0,47	429	6,40
-480,9	1,02	0,35	0,33	0,05	5	34	32	0,49	429	7,00
-481,2	1,23	0,81	0,3	0,06	5	66	24	0,27	431	13,50
-481,5	2,13	1,06	0,29	0,09	4	50	14	0,22	431	11,78
-481,8	2,43	1,2	0,24	0,09	4	49	10	0,17	434	13,33
-482,1	2,51	2,82	0,29	0,08	3	112	12	0,09	436	35,25
-482,4	1,17	0,88	0,25	0,05	4	75	21	0,22	433	17,60
-482,7	1,54	1,29	0,27	0,06	4	84	17	0,17	435	21,50
-483	1,39	1,02	0,25	0,05	4	74	18	0,19	433	20,40
-483,3	0,91	0,86	0,24	0,04	4	94	26	0,22	433	21,50
-483,6	1,34	0,82	0,22	0,09	7	61	16	0,21	431	9,11
-483,9	2,32	5,24	0,33	0,06	3	226	14	0,06	435	87,33
-484,2	3,04	12,14	0,48	0,07	2	399	16	0,04	439	173,43
-484,5	1,41	1,3	0,22	0,05	4	92	16	0,14	434	26,00
-484,8	1,38	1,23	0,2	0,07	5	89	15	0,14	434	17,57
-485,1	1,23	0,94	0,17	0,06	5	77	14	0,16	434	15,67
-485,4	1,05	0,66	0,19	0,06	6	63	18	0,22	433	11,00
-485,7	1,04	0,79	0,16	0,05	5	76	15	0,17	433	15,80
-486	1,15	0,84	0,18	0,07	6	73	16	0,18	434	12,00
-486,3	1,56	0,84	0,18	0,09	6	54	12	0,18	432	9,33
-486,6	1,47	0,7	0,2	0,07	5	48	14	0,23	433	10,00
-486,9	0,42	0,25	0,26	0,24	57	59	62	0,51	403	1,04
-487,2	1,25	0,18	0,17	0,08	6	14	14	0,49	427	2,25
-487,4	1,06	0,72	0,23	0,08	8	68	22	0,24	433	9,00
-487,7	1,33	0,48	0,22	0,09	7	0	17	0,31	434	5,33
-488	1,12	0,44	0,17	0,06	5	39	15	0,28	432	7,33
-488,2	1,44	0,36	0,16	0,08	6	25	11	0,3	432	4,50
-488,4	0,95	0,32	0,2	0,08	8	34	21	0,38	432	4,00
-488,7	1,05	0,34	0,17	0,08	8	33	16	0,33	429	4,25
-489	1,21	0,4	0,22	0,07	6	33	18	0,35	432	5,71
-489,1	1,63	0,59	0,16	0,09	6	36	10	0,22	433	6,56
-489,4	0,72	0,38	0,16	0,07	10	53	22	0,29	434	5,43

-489,5	7,24	5,37	0,22	0,28	4	74	3	0,04	429	19,18
-489,8	4,56	6,31	0,2	0,17	4	138	4	0,03	431	37,12
-490,3	0,86	0,69	0,16	0,05	6	80	19	0,19	438	13,80
-490,6	1,31	0,91	0,14	0,08	6	69	11	0,13	434	11,38
-490,9	0,83	0,46	0,13	0,06	7	55	16	0,22	433	7,67
-491,2	1,62	0,53	0,14	0,16	10	33	9	0,2	431	3,31
-491,5	1,18	0,42	0,13	0,1	9	36	11	0,24	432	4,20
-491,8	1,31	0,37	0,1	0,12	9	28	8	0,22	427	3,08
-492,1	3,71	1,62	0,23	0,17	5	44	6	0,13	433	9,53
-492,4	3,62	1,64	0,17	0,17	5	45	5	0,1	432	9,65
-492,7	8,11	6,01	0,21	0,53	7	74	3	0,03	433	11,34
-493	7,37	3,03	0,17	0,53	7	41	2	0,05	431	5,72
-493,3	5,58	2,38	0,19	0,46	8	43	3	0,07	430	5,17
-493,6	1,31	0,42	0,16	0,14	11	32	12	0,28	427	3,00
-493,9	1,1	0,34	0,14	0,14	13	31	13	0,28	430	2,43

Tabla 19. Estadísticos básicos de los datos de geoquímica orgánica exclusivamente para las lutitas grises a negras de los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

Variable	Estadístico	Pepe Núñez E-1b	Cañada del Charrúa E-2	Ambos pozos
COT	Mínimo	0,42	0,42	0,42
	Máximo	15,76	8,11	15,76
	Promedio	2,38	1,83	1,91
	Moda	0,66	1,41	1,41
S1	Mínimo	0,15	0,10	0,1
	Máximo	0,94	0,51	0,94
	Promedio	0,31	0,27	0,27
	Moda	0,18	0,17	0,17
S2	Mínimo	0,15	0,10	0,1
	Máximo	33,47	12,14	33,47
	Promedio	5,22	1,31	1,85
	Moda	–	0,35	0,35
S3	Mínimo	0,16	0,03	0,03
	Máximo	0,90	0,53	0,9
	Promedio	0,27	0,10	0,12
	Moda	0,20	0,06	0,06
IH	Mínimo	27,00	0,00	0
	Máximo	384,00	399,00	399
	Promedio	155,64	62,58	75,38
	Moda	–	24,00	24,00
IO	Mínimo	6,00	2,00	2
	Máximo	64,00	57,00	64
	Promedio	27,73	6,20	9,16
	Moda	30,00	4,00	4,00
Potencial generador	Mínimo	0,31	0,35	0,31
	Máximo	34,41	12,62	34,41
	Promedio	5,54	1,58	2,12
	Moda	–	0,63	0,63
Contenido de petróleo normalizado	Mínimo	6,00	2,00	2
	Máximo	78,00	62,00	78
	Promedio	30,82	19,97	21,46
	Moda	27,00	14,00	14,00
IP	Mínimo	0,02	0,03	0,02
	Máximo	0,60	0,74	0,74
	Promedio	0,26	0,29	0,29
	Moda	0,42	0,22	0,22
Tmax	Mínimo	424,00	318,00	318
	Máximo	435,00	439,00	439
	Promedio	429,67	430,32	430,24
	Moda	431,00	433,00	433,00
S2/S3	Mínimo	0,71	1,04	0,71
	Máximo	49,17	173,43	173,43
	Promedio	13,70	15,82	15,53
	Moda	–	7,33	7,33

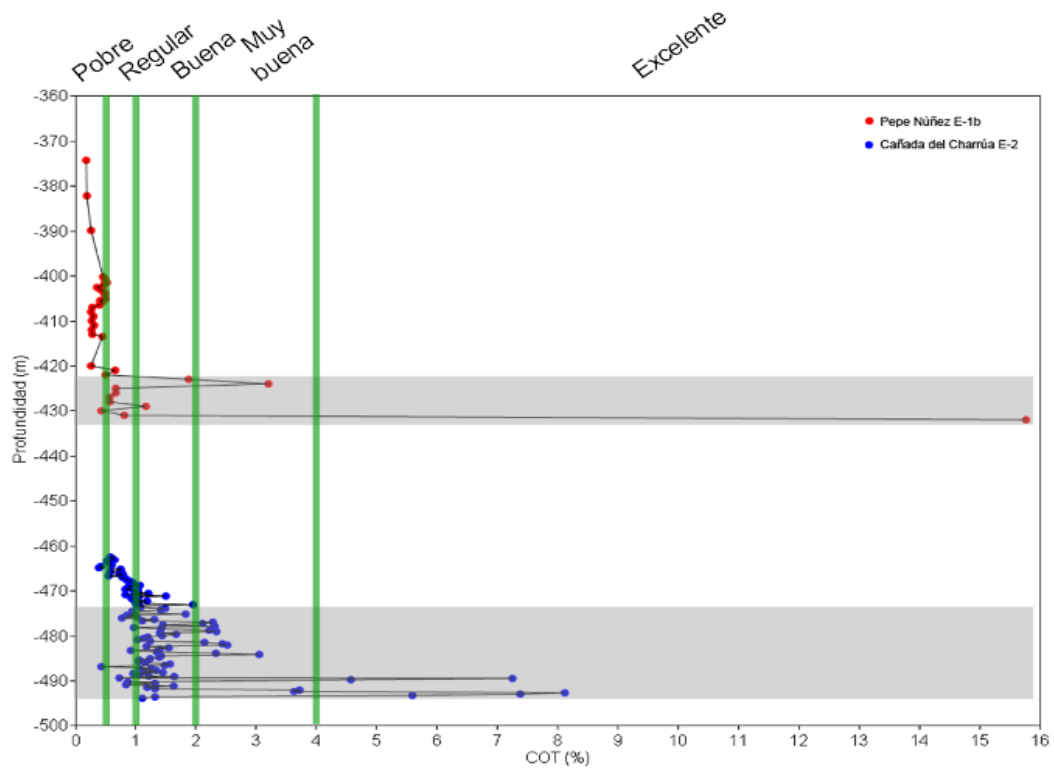


Figura 100. Variación de COT (%) con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

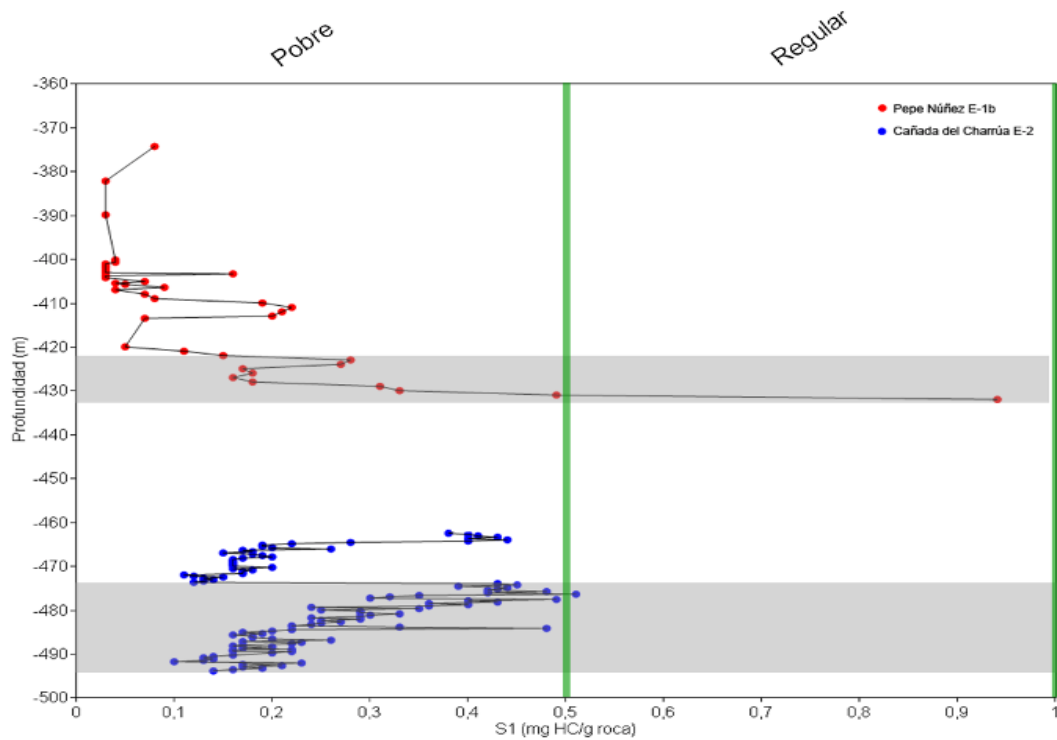


Figura 101. Variación de S1 (mg HC/g roca) con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

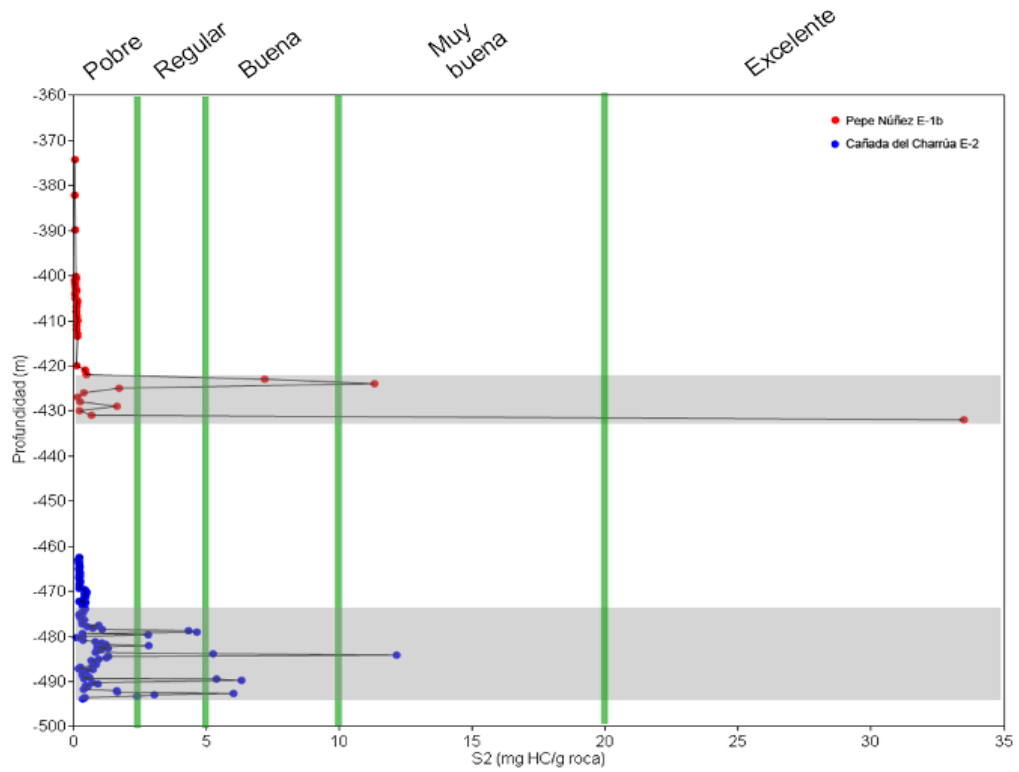


Figura 102. Variación de S2 (mg HC/g roca) con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

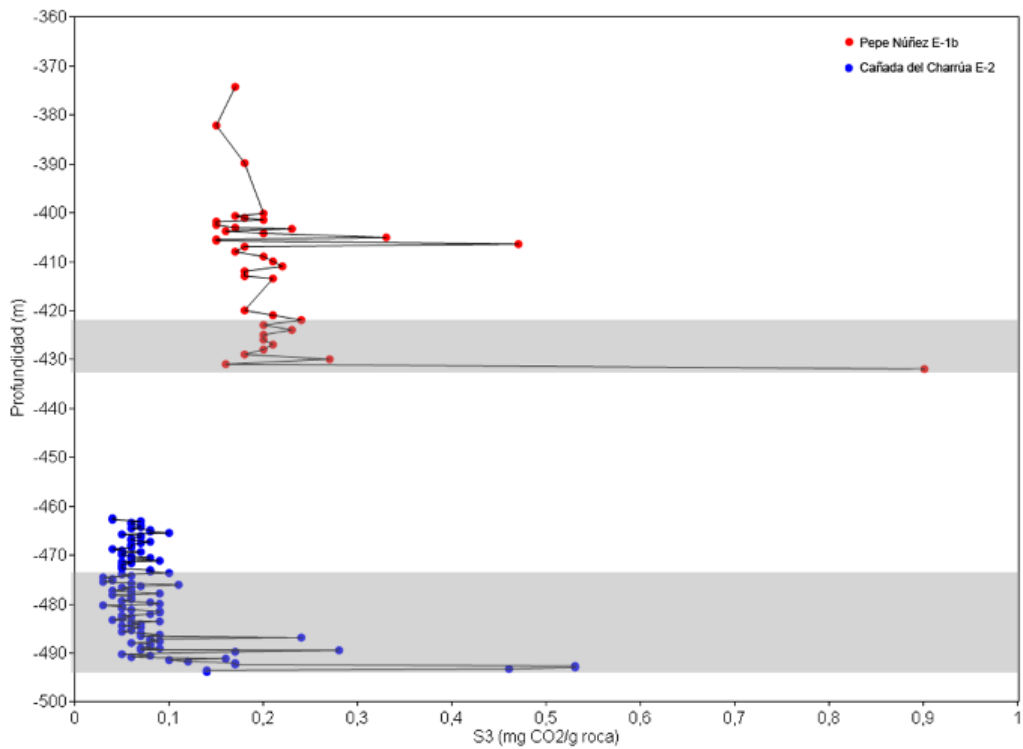


Figura 103. Variación de S3 (mg CO₂/g roca) con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

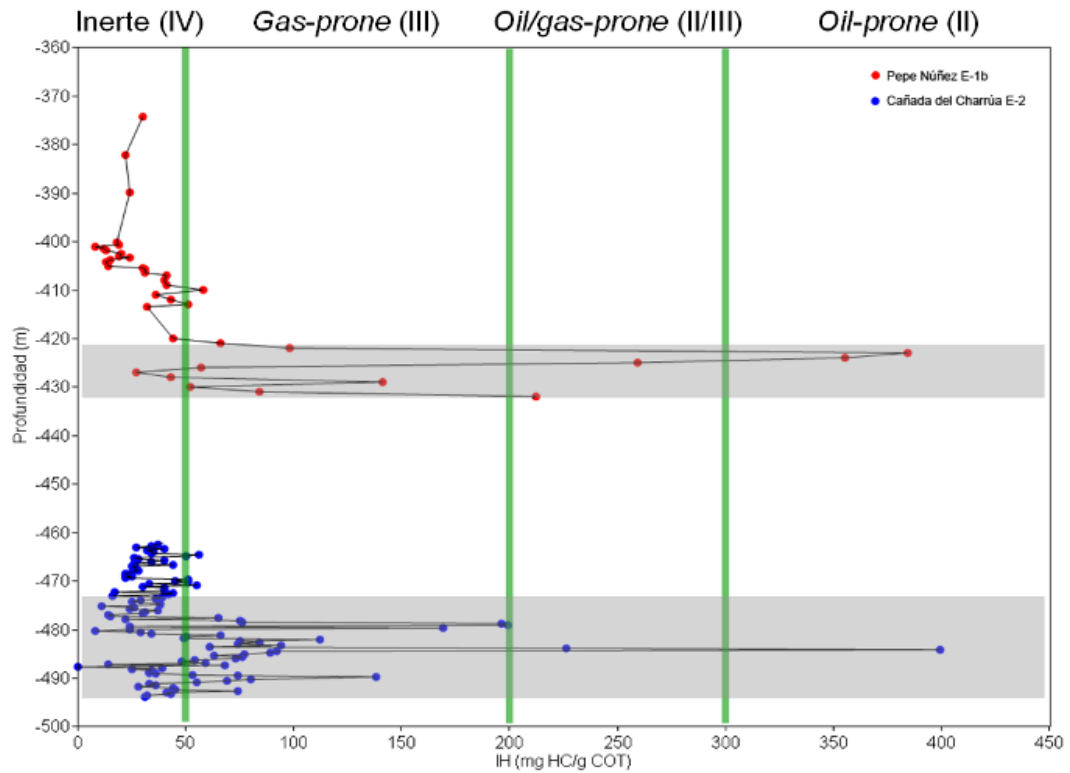


Figura 104. Variación de IH (mg HC/g COT) con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

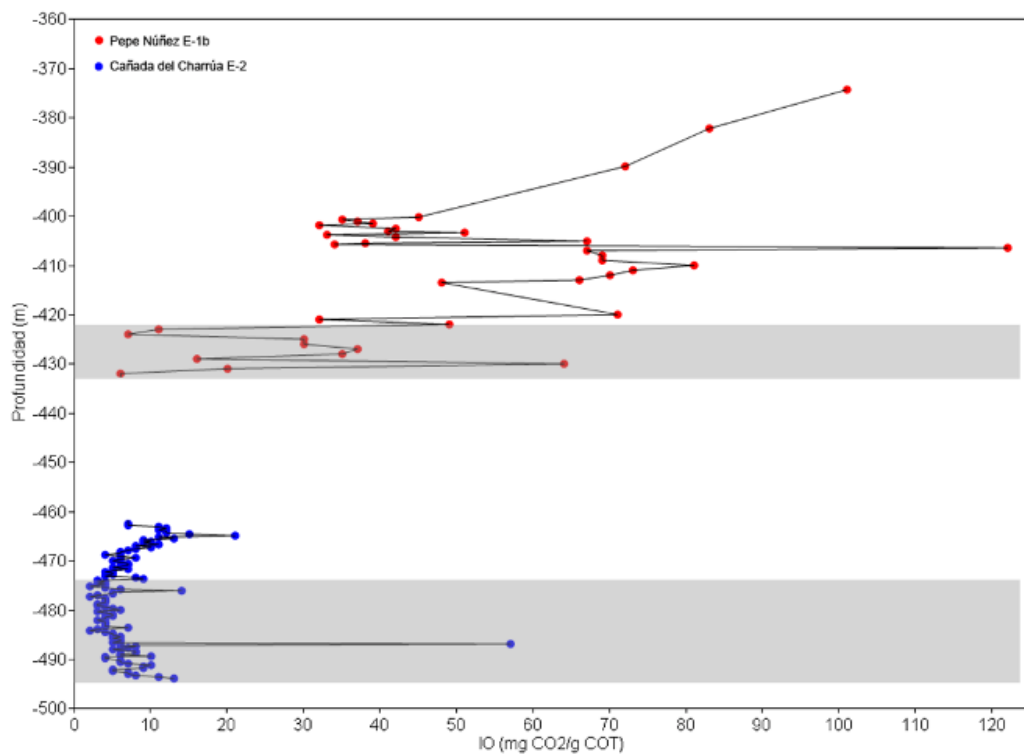


Figura 105. Variación de IO (mg CO₂/g COT) con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

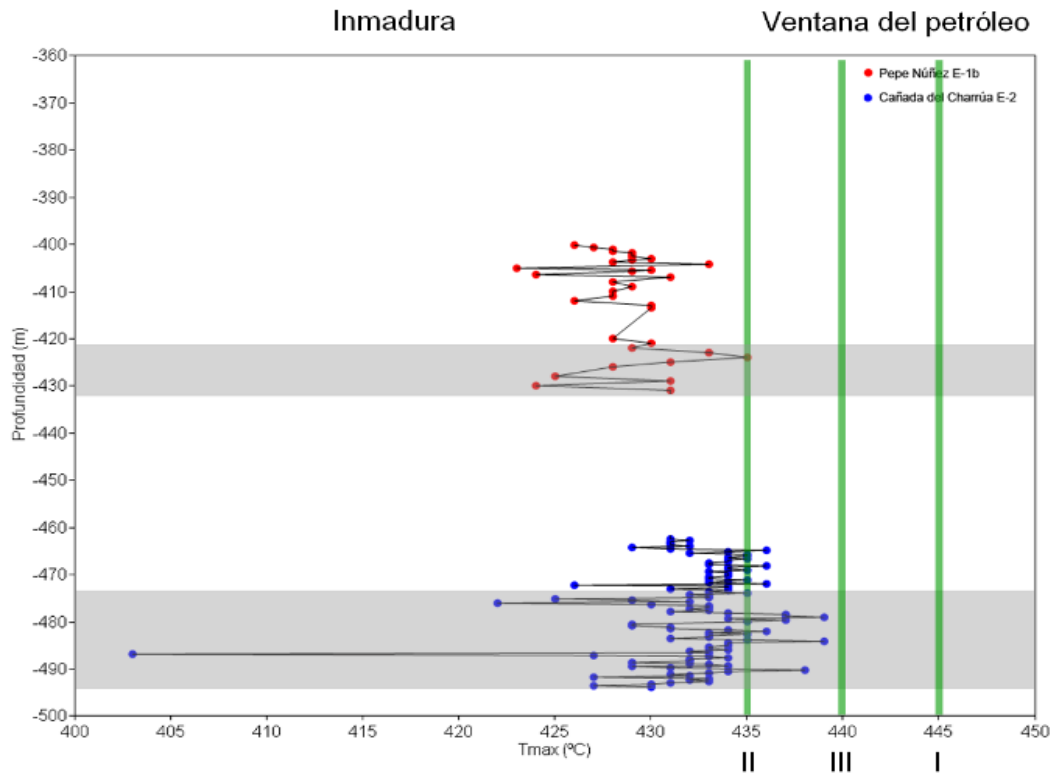


Figura 106. Variación de Tmax (°C) con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

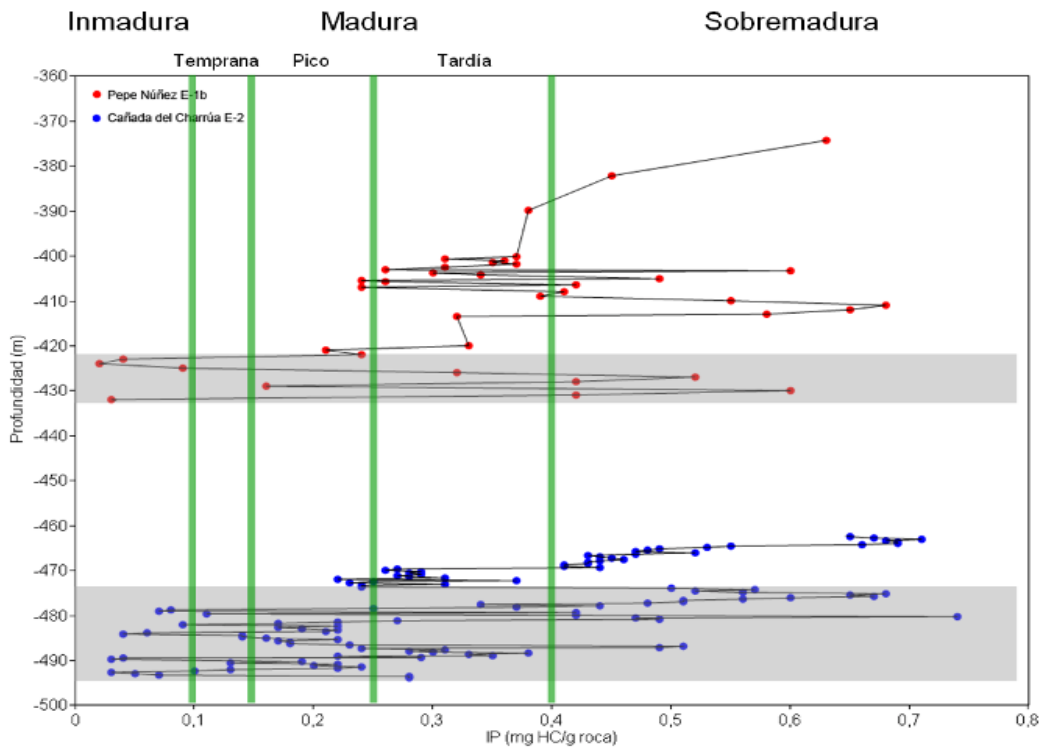


Figura 107. Variación de IP con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

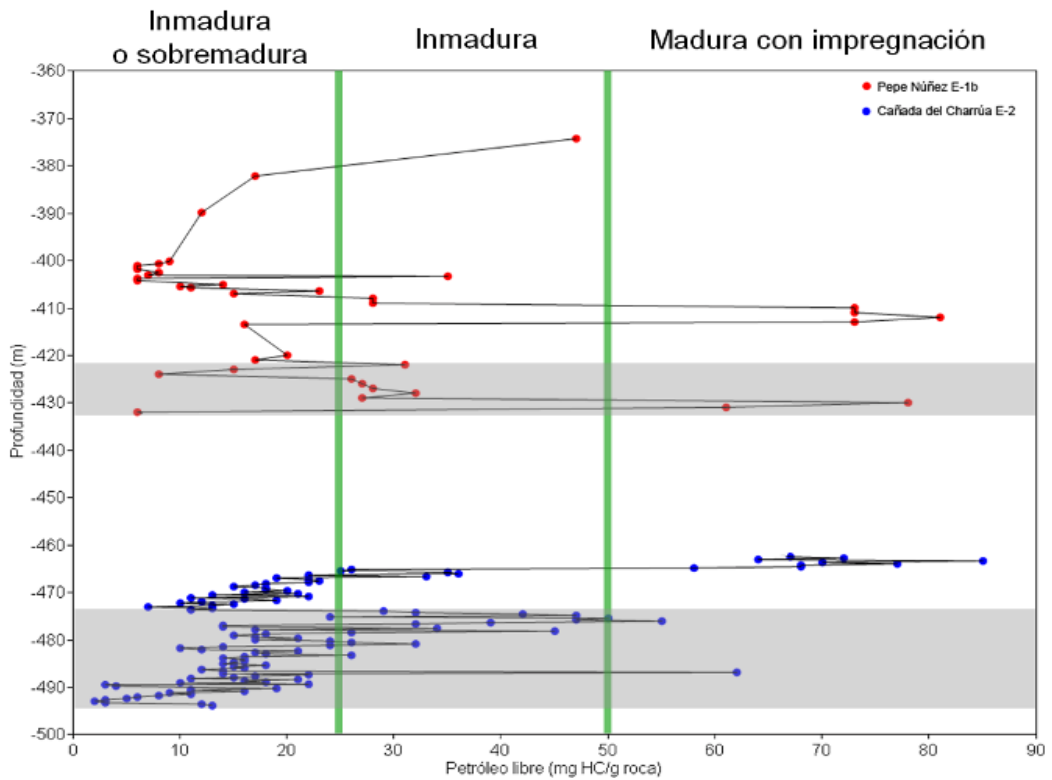


Figura 108. Variación del petróleo libre con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

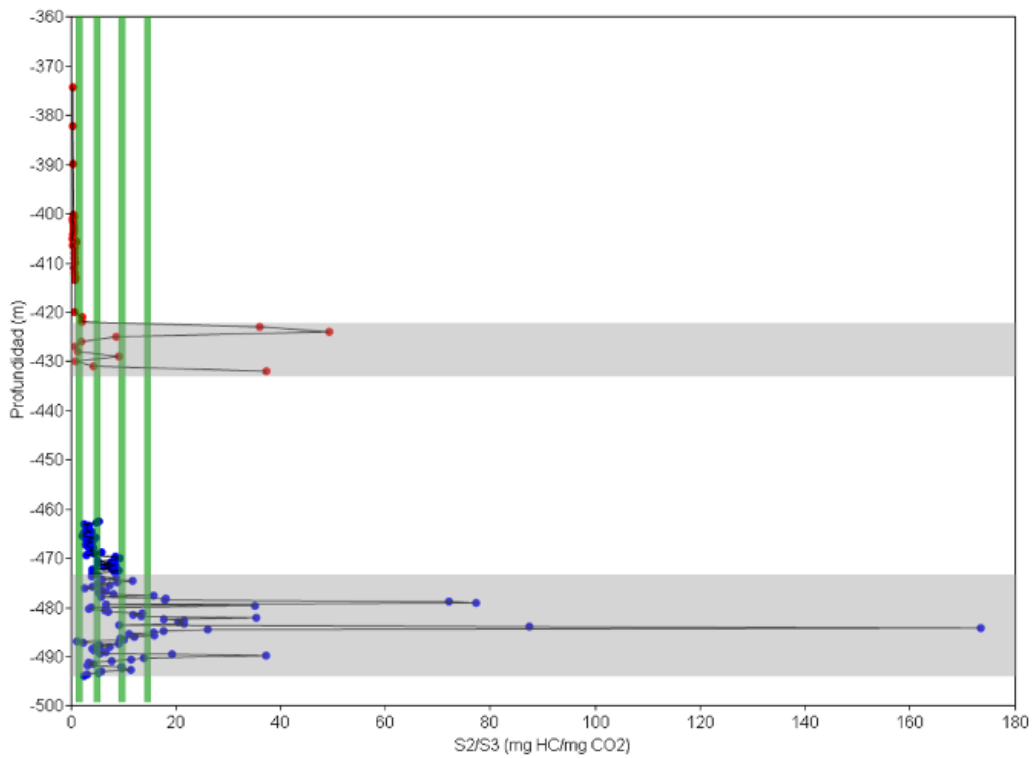


Figura 109. Variación del S2/S3 con la profundidad para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

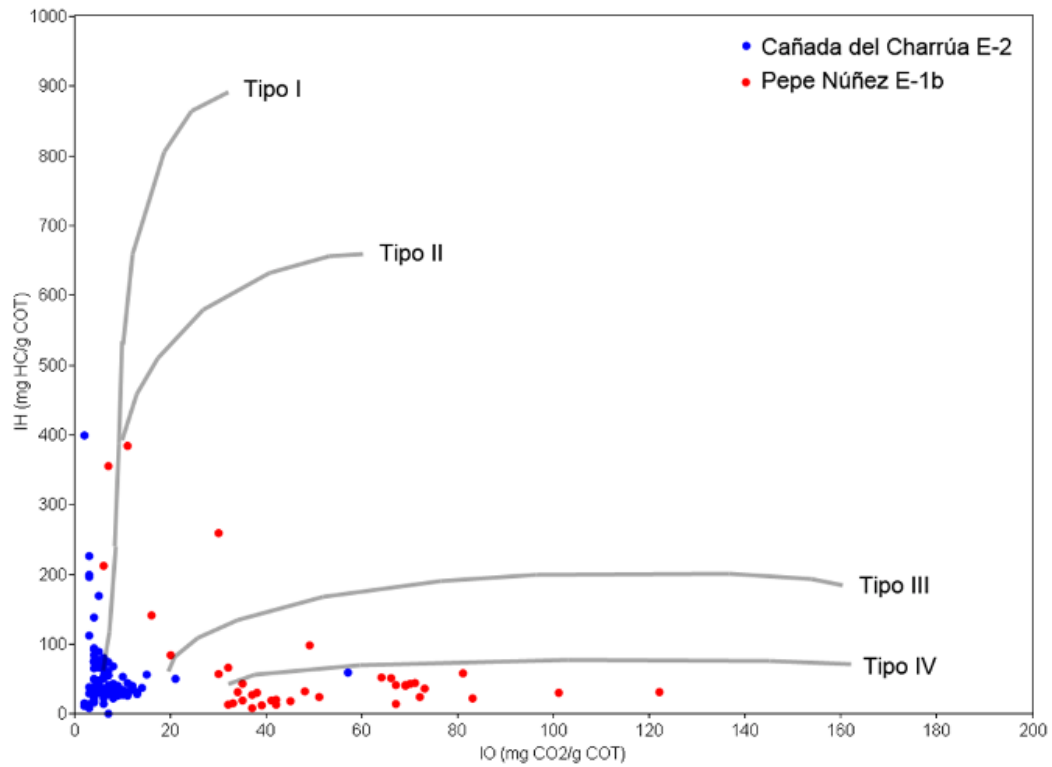


Figura 110. Diagrama de Van Krevelen para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

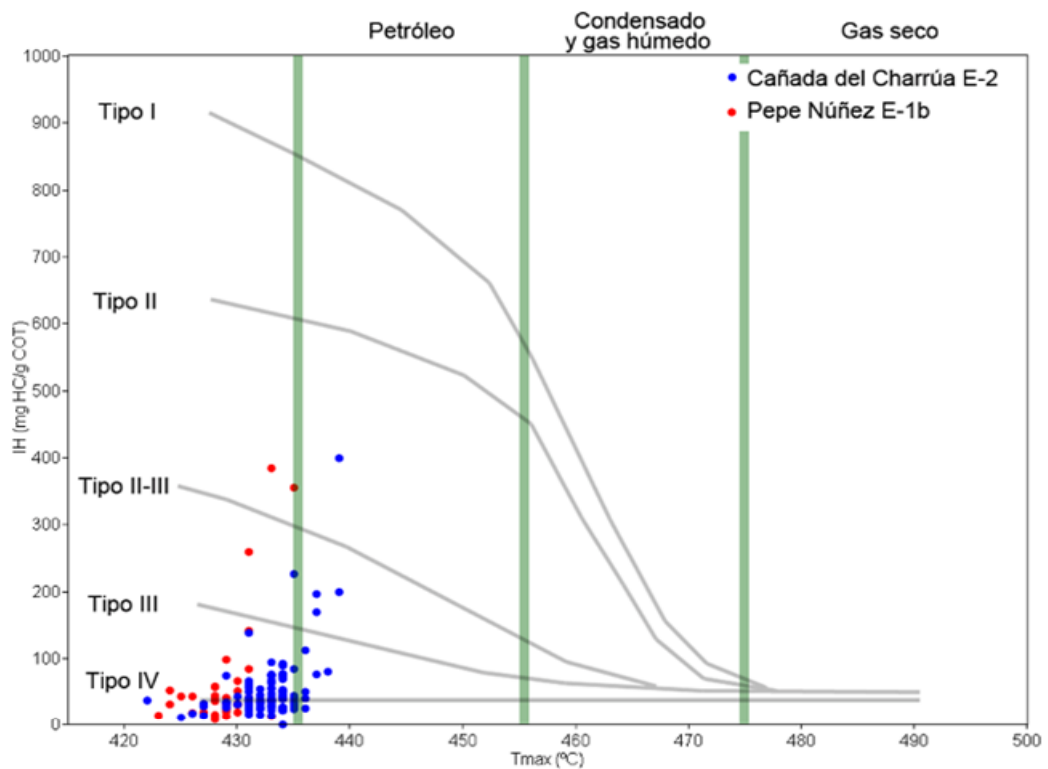


Figura 111. Gráfico de IH (mg HC/g COT) vs Tmax (°C) para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

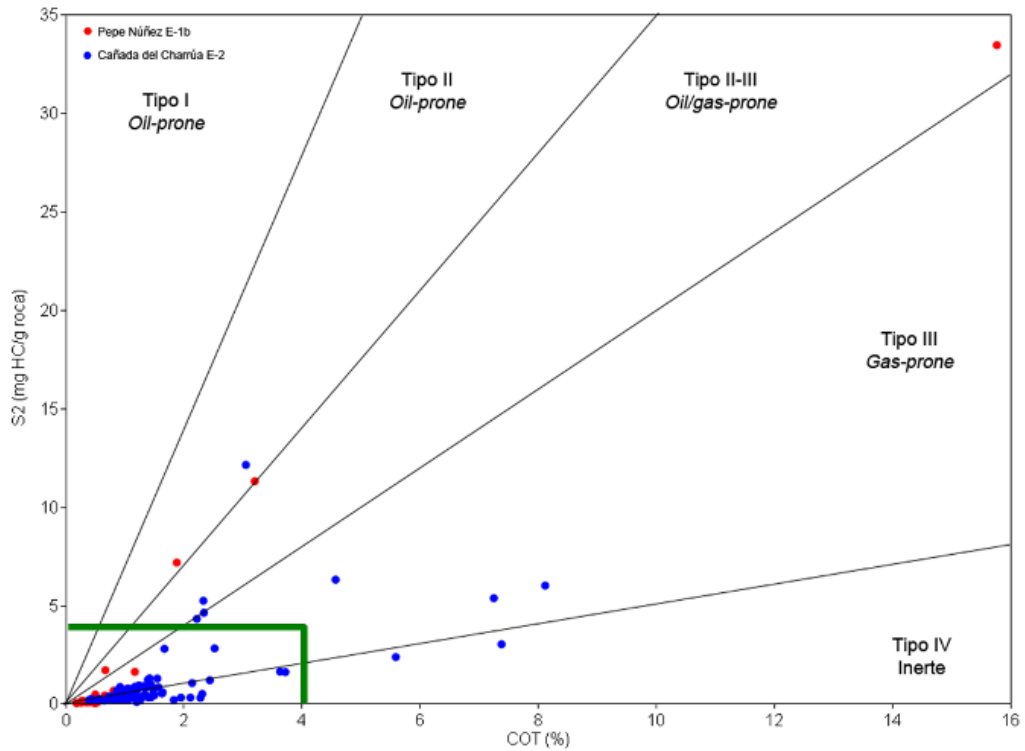


Figura 112. Gráfico de S2 (mg HC/g roca) vs COT (%) para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy. El recuadro verde se muestra ampliado en la Fig. 113.

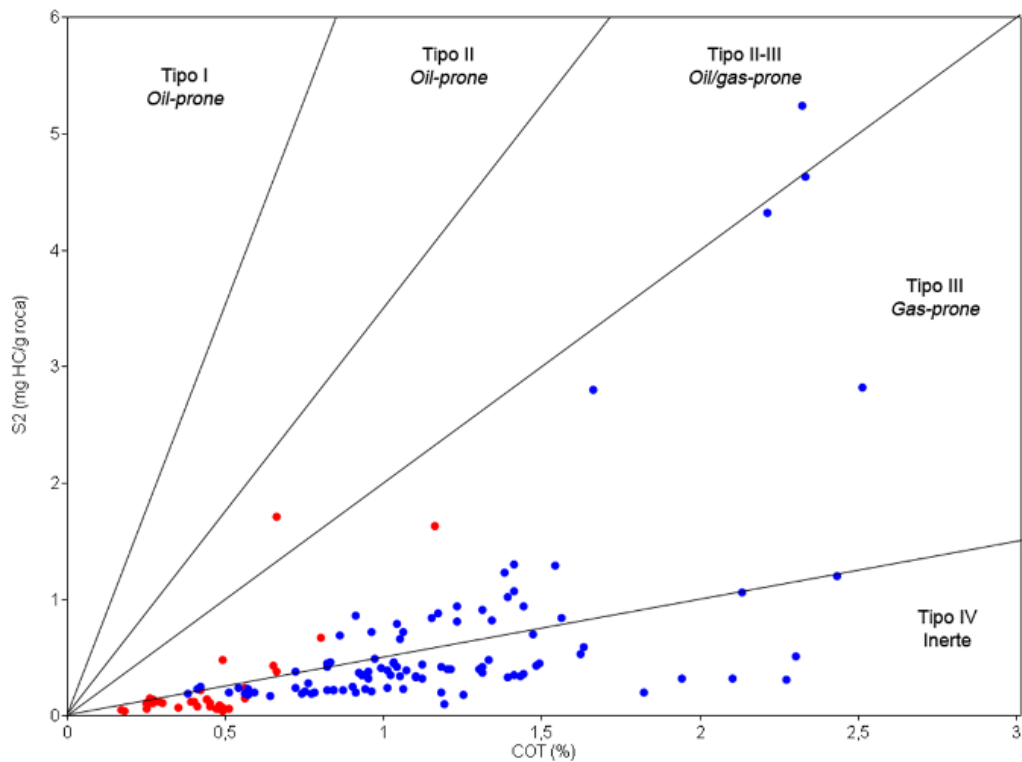


Figura 113. Gráfico de S2 (mg HC/g roca) vs COT (%) para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Schuepbach Energy.

8.2. Microscopía del kerógeno

Se analizaron cuatro muestras del pozo Cañada del Charrúa E-2 (Geolab Sur) y cuatro muestras del pozo Pepe Núñez E-1b (Shell), representativas de toda la sección pelítica, a efectos de determinar tipo de kerógeno y madurez térmica.

8.2.1. Tipo de kerógeno

En muestras de la base del intervalo en Pepe Núñez E-1b la materia orgánica presenta un conspicuo oscurecimiento. En particular la muestra de 432 m presenta abundante bitumen de aspecto granular (Fig. 114), posiblemente biodegradado.

Los análisis de microscopía del kerógeno sobre los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2 (Fig. 115) muestran en todos los casos una clara predominancia de materia orgánica amorfa (promedio 84%), llegando incluso a 100% en una de las muestras del primer pozo (493 m), seguida por inertinita (promedio 8%), vitrinita (promedio 5%) y liptinita (promedio 4%). Sólo en una de las muestras del pozo Pepe Núñez E-1b (424 m) la liptinita supera a la inertinita y la vitrinita (Fig. 115B).

En cuanto al potencial de generación de hidrocarburos, dado el elevado contenido de materia orgánica amorfa ya mencionado estas rocas generadoras serían *a priori* predominantemente proclives a generar petróleo (*oil-prone*). No obstante, esto no es así dado que la calidad de la materia orgánica es baja a moderada (como se ha mencionado respecto al índice de hidrógeno).

8.2.2. Reflectancia de vitrinita (Ro%)

En este análisis deben distinguirse componentes autóctonos y componentes alóctonos o retrabajados (Fig. 116); estos últimos incluso pueden dominar algunas de las muestras.

Por un lado, las Tablas 18 y 19 y la Fig. 116 resumen los principales resultados de Ro autóctonos de los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2.

Estos datos (Ro% medio de 0,49 a 0,63) son consistentes con lo discutido en la sección anterior en cuanto a valores de Tmax e IP, indicando rocas generadoras inmaduras o marginalmente maduras (ver también Fig. 118). La excepción es la muestra de 493 m del pozo Cañada del Charrúa E-2, que se encuentra en plena ventana del petróleo (Ro% medio 0,85). La aceleración de madurez que se registra en pocos metros en dicho pozo (Fig. 118) sólo podría aplicarse por la presencia de un mayor flujo térmico próximo a la base de la sección pelítica, relacionado a un dique o *sill* próximo (si bien no cortado por el pozo) y/o a una zona de falla.

Por otro lado, existen componentes retrabajados que exhiben mayor madurez que los autóctonos, correspondiendo a la ventana del petróleo (Ro% medio 0,72 a 0,75; Tabla 20 y Fig. 117B). Estos componentes podrían provenir de unidades devónicas (como en otros pozos de la Cuenca Norte) o incluso silúrico-ordovícicas (aún no registradas en Uruguay pero sí en Brasil). Quizás el bitumen de la muestra de 432 m del pozo Pepe Núñez E-1b provenga de una de estas unidades, erosionada en el área de estudio.

Es claro que la historia de soterramiento, levantamiento y denudación de estas cuencas es compleja. Otros métodos como cristalinidad de la illita y trazas de fisión de apatito podrían aportar valiosa información.

8.2.3. Color de fluorescencia e Índice de alteración térmica (TAI)

Los análisis de TAI sobre las mismas muestras mencionadas anteriormente son coherentes con los resultados de Ro%. En efecto, para el pozo Pepe Núñez E-1b (Tabla 21) los colores de fluorescencia bajo luz UV van de amarillo a naranja, y los valores de TAI se encuentran entre 2,5 a 3,0, correspondiendo a una reflectancia de vitrinita equivalente (Roe%) de entre 0,5 y 1,0.

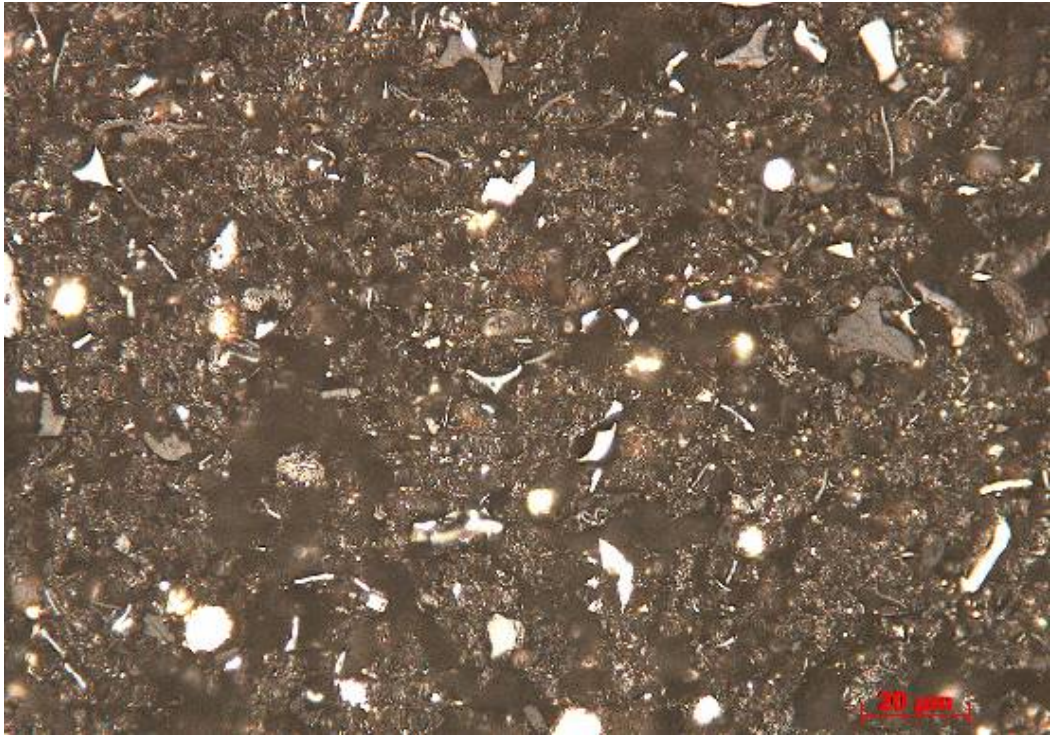
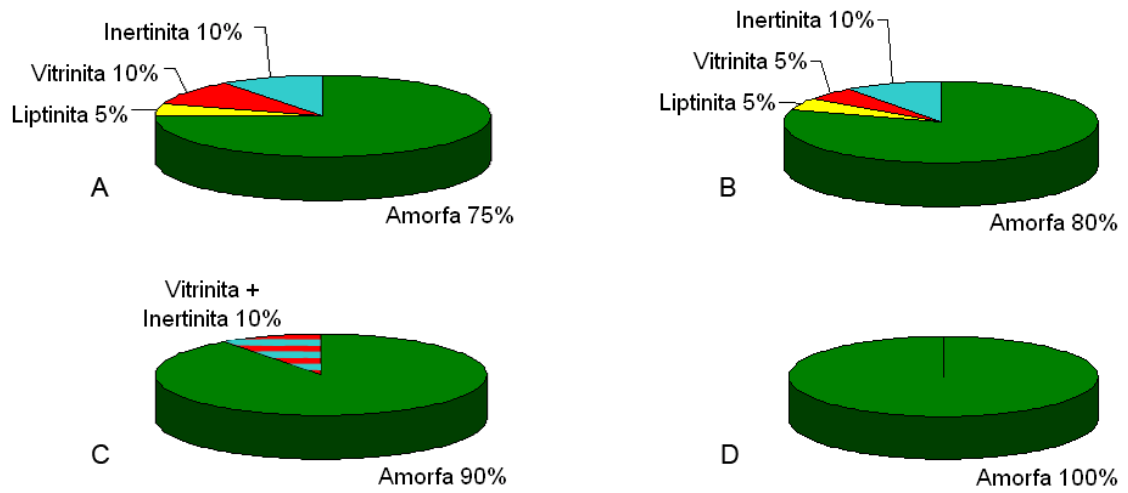


Figura 114. Lámina del pozo Pepe Núñez E-1b (profundidad: 432 m) mostrando abundante bitumen de color negro. Fotomicrografía gentileza de Shell.

CAÑADA DEL CHARRÚA E-2



PEPE NÚÑEZ E-1b

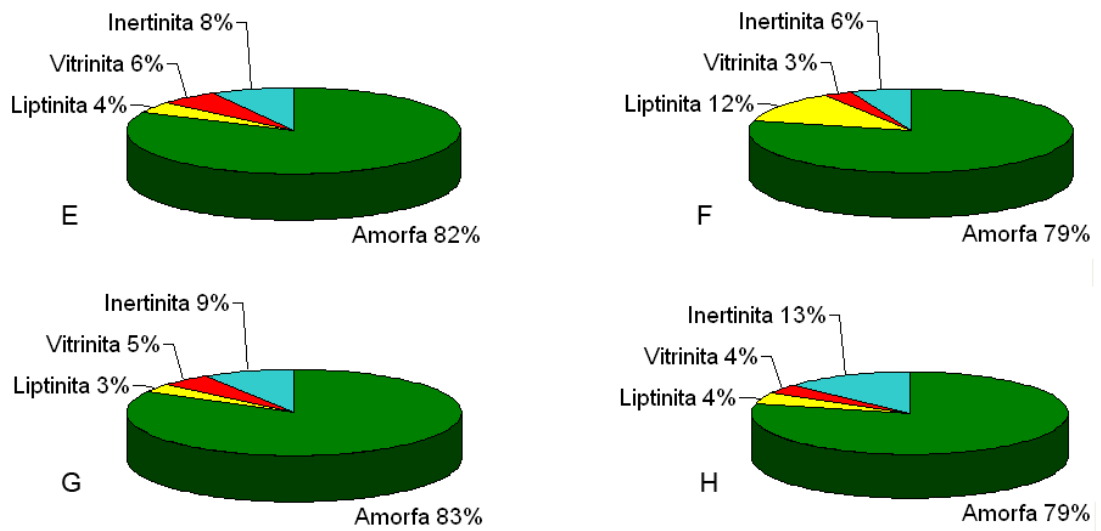


Figura 115. Composición del kerógeno en muestras de los pozos Cañada del Charrúa E-2 (A-D) y Pepe Núñez E-1b (E-H). A, 479 m. B, 484 m. C, 489 m. D, 493 m. E, 423 m. F, 424 m. G, 429 m. H, 430 m. Basado en datos de Geolab Sur y Shell.

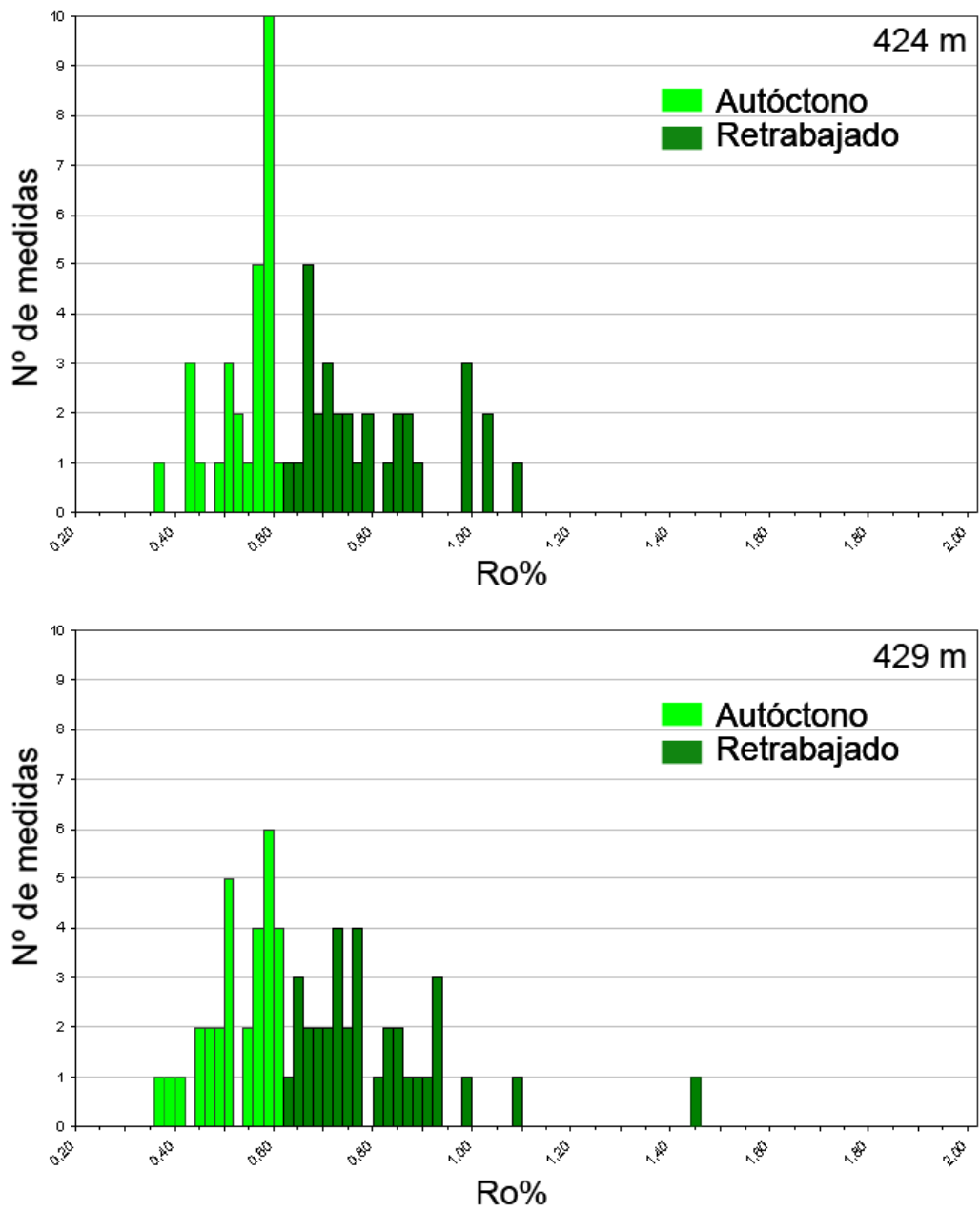


Figura 116. Histogramas de reflectancia de vitrinita en dos muestras del pozo Pepe Núñez E-1b (profundidades: 424 y 429 m). Basado en datos de Shell.

Tabla 18. Estadísticos básicos de las medidas de reflectancia de vitrinita (Ro%), exclusivamente sobre vitrinita representativa, para cuatro muestras del pozo Pepe Núñez E-1b. Basado en datos de Shell.

Muestra (m)	Valores de Ro%		
	Min	Max	Media
423	0,48	0,57	0,52
424	0,43	0,60	0,53
429	0,48	0,59	0,55
432	0,50	0,59	0,54

Tabla 19. Estadísticos básicos de las medidas de reflectancia de vitrinita (Ro%), exclusivamente sobre vitrinita representativa, para cuatro muestras del pozo Cañada del Charúa E-2. Basado en datos de Geolab Sur.

Muestra (m)	Valores de Ro%		
	Min	Max	Media
479	0,42	0,57	0,49
484	0,40	0,62	0,52
489	0,46	0,73	0,63
493	0,69	0,99	0,85

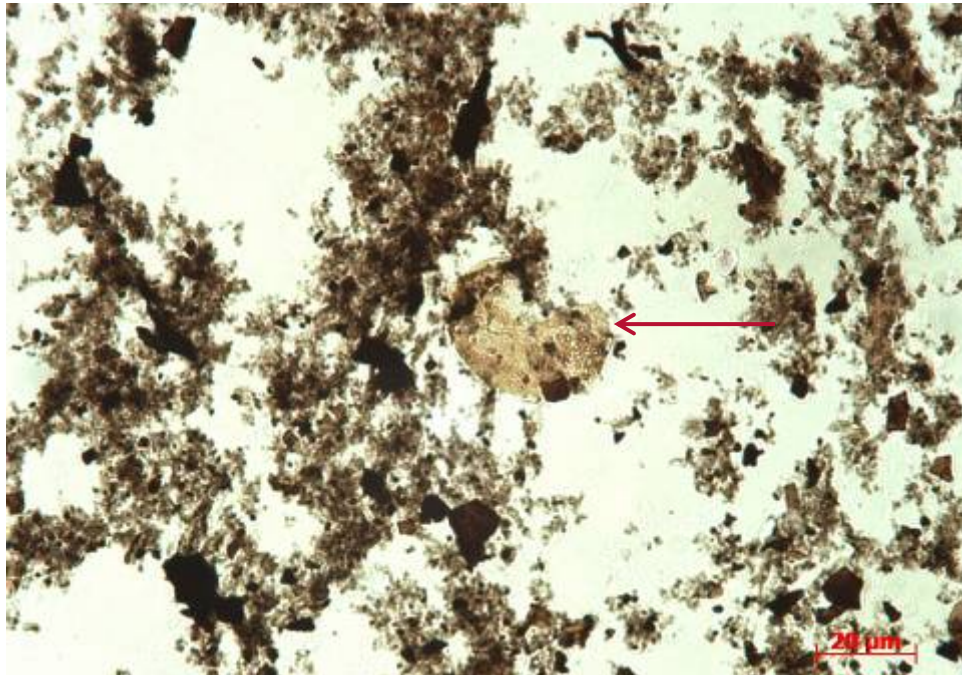
Tabla 20. Estadísticos básicos de las medidas de reflectancia de vitrinita (Ro%), exclusivamente sobre vitrinita retrabajada, para cuatro muestras del pozo Pepe Núñez E-1b. Basado en datos de Shell.

Muestra (m)	Valores de Ro%		
	Min	Max	Media
479	0,59	0,88	0,72
484	0,61	0,92	0,75
489	0,61	0,87	0,73
493	0,61	0,91	0,72

Tabla 21. Estadísticos básicos de las medidas de reflectancia de vitrinita (Ro%), exclusivamente sobre vitrinita representativa, para cuatro muestras del pozo Pepe Núñez E-1b, y correlación con color de fluorescencia UV, índice de alteración térmica (TAI) y reflectancia de vitrinita equivalente (Roe%). Basado en datos de Shell.

Muestra (m)	Fluorescencia UV		TAI (Roe%)	
	Min	Max	Min	Max
423	Amarillo	Amarillo/naranja	2,5 (0,5)	2,8 (0,8)
424	Amarillo	Amarillo/naranja	2,5 (0,5)	2,8 (0,8)
429	Naranja	Naranja	2,5 (0,5)	3,0 (1,0)
432	Naranja	Naranja	2,6 (0,5)	3,0 (1,0)

A



B

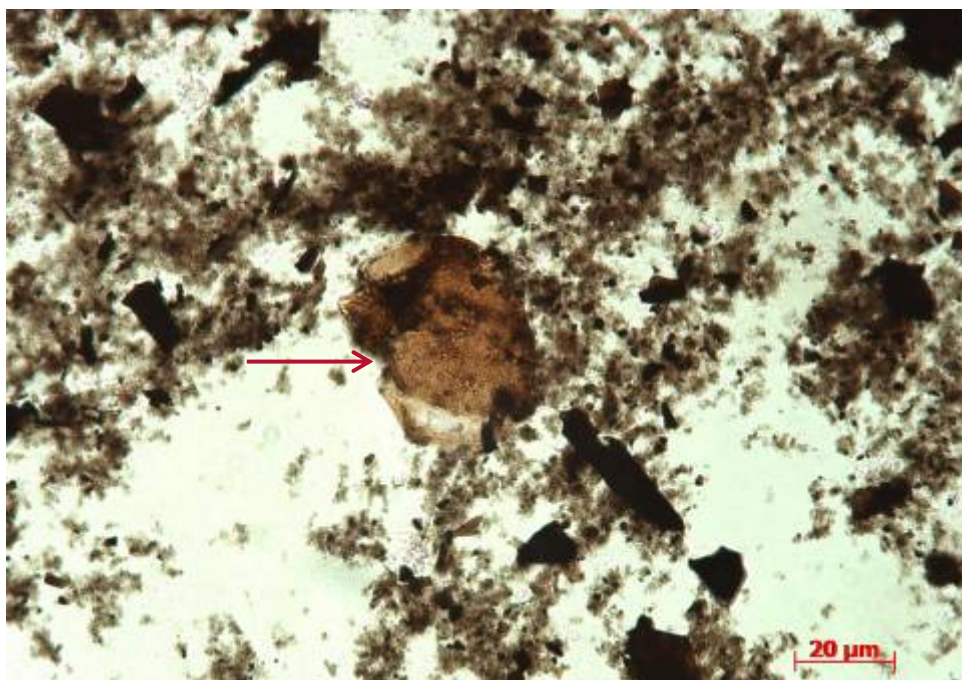


Figura 117. Fluorescencia bajo luz UV en el pozo Pepe Núñez E-1b (profundidad: 429 m). **A**, polinomorfo amarillo amarillado, probablemente autóctono, con TAI = 2,5 y Roe% = 0,5. **B**, polinomorfo naranja oscuro a marrón claro, probablemente alóctono, con TAI = 2,8-3,0 y Roe% = 0,8-1,0. Imágenes gentileza de Shell.

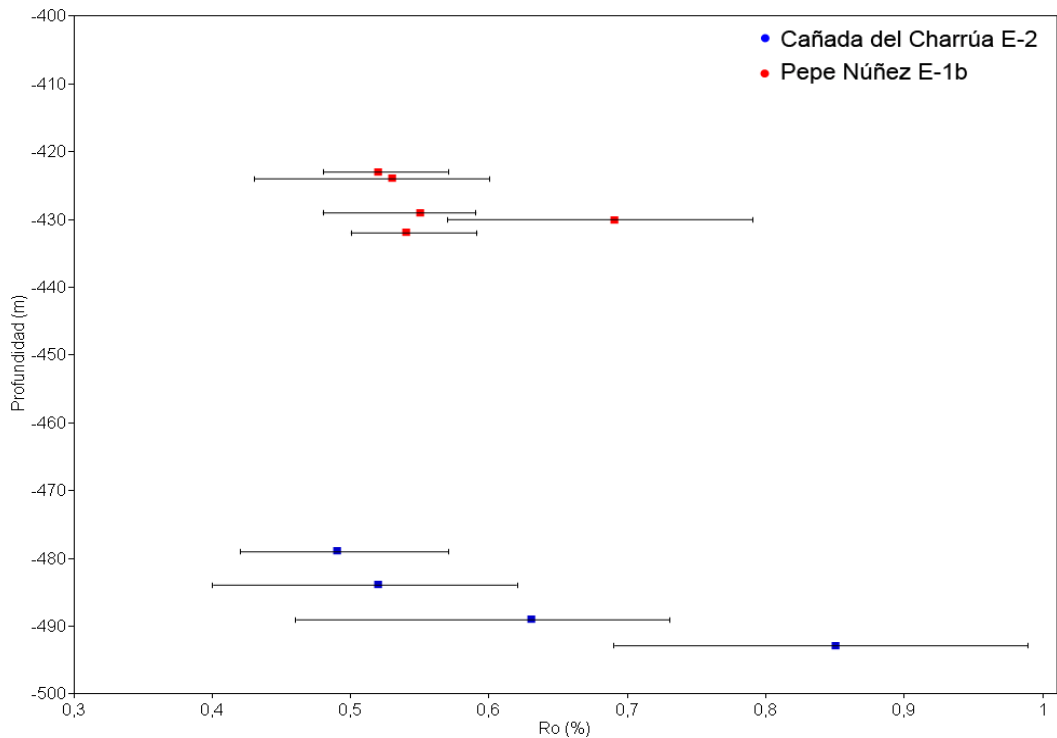


Figura 118. Variación de Ro (%s, sólo vitrinita autóctona) con la profundidad, para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Nótese el aumento de madurez en este último. Se indica el rango de Ro y la media. Basado en datos de Geolab Sur y Shell.

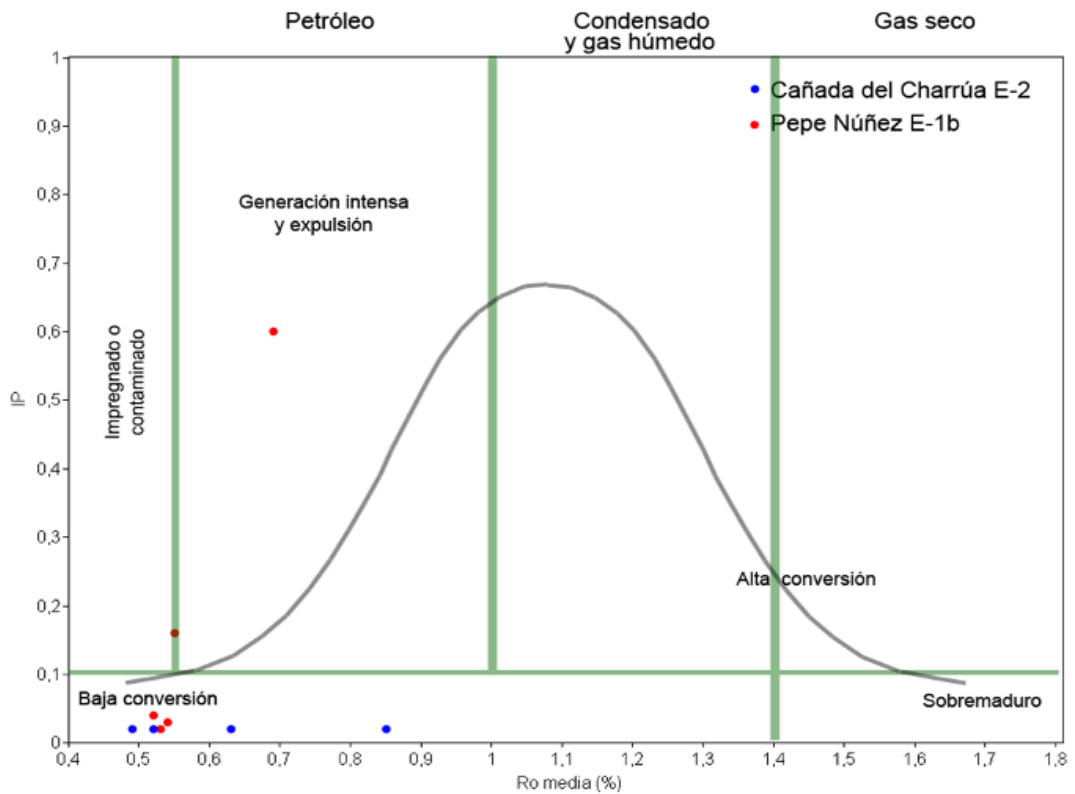


Figura 119. Gráfico de IP vs Ro media (%s, sólo vitrinita autóctona) para los pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-2. Basado en datos de Geolab Sur y Shell.

9. BACTERIAS BUTANOTRÓFICAS

Los resultados del análisis microbiológico en Pepe Núñez fueron alentadores, obteniéndose altas concentraciones de bacterias butanotróficas, de hasta 970.000 UFC/g (unidades formadoras de colonias por gramo de muestra), siendo la mediana 160.000 UFC/g.

En la Fig. 120A se muestra el histograma de concentraciones de bacterias para Pepe Núñez. Los valores más bajos de concentración de bacterias (es decir, la parte izquierda del histograma) corresponderían al *background* del área de estudio, mientras que los valores más altos (parte derecha del histograma) indican importantes anomalías. Resultan de interés los picos próximos a 400.000, 550.000 y 950.000 UFC/g, que en conjunto superan el 5% de las muestras analizadas. Esto sugeriría que existe butano en el suelo, dado que estas bacterias sólo proliferan en medios ricos en butano.

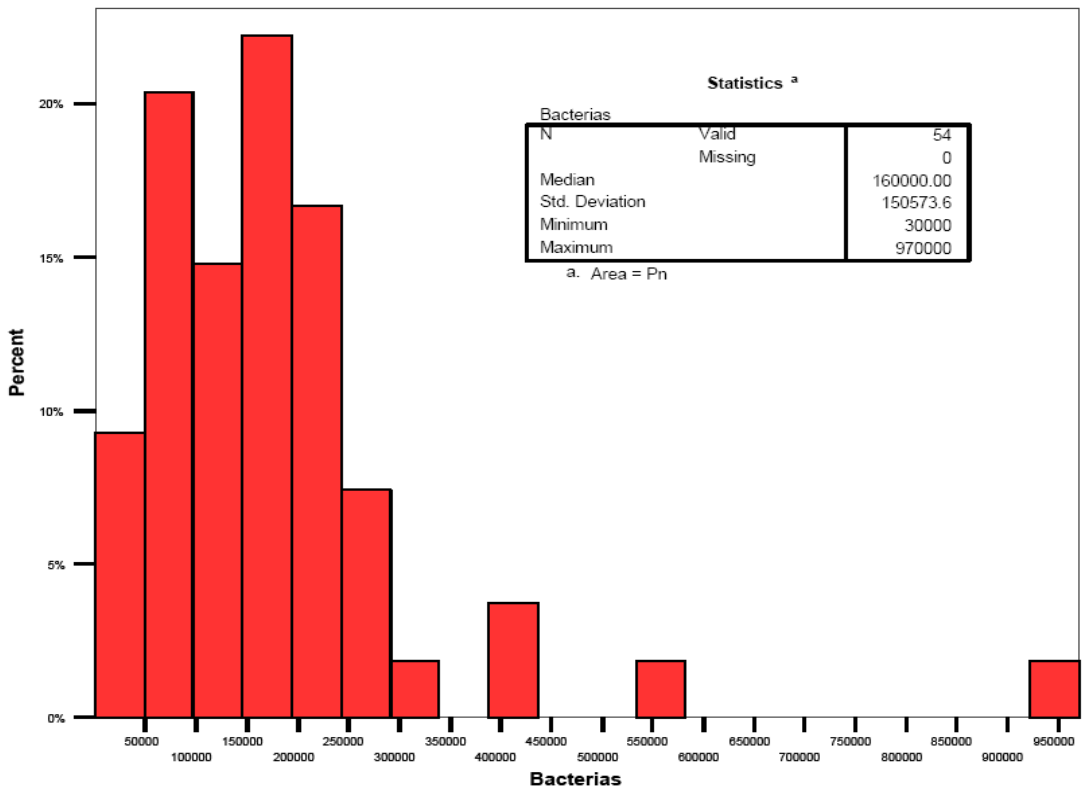
Visualizándolo en un mapa (Fig. 121), se observan en particular tres zonas del área de estudio con mayores concentraciones de bacterias: la primera al SO del área, al Norte del Arroyo Sopas; la segunda en el centro del área, al Norte del Arroyo Mataojo Chico; y la tercera al Norte del área, al Sur del Arroyo Mataojo Grande.

Si se comparan los resultados de Pepe Núñez con los de algunos campos de la Cuenca Neuquina (Fig. 120B), pese a la diferencia en las escalas se aprecia que los valores son sensiblemente inferiores a los de Pepe Núñez, incluyendo tanto el *background* como las anomalías. En efecto, sólo el 1% de las muestras analizadas supera 100.000 UFC/g, pero siendo los valores máximos de 200.000 UFC/g (sólo la quinta parte de lo registrado para Pepe Núñez).

Si bien *a priori* llama la atención esta disparidad de resultados entre un área no productora y una cuenca prolífica en hidrocarburos (con una excelente roca generadora probada como ser la Formación Vaca Muerta y otras de importancia secundaria), deben tomarse estos resultados con

cautela, ya que no necesariamente implican la existencia de acumulaciones comerciales de hidrocarburos en el subsuelo de Pepe Núñez, ni siquiera de acumulaciones no comerciales, dado que podrían corresponder simplemente a la presencia de microfugas de gases desde la roca generadora.

A



B

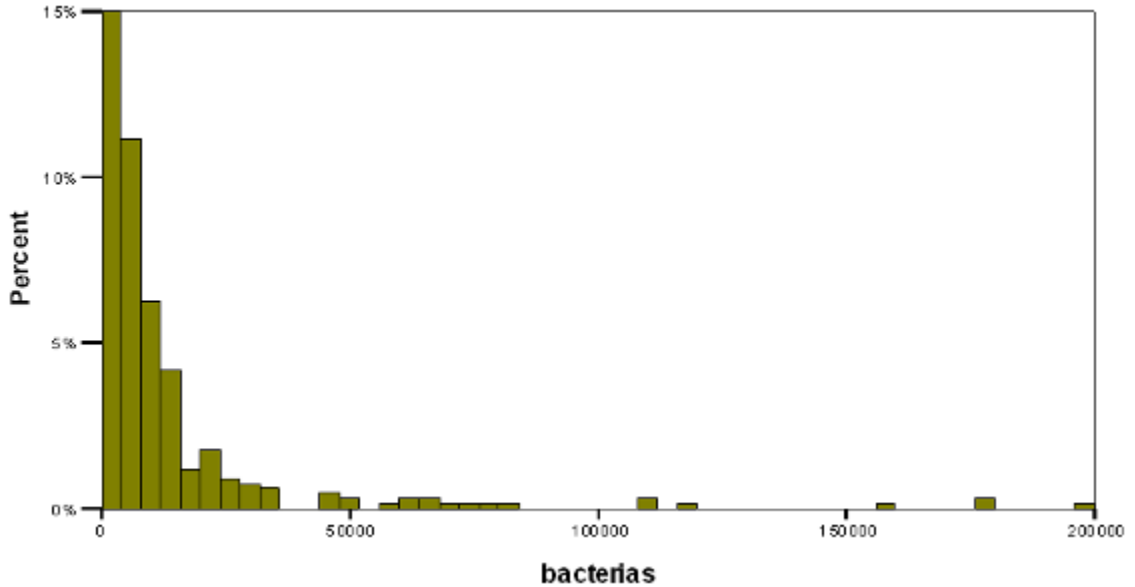


Figura 120. Histogramas de concentración de bacterias butanotróficas. **A**, Pepe Núñez. **B**, Cuenca Neuquina. Nótese que tanto la escala vertical (frecuencia relativa) como la escala horizontal (unidades formadoras de colonias/g) no son las mismas para ambas gráficas. La primera alcanza 23% en A y 15% en B, y la segunda alcanza 1.000.000 en A y 200.000 en B. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2011).

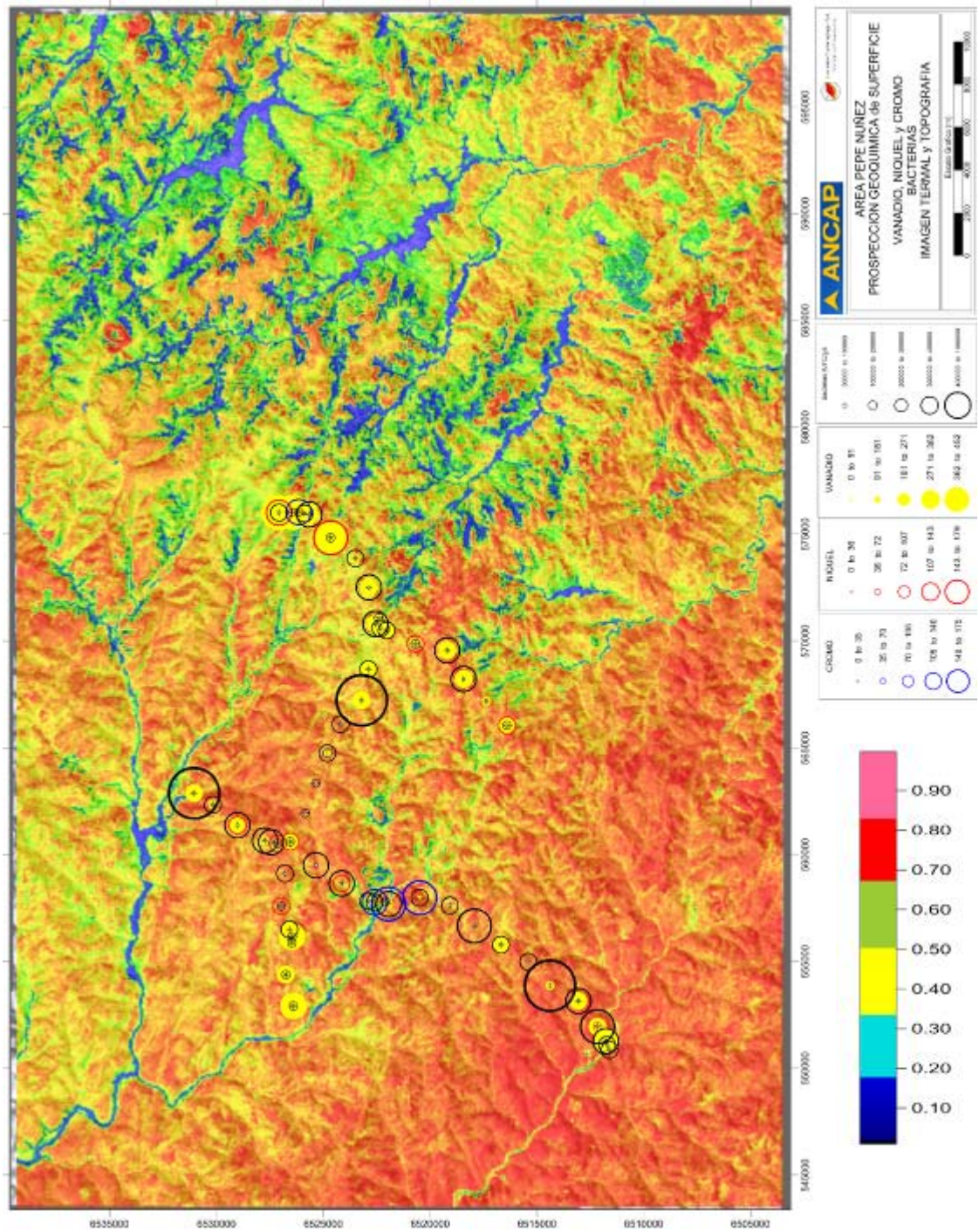


Figura 121. Relación entre concentración de bacterias butanotróficas y valores de Cr, Ni y V sobre imagen termal. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2011).

10. FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

Los resultados de FRX sobre 21 muestras incluyen el reconocimiento de dos zonas (Tabla 22 y Fig. 122) que indican ambiente reductor:

- la primera (422 a 425,5 m de profundidad) con picos de S, As y Mo; esto se asociado como se vio en la sección anterior a valores de COT superiores a 3% y valores de IH cercanos a 400 mg HC/g COT;

- la segunda (429 a 432 m de profundidad) con picos de S, As y Mo (aunque levemente menor), a los que se agrega el U (hasta 75 ppm), y un incremento en Ni, Cu y V (pudiendo indicar la presencia de uranovanadatos de Cu asociados a la materia orgánica); esto se corresponde con valores de COT de casi 16% (indicando mayor anoxia aún) y valores de IH menores, que apenas superan 200 mg HC/g COT.

Los elementos traza permiten inferir ambientes anóxicos a euxínicos. La relación S-COT (con valores de S menores a 1%) indicaría ambientes transicionales o no marinos (Fig. 123), lo que es coherente con los valores de Mo, que serían más propios de ambientes lacustres (Tabla 23).

La concentración de Co (cercana a 0,1%) y su correlación con el Fe podría estar asociado según Larriestra Geotecnologías (2012) a eventos del tipo impactos meteoríticos.

Globalmente, la concentración de elementos traza se asemeja a las de rocas generadoras mesozoicas del Sur de la Patagonia (e.g. Formación D-129 de la Cuenca Golfo de San Jorge y Formación Cañadón Asfalto de la cuenca homónima).

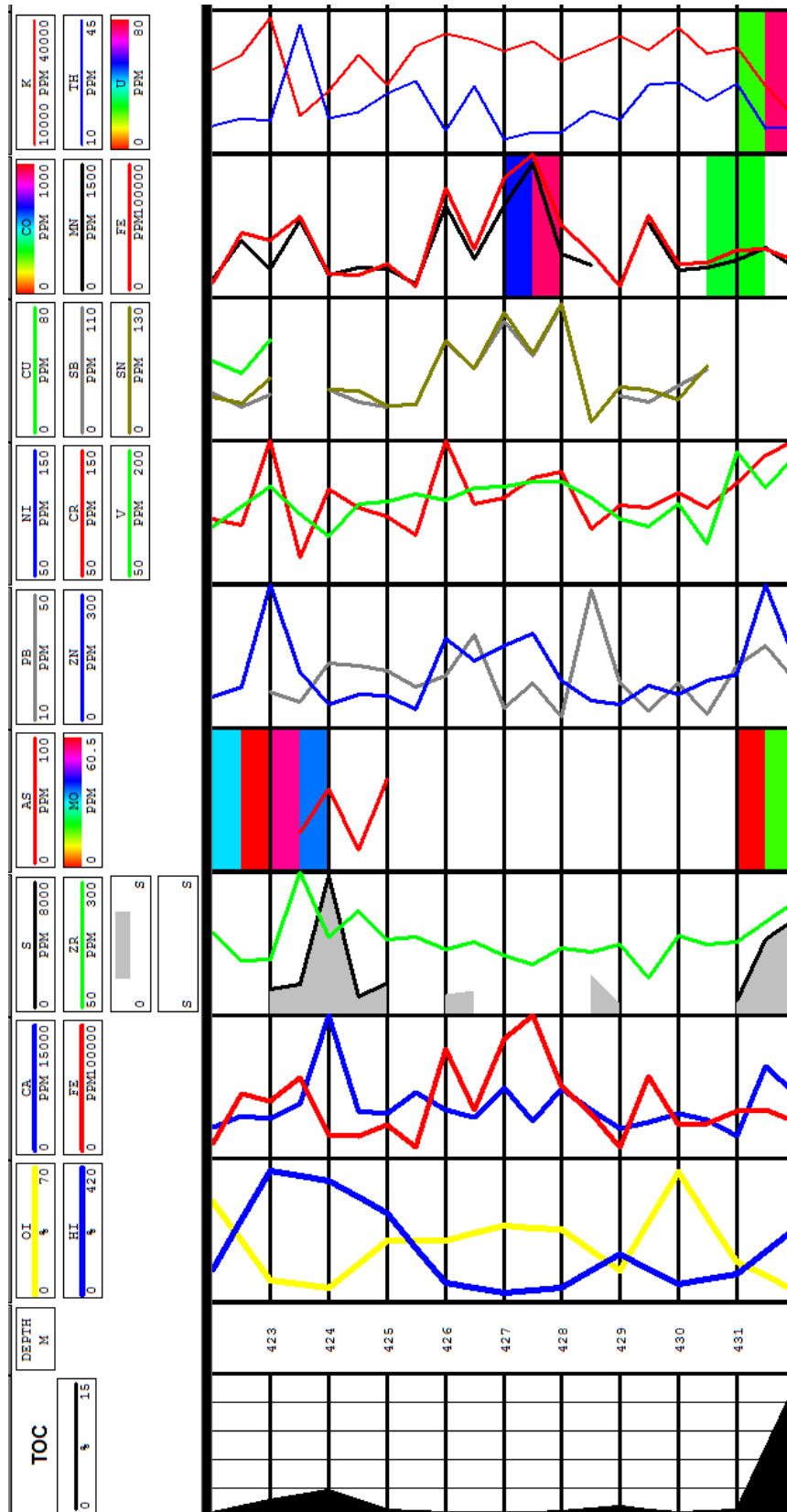


Figura 122. Datos geoquímicos de fluorescencia de rayos X sobre lutitas negras del pozo Pepe Núñez E-1b. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2012).

Tabla 22. Resultados de FRX sobre 21 muestras del pozo Pepe Núñez E-1b (2 análisis por muestra). Molibdeno a manganeso (por otros elementos, ver pág. 319). Tomado de Larriestra Geotecnologías (2012).

Prof.	Mo	Zr	Sr	U	Rb	Th	Pb	Se	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Mn
422	31,72	194,33	157,29	27,31	133,35	16,71	37,91				65,82	45,1		142,49	10891,45	200,22
422		189,5	132,07		117,79	14,42	15,39				54,17				15537,46	175,79
422.5		169,74	184,23		145,71	17,41	22,37			10,02	55,26				8708,76	100,65
422.5		147,78	180,83		132,33	18,7					88,54	38,23			45576,44	607,15
423	55,05	149,11	178,42		159,76	18,13	20,35				359,15	56,56		726,54	40789,11	306,55
423		174,46	208,15		179,43	19,46	14,94				72,63	66	75,38		14246,64	131,46
423.5		241,09	132,8		109,38	14,1	19,03				80,06			149,57	13621,72	145,71
423.5	36,07	317,26	138,21	24,25	120,24	41,63	17,45		27,19		119,64			562,42	56687,61	815,42
424		174,99	162,86		131,8	19,11	26,1		79,34		70,65	56,51	58,11		25000,07	287,37
424		188,2	171,11		126,44	18,7	28,16		57,93		52,04	50,46			16794,06	237,07
424.5		233,59	182,64		132,87	20,3	27,63		14,95		72,7				16417,73	315,14
424.5		233,47	167,89		122,87	16,42	14,83				73,21				14185,24	254,09
425		189,28	248,08		128,53	25,89	31,35		50,62		53,46		51,63		18556,92	237,2
425		183,78	290		131,97	24,73	26,12		64,73		69,67		64,25	214,27	23786,76	305,83
425.5		188,49	253,76		138,3	27,86	21,67				41,11				8691,89	143,6
425.5		196,57	221,05		122,56	20,55	20,7				25,75				6505,52	156,91
426		166,98	140,02		94,8	15,66	24,8				190,42			500,92	76669,86	975,94
426		227,53	209,12		93,31	26,49	35,25				75,19			404,55	12031,67	135,91
426.5		188,38	151,51		153,19	28,19	20,32				67,83	36,46			21139,46	240,76
426.5		179,65	114,38		159,24	26,53	36,21		91,86		141,72	76,05	77,7		34002,06	413,56
427		204,53	64,85		122,69	25,57	26,81				29,01				10083,66	151,73
427		156,49	55,39		99,92	13,56	15,8				173,03			665,4	83481,96	971,95
427.5		140,78	116,63		118,26	15,4	22,81				198,55			933,28	104129,9	1417,08
427.5		182,33	148,45		143,65	21,17	19,48				66,28	38,38		193,19	12003,22	186,37
428		182,8	147,86		132,69	24,75	15,38				43,47				13864,37	223,07
428		169,36	109,58		78,75	15,37	13,27				99,99	46,13		983,07	50505,15	465,41
428.5		161,4	187,43		179,69	20,43	48,87		29,64		57,5				31543,71	342,99
428.5		165,34	202,45		172,56	13,4	41,28		13,92		31,33		71,74		14442,26	183,43
429		174,72	130,82	16,39	139,64	18,27	22,59				51,12				7881,08	
429		165,35	124,42		133,06	13,54	16,81			11,35	60,07	45,36	63,84		18814,3	355,85
429.5		135,4	109,75		206	25,69	18,47				50,14	59,22			10772,39	
429.5		116,63	111,62		183,14	27,05	15,15			15,05	91,21	60,38			57950,76	788,16
430		129,67	218,24		107,08		18,55				241,4	50,87		883,58	131789,98	1800,49
430		191,16	275,39		166,96	27,58	22,72		15,15		73,05		61,59		24120,45	289,25
430.5		175,64	161,73		134,73	22,88	14,04				99,3	38,24		358,74	24895,24	318,86
430.5		166,4	127,76		158,96	24,82					128,04				28942,02	389,16
431		169,82	171,93		128,13	19,99	27,31				284,71	69,67		1477,83	141784,66	1596,72
431		178,36	161,77	24,43	186,53	27,23	27,42		15,84		114,5			341,82	33173,61	395,73
431.5		238,52	170,12	73,59	114,15	18,92	36,6		31,8		254,99	47,49	100,31		11414,97	135,86
431.5	18,25	214,04	172,45	74,99	107,88	16,32	33,02	10,82	38,3		316,54	74,27	146,82	351,77	34353,03	532,74
432		245,62	151,37		102,42	16,49	19,54	27,45			110,37	64,78	98,02	362,55	32613,32	268,38
432		247,87	150,39	19,18	92,1	16,51	23,58	31,98			147,02	119,13	136,37		26591,48	322,03

Tabla 22 (viene de pág. 317). Resultados de FRX sobre 21 muestras del pozo Pepe Núñez E-1b (2 análisis por muestra). Cromo a paladio. Tomado de Larriestra Geotecnologías (2012).

Prof. (m)	Cr	V	Ti	Sc	Ca	K	S	Ba	Cs	Te	Sb	Sn	Cd	Ag	Pd
422	95,9	110,82	3583,42	25,32	3311,41	27701,04	757,54	553,58	84,8	163,44	36,74	40,44	12,74		
422	92,16	134,35	3746,94		3015,89	21001,78		628,24	116,67	228,06	38,42	58,71			
422.5	98,71	122,95	3518,81		2574,15	36883,6		490,93	60,66	72,7	23,57	38,1			
422.5	91,6	131,96	2828,02		4486,26	30751,17		503,01	67,53	105,81	26,48	34,19			
423	151,56	151,82	4004,16		4183,22	38474,95	1502,58	665,97	104,76	133,07	35,46	56,85			
423	129,39	148,17	4135,21		3061,46	44090,58		548,4	71,03	98,96	24,53	41,35			
423.5	99,56	157,52	4815,07		4438,61	27894,74	986,65	466,78	82,75	121,34	27,28	39,65			
423.5	68,26	123,92	3410		5868,04	17972,38	1746,44								
424	134,91	134,62	5093,99		4322,37	29647,72	3757,28	598,01	104,55	170,18	48,88	56			
424	116,18	99,68	3914,04	50,03	15340,68	23115,1	7815,39	546,93	86,5	130,06	40,06	47,3			
424.5	103,52	134,02	5371,51		5050	30807,77	1104,74	550,93	88,57	133,41	29,68	45,66			
424.5	114,74	136,16	5365,27		5693,11	30426,74		541,94	89,47	119,99	27,34	54,24			
425	112,21	142,31	6766,94		4663,72	31418,18	1675,31	611	91,66	142,56	35,26	44,09			
425	97,09	137,26	5105,8		4729,69	24570,83	1831,09	453,42	61,72	91,87	26,38	32,67			
425.5	84,45	144,07	5893,24		6950,03	32683,27		455,38	53,68	52,85		33,93			
425.5	106,95	103,81	5878,26		6000,91	33000,12		462,57	67,24	86,13	17,96	24,23			
426	151,13	137,79	5698,38		5144,62	35056,73	1198,12	851,03	166,37	274,55	75,82	90,9	20		16,96
426	129,92	156,7	5773,27		3176,09	39594,25		870,66	144,91	198,85	56	72,62			
426.5	113,22	141,22	6107,14		5100,51	33145,09		577,44	79,51	144,63	37,89	54,28			
426.5	106,45	151	6145,55		4366,36	33825,94	1396,98	701,12	121,24	182,88	56,27	66,31			16,48
427	84,79	121,18	5118,13	38,7	8259,79	28973,53	699,6	615,08	100,88	163,09	41,04	56,43	16,56		
427	110,83	151,9	6493,45	61,9	7451,91	31564,7		978,14	206,64	363,81	92,61	116,6	25,89		
427.5	124,22	157,88	6597,33		4037,97	33533,56		768,02	131,73	264,92	66,01	79,53			
427.5	103,53	131,21	6143,55		3165,35	34294,51		390,63	48,86	71,98	23,95	25,7			
428	87,64	116,04	5610,01		4355,67	28726,15		512,35	75,56	127,61	32,03	33,87			
428	128,76	157,73	6867,63		7390,56	29383,67		984,91	195,55	353,9	105,11	124,69	22,77	10,62	
428.5	89,1	140,9	5468,67		5110,63	32082,88	2360,43	310,54	27,53			17,28			
428.5	87,09	131,62	4939,76		2860,39	27992,38		450,73	52,72			37,83			
429	104,88	119,07	4066,1		3198,27	34693,94	634,26	603,44	88,01	121,09	34,74	49,71			
429	109,47	113,31	3516,98		3544,7	27313,11	722,27	556	89,03	117,39	24,6	41,76			
429.5	125,01	119,3	3966,89		2331,08	44282,15		506,27	71,86	88,92	33,28	44,86			
429.5	103,45	110,7	2976,95		3859,63	31693,29		604,67	89,84	174,04	30,43	46,9			
430	114,18	143,92	4586,62		4478,47	32703,88		1003,8	183,98	269,43	71,38	95			
430	114,06	134,19	5638,74		4821,89	36482,16		642,78	88,05	157,78	42,32	37,78			
430.5	103,67	92,55	5166,14		4071,91	31062,06		699,16	110,05	159,46	54,88	68,81			
430.5	108,55	161,56	5301,4		4043,3	34566,98		462,69	64,78	62,17	19,06	31,26			
431	161,67	184,13	5033,21		4057,88	35311,49		364,75	48,08			26,63			
431	120,46	188,4	4772,82	24,89	2419,38	32274,51	844,19	163,52							
431.5	133,73	172,31	4930,93		3405,88	24534,11	1921,38	437,53	71,09	118,12	29,67	38,62			
431.5	139,59	150,99	4876,1		9690,46	24175,23	4272,07	563,72	104,61	147,06	35,29	45,62			
432	273,25	265,43	4724,71		9700,63	22224,92	5682,8	366,7	73,17	80,72	28,47	40,72			
432	204,47	184,25	3617,03	54,88	7000,18	17588,62	5408,66	268,04	46,87	92,45	23,61				

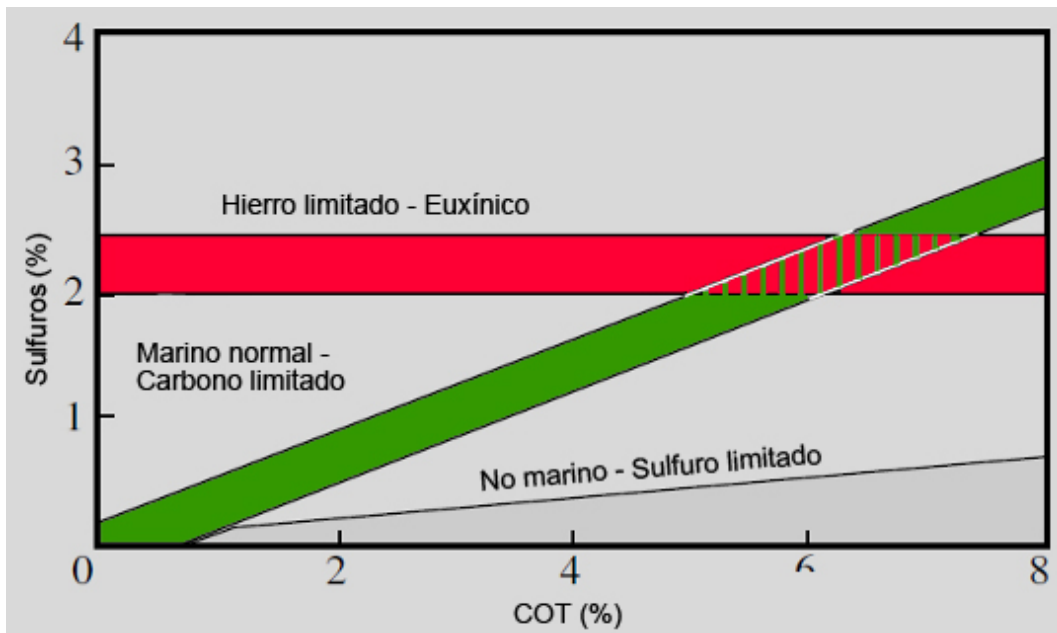


Figura 123. Relación sulfuros vs COT. Modificado de Larriestra Geotecnologías (2012).

Tabla 23. Valores tipo de Mo de acuerdo a patrones de USGS.

Fuente	Tipo de roca	Mo (ppm)
Cody Shale	Fangolita gris (marina)	1,37
Green River Shale	Lutita negra (lacustre)	35,1
Ohio Shale	Lutita negra (marina)	134
Océano Atlántico	Nódulo de Mn	448
Océano Pacífico	Nódulo de Mn	762

CAPÍTULO III

DISCUSIÓN

1. DISTRIBUCIÓN Y MAPAS DE ISÓPACAS DE UNIDADES DE LA CUENCA NORTE

Se creyó necesario actualizar los mapas de isópacas presentados por de Santa Ana (2004), también reproducidos en de Santa Ana y Veroslavsky (2004) y de Santa Ana *et al.* (2006a,b), para ello se incluyeron datos de 26 pozos (Fig. 124). Además de los 10 pozos exploratorios de ANCAP (Artigas, Belén, Gaspar, Guichón, Itacumbú, Pelado, Quebracho, Salsipuedes, Salto, Yacaré) y 9 pozos seleccionados del ex Instituto de Geología del Uruguay, actualmente DINAMIGE (Bañado de Rocha, Cerrillada, Cuchilla Zamora, La Paloma, Las Toscas, Paso del Borracho, Paso Ulleste, Rincón del Bonete, Yaguarí), se incluyeron datos de los 6 pozos de estudio realizados por ANCAP en el área de Pepe Núñez, así como de un pozo de estudio realizado por la empresa Schuepbach en el marco de un Contrato de Prospección de Hidrocarburos (Achar).

Otra innovación respecto a trabajos anteriores es que se grillaron por separado los pozos situados al Sur (8 pozos) y los ubicados al Norte (18 pozos) de la principal estructura NO-SE que compartimenta la Cuenca Norte (Fig. 124), combinándose luego ambas grillas.¹⁷ Dicha estructura pasa por las localidades de Belén, Arerunguá y Curtina, y controla claramente el curso del río Arapey Grande, el arroyo Arerunguá (afluente del anterior) con excepción de la cabecera, y parte de los arroyos del Sarandí (afluente del Arerunguá) y Malo¹⁸.

Esta estructura es figurada, con leves variantes de trazado y/o denominación, por diferentes autores (e.g. Preciozzi *et al.*, 1985; Bossi y Navarro, 1991; Bossi y Ferrando, 2001). En mapas gravimétricos aparenta ser continuación de la Zona de Cizalla de Sarandí del Yi-Piriápolis (Masquelin, 2006), y ha sido recientemente considerada el límite oriental del Cratón

¹⁷ Se trata de una primera aproximación, dado que deben incorporarse otras estructuras que compartimentan la Cuenca Norte para obtener un grillado más realista.

¹⁸ Podrían haber aprovechado esta estructura diques cretácicos de los alrededores de la localidad de La Paloma (Durazno).

del Río de la Plata (e.g. Oyhantçabal *et al.*, 2011). Este proceder se debe a que se trata de dos dominios claramente diferenciables: diferente basamento (Terreno Piedra Alta al Sur, Terreno Nico Pérez al Norte), diferente relación de efusivas: intrusivas básicas cretácicas (mucho mayor al Norte que al Sur), etc.

La importancia de esta estructura es confirmada por los mapas de isópacas, que muestran un comportamiento diferente para la mayoría de las unidades, tanto a nivel de cuenca (Fig. 125) como considerando las secuencias Permocarbonífera (Fig. 126) y Juro-Eocretácica (Fig. 127). Si se hace referencia a las unidades, la Formación San Gregorio parece ser la menos afectada, mientras que la Formación Arapey es claramente una de las más afectadas.

El grillado se realizó en el software The Kingdom Suite 8.5, empleando el algoritmo *Flex Gridding* y con ajuste residual. Las imágenes fueron posteriormente combinadas y editadas en Photoshop CS, eliminando del grillado las zonas donde sólo afloran unidades más antiguas que las que se tratan en cada caso. Los topes formacionales de los pozos exploratorios de ANCAP y el ex Instituto Geológico del Uruguay fueron tomados de de Santa Ana (2004), con algunas correcciones:

- el pozo Salsipuedes, ubicado al Sur del departamento de Tacuarembó, alcanzó el basamento a los 541 m, no a 583 m como figura en de Santa Ana (2004) y de Santa Ana *et al.* (2006b); pero además, recientemente se ha demostrado que los últimos 40 metros del pozo Salsipuedes corresponden a unidades devónicas (Daners *et al.*, 2013), lo que disminuye el espesor de la Formación San Gregorio drásticamente en ese pozo, de los 330 m que figuran en Santa Ana *et al.* (2004b) a 247 m, es decir, menor espesor que en los pozos Guichón y Paso Ulleste.

- debe admitirse que, dada la dificultad de reconocer discordancias en potentes secuencias *red beds* en virtud de la ausencia de palinomorfos, es probable que se esté sobreestimando el espesor de las formaciones Buena Vista y Tacuarembó. Por ejemplo, pese a los espesores sugeridos

para la Formación Tacuarembó en pozos del NO por de Santa Ana y Veroslavsky (2004), el espesor de dicha unidad es probable que no supere 250 m en la mayor parte de la cuenca.

- finalmente, es probable que el pozo Pelado en el departamento de Artigas no haya alcanzado el basamento sino una diabasa.

El análisis de los mapas aquí obtenidos muestra que, como ya era conocido, la Cuenca Norte (incluyendo las secuencias Devónica, Permocarbonífera, Juro-Eocretácica y Neocretácica) se profundiza hacia el NO (Fig. 125), superando los 2000 m de relleno, con los mayores espesores registrados en los pozos Yacaré y Belén. La cuenca se profundizaría hacia Brasil y Argentina, como lo sugieren líneas sísmicas y secciones magnetotélúricas, respectivamente. El área de Pepe Núñez aparece como un bajo, con menores espesores a los que aparecerían si no se incluyeran los pozos de estudio de ANCAP.

La Secuencia Permocarbonífera (Fig. 126) exhibe la misma tendencia general que la Cuenca Norte. La zona de los pozos Gaspar e Itacumbú aparece como un alto local, con espesores sensiblemente menores a los de los pozos vecinos. Por otro lado, la Secuencia Juro-Eocretácica (Fig. 126) se profundiza claramente hacia el NO.

Dentro de la **Secuencia Permocarbonífera**, la Formación San Gregorio tendría un control NE-SO (Fig. 128), y no E-O como proponen de Santa Ana *et al.* (2006a); además los pozos del área Pepe Núñez registran dicha unidad con espesores no despreciables (hasta 150 m), en una zona que según el mapa de isópacas de de Santa Ana *et al.* (2006a) no debería estar presente. Esta discrepancia se debe lógicamente a la inclusión de datos en una zona de la cuenca donde no existía información alguna. Tras efectuar las correcciones anteriormente mencionadas, el mayor espesor corresponde al pozo Guichón.

Las formaciones Cerro Pelado, Tres Islas y Fraile Muerto tendrían su mayor espesor en los pozos Artigas y Pelado (Fig. 129).

Las formaciones Mangrullo, Paso Aguiar y Yaguarí se restringen al NE de la Cuenca Norte (Fig. 130), como ya ilustraban otros autores, aunque esto podría cambiar a la vista de los resultados del pozo de estudio Cerro Padilla, situado al Este del departamento de Paysandú. Los pozos del área Pepe Núñez demostraron la ausencia de estas unidades para dicha zona de la cuenca.

La Formación Buena Vista tiene su mayor espesor en los pozos Artigas y Yacaré, donde supera los 800 m (Fig. 131).

Dentro de la **Secuencia Juro-Eocretácica** (Fig. 126), la Formación Tacuarembó tiene su mayor espesor en los pozos Pelado y Belén, aunque probablemente esté sobrestimado. La Formación Arapey tiene su mayor espesor en el pozo Salto (casi 1000 m), contrastando marcadamente con el espesor registrado en el cercano pozo Belén; no obstante la diferente relación efusivas:intrusivas ya mencionada, el espesor de rocas ígneas cretácicas se mantiene aproximadamente constante de un lado y otro de la falla. Finalmente, debe recordarse que en pozos como Gaspar e Itacumbú se desarrollan las unidades homónimas, las más antiguas de la Secuencia Juro-Eocretácica (de Santa Ana, 2004; de Santa Ana y Veroslavsky, 2004), que aquí no se han grillado dada la escasez de datos.

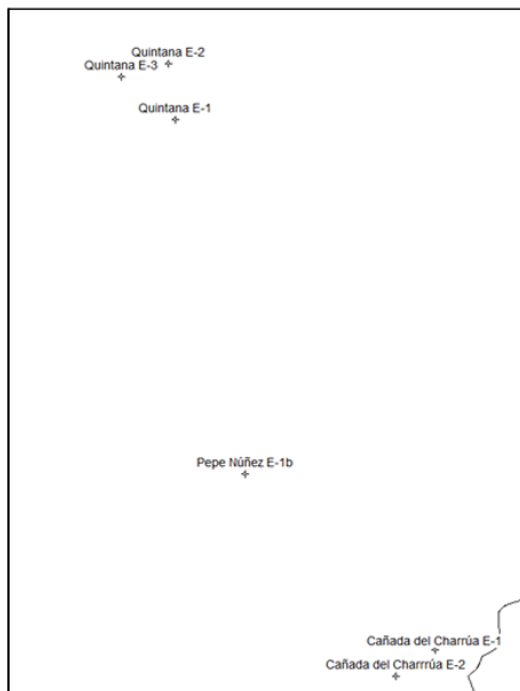


Figura 124. Perforaciones empleadas para realizar los mapas de las Figs. 215 a 223. Los pozos en mayúscula corresponden a los 10 pozos exploratorios de ANCAP. Los pozos de estudio de ANCAP en el recuadro rojo se muestran ampliados debajo. Se indica la falla Belén-Curtina (según el trazado de Bossi y Ferrando, 2001).

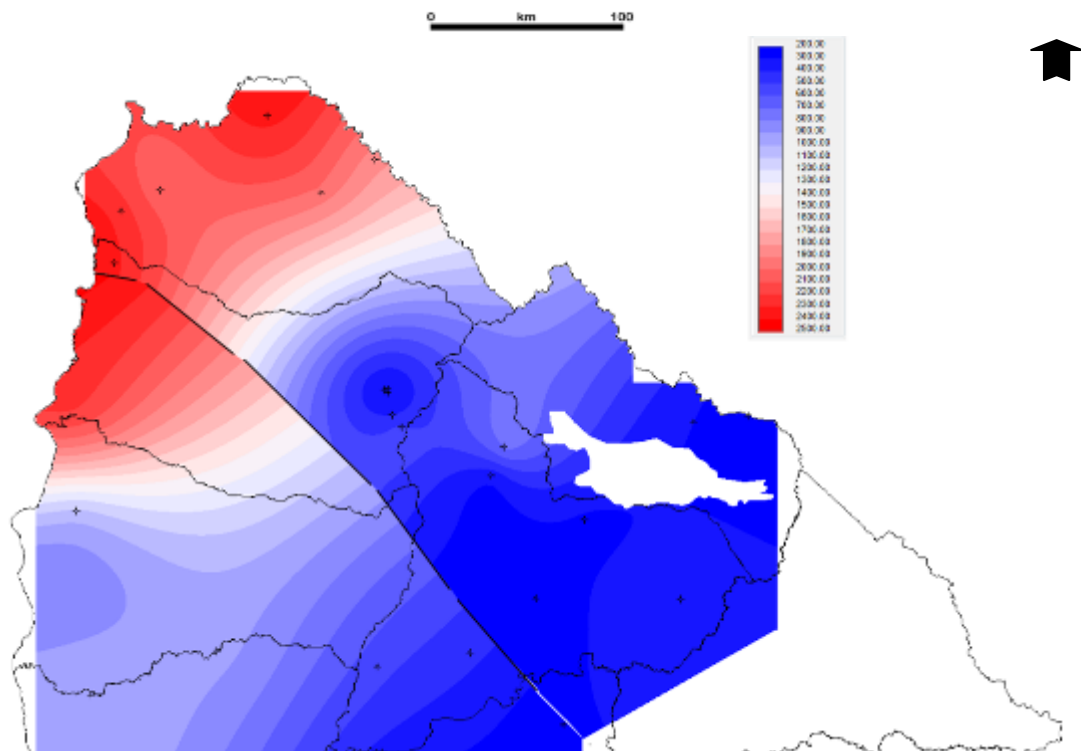


Figura 125. Mapa de isópacas de la Cuenca Norte. Profundidad en m.

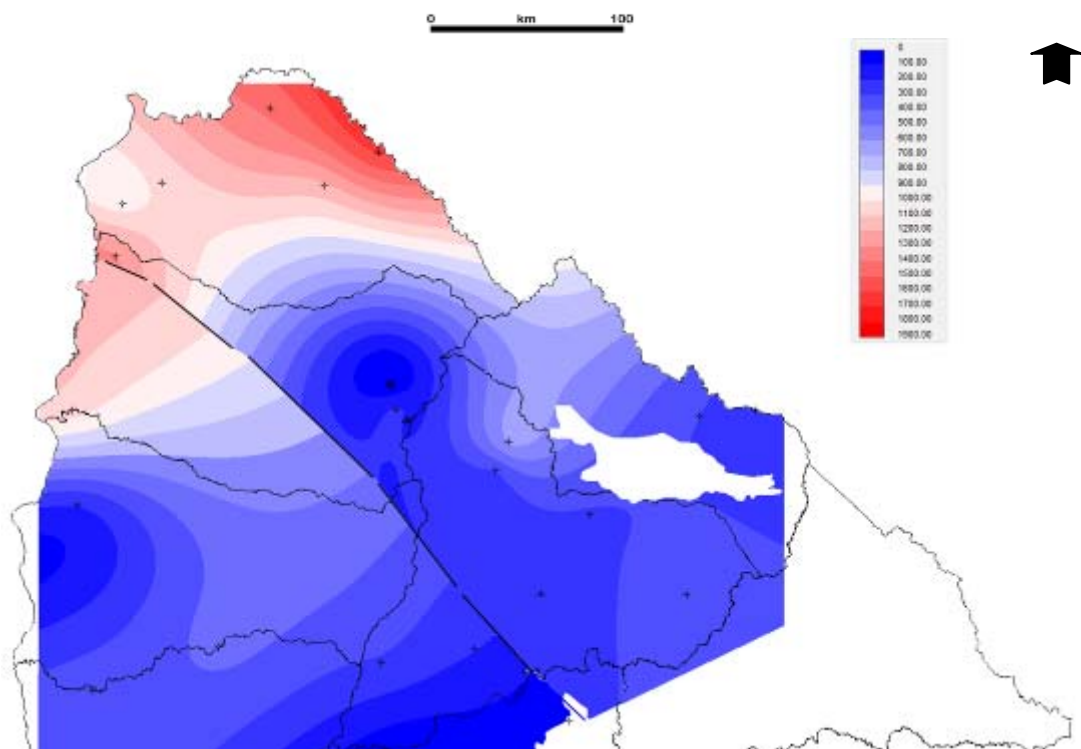


Figura 126. Mapa de isópacas de la Secuencia Permocarbonífera. Profundidad en m.

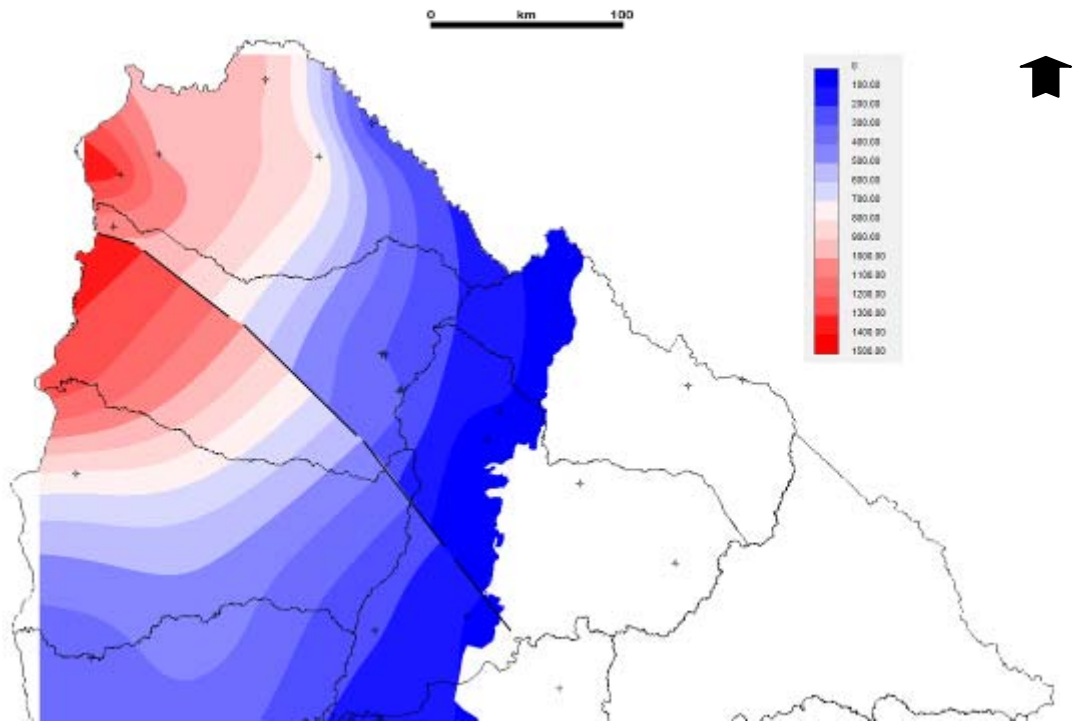


Figura 127. Mapa de isópacas de la Secuencia Juro-Eocretácica. Profundidad en m.

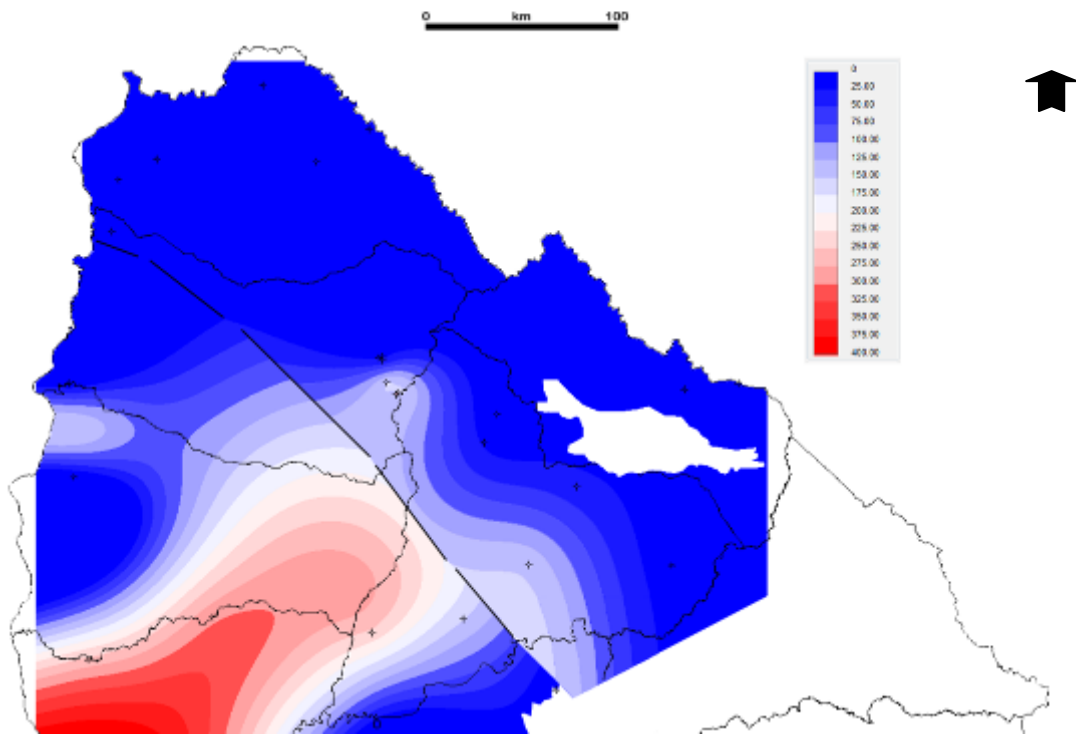


Figura 128. Mapa de isópacas de la Fm. San Gregorio. Profundidad en m.

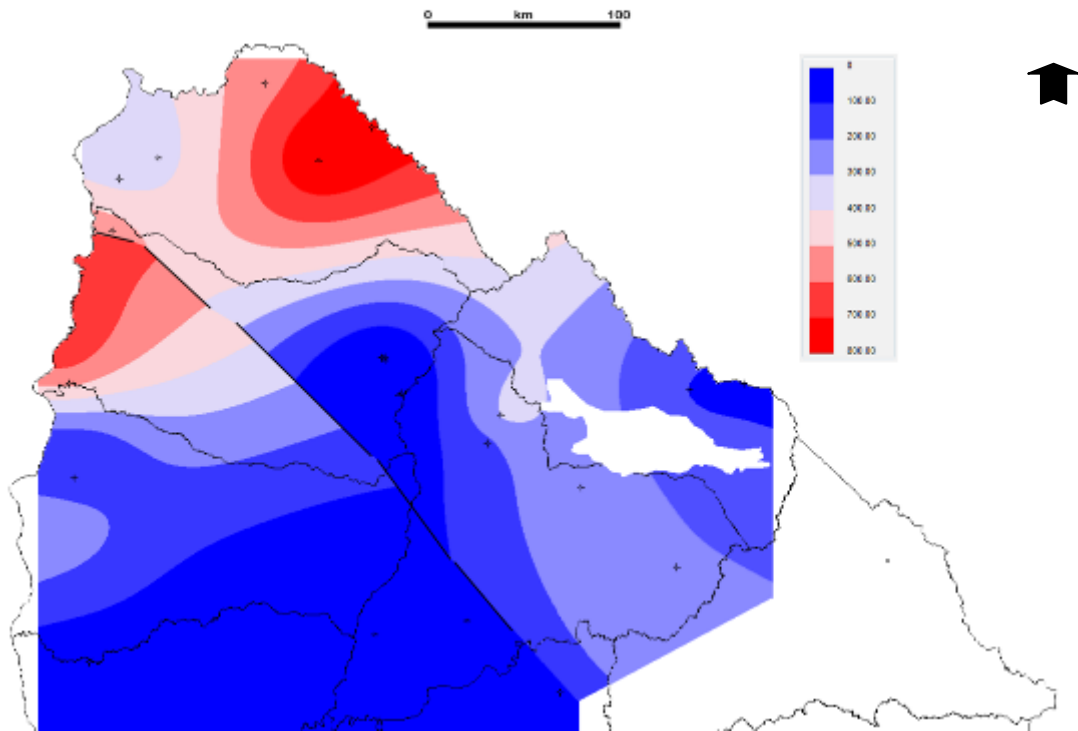


Figura 129. Mapa de isópacas de las Fms. Cerro Pelado, Tres Islas y Fraile Muerto. Profundidad en m.



Figura 130. Mapa de isópacas de las Fms. Mangrullo, Paso Aguiar y Yaguarí. Profundidad en m.

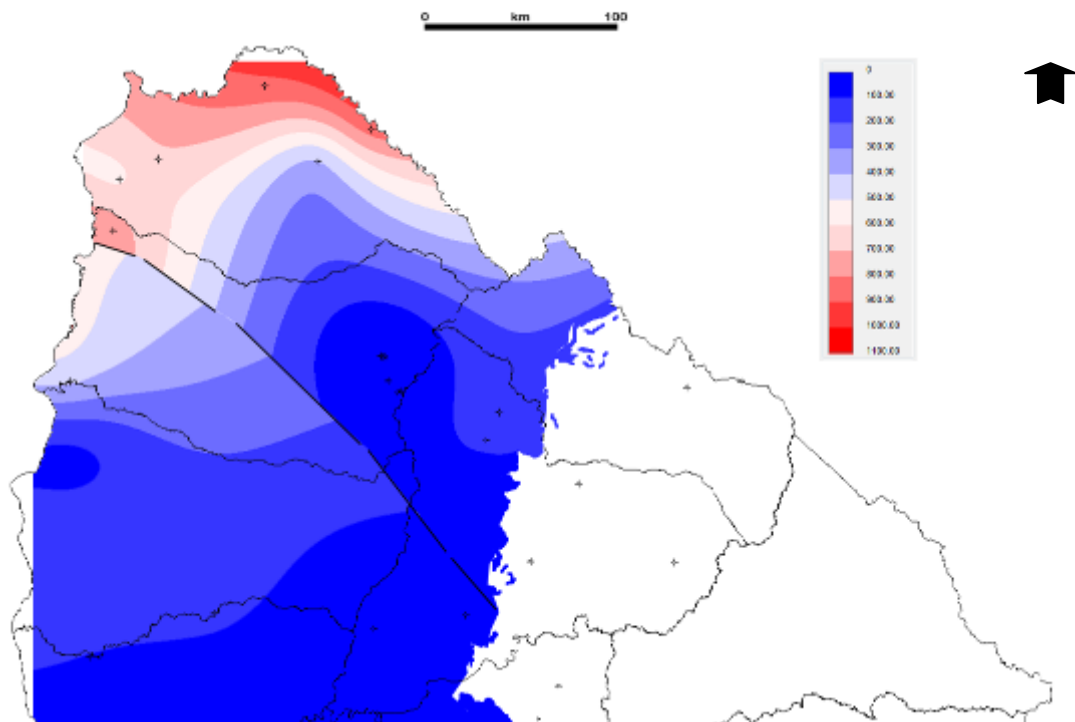


Figura 131. Mapa de isópacas de la Fm. Buena Vista. Profundidad en m.

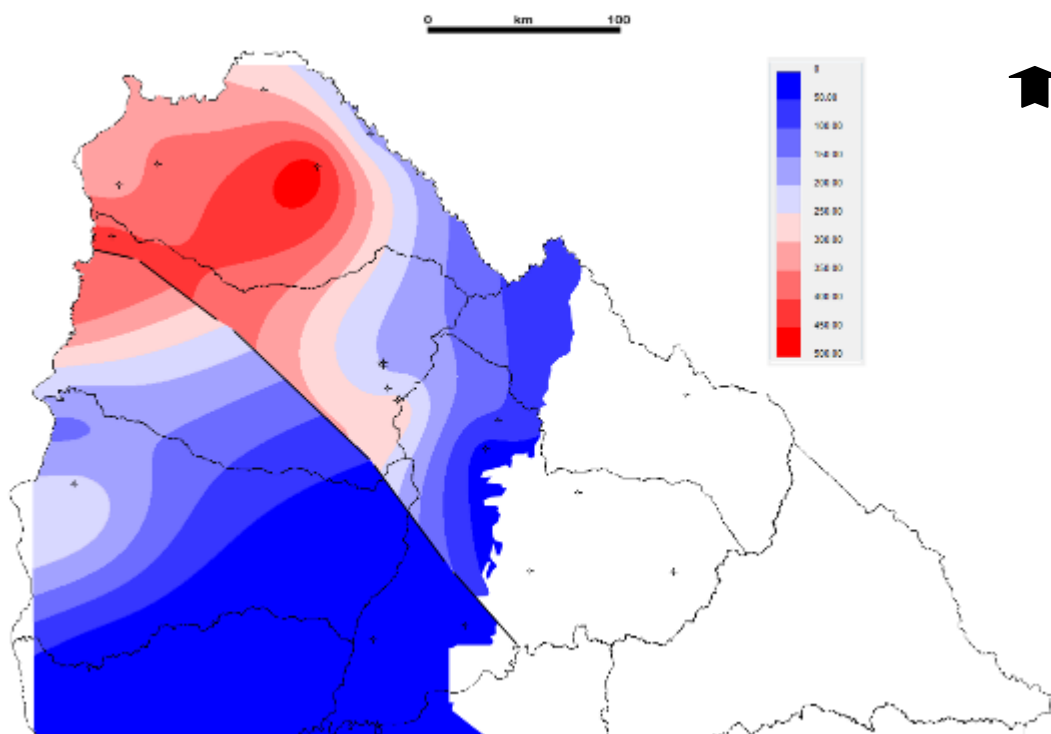


Figura 132. Mapa de isópacas de la Fm. Tacuarembó. Profundidad en m.

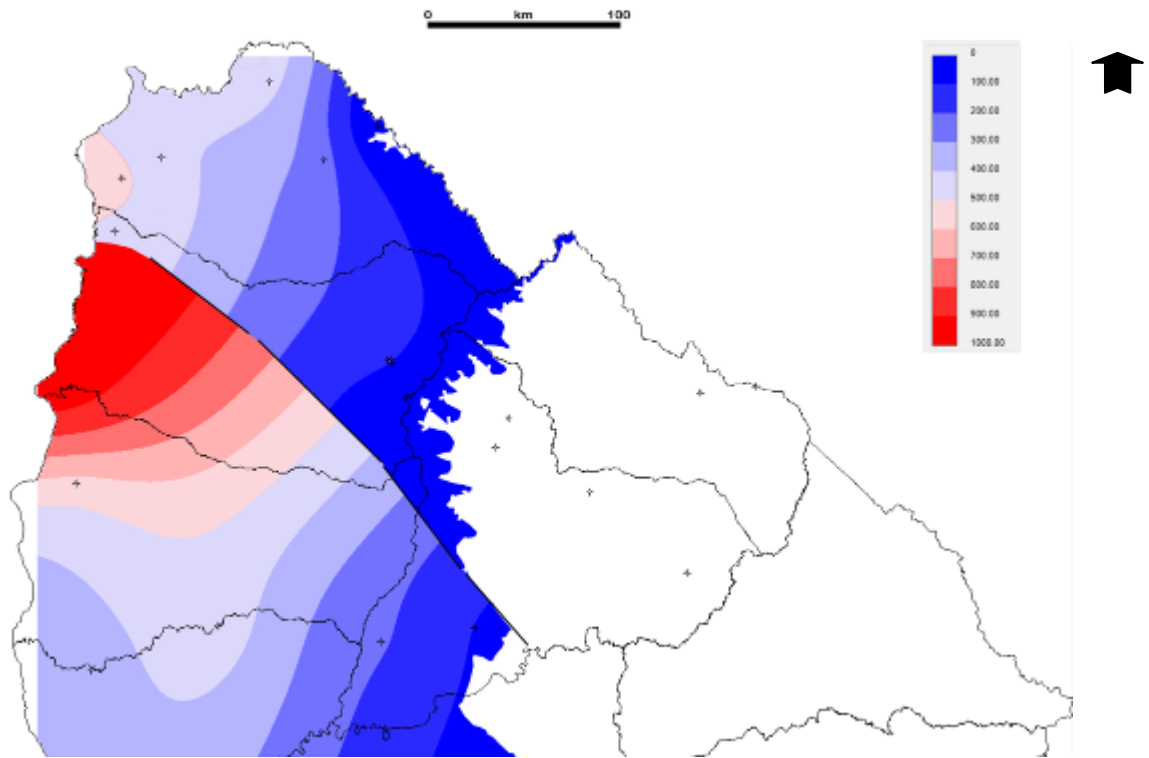


Figura 133. Mapa de isópacas de la Fm. Arapey. Profundidad en m.

2. INTERACCIÓN MAGMA-SEDIMENTO

Numerosos autores se han ocupado, directa o indirectamente, de fenómenos de interacción magma-sedimento, particularmente en Namibia y Brasil (véase correlación con unidades uruguayas en Fig. 134), por ejemplo:

- en Uruguay (Fig. 135), entre las areniscas de la Formación Tacuarembó y los basaltos de la Formación Arapey (e.g. Bossi *et al.*, 1969).

- en Namibia (Figs. 136-137), entre las areniscas de la Formación Twyfelfontein y los basaltos de la Formación Awahab, ambas parte del Grupo Etendeka (e.g. Jerram *et al.*, 1999, 2000; Jerram y Stollhofen, 2002; Figs. 226 a 228)

- en Brasil (Figs. 138-140), entre las areniscas de la Formación Botucatu y los basaltos de la Formación Serra Geral (e.g. Almeida, 1953; Soares, 1975; Scherer, 2002; Waichel *et al.*, 2006, 2007; Petry *et al.*, 2007; Holz *et al.*, 2008; Figs. 230 a 232).

Se comentarán los resultados de algunos de estos trabajos de Brasil y Namibia.

- Jerram y Stollhofen (2002), en un estudio del Grupo Etendeka en el NO de Namibia, describieron diferentes tipos y geometrías de sedimentos intercalados con basaltos, ejemplificando la interacción entre un sistema eólico activo y un sistema basáltico: multidunas, dunas aisladas, sedimentos rellenando topografía de la lava, superficies de *bypass*, fracturas y fisuras rellenas de sedimento, y brechas tipo peperitas (Fig. 137). Estas últimas pueden ocurrir en el contacto lava-sedimento, en el contacto entre coladas, o dentro de una misma colada. La interacción de la arenisca con la lava puede darse cuando ésta se ha enfriado o cuando está aún caliente (lo que se refleja en diferencias a nivel de lámina delgada). En el segundo caso, Jerram y Stollhofen (2002) identifican una zonación entre la duna y la lava, que abarca de base a tope una zona de arenisca decolorada y moteada con estratificación aún aparente, una zona de areniscas

silicificadas con escasos clastos de basalto, y una zona de intensa interacción lava-arena, con numerosos clastos de basalto.

Esos niveles de brechas son, en la mayoría de los casos, delgados (<2 m), y se formarían al derramarse lava sobre una duna, o al caer arena de una duna sobre lava fluyendo. No obstante, existen niveles de potencia decamétrica y mayor complejidad (e.g. coexistencia de contactos “en frío” y “en caliente”), que Jerram y Stollhofen (2002) interpretan como resultado del colapso de una duna debido al movimiento de *bulldozer* de una lava de tipo *aa* (Fig. 141B).

En el caso de que el contacto lava-sedimento es neto (no se forman brechas), se preservan en la arenisca texturas cordadas (Fig. 136A-B), que evidencian que el estilo de erupción de muchos de los basaltos era del tipo *pahoehoe*; y rasgos como estrías (lineares, subparalelas, de relieve centimétrico; indican la dirección del flujo) y *ripples* (Fig. 136C-D), moldes de fragmentos basálticos (desprendidos de la colada suprayacente) y estructuras de carga.

► Petry *et al.* (2007) comentan sobre la formación de peperitas en ambientes áridos, sin presencia de agua (usualmente considerada un factor importante en la formación de peperitas). El estudio se ocupa de una secuencia de coladas de lava y areniscas de *intertrap*, describiendo la formación de diques clásticos, estrías de flujo de colada (Fig. 138B), peperitas y brechas similares a peperitas. Los autores sugieren 4 procesos para la génesis de estas “peperitas secas”: fragmentación de frente y base de colada; inyección de arenisca; colapso de dunas; y cascada de magma pendiente abajo (Fig. 141C-F).

► Machado *et al.* (2009) reportan para la Formación Serra Geral, en los estados de Mato Grosso y Mato Grosso do Sul, la presencia de:

- rocas (denominadas peperitas por los autores) constituidas por clastos angulosos de basalto en matriz de arenisca silicificada (Fig. 139A); existen vesículas (de tamaño máximo 10 cm) tanto en el basalto como en la arenisca, ocupando en esta última los planos de estratificación.

- diques clásticos de entre 1 y 50 cm de largo, con ángulo variable entre 45° y 90°; se encuentran fallados por tectonismo post-basáltico.

- areniscas recristalizadas y plegadas en el paleocontacto con el basalto;

- ▶ Fernandes *et al.* (2010), en un estudio sobre los basaltos de la Formación Serra Geral en el estado de São Paulo, reportan areniscas de *intertrap*, diques clásticos y brechas con clastos de basalto vacuolar en matriz de arenisca rojiza, que denominan pseudopeperitas. Éstas no deben ser confundidas con las brechas hidráulicas que los mismos autores describen, que contienen fragmentos angulares de basalto vacuolar en una matriz blanquecina dominada por ceolita (Fig. 139B).

- ▶ Holz *et al.* (2008) reportaron en el borde SO de la Cuenca Paraná (estado de Mato Grosso do Sul) la preservación por derrames de lavas de una duna tipo barján de 10 metros de potencia. Los autores describen la presencia de diferentes rasgos (Fig. 140), cuya preservación demuestra nuevamente que el paleoerg estaba activo al momento de la efusión de las lavas (esto es, no existiría una discontinuidad entre las formaciones Botucatu y Serra Geral):

- *ripples*: su preservación indica baja viscosidad y poder erosivo de la lava;

- estrías: estructuras lineares, subparalelas, estrechamente espaciadas (<1 cm) y de relieve mm; indicarían la dirección (no sentido) del flujo de la lava;

- marcas en chevrón: no reportadas anteriormente, son crestas y surcos de 20-25 cm de largo (que forman entre sí ángulos de 60°C), y se habrían formado debido al enfriamiento diferencial de delgadas y largas lenguas de lava que descendían por la cara de avalancha de la duna;

- fracturas y tubos: huecos o rellenos por arena, producto del movimiento diferencial de lava parcialmente consolidada sobre arena no consolidada.

- marcas semilunares: de 40 a 60 cm de ancho, con la convexidad apuntando en el sentido del flujo de la lava; son producto de la deformación del sustrato arenoso ante el avance de lóbulos de lava de tipo *pa-hoehoe*);

Holz *et al.* (2008) no hallaron evidencias de peperitas, argumentando para ello la aridez del paleoerg de Botucatu y el estilo de emplazamiento de las lavas. No obstante, para el estado de Paraná Waichel *et al.* (2007) describen peperitas s. s. (peperitas húmedas).

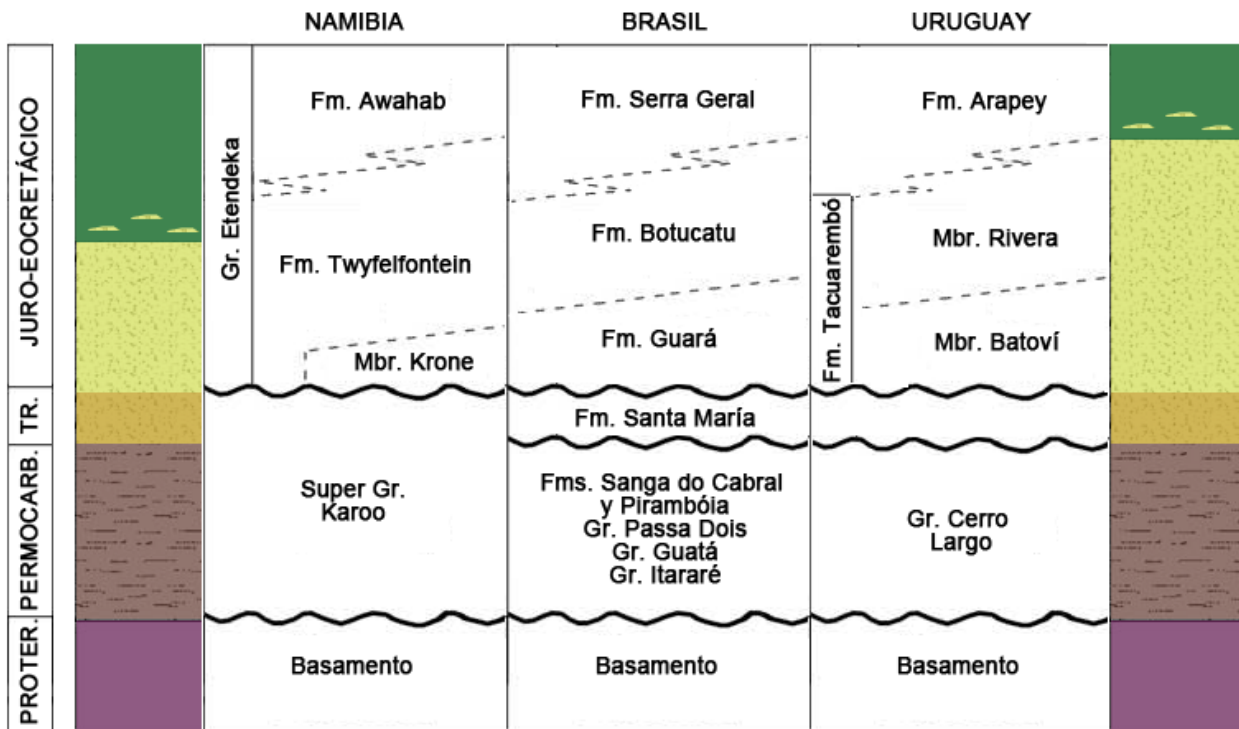


Figura 134. Columnas estratigráficas comparadas de las cuencas de Huab (Namibia), Paraná (Brasil) y Norte (Uruguay). Como implica la figura, los niveles de basaltos con intertraps son incluidos dentro de la Formación Arapey en Uruguay (propuesta estratigráfica similar a la de Brasil), pero en Namibia son parte de la Formación Twyfelfontein.

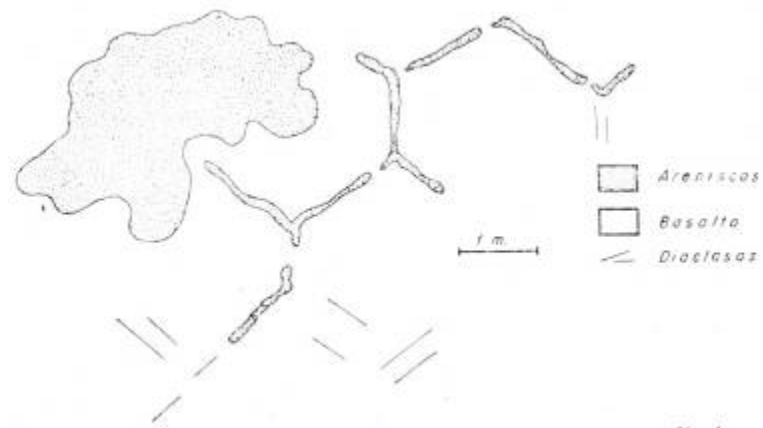


Figura 135. Diques clásticos de arenisca relleno diaclasas de enfriamiento hexagonales en el basalto en la región de Colonia Itapebí. Tomado de Bossi *et al.* (1969).

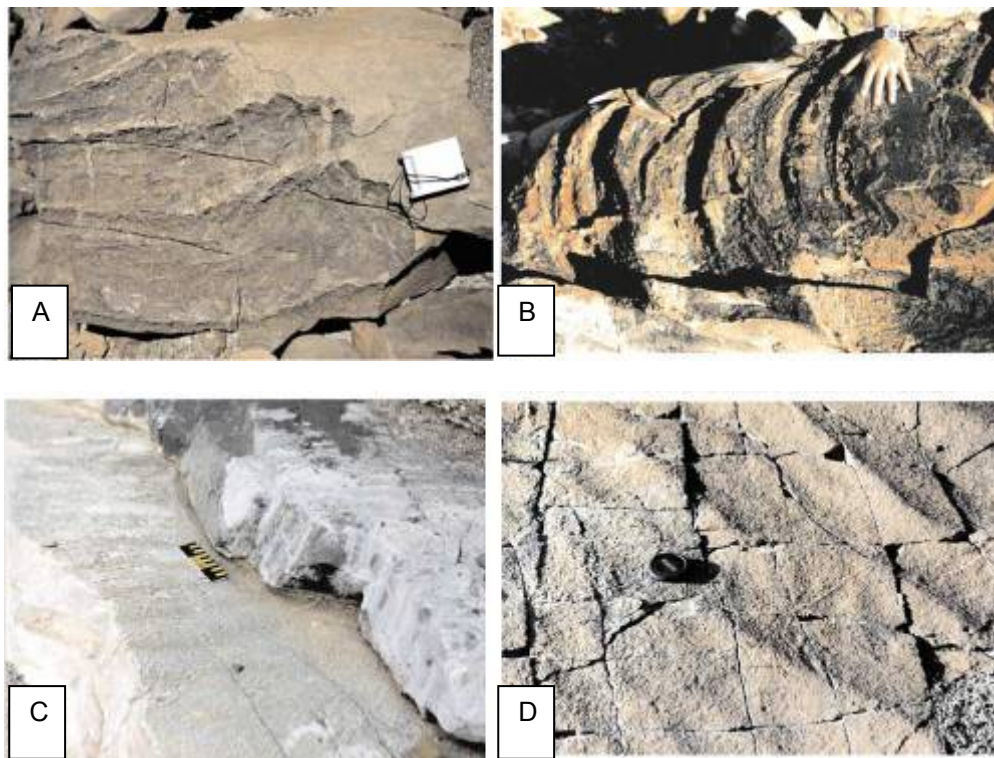


Figura 136. Evidencias de interacción lava-sedimento en Namibia. **A-B**, moldes de lavas *pahoehoe* en arenisca. **C-D**, *ripples* y estrías preservados en arenisca. Tomado de Jerram y Stollhoffen (2002).

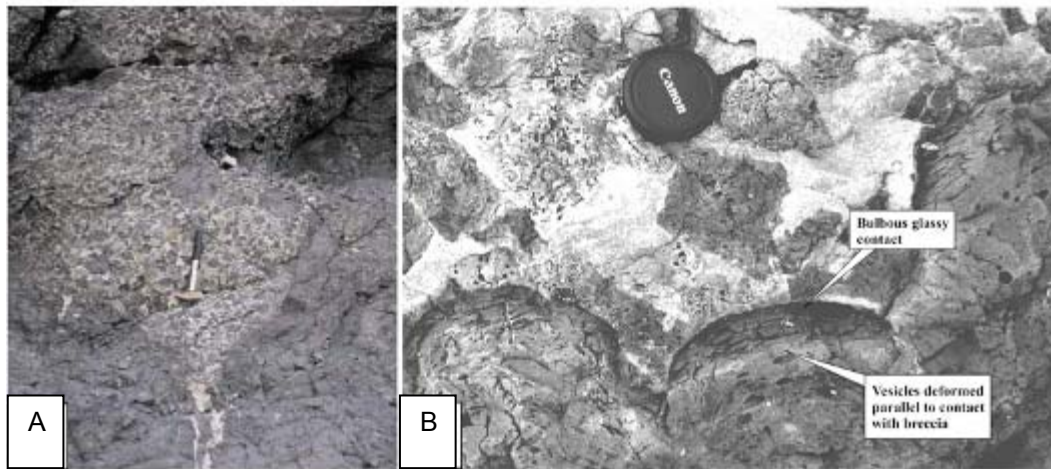


Figura 137. Evidencias de interacción lava-sedimento en Namibia. **A**, brecha con forma de embudo desembocando en un dique clástico. **B**, contacto bulboso entre lava y brecha suprayacente. Modificado de Jerram y Stollhoffen (2002).

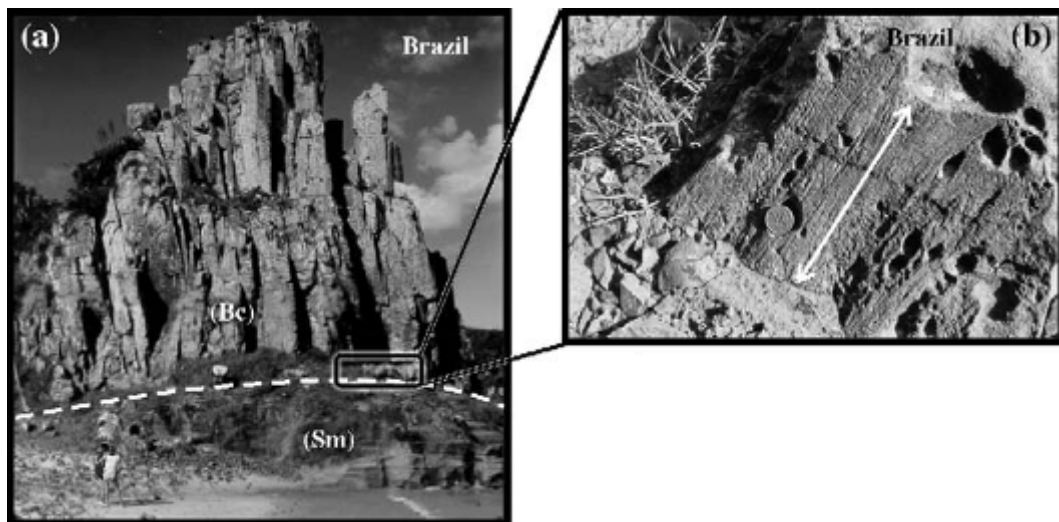


Figura 138. Evidencias de interacción lava-sedimento en Brasil. **A**, basalto con disyunción columnar suprayaciendo a un cuerpo de arenisca. **B**, estrías de flujo de colada. Modificado de Petry *et al.* (2007).



Figura 139. Evidencias de interacción lava-sedimento en Brasil. **A**, peperita. **B**, brecha hidráulica. Modificado de Machado *et al.* (2009) y Fernandes *et al.* (2010).

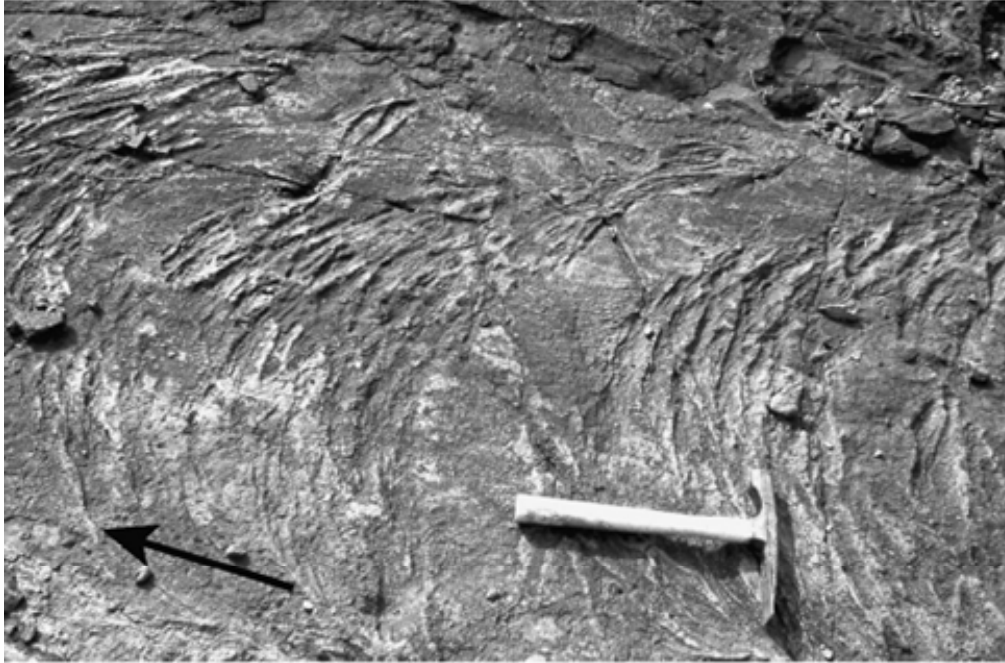


Figura 140. Evidencias de interacción lava-sedimento en Brasil. Marcas semilunares. Modificado de Holtz *et al.* (2008).

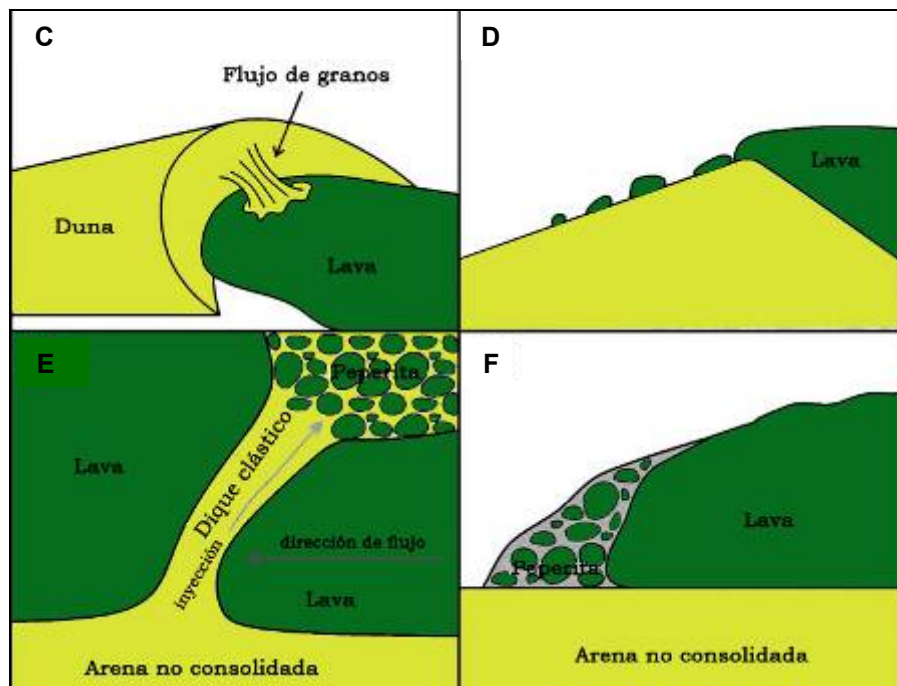
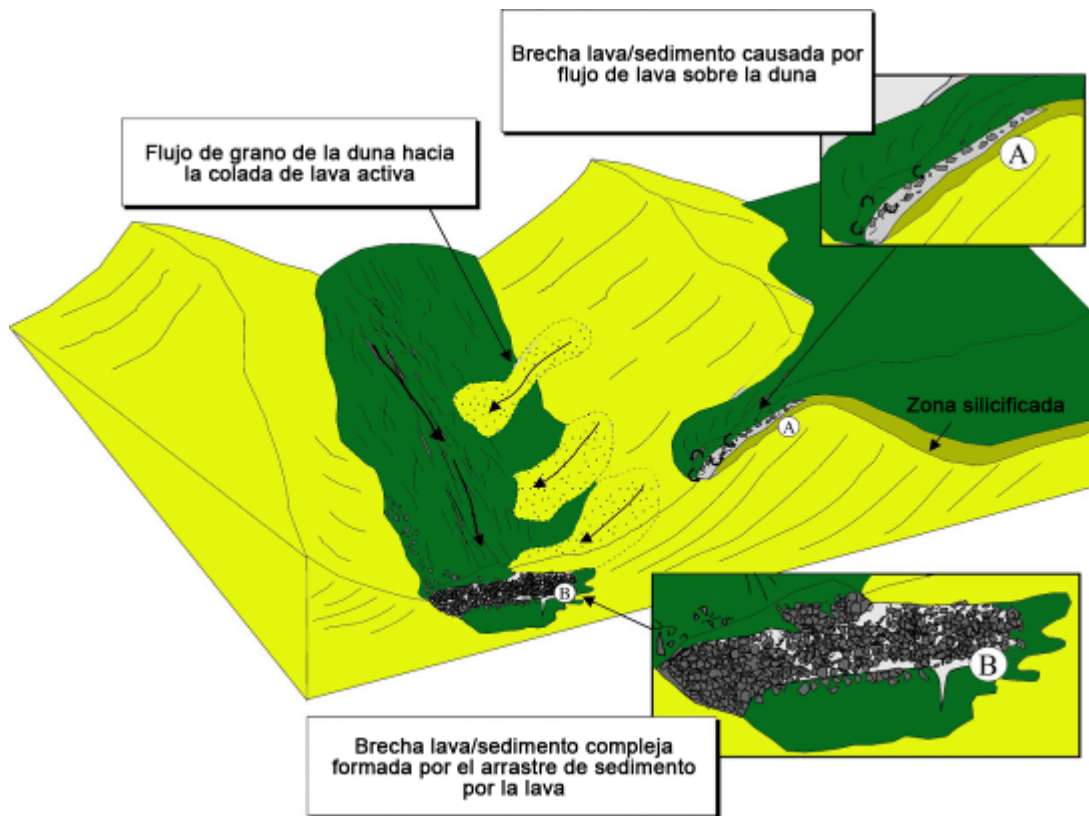


Figura 141. Diferentes mecanismos de interacción lava-sedimento, que tienen como resultados peperitas, brechas y diques clásticos. **A-B**, modificado de Jerram y Stollhoffen (2002). **C-F**, modificado de Petry *et al.* (2007).

3. COMENTARIOS SOBRE ALGUNOS ASPECTOS GEOLÓGICOS Y ESTRUCTURALES

3.1. Tipos de basaltos

En superficie, los afloramientos de basaltos no presentan una buena exposición ni en la vertical ni en la lateral, y los contactos entre coladas no pudieron apreciarse dada la casi omnipresente cobertura edáfica y vegetal del área. Esto impide una caracterización detallada de la arquitectura de las facies volcánicas, tal como realizaron Waichel *et al.* (2012).

No obstante, los rasgos identificados en los pozos donde la estratigrafía de la Formación Arapey está bien preservada (Quintana E-1 y Quintana E-2, separados aproximadamente 1 km entre sí) permiten diferenciar:

- una colada, de posición estratigráfica inferior, de 31 m de potencia, compuesta mayormente por basalto masivo pero con basalto amigdaloides fresco al tope y un delgado nivel de basalto masivo alterado en la base;
- una colada, de posición estratigráfica superior, de entre 45 y 48 m de potencia, compuesta casi esencialmente por basalto masivo pero con basalto amigdaloides en el tope y en la base.

Las amígdalas no suelen estar elongadas (como es común en basaltos tipo aa; Waichel *et al.*, 2012), sino que tienden a ser esféricas. Amígdalas elongadas se observaron solamente en clastos dentro de brechas volcánicas.

En el límite entre ambas coladas existe un nivel de peperitas de unos 2 m de potencia. El avance de las coladas sobre la cara de avalancha de las paleodunas precisamente promueve la formación de peperitas (Waichel *et al.*, 2012).

Este esquema básico puede experimentar modificaciones; notablemente en el pozo Quintana E-1 existe

- un nivel basal (¿primera colada?) compuesta exclusivamente por basalto amigdaloides, de 10 m de potencia.

- un nivel de brechas volcánicas al tope de la columna, de unos 7 m de potencia.

Estos rasgos observados en subsuelo, más otros apreciados en superficie (areniscas con estrías acanaladas curvas, concéntricas, o bien rectilíneas) permite proponer que estas primeras coladas de basalto que cubrieron el paleoerg de Botucatu son del tipo *pahoehoe*, tanto compuesto-*braided* (en zona de dunas e interdunas) como tabular clásico, siendo estas últimas más extensas lateralmente y con mayor espesor (ver Jerram, 2002 y Waichel *et al.*, 2012).

El escaso espesor de las coladas es coherente con una baja tasa de efusión, simultánea a la subsidencia. La no ocurrencia de disyunción columnar bien marcada se ha observado en otros ejemplos de ambientes áridos (Jerram, 2002).

La ausencia de análisis geoquímicos (que no se descarta realizar a futuro) impidió identificar la presencia de facies volcánicas ácidas, aunque al menos es posible afirmar que no se observaron facies en forma de domos de lava (ver Waichel *et al.*, 2012).

3.2. Diques alimentadores

En la sección de geología se superficie se mencionaron los basaltos “B”, como los que se encuentran en los cerros Bonito, de la Virgen, del Charrúa, etc. A ellos corresponden las cotas más elevadas, y son probablemente discordantes respecto a las otras unidades, por lo que de ser datados por métodos isotópicos podrían arrojar edades más jóvenes.

Según Veroslavsky *et al.* (2012) estos cerros son las expresiones morfológicas de conductos volcánicos que permitieron el ascenso de magmas básicos muy fluidos (tipo hawaiano), sin explosividad, lo que explicaría la ausencia de brechas de conducto asociadas.

Se concuerda con Veroslavsky *et al.* (2012) en que estos centros de emisión lávico estarían asociados al alto gravimétrico que separa los bajos gravimétricos de Quintana y Pepe Núñez.

3.3. Conglomerado de “La California”

Es llamativa la presencia de potentes conglomerados y brechas (con clastos de granito¹⁹ y basalto de dimensiones inclusive decimétricas) en el pozo Quintana E-3. Estas litologías son análogas a las descritos por Bossi y Navarro (1991) como conglomerados de “La California” (Figs. 142 y 143), aflorantes en cerros próximos al arroyo homónimo al SE del área de estudio, por fuera de la misma (ver ubicación en Fig. 10).

La presencia de estas litologías, intercaladas por falla repetidamente con los basaltos de la Formación Arapey en la mencionada perforación, implica la existencia en el Cretácico de un alto de basamento granítico (que quizás sufrió sucesivos levantamientos), desde donde básicamente por gravedad se transportaban clastos de granito. Las sucesivas coladas basálticas se intercalarían con estos depósitos de pie de monte. Dicho alto ha perdido hoy en día la expresión geomorfológica que tuvo en el Cretácico.

3.4. Conglomerados aluviales

Se han descrito conglomerados y areniscas conglomerádicas en la Cañada del Charrúa; en este trabajo se comunica la ocurrencia de litologías similares (aunque de menor potencia) tanto en el lecho de una cañada al SE del área de estudio como fuera de la misma, en la zona de Zanja del Tigre (al Norte del bloque).

Estos depósitos groseros, de edad probablemente Cuaternaria, poseen geometría de abanicos y se interpretan como un flujo de detritos con poco transporte e importante componente gravitacional (alta pendiente).

Como expresan Veroslavsky *et al.* (2012), los conglomerados afloran con mayor espesor en el margen Sur de la Cañada del Charrúa (cuyo curso está controlado por fractura), sugiriendo una reactivación cenozoica

¹⁹ A juzgar por el aspecto de los clastos, se trataría de un granito similar al atravesado por las perforaciones de Pepe Núñez y Cañada del Charrúa.

por falla normal, hundiendo un bloque SO respecto de un bloque al NE de la cañada.



Figura 142. Afloramiento de conglomerados próximo al Arroyo La California.



Figura 143. Muestra de mano procedente del afloramiento anterior. No se descarta que se trate de una brecha de conducto.

4. CONCLUSIONES

Se efectuarán a continuación ciertas consideraciones sobre los métodos empleados.

Magnetotelúrica

Los sondeos magnetotelúricos dieron resultados sólo parcialmente satisfactorios. En un área estructuralmente compleja como el bloque Pepe Núñez, muchos sondeos muestran un comportamiento bidimensional. Unos pocos sondeos fueron ruidosos, por lo que debería cotejarse si en dichas fechas existieron tormentas solares.

Sería conveniente alejar lo máximo posible los sondeos de las fallas identificadas, y emplear dos equipos simultáneamente.

Las estimaciones iniciales de basamento en base a la magnetotelúrica fueron en algunos pozos sobrestimadas (ej. Cañada del Charrúa E-1 y E-2) y en otros subestimadas (ej. Quintana E-2 y Quintana E-3), ajustándose mejor en el procesamiento final de los datos magnetotelúricos empleando los datos de perforaciones.

Geoquímica orgánica

Si bien la geoquímica orgánica es una herramienta sumamente útil para caracterizar rocas generadoras, deben tenerse en cuenta las siguientes situaciones:

- si una muestra posee menos de 0,4% de COT los resultados no serán confiables.

- si el valor de S2 es muy bajo (menor a 0,2 mg HC/g roca) la lectura de Tmax no es confiable.

- algunos componentes afectan ciertos valores; por ejemplo, la presencia de azufre elemental disminuye los valores de IH y Tmax y aumenta los valores de IO e IP. Análogamente, la presencia de resinita y gilsonita disminuyen o aumentan los valores de Tmax, respectivamente.

- en muestras procedentes de afloramientos, debido a la alteración, los valores de S1, S2 e IH se ven reducidos y los valores de S3 e IO se ven incrementados.

- un tipo de kerógeno dado puede degradarse químicamente en otro.

Bacterias butanotróficas

Algunas explicaciones de los altos valores de poblaciones de bacterias registrados en Pepe Núñez pueden estar relacionados a:

- escasa eficiencia del sello en comparación con la Cuenca Neuquina (quizás debido en parte a la gran densidad de fallas);

- menor profundidad de la cuenca (la roca generadora y/o la acumulación de hidrocarburos está muy próxima a la superficie, en comparación con la gran profundidad de la Cuenca Neuquina);

- elevados valores de COT máximo en las lutitas negras cortadas por los pozos del área Pepe Núñez (según el laboratorio, entre 12 y 17%) en comparación con el COT máximo de la Formación Vaca Muerta;

- diferentes factores ambientales (temperatura y humedad del suelo)

- potenciación de las microfugas por geogases del manto, lo que podría explicar valores anómalos de V, Cr y Ni en las cercanías de lineamientos (Fig. 211), aunque no aparecen asociados a las mayores anomalías de bacterias.

Deben hacerse asimismo otras consideraciones:

- los resultados se basan sólo en 54 muestras en tres transectas, distanciadas en su mayor parte 1,5 km entre sí; debería densificarse el muestreo para obtener resultados más representativos de toda el área y delinear mejor las tres anomalías observadas en los mapas de la Fig. 189;

- la Cuenca Norte tiene un ambiente geotectónico diferente a la Cuenca Neuquina, así que no necesariamente son situaciones comparables;

- la Cuenca Norte está totalmente subexplorada en comparación con la Cuenca Neuquina, por lo que no es sencillo interpretar los primeros resul-

tados que se obtienen por métodos novedosos, sin un contexto bien conocido;

- se estima prudente que debería proseguirse con captura directa de gases C1 a C4 (metano, etano, propano y butano) a efectos de correlacionar esto con los resultados indirectos obtenidos mediante el análisis microbiológico.

Fluorescencia de rayos X

Los altos valores de U registrados en la fluorescencia (que de ser verificados estimularían una prospección más detallada de ese elemento) no guardan correlación con los resultados obtenidos por la espectrometría.

Quizás esto se debe a que si bien el equipo empleado por Larriestra Geotecnologías (2012) posee una buena precisión, tiene una exactitud menor que equipos de mayor porte. De hecho este equipo no sería el más adecuado para analizar algunos de estos elementos.

5. EVOLUCIÓN TECTONOESTRATIGRÁFICA

A raíz de este trabajo se propone el siguiente esquema de evolución tectono-estratigráfica del bloque Pepe Núñez (Fig. 144):

1º) Basamento gnéissico intruido por granito; las edades absolutas están pendientes de determinación por métodos isotópicos (U/Pb SHRIMP).

2º) Erosión del basamento y posterior depositación de formaciones San Gregorio, Cerro Pelado y Frayle Muerto, potencialmente también Mangrullo, Paso Aguiar y Yaguarí (cuya continuación hacia el SO ha sido constatada recientemente por el pozo Cerro Padilla de la empresa Schuepbach).

3º) Levantamiento generalizado erosionándose en toda el área parte de la columna pérmica, concretamente las formaciones Cerro Pelado, Frayle Muerto, Mangrullo, Paso Aguiar y Yaguarí; en Quintana además llega a erosionarse casi totalmente la formación San Gregorio.

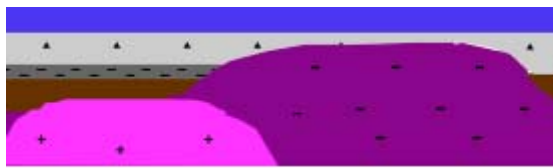
4º) Depositación en parte del área (Pepe Núñez y Cañada del Charrúa) de la Formación Buena Vista.

5º) Hiato y posterior depositación de la Formación Tacuarembó.

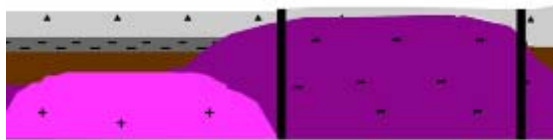
6º) Intrusión de diques básicos (aprovechando fallas preexistentes) y *sills*, y efusión de coladas basálticas, englobando areniscas de intertrap en el breve período de cesación de volcanismo entre dos coladas.

7º) Reactivación de fallas (neotectónica) más erosión, adquiriendo el área su geomorfología actual.

Se propone que dos importantes estructuras NO-SE compartimentan el área de estudio, denominándose (por los cursos de agua que controlan) falla Sopas-California y falla Mataojo Chico-Tacuarembó Chico (Fig. 145), compartimentándose tres bloques, denominados (de la misma forma que los bajos gravimétricos) Carumbé, Quintana y Pepe Núñez. Este último bloque está claramente hundido respecto al bloque Quintana; la situación respecto al bloque Carumbé no es clara, dada la ausencia de perforaciones en esa área y la indefinición existente en la inversión 2D magnetotelérica.



1º) Erosión del basamento y posterior deposición de formaciones del Pérmico Temprano y Medio.



2º) Levantamiento del basamento, denudándose parte de la columna pérmica en toda el área



3º) Deposición en parte del área de la Formación Buena Vista.



4º) Hiato y posterior deposición de la Formación Tacuarembó, fósilífera.



5º) Fenómeno extensional generalizado fisural: intrusión de diques y *sills*, efusión de coladas basálticas, englobando areniscas de *intertrap*.



6º) Reactivación de fallas (neotectónica) más erosión, adquiriendo el área su geomorfología actual.

Figura 144. Esquema de evolución tectono-estratigráfica del área de estudio, simplificado, basado en transecta N-S.

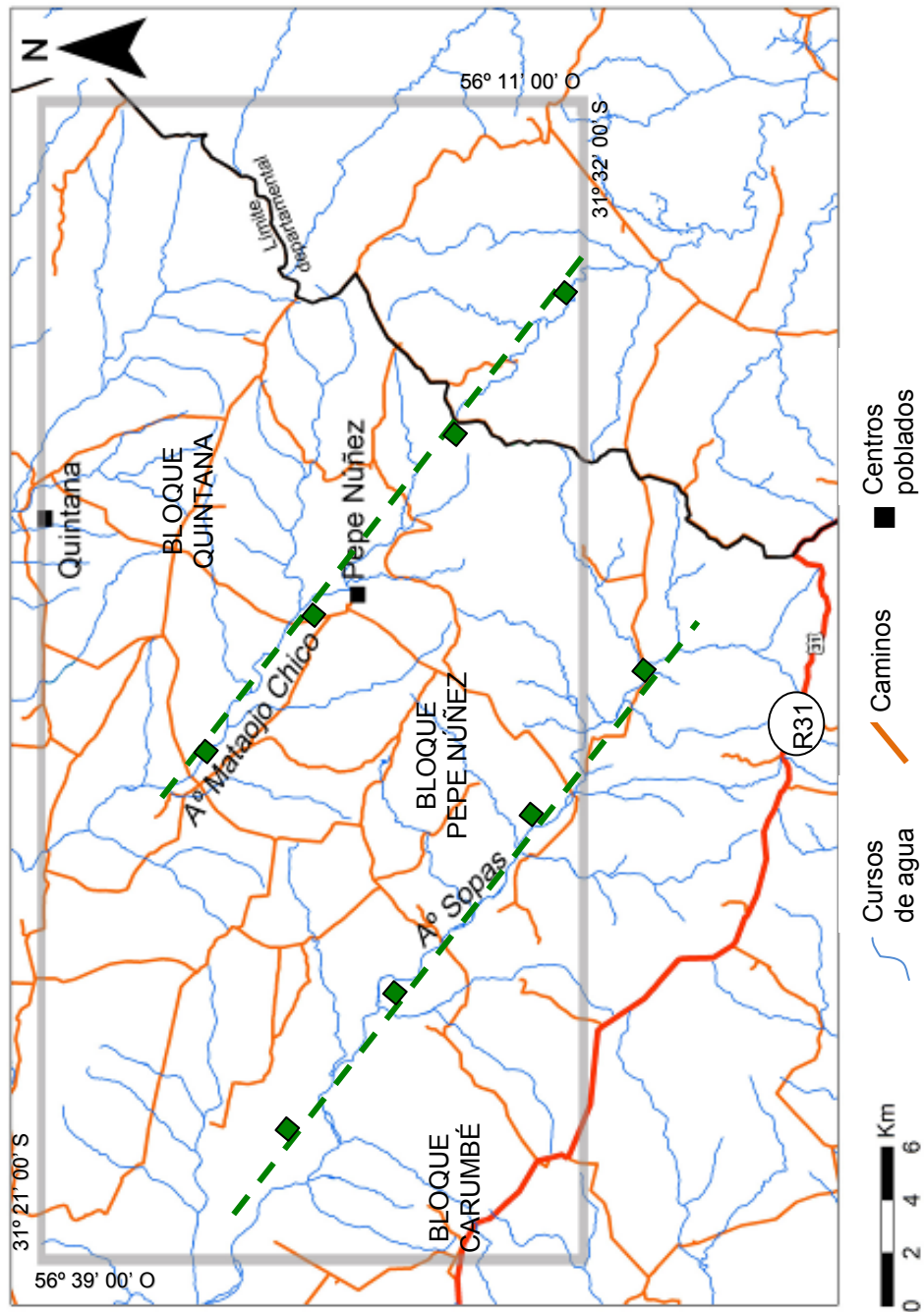


Figura 145. Compartimentación del área de estudio por dos fallas principales NW, en tres bloques estructurales (Carumbé, Pepe Núñez y Quintana). El bloque hundido es el Pepe Núñez.

6. SISTEMAS PETROLEROS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Se efectuarán, como ejercicio hipotético, consideraciones sobre un posible sistema petrolero especulativo del área, anteriormente no propuesto para Uruguay: San Gregorio-Buena Vista/Tacuarembó (?).

De todas formas, es claro que la mayor probabilidad de descubrir acumulaciones convencionales de hidrocarburos en Uruguay se centran en las cuencas *offshore*.

Por otro lado, no se considerará seriamente la posibilidad de la existencia de acumulaciones no convencionales de hidrocarburos dado que para ello deben coincidir varios factores geológicos y económicos (además de las consideraciones ambientales), la mayoría de los cuales en esta área o bien no se cumple o bien es desconocido:

- madurez de la roca generadora
- mayores espesores de roca generadora
- contenido en minerales convenientes para el *fracking* (cuarzo y carbonatos, pero no minerales arcillosos)
- soterramiento mayor a 1500 m
- separación suficiente respecto a capas acuíferas
- estructuralmente simple
- presencia de infraestructura

Rocas generadoras

En el área se cortó una sola roca generadora, con los datos actuales exclusivamente presente al Sur del lineamiento Mataojo Chico (pozos Pepe Núñez E-1b y Cañada del Charrúa E-1 y E-2). Se trata de arcillitas de color gris oscuro (localmente negro), piritosas, con espesores de entre 13 y 20 m, COT máximo de casi 16% e IH máximo de 400 mg HC/g COT. El alto valor del COT llama la atención dado que supera incluso al 13,5% registrado para la Formación Mangrullo (de Santa Ana y Gutiérrez, 2000), y puede explicarse por condiciones de gran restricción hacia la base de la

Formación San Gregorio. Asimismo, los valores promedio son mucho menores (aproximadamente 2% de COT y 50 mg HC/g COT).

Los principales problemas de esta “nueva” roca generadora son por tanto no la cantidad de materia orgánica sino su baja calidad, su reducido espesor y sus condiciones de inmadurez o madurez marginal.

Por tanto, se impone la necesidad de mapearla a través de la Cuenca Norte, y predecir dónde estaría su depocentro, que debería haber experimentado el soterramiento suficiente para alcanzar la ventana del petróleo (o bien la influencia de magmatismo cretácico). Por el momento su distribución abarca, además de los pozos mencionado en el bloque Pepe Núñez, al menos a los pozos Paso del Borracho y Las Toscas (pero ausente en los pozos Tacuarembó y Bañado de Rocha, configurándose un corredor NO-SE probablemente con fuerte control estructural (Fig. 146).

Rocas reservorio

Se atravesaron secciones importantes (según el pozo que se considere, entre 200 y 300 metros) de areniscas con permeabilidades y porosidades inferidas mayormente altas. Litoestratigráficamente pertenecen a las formaciones Tacuarembó y Buena Vista. Mayormente se trata de areniscas de grano fino a medio, de selección moderada a buena, con bajo contenido de arcillas (a excepción de algunas facies subacuáticas de la Formación Tacuarembó). Las pelitas cortadas en estas unidades presentaron espesores despreciables (centimétricos a decimétricos) y baja continuidad lateral, por lo que se cree no afectarían en forma negativa a los reservorios. Algunos intervalos resultaron ser acuíferos.

Rocas sello

Existen básicamente dos unidades con litologías impermeables y de distribución continua en la lateral que officiarían de sellos. En primer lugar, los basaltos de la Formación Arapey, con espesores atravesados en el área de entre 40 (Cañada del Charrúa E-1 y E-2) y 100 metros (Quintana

E-1), aunque existen ventanas de arenisca (caso del pozo Pepe Núñez-E1b). Pese a que localmente los basaltos pueden presentar importante fracturación, la mayoría de las fracturas están rellenas. Los intervalos de mayor permeabilidad corresponderían a *intertraps*, pero en el área presentan espesores reducidos (menores a dos metros) y continuidad lateral probablemente reducida.

En segundo lugar, las diamictitas y pelitas de la Formación San Gregorio, con espesores importantes (más de 100 m), que funcionarían de sello para potenciales acumulaciones pre-Carboníferas.

No puede dejar de mencionarse el rol sellante que podría cumplir bajo ciertas condiciones parte de las fallas existentes en el área. Un sello de importancia secundaria podrían ser facies subacuáticas pelíticas de las formaciones Buena Vista y Tacuarembó.

Vías de migración

En el área la eventual migración se habría producido a través de fallas y diques, y por *carrier beds* (estratos porosos de las formaciones Tacuarembó y Buena Vista).

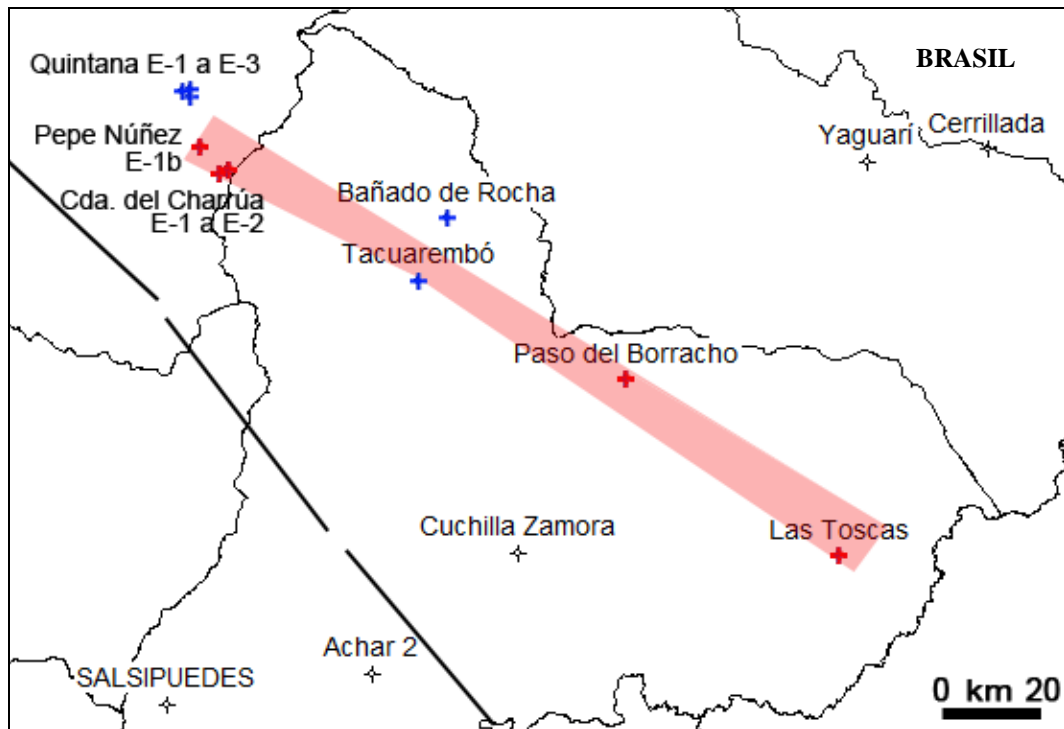


Figura 146. Hipótesis conservadora de distribución de las lutitas negras de la base de la Formación San Gregorio. Presencia: pozos en rojo. Ausencia: pozos en azul.

7. RECOMENDACIONES

A partir del trabajo realizado, surgen una serie de consideraciones, que se detallan a continuación, a efectos de testear hipótesis y despejar incógnitas son:

- ▶ realizar mapeo geológico al NO del área; como se verá en el Anexo 1, esta área no fue relevada, sea por dificultades logísticas (porteras trancadas, arroyos inundados, caminos en mal estado);
- ▶ densificar el muestreo para geoquímica y palinología en la Formación San Gregorio, tanto en el intervalo de lutitas grises a negras como fuera de él;
- ▶ realizar más determinaciones de madurez sobre lutitas grises a negras de la Formación San Gregorio, a efectos de corroborar o no el aumento de madurez registrado en el pozo Cañada del Charrúa E-2 (no así en Pepe Núñez E-1b); por ejemplo, puede muestrearse también el pozo Cañada del Charrúa E-1;
- ▶ captura directa de gases (metano, etano, propano y butano), para complementar con los datos de bacterias butanotróficas;
- ▶ culminar los análisis de *gamma ray* espectral para los pozos Quinta-na E-2 y E-3;
- ▶ integrar los datos de las nuevas perforaciones estratigráficas que se están llevando a cabo en estos momentos, tanto por parte de ANCAP en el bloque Pepe Núñez (al SE y S del área) como por parte de Schuepbach Energy fuera del mismo (pozos Cerro Padilla y Cardozo Chico);
- ▶ procurar establecer con mayor precisión el contacto entre las formaciones Tacuarembó y Buena Vista, por ejemplo recurriendo a minerales pesados. Algunos análisis realizados por la empresa LCV parecen sugerir que la primera presenta mayor contenido medio de granate, turmalina y epidoto, mientras que la segunda presenta contenidos ligeramente mayores de circón, rutilo y opacos (Fig. 147).

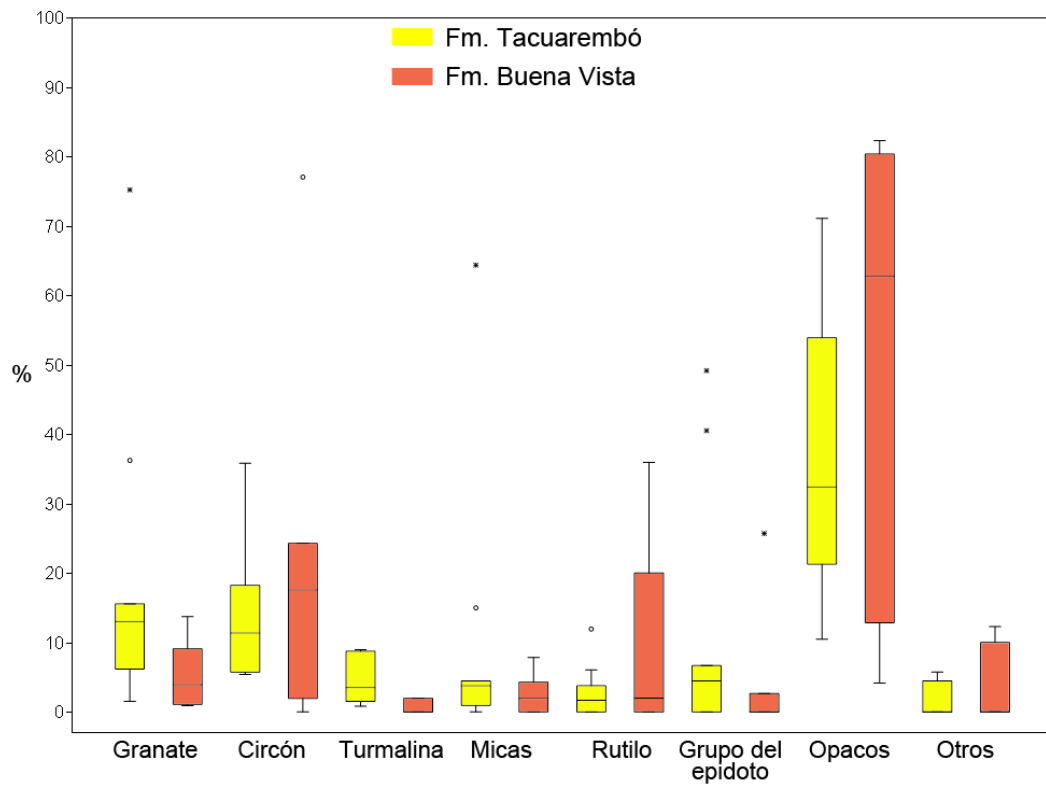


Figura 147. Diagrama de caja (*box-plot*) con diferentes minerales pesados para varias muestras de las formaciones Tacuarembó y Buena Vista. Construido en base a datos de LCV.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, A.E.; MacKenzie, W.S.; Guilford, C. 1984. *Atlas of Sedimentary Rocks Under the Microscope*, Longman, 104 pp.
- Allix, P.; Burnham, A.; Fowler, T.; Herron, M.; Kleinberg, R. y Symington, B. 2011. Extracción del petróleo contenido en las lutitas. *Oilfield Review* 22(4):4-15.
- Al-Mashramah, Y.A.A. 2011. *Maturity of kerogen, petroleum generation and the application of fossils and organic matter for paleotemperature measurements*. Examensabeten i geology vid Lunds universitet, 274, 30 pp.
- Almeida, F.F.M. de. 1953. Botucatu, a triassic desert of South America. In: IUGS, International Geological Congress, 19, Argel, Argelia. *Comptes Rendus, Argelia*, 19(7):9-24.
- Assine, M. L.; Piranha, J. M. y Carneiro, C. D. R. 2004. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. Em: *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, pp. 77-93, São Paulo, Beca.
- Beltan, L. 1977. Découverte d'une ichtyofaune dans le Carbonifère supérieur d'Uruguay. Rapports avec les faunes ichtyologiques contemporaines des autres régions du Gondwana. *Annales de la Société Géologique du Nord* 97:351-355.
- Beltan, L. 1981. *Coccocephalithchys tessellatus* n.sp. (Pisces, Actinopterygii) from the Upper Carboniferous of Uruguay. II Congreso Latinoamericano de Paleontología, Porto Alegre, Anais I: 95-106.
- Beltan, L. 1988. *The paleoichthyofauna from the San Gregorio Formation (Late Carboniferous or Early Permian) of South America*. 7th Gondwana Symposium, Abstracts 39, São Paulo.
- Beri, Á. y Daners, G. 1996. Palinomorfos de la perforación Cerro Largo Sur N° 4, Pérmico Inferior, Uruguay. *Revista Chilena de Historia Natural* 6:163-170.
- Beri, Á. y Goso, C.A. 1996. Análisis Palinológico y Estratigráfico de la Fm. San Gregorio (Pérmico Inferior) en el área de los Cerros Guazunambí, Cerro Largo, Uruguay. *Revista Española de Micropaleontología* 28:67-79.
- Beri, Á. y Goso, C.A. 1998. Resultados palinológicos y estratigráficos de la Formación San Gregorio (Pérmico Inferior), Uruguay. *Revista Universidade Guelhos, Geociências*, 3:108-119.

- Beri, Á.; Martínez-Blanco, X. y Mourelle, D. 2010. A synthesis of palynological data from the Early Permian Cerro Pelado Formation (Paraná Basin, Uruguay): a record of warmer climate stages during Gondwana glaciations. *Geologica Acta*, 8:419–429.
- Bossi, J. 1966. *Geología del Uruguay*. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo. 469 pp.
- Bossi, J. 2006. Magmatismo hipabisal básico Gondwanico: Un nuevo aporte al reconocimiento de terrenos tectonoestratigráficos en Uruguay. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología* 13:34-48.
- Bossi, J. y Campal, N. 1992. Magmatismo y tectónica transcurrente durante el Paleozoico Inferior en Uruguay. Pp. 343-356 en: Gutiérrez- Marco, J. G.; Saavedra, J. y Rabano, I. (eds.), *Paleozoico Inferior de Iberoamérica*. Mérida.
- Bossi, J. y Ferrando, L. 2001. Carta Geológica del Uruguay. Escala 1:500.000. Geo Editores SRL, Montevideo. (CD-ROM)
- Bossi, J.; Ferrando, L.A.; Fernández, A.; Elizalde, G.; Morales, H.; Ledesma, J.; Carballo, E.; Medina, E.; Ford, I. y Montaña, J.R. (eds.). 1975. *Carta geológica del Uruguay. Escala 1/1.000.000*. Montevideo. 32 pp.
- Bossi, J.; Heide, E. y de Oliveira, T. 1969. Segmento Salto (Sectores XIX y XX). En: Bossi, J. y Goso, H. (eds.), *Carta Geológica del Uruguay a escala 1:100.000*. Universidad de la República-MGAP-MIEM. Memoria, 57 pp., 1 mapa. Montevideo.
- Bossi, J. y Navarro, R. 1991. *Geología del Uruguay*. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República. Montevideo. 967 pp.
- Bossi, J. y Schipilov, A. 1998. Grupo Arapey: basaltos confinantes del Acuífero Guaraní en Uruguay. *Agrociencia* II(1):12-25.
- Busby-Spera, C.J. y White, J.D.L. 1987. Variations in peperite textures associated with different host sediment properties. *Bulleting of Volcanology* 49(6):765-776.
- Cagniard, L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysicis* 18:603-635.
- Campal, N. y Schipilov, A. 1999. The Eastern Edge of the Río de la Plata Cratón: a history of tangential collisions. *Basement Tectonics* 13:33-48.
- Campos, L. de; Milani, E.; Toledo, M.; Queiroz, R.; Catto, A. y Kelke, S. 1998. Barra Bonita: a primeira acumulação comercial de hidrocarboneto da Bacia do Paraná. *Rio Oil & Gas Conference (Rio de Janeiro)*, 7 pp.

- Closs, D. 1967a. Orthocone cephalopods from the Upper Carboniferous of Argentina and Uruguay. *Ameghiniana* 5(3):123-129.
- Closs, D. 1967b. Upper Carboniferous anaptychi from Uruguay. *Ameghiniana* 5(4):145-148.
- Closs, D. 1969. *Intercalation of Goniatites in the Gondwana glacial beds of Uruguay*. I International. *Symposium of Gondwana Geology & Stratigraphy* (IUGS), 2:197-212.
- Corbo, F. 2006. *Modelo geofísico del Acuífero Guaraní: zona comprendida entre Uruguay y Argentina*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 152 pp.
- Daners, G.; Lé Herissé, A. y Veroslavsky, G. 2013. Palinoestratigrafía del Devónico inferior de Uruguay en los pozos Achar y Salsipuedes (Cuenca Norte, Uruguay). VII Congreso Uruguayo de Geología, Montevideo. [CD-ROM]
- Daners, G. y Verde, M. 2008. Fósiles microscópicos. En: Perea, D. (ed.), *Fósiles del Uruguay*. DIRAC, pp. 77-118.
- de Santa Ana, H. 1989. Consideraciones tectónicas y deposicionales de la Cuenca Norte uruguaya. *Boletín Técnico de ARPEL* 18(4):319-339.
- de Santa Ana, H. 2004. *Análise Tectono-estratigráfica das Seqüências Permiantriássica e Jurocretácea da Bacia Chacoparanense Uruguáia ("Cuenca Norte")*. Tese de Doutorado. UNESP, Rio Claro, 274 pp. [inédito]
- de Santa Ana, H., Goso, C. y Daners, G. 2006a. Cuenca Norte: Estratigrafía del Carbonífero-Pérmico. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico*. DIRAC-Facultad de Ciencias, Montevideo, pp. 209-256.
- de Santa Ana, H. y Veroslavsky, G. 2002. Evidencias de tectónica cenozoica en la región Norte de Uruguay. *II Jornadas Uruguayas del Cenozoico (Montevideo)*, *Actas*:1-5.
- de Santa Ana, H. y Veroslavsky G. 2004. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico – Cretácico Temprano. Pp. 51-74 in Veroslavsky, G.; Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales – Mesozoico*. 2ª Edición. DIRAC – Facultad de Ciencias, p. 53-75.

- de Santa Ana, H. y Gutiérrez, L. 2000. Formación Mangrullo (Cuenca Norte, Uruguay): estratigrafía y recursos minerales asociados. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología* 7:2-14.
- de Santa Ana, H., Veroslavsky, G., Fúlfaro, V. y Rossello, E. 2006b. Cuenca Norte: Evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero-Pérmico. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico*. DIRAC-Facultad de Ciencias, Montevideo, pp. 209-256.
- De León, L. y Cayssials, R. 2004. Los suelos de Uruguay y su potencial de aprovechamiento. Pp. 333-355 en: Veroslavsky, G.; Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Cenozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias, Montevideo.
- Degolyer y MacNaughton. 1950. *Report on the Progress of the Petroleum Exploration Program in Uruguay*. 169 pp. [Informe Interno ANCAP]
- Enciso-De La Vega, S. 1992. Technique of sample preparation for palynological analysis. *Boletín Del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora* 9(2):101-107.
- Féraud, G.; Bertrand, H.; Martínez, M.; Ures, C.; Schipilov, A. y Bossi, J. 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and geochemistry of the southern extension of Paraná traps in Uruguay. II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Córdoba, Actas: 57-59.
- Fernandes, A. J.; Maldaner, C. H.; Sobrinho, J. M. A.; Pressinotti, M. M. N. y Wahnfried, I. 2010. Estratigrafia dos derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto – SP) based on physical geology, petrography and geochemistry. *Revista do Instituto de Geociências, Geol. USP, Sér. cient*, 10(2):73-99.
- Ferrando, L. y Andreis, R.R. 1986. *Nueva estratigrafía en el Gondwana de Uruguay*. I Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos, ARPEL. Buenos Aires. Actas: 295-323.
- Gluyas, J. y Swarbrick, R. 2004. *Petroleum Geoscience*. Blackwell Publishing, 376 pp.
- Goso, C. 1995. *Análise estratigráfica da Formação São Gregorio na borda leste da Bacia Norte uruguaia*. Dissertação de Mestrado. UNESP, Rio Claro, 214 pp. [inédito]

- Goso, C. 1999. *Análise estratigráfica do Grupo Paysandú (Cretáceo) na Bacia do Litoral Uruguai*. Tese de Doutorado. UNESP, Rio Claro, 184 pp. [inérito]
- Goso, C. y de Santa Ana, H. (1986): *Evolución tectónica y sedimentaria de la Cuenca Norte uruguaya. Modelo preliminar*. LX RANE 1986, Presente y futuro de la exploración de hidrocarburos en las cuencas latinoamericanas, AR-PEL, 30, Lima.
- Goso, C. y Perea, D. 2004. El Cretácico post-basáltico de la Cuenca litoral del río Uruguay: geología y paleontología. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Mesozoico*. DIRAC, Montevideo, pp. 143-171.
- Goso, C.; Veroslavsky, G. y de Santa Ana, H. 1996. *Modelo estratigráfico seqüencial da Bacia Norte Uruguai*. XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, Salvador, pp. 159-161.
- Hammer, Ø.; Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. 2001. Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1):9 pp.
- Hartmann, L.A.; Campal, N.; Santos, J.O.; Mac Naughton, N. J. y Schipilov, A. 2001. Archean crust in the Río de la Plata Craton, Uruguay: SHRIMP U-Pb reconnaissance geochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 14:557-570.
- Holz, M.; Soares, A.P. y Soares, P.C. 2008. Preservation of aeolian dunes by pahoehoe lava: an example from the Botucatú Formation (Early Cretaceous) in Mato Grosso do Sul state (Brasil), western margin of the Paraná Basin in South America. *Journal of South American Earth Sciences* 25:398-404.
- Ingesur, 2013. *Informe Pepe Núñez*. Proyecto "Prospección del subsuelo basada en métodos geofísicos en sectores continentales de potencial existencia de hidrocarburos". Fondo Sectorial de Energía – ANII. 59 pp. + anexos [Informe Interno ANCAP]
- Jerram, D. A.; Mountney, N.; Holzförster, F. y Stollhofen, H. 1999. Stratigraphic relation in the Etendeka Group in the Huab Basin, NO Namibia: understanding the onset of flood volcanism. *Journal of Geodynamics* 28:393-418.
- Jerram, D. A.; Mountney, N.; Howell, J.; Stollhofen, H. y Long, D. 2000. Death of a sand sea: an active aeolian erg systematically buried by the Etendeka Flood Basalts of NO Namibia. *Journal of the Geological Society* 157:513-516.

- Jerram, D. A. y Stollhofen, H. 2002. Lava–sediment interaction in desert settings; are all peperite like textures the result of magma–water interaction? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 114:231-249.
- Kearey, P.; Brook, M. y Hill, I. 2002. *An introduction to geophysical exploration*. 3° ed., Blackwell Science, x + 262 pp.
- Larriestra Geotecnologías. 2011. *Geoquímica Superficial. Tacuarembó, Pepe Núñez y Belén-Salto. Cuenca Noroeste. República Oriental del Uruguay, ANCAP. Informe Final*. 32 pp. [Informe Interno ANCAP]
- Larriestra Geotecnologías. 2012. *Log geoquímico de pozo (log XRF). Pozo Pepe Núñez Es-1. Informe Final*. 13 pp. [Informe Interno ANCAP]
- López, L. 2013. *Espectrometría de rayos gamma*. Taller sobre exploración y minería del uranio: punto inicial del ciclo del combustible nuclear. MIEM-CNEA. 15 al 18 de octubre de 2013, Montevideo.
- Luchetti, A.C.F.; Nardy, A.J.R.; Machado, F.B.; Madeira, J.E.O. y Arnosio, J.M. 2014. New insights on the occurrence of peperites and sedimentary deposits within the silicic volcanic sequences of the Paraná Magmatic Province, Brazil. *Solid Earth* 5:121-130.
- Machado, F. B.; Nardy, A. J. R.; Rocha, E. R. V., Jr.; Marques, L. S.; de Oliveira, M. A. F. 2009. Geología e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. *Geociências* 28(4):523-540.
- Mallmann, G.; Chemale Jr., E.; Avila, N.; Kawashita, K. y Armstrong, R.A. 2007. Isotope geochemistry of the Nico Perez Terrane, Rio de la Plata Craton, Uruguay. *Gondwana Research* 12:489-508.
- Marques-Toigo, M. 1970. *Anabaculites* nov. gen., a new miospore genus from San Gregorio Formation of Uruguay. *Ameghiniana* 7(1):79-82.
- Marques-Toigo, M. 1973a. *Estudo palinológico de concreções calcárias da Formação San Gregorio, NE da República Oriental del Uruguai – Bacia do Paraná*. Dissertação de Mestrado (inédito), Porto Alegre, UFRGS, 109 pp.
- Marques-Toigo, M. 1973b. Ammonoids x pollen and the Carboniferous or Permian age of San Gregorio Formation of Uruguay, Parana Basin. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 44 (supl.):237-241.
- Marques-Toigo, M. 1974. Some new species of spores and pollens of Lower Permian age from the San Gregorio Formation in Uruguay. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 46(3/4):601-616.

- Martínez, S. y Figueiras, A. 1991. Two new species of Mesozoic *Diplodon* (Bivalvia: Hyriidae: Hyriinae) from Uruguay. *Walkerana* 5: 217-223.
- Masquelin, H. 2006. El Escudo Uruguayo. Pp. 37-106 en: Veroslavsky, G.; Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Paleozoico*. DIRAC, Montevideo.
- McCarthy, K.; Rojas, K.; Niemann, M.; Palmowski, D.; Peters, K. y Stankiewicz. 2011. La geoquímica básica del petróleo para la evaluación de las rocas generadoras. *Oilfield Review* 23(2):36-47.
- Milani, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-occidental. 1997. 2 v. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- Milani, E.J. 2004. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Mantesso-Neto, V. et al. (ed.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, pp. 266-279, São Paulo, Beca.
- Milani, E.; de Melo, J.H.E.G.; de Souza, P.A.; Fernandes, L.A. y França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15(2):265-297.
- Milani, E.J. y Zalán, P.V. 1998. An outline of the geology and petroleum Systems of the Paleozoic interior basins of South America. *Episodes* 22(3):199-205.
- Martínez, S.; Figueiras, A. y Da Silva, J. 1993. A new Unionoidea (Mollusca, Bivalvia) from the Tacuarembó Formation (Upper Triassic-Upper Jurassic), Uruguay. *Journal of Paleontology* 67: 962-965.
- Mones, Á. 1980. *Nuevos elementos de la paleoherpetofauna del Uruguay (Crocodilia y Dinosauria)*. II Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía y I Congreso Latinoamericano de Paleontología, Buenos Aires, Actas (1): 265-277.
- Núñez-Betelu, L. y Baceta, J.I. 1994. Basics and Application of Rock-Eval/TOC Pyrolysis: an Example from the Uppermost Paleocene/Lowermost Eocene in the Basque Basin, Western Pyrenees. *Munibe Ciencias Naturales* 46:43-62.
- Oleaga, A. 2002. *Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 119 pp.

- Oyhantçabal, P.; Siegesmund, S. y Wemmer, K. 2011. The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. *International Journal of Earth Sciences* 100:201-220.
- Palacky, G.J. 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. Pp. 53-129 en: Nabighian, M. N. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, I.
- Peate, D.W. 1997. The Paraná–Etendeka province. Pp. 217-245 en: Mahoney, J.J. y Coffin, M.F. (eds.): *Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism*. Geophysical Monograph 100.
- Perea, D., Soto, M., Veroslavsky, G., Martínez, S. y Ubilla, M. 2009. A Late Jurassic assemblage in Gondwana: biostratigraphy and correlations of Tacuarembó Formation, Paraná Basin, Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences* 28(2):168-179.
- Perea, D; Ubilla, M. y Rojas, A. 2003. First report of theropods from the Tacuarembó Formation (Late Jurassic-Early Cretaceous), Uruguay. *Alcheringa* 27(2): 79-83.
- Perea, D.; Ubilla, M.; Rojas, A. y Goso, C. 2001. The West Gondwanan occurrence of the hybodontid shark *Priohybodus* and the Late Jurassic-Early Cretaceous age of Tacuarembó Formation, Uruguay. *Palaeontology* 44: 1227-1235.
- Peters, E. y Cassa, R. 1994. *Applied Source Rock Geochemistry*. Pp. 93-120 in: Magoon, L.B. y Dow, O.G. (eds.), *The Petroleum System-from Source to Trap*. AAPG Memory nº 60.
- Petry, K.; Jerram, D.A.; Almeida, P. y Zerfass, H. 2006. Volcanicsedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: examples of dynamic lava–sediment interactions in an arid setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159:313-325.
- Piñeiro, G.; Marsicano, C.A. y Damiani, R. 2007a. Mandibles of mastodontosaurid temnospondyls from the Upper Permian–Lower Triassic of Uruguay. *Acta Palaeontologica Polonica* 52(4):695–703.
- Piñeiro, G.; Marsicano, C.; Goso, C. y Morosi, E. 2007b. Temnospondyl diversity of the Permian-Triassic Colonia Orozco Local Fauna (Buena Vista Formation) of Uruguay. *Revista Brasileira de Paleontologia* 10(3):169-180.
- Piñeiro, G.; Marsicano, C. y Lorenzo, N. 2007c. A new temnospondyl from the

- Permo.-Triassic Buena Vista Formation of Uruguay. *Palaeontology* 50(3):1-14.
- Piñeiro, G.; Ramos, A. y Marsicano, C. 2012. A rhinesuchid-like temnospondyl from the Permo-Triassic of Uruguay. *Comptes Rendus Palevol* 11:65-78.
- Piñeiro, G., Verde, M.; Ubilla, M. y Ferigolo, G. 2003. First basal synapsids ("pelycosaurs") from the Upper Permian-?Lower Triassic of Uruguay, South America. *Journal of Paleontology* 77(2):389-392.
- Preciozzi, F.; Spoturno, J.; Heinzen, O.; y Rossi, P. 1985. *Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000*. DINAMIGE (MIEM), pp. 90, 1 mapa.
- Renne, P.R.; Ernesto, M.; Pacca, I.G.; Coe, R.S.; Glen, J.M.; Prevot, M. y Perrin, M., 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science* 258:975-979.
- Scherer, C.M. 2002. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Parana' Basin, southern Brazil. *Sedimentology* 49:97-116.
- Shen, Y.B.; Gallego, O.F. y Martínez, S. 2004. The conchostracan subgenus *Ortheastheria* (*Migransia*) from the Tacuarembó Formation (Late Jurassic-?Early Cretaceous, Uruguay) with notes on its geological age. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 631-638.
- Skilling, I.P., White, J.D.L y McPhie, J. 2002. Peperite: a review of magma-sediment mingling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 114:1-17.
- Soares, P.C. 1975. Divisão estratiográfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geologia* 5(4):229-251.
- Soto, M. 2010. Estudio de los dientes de terópodos (Dinosauria, Saurischia) de la Formación Tacuarembó, Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Uruguay). Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, PEDECIBA, 275 pp. [inédito]
- Soto, M. y Perea, D. 2008. A ceratosaurid (Dinosauria, Theropoda) from the Late Jurassic-Early Cretaceous of Uruguay. *Journal of Vertebrate Paleontology* 28(2):439-444.
- Soto, M. y Perea, D. 2010. Late Jurassic lungfishes (Dipnoi) from Uruguay, with comments on the systematics of Gondwanan ceratodontiforms. *Journal of Vertebrate Paleontology* 30(4):1049-1058.

- Soto, M.; de Carvalho, M.S.S.; Maisey, J. G.; Perea, D. y Da Silva, J. 2012a. Coelacanth remains from the Late Jurassic–?earliest Cretaceous of Uruguay: the southernmost occurrence of the Mawsoniidae. *Journal of Vertebrate Paleontology* 32(3):530-537.
- Soto, M.; Perea, D. y Toriño, P. 2012b. New remains of *Priohybodus arambourgi* (Hybodontiformes: Hybodontidae) from the Late Jurassic–?earliest Cretaceous of Uruguay. *Cretaceous Research* 35:118-123.
- Stewart, K.; Turner, S.; Kelley, S.; Hawkesworth, C.; Kirstein, L. y Mantovani, M. 1996. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters* 143:95-109.
- Thiede, D. S. y Vasconcelos, P. M. 2010. Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. *Geology* 38(8):747-750.
- Turner, S.; Regelous, M.; Kelley, S.; Hawkesworth, C. y Mantovani, M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 121:333-348.
- Veroslavsky, G. 1994. *Análise faciológica e estratigráfica do Devoniano da borda sul da bacia do Paraná, Uruguai*. Dissertação de Mestrado. UNESP, Rio Claro, 208 pp. [inérito]
- Veroslavsky, G., Daners, G. y de Santa Ana, H. 2003. Rocas sedimentarias pérmicas en la plataforma continental uruguaya: el *prerift* de la Cuenca de Punta del Este. *Geogaceta* 34:203-206.
- Veroslavsky, G., Fúlfaro, V. y de Santa Ana, H. 2006. El Devónico en Uruguay: estratigrafía, correlación geológica y recursos minerales. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico*. DIRAC-Facultad de Ciencias, Montevideo, pp. 107- 132.
- Veroslavsky, G.; Masquelín, H. y Soto, M. 2012. *Mapa geológico de la región de Pepe Núñez, Departamento de Salto*. Asesoría técnica de Facultad de Ciencias para la Gerencia de Exploración y Producción de ANCAP. Informe Final. 49 pp. + anexos [Informe Interno ANCAP]
- Vozoff, K. 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics* 37, 98 – 141.

- Waichel, B. L.; Lima, E. F.; Lubachesky, R. y Sommer, C. A. 2006. Flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. *Bulletin of Volcanology* 68:99-610.
- Waichel, B. L.; Lima, E. F.; Sommer, C. A. y Lubachesky, R. 2007. Peperite formed by lava flows over sediments: An example from the central Paraná Continental Flood Basalts, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159:343-354.
- Waichel, B. L.; Lima, E. F.; Viana, A. R.; Scherer, C. M.; Bueno, G. V. y Dutra, G. 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 215-216:74-82.
- Waichel, B.L.; Scherer, C.M. y Frank, H.T. 2008. Basaltic lava flows covering active aeolian dunes in the Paraná Basin in southern Brazil: Features and emplacement aspects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 171:59-72.
- Walther, K. 1933. Restos de un Pez Ganoide de gran tamaño, proveniente del Neogondwana Uruguayo. Instituto de Geología y Perforaciones, *Boletín* 19: 65-72.
- White, J. D. L.; McPhie, J. y Skilling, I. 2000. Peperite: a useful genetic term. *Bulletin of Volcanology* 62:65-66.

ANEXO A
Fotografías de afloramientos.

A



B



Figura A1. Afloramiento de areniscas en P2. **A**, vista general mostrando de base a tope areniscas, areniscas silicificadas (cornisa) y basaltos. Nótese la mayor expresión de las primeras en afloramientos, **B**, detalle de la arenisca de la base de la secuencia ilustrada en A. Se trata de una arenisca fina, rojiza, cuarzosa, con estratificación cruzada.



Figura A2. Afloramiento de areniscas en P114. Se trata de una arenisca fina, anaranjada, cuarzosa, con estratificación cruzada Fotografía gentileza de Bruno Conti.



Figura A3. Plano de diaclasa en arenisca, que corta planos de estratificación (ver flechas). Nótese el contraste entre arenisca silicificada (gris) y arenisca no silicificada (roja).



Figura A4. Cornisa de arenisca basculada unos 15° al SE, en P71.

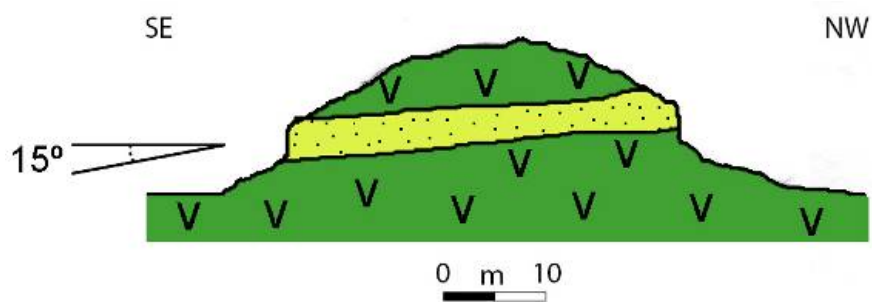


Figura A5. Cornisa de arenisca basculada unos 15° al SE (su continuación en el fondo está indicada por la flecha roja), en P76. Representación esquemática modificada de Veroslavsky *et al.* (2012).



Figura A6. Afloramiento de areniscas y basaltos (infra y suprayacentes) en P12. Nótese el cambio de pendiente y vegetación al pasar de las areniscas a los basaltos del cerro.



Figura A7. Ejemplos de fragmentos de arenisca silicificada trabajados por charrúas.



Figura A8. Ejemplo de arenisca recortada por venillas de cuarzo de origen hidrotermal.



Figura A9. Afloramiento de arenisca con dos familias de diaclasas subortogonales (N10 y N90).



Figura A10. Areniscas afectadas por disolución en P184.



Figura A11. Óxidos (posiblemente de manganeso) en afloramientos de areniscas.



Figura A12. Afloramiento de basalto masivo en P16.



Figura A13. Detalle de basalto masivo en P16.



Figura A14. Extenso afloramiento de basalto masivo en P124, en el lecho del Arroyo Sopas.

A



B



C



Figura A15. **A**, vista general de basaltos suprayaciendo areniscas en P3. Nótese el cambio de pendiente y exposición rocosa al pasar de areniscas a basaltos. **B**, afloramiento de basalto masivo en la cima del cerro. **C**, foto de detalle del basalto gris masivop.

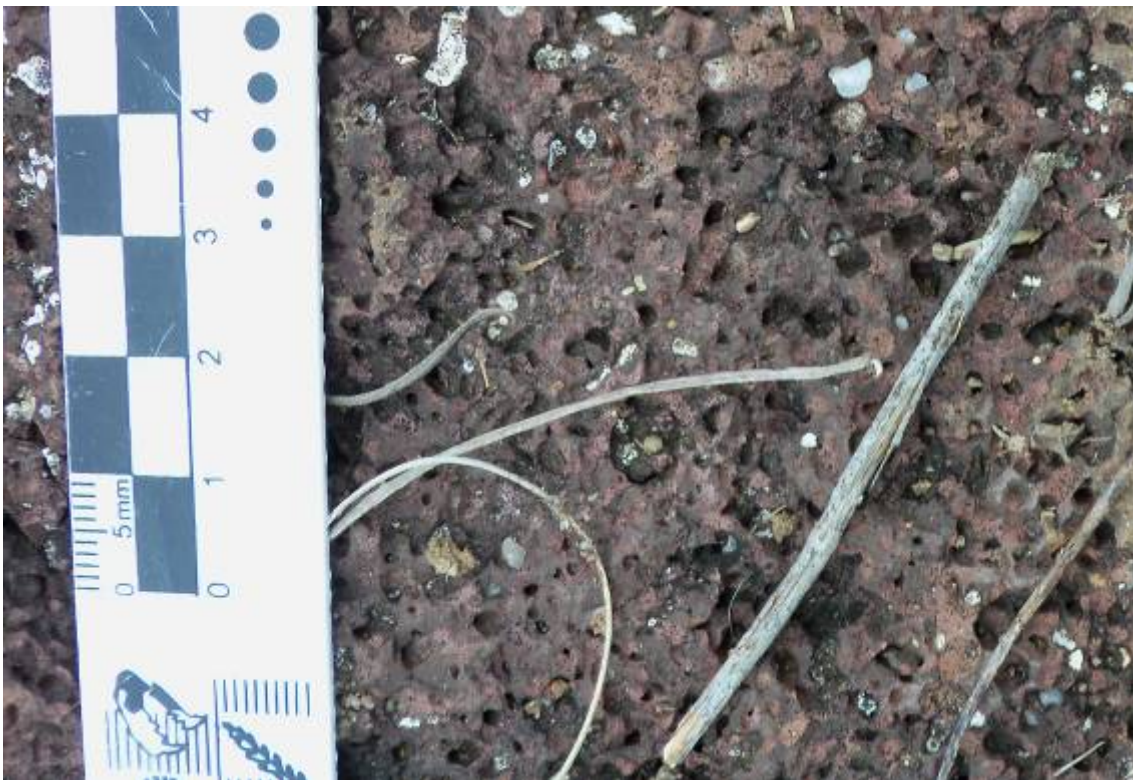


Figura A16. Afloramiento y detalle de basalto amigdaloides, en el km 160 de la Ruta 31 (fuera del área).

A



B



Figura A17. Ejemplos de diaclasas en afloramientos de basalto. **A**, varias familias oblicuas de diaclasas . **B**, dos familias de diaclasas.



Figura A18. Desmonte en P66 con contacto arenisca-basalto: arenisca en la base, basalto alterado en el medio (coloración violácea) y basalto lajoso en el tope.



Figura A19. Ejemplo de disyunción esferoidal en afloramiento de basalto, P27.



Figura A20. Ejemplo de disyunción columnar en el basalto, P33.



Figura A21. Cerro Bonito, P32.



Figura A22. Cerro de la Virgen, P14.



Figura A23. Afloramiento de basaltos "B" con disyunción columnar en Cerro de la Virgen, P14. Nótese el basculamiento de los prismas.

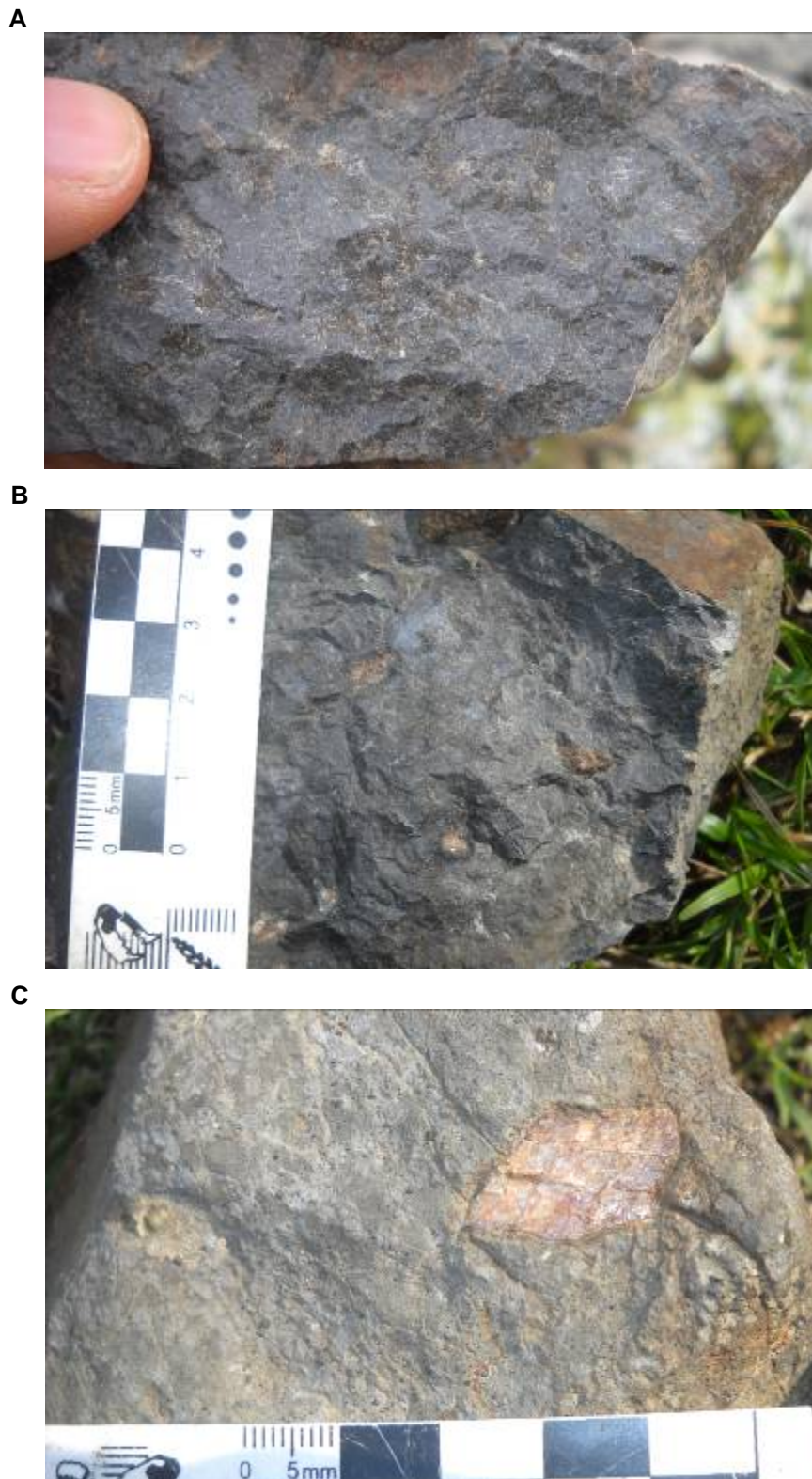


Figura A24. Detalles de basaltos "B". **A**, Cerro de la Virgen. **B-C**, Cerro del Charrúa. Nótese el color gris oscuro a negro y la textura predominantemente afanítica. En C se aprecia además un fenocristal de 2 cm de feldespato.



Figura A25. Círculos de piedra construidos por los charrúas empleando fragmentos de basalto con disyunción columnar. Al fondo, afloramientos de areniscas. Cerro del Charrúa, P253.



Figura A26. Afloramiento de brechas volcánicas en P156.



Figura A27. Afloramiento de brechas volcánicas en P157.



Figura A28. Detalles de brechas volcánicas en P33. Nótense clastos angulosos de basalto amigdaloides en una matriz de arenisca rojiza.



Figura A29. Detalle de brechas volcánicas en P34. Nótense clastos angulosos de basalto vacuolar en una matriz de arenisca amarillenta.



Figura A30. Vista general de afloramiento de areniscas con clastos de basalto en P123, cercano a afloramiento de basaltos.



Figura A31. Afloramiento de areniscas con clastos de basalto en P123.



Figura A32. Detalle de areniscas con clastos de basalto en P123.



Figura A33. Detalle de areniscas con clastos de basalto en P123.



Figura A34. Areniscas con clastos (mayormente erosionados) de basalto en P125.



Figura A35. Detalle de areniscas con clastos de basalto (algunos de ellos erosionados) en P125.



Figura A36. Areniscas con estructuras de flujo en P125.



Figura A37. Ignimbrita (caída) con estructura de flujo en P55.



Figura A38. Conglomerados en la Cañada del Charrúa (P113) apoyados en discordancia sobre la Formación Tacuarembó

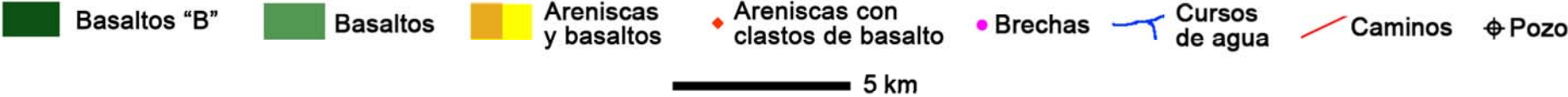
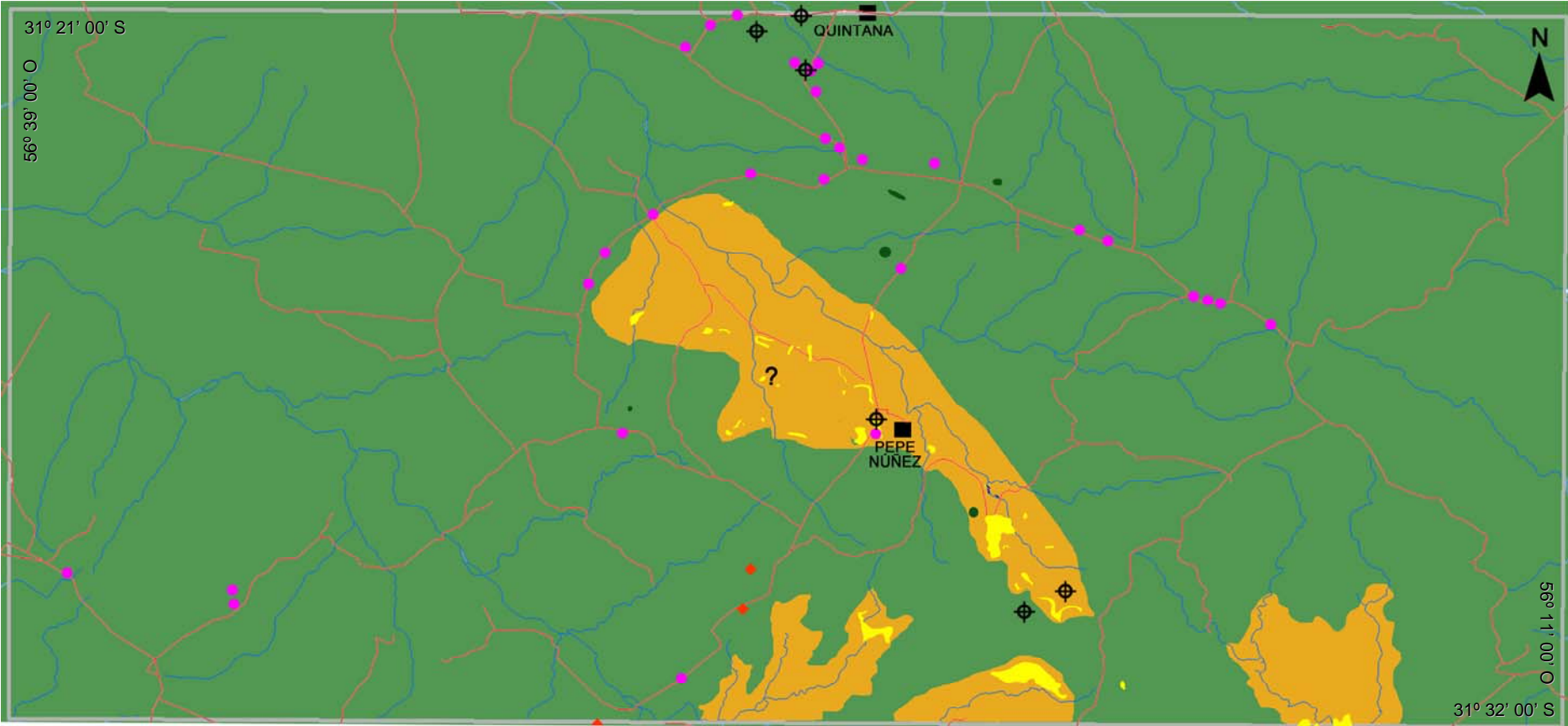


Figura A39. Conglomerados en la Cañada del Charrúa (P113) apoyados en discordancia sobre la Formación Tacuarembó.

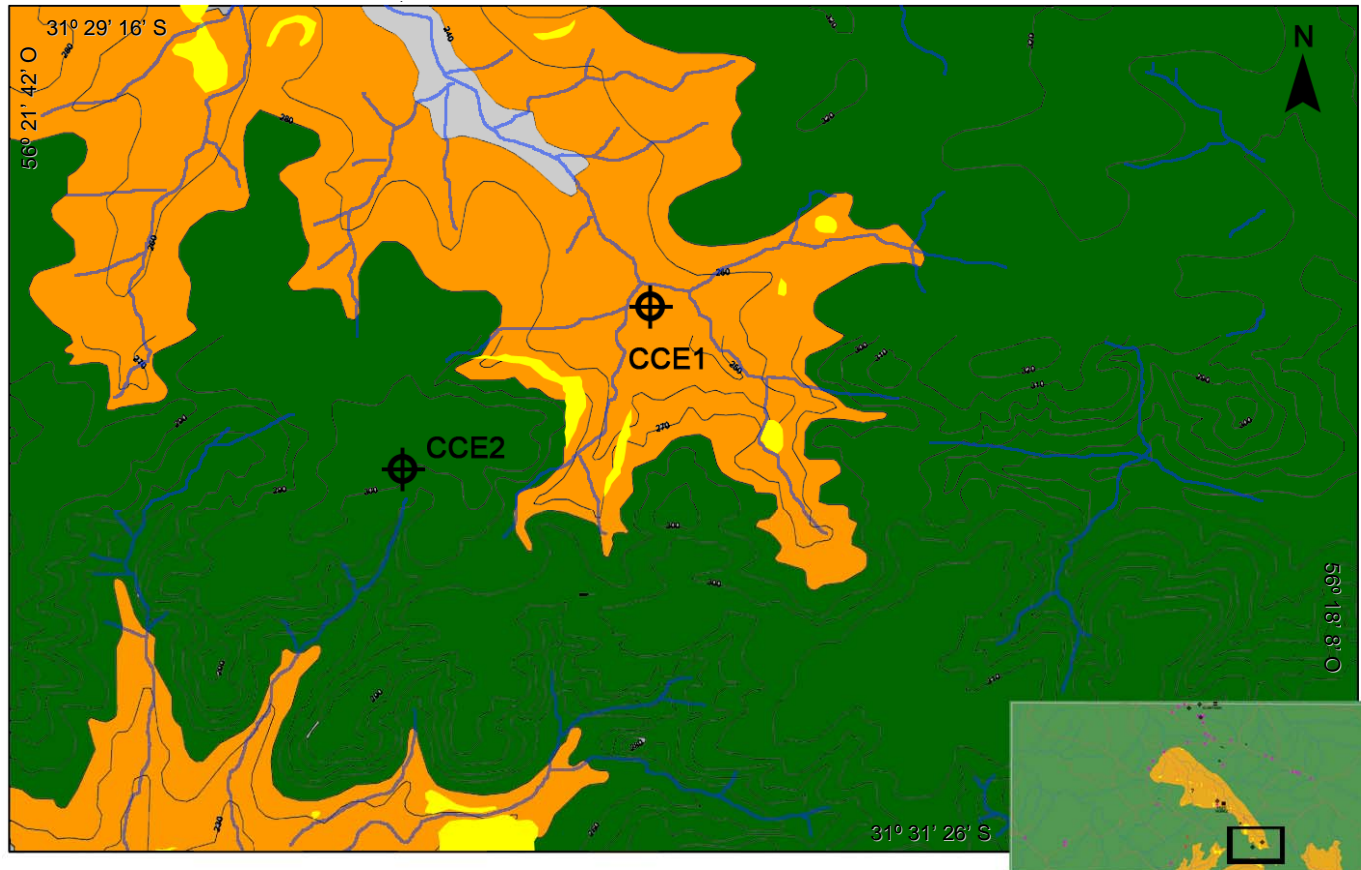


Figura A40. Detalle de los conglomerados y areniscas gravillosas De la Cañada del Charrúa (P113).

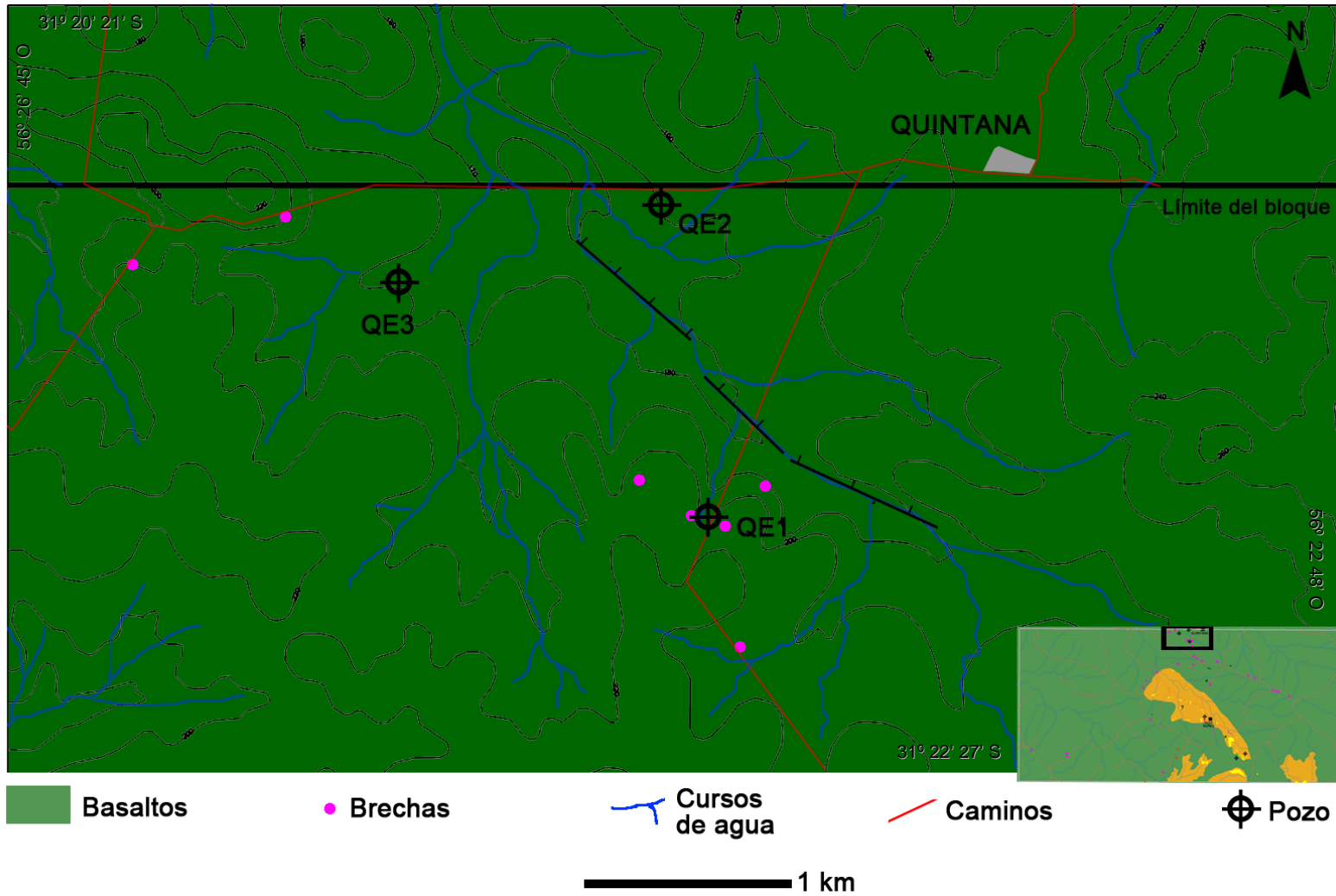
Anexo B
Mapa geológico a escala 1:50.000 del bloque Pepe Núñez



Anexo C
Mapa geológico de detalle del área Cañada del Charrúa.



Anexo D
Mapa geológico de detalle del área Quintana.



ANEXO E
Lista de puntos GPS relevados en el campo.

Nº	X_UTM21	Y_UTM21	Z	Litología
1	557879	6519792	233	Arenisca
2	557831	6519993	227	Arenisca
3	557627	6520085	286	Basalto
4	557832	6520226	253	Arenisca
5	557764	6520396	255	Arenisca
6	557862	6520615	245	Basalto
7	557885	6520655	246	Basalto
8	557840	6520945	223	Basalto
9	557501	6521075	234	Basalto
10	557188	6520769	224	Arenisca
11	557164	6520715	218	Basalto
12	557191	6520670	238	Basalto
13	557026	6520560	237	Arenisca
14	557034	6520536	238	Arenisca
15	557025	6520487	237	Arenisca
17	557360	6520774		Arenisca
18	557724	6520734	259	Arenisca
19	558842	6519202	241	Arenisca
20	558950	6519580	231	Arenisca
21	558863	6519676		Arenisca
22	558065	6520148		Arenisca
23	558025	6520278		Basalto vacuolar
24	557881	6520305		Basalto vacuolar
25	557719	6521712		Basalto
26	557753	6522047		Basalto
27	557806	6522822		Arenisca/basalto
28	557842	6522949		Arenisca/basalto
29	557853	6522966		Arenisca/basalto
30	558052	6523418		Basalto
31	558630	6524121		Brecha
32	558363	6524656		Basalto B
33	563768	6525182		Brecha/basalto
34	564603	6524855		Brecha
35	564579	6524892		Brecha/basalto
36	567038	6523280		Brecha/basalto
37	567459	6523191		Brecha
38	569264	6522482		Brecha
39	570204	6511108		Basalto
40	577906	6511524		Arenisca/basalto
41	589597	6502975		Arenisca
42	589560	6502069		Basaltos
43	589749	6501787		Arenisca
44	590132	6501577		Arenisca
45	591493	6499112		Arenisca
46	591840	6498653		Arenisca
47	592627	6497920		Arenisca
48	593084	6497561		Arenisca
49	557715	6519223		Arenisca/basalto
50	557578	6519170	216	Arenisca/basalto
51	557606	6519170		Arenisca
52	557607	6519008		Basalto vacuolar
53	557520	6519068	242	Basalto
54	557460	6519060	247	Arenisca
55	557350	6519020	272	Basalto
56	558313	6519656		Basalto
57	557972	6519575	235	Arenisca

58	558981	6519015		Arenisca/basalto
59	559419	6518749	233	Basalto
60	559592	6518826		Arenisca
61	559535	6518698		Basalto
62	557443	6518502		Basalto
63	557512	6518490		Basalto
64	557452	6518812		Arenisca
65	557420	6518817		Arenisca/basalto
66	558021	6520228		Arenisca/basalto vacuolar
69	558836	6519415		Arenisca/basalto
70	556972	6521247		Arenisca
71	560412	6518805		Arenisca
72	560451	6518824		Arenisca
73	560978	6518646		Basalto
74	561189	6518692		Basalto
75	559613	6518825		Arenisca
76	559439	6518975		Arenisca
77	559599	6519059		Arenisca/basalto
78	558417	6526323		Basalto B
79	558088	6519740	227	Arenisca
80	558101	6519759	226	Arenisca
81	558100	6519785	226	Arenisca
82	558117	6519787	230	Arenisca
83	558100	6519698	231	Arenisca
84	558047	6519605	230	Arenisca
85	558028	6519436	227	Basalto
86	558044	6519384	229	Basalto
87	558099	6519353	233	Basalto
88	558127	6519383	236	Basalto
89	558131	6519391	236	Arenisca
90	558208	6519391	240	Arenisca
91	558264	6519251	256	Basalto
92	558259	6519244	257	Basalto
93	558253	6519234	264	Basalto
94	558227	6519221	264	Basalto
95	558230	6519190	268	Basalto
96	558294	6519150	263	Basalto
97	558254	6519141	262	Basalto
98	558203	6519176	261	Basalto
99	558179	6519230	263	Basalto
100	558144	6519236	248	Basalto
101	558033	6519837	222	Arenisca
102	558002	6519824	221	Arenisca
103	557974	6519802	222	Arenisca
103	557981	6519787	221	Arenisca
103	557981	6519778	220	Arenisca
103	557976	6519785	221	Arenisca
104	558021	6519752	225	Arenisca
104	557997	6519750	224	Arenisca
105	557925	6519736	218	Arenisca
105	557930	6519657	220	Arenisca
107	558114	6519220	237	Basalto
108	557983	6519220	257	Basalto
109	557906	6519322	250	Brecha
111	557921	6519338	250	Brecha
112	557855	6519549	226	Arenisca
113	561194	6517729	214	Conglomerado
113	561184	6517808	218	Conglomerado
113	561120	6517881	217	Conglomerado
113	561194	6517715	217	Conglomerado
113	561225	6517610	219	Conglomerado

114	561094	6517904	216	Arenisca
115	564547	6524896	295	Brecha
116	570112	6520316	324	Basalto
117	570557	6519926	320	Basalto
118	574068	6517503	320	Basalto
119	580610	6510510	283	Basalto
120	548398	6504560	283	Brecha
120	548313	6504583	292	Basalto
121	547155	6507153	242	Basalto
122	547840	6508531	199	Basalto
123	549925	6511043	198	Arenisca volcánica
123	549988	6511022	197	Basalto
124	551053	6511681	175	Basalto
125	552363	6512390	206	Brecha
126	552962	6512819	222	Basalto
127	553567	6514134	228	Basalto
128	554154	6514424	241	Arenisca volcánica
129	555492	6516031	267	Basalto
130	557052	6518319	262	Basalto
131	561792	6525921	280	Basalto/basalto vacuolar
132	562874	6525506	293	Basalto
133	565263	6524693	310	Basalto
134	567024	6523285	295	Brecha
135	567136	6523230	301	Basalto vacuolar
136	567387	6523188	317	Brecha
137	567791	6523128	333	Brecha
138	569206	6522530	315	Brecha
139	569443	6522339	322	Arenisca
140	569763	6522033	328	Basalto
141	570032	6520359	322	Basalto
142	567083	6517220	342	Basalto
143	565350	6516117	331	Basalto
144	564385	6513875	310	Basalto
145	564262	6512605	297	Basalto
146	563525	6511760	269	Arenisca
146	563529	6511714	271	Basalto
147	564127	6510128	273	Brecha
148	562067	6507259	236	Basalto
148	561993	6507119	227	Arenisca
148	562005	6507145	230	Basalto
149	554856	6515647	245	Basalto
150	554656	6515644	242	Basalto
151	554452	6515688	238	Basalto
152	554369	6515522	237	Arenisca volcánica
153	553367	6526414	208	Arenisca
154	566107	6513717	224	Basalto
155	539034	6513866	216	Basalto
156	539662	6514857	218	Brecha
157	539681	6514510	218	Brecha
158	539881	6514588	225	Basalto
159	540365	6515402	227	Basalto
159	540371	6515386	222	Brecha
160	541161	6515744	198	Basalto
161	542500	6516302	159	Basalto
162	534963	6515317	251	Brecha
163	522546	6523225	193	Basalto vacuolar
164	522543	6523342	202	Brecha/basalto
165	571444	6519502	335	Basalto
166	572051	6518904	338	Basalto
167	573604	6517568	313	Basalto
168	573834	6517577	312	Basalto

169	575358	6516539	312	Basalto
170	575906	6514927	316	Basalto
171	575490	6514031	344	Basalto
172	575742	6512804	306	Basalto
173	578326	6511755	284	Basalto
174	580607	6510431	298	Basalto
174	580557	6510499	295	Brecha
174	580549	6510510	285	Basalto
175	555566	6526564	226	Basalto
176	554409	6526720	209	Basalto
177	554373	6526720	212	Basalto
178	554353	6526410	203	Arenisca
179	554281	6526262	201	Arenisca
180	554198	6526196	203	Arenisca
181	554239	6526114	192	Arenisca
182	554448	6526173	195	Arenisca
183	553935	6526058	200	Arenisca
184	553902	6525990	216	Arenisca
185	554272	6526399	208	Basalto
186	554487	6526324	203	Basalto
187	554477	6526191	195	Basalto
188	551554	6525627	190	Brecha
189	551193	6525412	176	Basalto
190	550186	6524537	236	Brecha
191	549754	6523655	237	Brecha/basalto
192	549489	6522698	247	Basalto vacuolar
193	549418	6521745	252	Basalto
194	550090	6520109	250	Basalto
195	550284	6520121	240	Basalto
196	550712	6520158	231	Basalto
197	550943	6520093	262	Basalto B
198	550702	6519356	274	Brecha
199	555661	6531247	175	Basalto
200	555533	6531407	170	Basalto
201	555511	6531512	175	Basalto
202	555656	6529960	207	Brecha
203	555954	6529781	216	Brecha
204	556278	6530163	185	Basalto
205	556331	6529926	222	Brecha
206	556478	6529949	196	Basalto
207	556098	6529726	214	Brecha
208	556237	6529119	209	Brecha
209	556782	6528260	239	Brecha
210	556789	6528276	242	Basalto
211	557549	6527103	264	Basalto
212	557567	6527162	252	Brecha
213	560452	6526831	262	Basalto
214	553970	6531297	203	Brecha
215	553212	6531047	211	Basalto
216	553207	6531056	216	Brecha
217	552703	6530247	218	Basalto
218	552472	6530360	221	Brecha
219	547297	6507269	223	Basalto
220	554145	6514501	245	Arenisca
221	555646	6515678	250	Basalto
222	555833	6515397	244	Basalto
223	556045	6515231	252	Arenisca volcánica
224	556024	6515244	250	Basalto
225	560782	6528203	253	Basalto
226	561160	6528390	290	Basalto/brecha
227	561153	6528376	297	Basalto

228	561227	6528267	266	Basalto
229	562565	6530610	229	Basalto
230	562787	6531054	191	Basalto
231	562220	6529904	240	Basalto/Brecha
232	559658	6537021	249	Brecha
233	559630	6527038	245	Brecha
234	559634	6526958	247	Basalto
235	559523	6526816	260	Basalto
236	556989	6527483	245	Brecha
237	556976	6527475	244	Basalto
238	556884	6527506	241	Brecha
239	556548	6527699	246	Brecha
240	551228	6538931	161	Conglomerado
241	551379	6538996	167	Arenisca
242	551872	6539217	176	Arenisca
243	552043	6539372	177	Arenisca
244	552169	6539459	174	Arenisca
245	551478	6539109	160	Arenisca
246	551466	6539083	165	Arenisca
247	549705	6540806	165	Basalto
248	561103	6517007	231	Arenisca
249	561200	6516987	241	Arenisca
250	561235	6516648	264	Arenisca
251	560640	6516603	251	Arenisca
252	560739	6516962	304	Basalto
253	560721	6517025	331	Basalto B
254	560869	6517139	279	Basalto
255	561016	6517164	242	Arenisca
256	556488	6526574	246	Basalto
257	556492	6526558	246	Brecha
258	555517	6526564	227	Basalto
259	554935	6526747	229	Basalto
260	554387	6526749	223	Brecha
261	549258	6526960	212	Basalto
262	548836	6527618	183	Basalto
263	564130	6514153	289	Basalto
264	563992	6514263	289	Basalto
265	563858	6514263	275	Arenisca
266	563858	6514063	271	Basalto
267	563890	6514049	276	Basalto
268	563812	6514467	260	Arenisca
284	567202	6518538	337	Basalto
285	566784	6518678	339	Basalto
286	566212	6518709	334	Basalto
287	565691	6518679	326	Basalto
288	564920	6518664	324	Basalto
289	564848	6519128	307	Basalto
290	564244	6519119	312	Basalto
291	563994	6519109	299	Basalto
292	563525	6519916	303	Basalto
293	562482	6518666	295	Basalto
294	561985	6518734	270	Basalto
295	561561	6518764	260	Basalto
296	565351	6525071	316	Basalto
297	565346	6525518	291	Basalto
298	565371	6526138	289	Basalto
299	565354	6526169	292	Basalto
300	565432	6526327	279	Basalto
301	565415	6526625	275	Basalto
302	565285	6526658	253	Basalto
303	565082	6526624	402	Basalto

304	564874	6526628	282	Basalto
305	568464	6504031	175	Basalto
306	568376	6504257	184	Basalto
307	568240	6504213	185	Arenisca volcánica
308	568105	6504200	210	Arenisca
309	569930	6506993	238	Arenisca
310	573077	6510114	239	Basalto
311	573737	6510547	237	Arenisca
312	574113	6511237	281	Basalto
313	574098	6511424	245	Basalto/conglomerado
314	574106	6511405	250	Basalto/conglomerado
315	575432	6511951	295	Basalto
316	563880	6514367	263	Arenisca
317	564320	6514106	298	Basalto
318	564647	6514564	316	Basalto
319	565102	6514816	313	Basalto
320	565186	6515310	320	Basalto
321	565104	6515766	329	Basalto
322	565440	6516141	329	Basalto
323	565979	6516384	324	Basalto
324	566416	6516333	330	Basalto
325	566673	6516649	322	Basalto
326	566788	6517070	329	Basalto
327	567187	6517383	332	Basalto
328	567479	6517698	335	Basalto
329	567845	6518000	335	Basalto
330	568171	6518422	330	Basalto
331	568476	6518683	332	Basalto
332	568905	6518899	329	Basalto
333	569431	6519166	322	Basalto
334	569877	6519292	329	Basalto
335	570250	6519499	335	Basalto
336	570715	6519769	335	Basalto
337	570715	6519769	335	Basalto
338	570357	6520098	329	Basalto
339	569942	6520506	307	Basalto
340	569812	6520824	319	Basalto
341	569688	6521369	320	Basalto
342	569807	6521802	330	Basalto
343	569647	6522143	314	Basalto
344	569295	6522472	306	Basalto
345	568923	6522739	303	Basalto
346	568060	6523166	316	Basalto
347	567546	6523157	318	Basalto
348	567077	6523243	283	Basalto
349	566785	6523584	283	Basalto
350	566449	6523858	301	Basalto
351	566039	6524239	302	Basalto
352	565685	6524539	301	Basalto
353	565272	6524678	304	Basalto
354	564798	6524808	304	Basalto
355	564352	6524938	276	Basalto
356	563812	6525170	267	Basalto
357	563466	6525299	285	Basalto
358	564362	6513214	313	Basalto
359	563867	6513486	304	Basalto
360	564442	6513674	309	Basalto
361	563467	6525299	285	Basalto
362	563014	6525465	284	Basalto
363	562588	6525623	280	Basalto
364	562116	6525740	269	Basalto

365	561769	6525993	266	Basalto
366	560707	6526527	268	Basalto
367	560159	6526606	262	Basalto
368	559554	6526744	264	Basalto
369	559019	6526801	267	Basalto
370	558526	6526860	271	Basalto
371	558055	6526893	264	Basalto
372	557563	6526963	263	Basalto
373	557145	6527085	262	Basalto
374	556510	6528692	209	Basalto
375	556190	6529130	206	Basalto
376	556026	6529739	204	Basalto/brecha
377	556315	6530283	184	Basalto
378	556525	6530738	190	Basalto
379	562925	6514982	252	Basalto
380	562648	6515279	261	Brecha
381	562573	6515699	232	Basalto
382	562124	6515922	248	Arenisca
383	561824	6516310	243	Basalto
384	561347	6516597	255	Arenisca
385	561155	6516989	232	Arenisca
386	561199	6517731	212	Arenisca/conglomerado
387	560861	6518102	222	Basalto
388	560504	6518381	210	Basalto
389	560520	6518618	207	Basalto
390	561043	6518729	214	Basalto
391	561519	6518760	239	Basalto
392	561997	6518734	258	Basalto
393	562403	6518751	265	Basalto
394	562753	6518563	286	Brecha
395	563134	6518787	296	Basalto
396	563594	6519042	302	Basalto
397	564003	6519112	291	Basalto
398	564457	6519129	304	Basalto
399	564911	6519081	299	Basalto
400	564990	6518669	316	Basalto
401	565427	6518674	321	Basalto
402	566213	6518714	325	Basalto
403	566957	6518614	325	Basalto
404	567688	6518386	331	Basalto
405	563277	6514320	272	Basalto
406	562880	6514078	267	Basalto
407	562277	6514035	287	Basalto
408	561962	6514153	304	Basalto
409	562305	6514430	305	Basalto
410	562803	6514554	276	Basalto
411	563039	6513686	292	Basalto
412	563372	6513531	301	Basalto
413	563959	6513262	310	Basalto
414	564432	6512647	306	Basalto
415	564236	6511902	287	Basalto
416	563974	6511488	297	Basalto
417	563662	6511113	300	Basalto
418	563884	6510585	297	Basalto
419	564120	6510083	265	Basalto
420	564045	6509670	264	Basalto
421	563497	6509456	255	Basalto
422	562963	6509100	256	Basalto
423	562379	6508887	260	Basalto
424	561922	6508793	257	Basalto
425	561487	6508708	259	Basalto

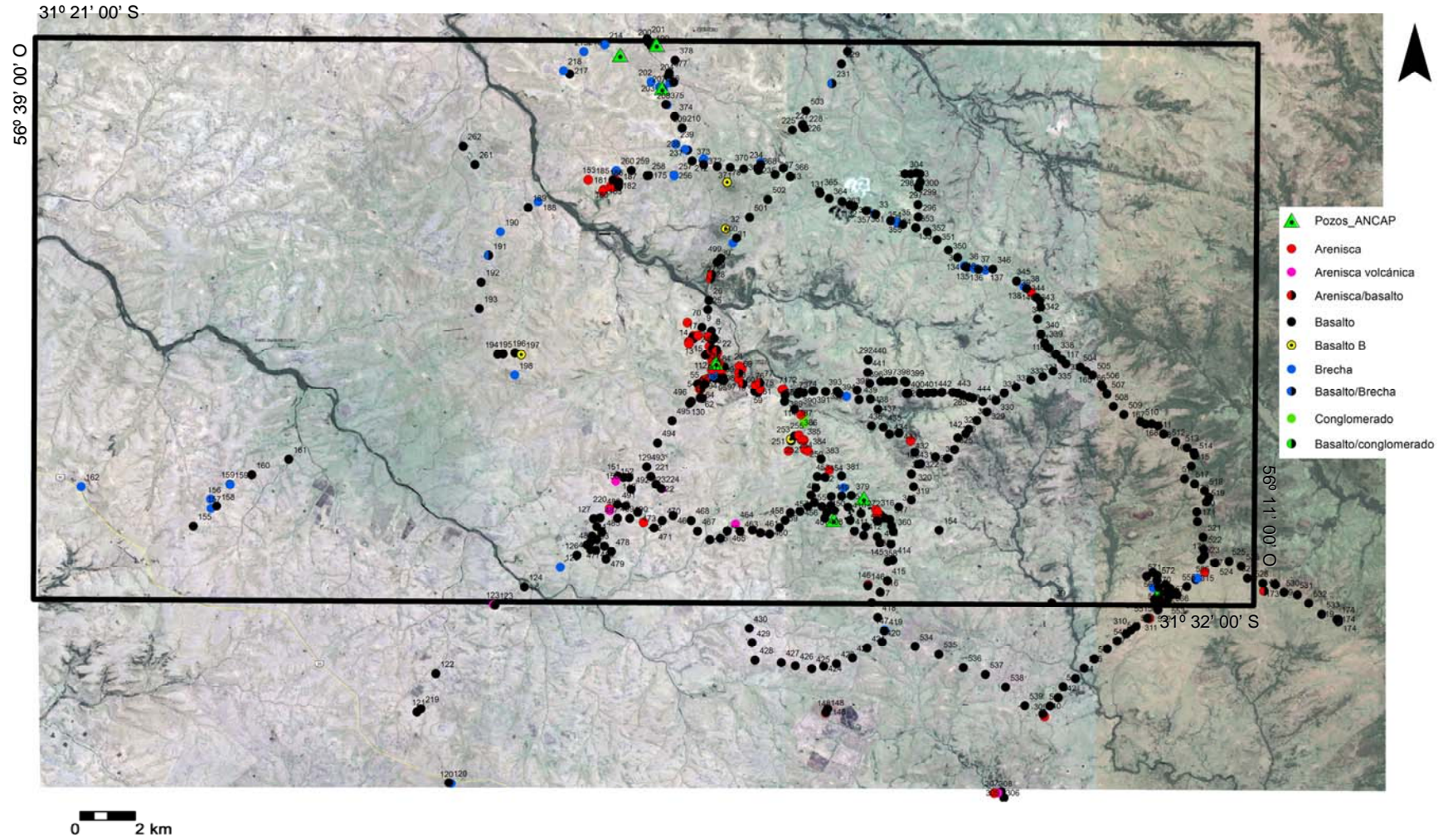
426	560888	6508815	252	Basalto
427	560384	6508929	249	Basalto
428	559427	6509017	243	Basalto
429	559323	6509649	232	Basalto
430	559221	6510188	214	Basalto
431	565231	6516556	314	Basalto
432	565077	6516971	283	Arenisca
433	564657	6517236	264	Basalto
434	564307	6517203	243	Basalto
435	564087	6517451	241	Basalto
436	563655	6517502	233	Basalto
437	563893	6518104	236	Basalto
438	563616	6518466	249	Basalto
439	563207	6518452	279	Basalto
440	563541	6519897	290	Basalto
441	563521	6519449	300	Basalto
442	565913	6518692	319	Basalto
443	566609	6518704	328	Basalto
444	567337	6518504	327	Basalto
445	562573	6514967	272	Basalto
446	562179	6514617	298	Basalto
447	561855	6514578	297	Basalto
448	561580	6514724	300	Basalto
449	562194	6514949	296	Basalto
450	562037	6514352	304	Basalto
451	561454	6515001	292	Basalto
452	561636	6515269	287	Basalto
453	561691	6515676	283	Basalto
454	561971	6515650	270	Basalto
455	561351	6514581	293	Basalto
456	561057	6514392	295	Basalto
457	560710	6514345	296	Basalto
458	560518	6514079	293	Basalto
459	560315	6513814	289	Basalto
460	559958	6513585	284	Basalto
461	559626	6513622	279	Basalto
462	559331	6513727	243	Basalto
463	558885	6513680	243	Basalto
464	558720	6513939	221	Arenisca volcánica
465	558423	6513691	220	Basalto
466	557789	6513381	209	Basalto
467	557341	6513686	223	Basalto
468	557111	6514068	263	Basalto
469	556453	6514242	265	Basalto
470	556061	6514064	261	Basalto
471	555760	6513801	223	Basalto
472	555378	6514002	207	Arenisca
473	555173	6514366	205	Basalto
474	554737	6514597	226	Basalto
475	558173	6513430	214	Basalto
476	553682	6513386	200	Basalto
477	553957	6513139	198	Basalto
478	554213	6512951	205	Basalto
479	554021	6512682	202	Basalto
480	553645	6512997	199	Basalto
481	553457	6513017	213	Basalto
482	553319	6513186	218	Basalto
483	553462	6513307	218	Basalto
484	553512	6513505	216	Basalto
485	553867	6513643	211	Basalto
486	553685	6513846	207	Basalto

487	553803	6514160	230	Basalto
488	554150	6514429	232	Arenisca volcánica
489	554438	6514152	237	Basalto
490	554876	6514140	224	Basalto
491	554436	6514650	240	Basalto
492	554931	6515219	243	Basalto
493	555497	6516031	262	Basalto
494	555890	6516889	260	Basalto
495	556417	6517687	253	Basalto
496	557118	6518382	259	Basalto
497	557583	6519005	239	Basalto
498	557941	6520679	226	Basalto
499	558188	6523558	208	Basalto
500	558762	6524308	232	Basalto
501	559233	6525061	224	Basalto
502	559895	6525704	256	Basalto
503	561277	6528900	249	Basalto
504	571239	6519642	332	Basalto
505	571677	6519352	331	Basalto
506	571995	6518989	334	Basalto
507	572204	6518647	332	Basalto
508	572435	6518199	323	Basalto
509	572819	6517909	323	Basalto
510	573423	6517659	307	Basalto
511	574257	6517210	316	Basalto
512	574698	6516928	315	Basalto
513	575111	6516716	310	Basalto
514	575381	6516447	307	Basalto
515	575264	6516055	305	Basalto
516	575023	6515599	313	Basalto
517	575391	6515412	313	Basalto
518	575750	6515161	314	Basalto
519	575818	6514744	315	Basalto
520	575465	6514373	303	Basalto
521	575695	6513468	309	Basalto
522	575712	6513041	303	Basalto
523	575633	6512667	299	Basalto
524	576130	6512541	301	Basalto
525	576638	6512597	295	Basalto
526	577080	6512428	290	Basalto
527	577302	6511998	286	Basalto
528	577867	6511809	286	Basalto
529	578293	6511782	274	Basalto
530	578635	6511481	269	Basalto
531	579120	6511396	277	Basalto
532	579531	6511089	273	Basalto
533	579998	6510697	277	Basalto
534	565239	6509513	260	Basalto
535	566105	6509230	241	Basalto
536	566991	6508749	233	Basalto
537	567791	6508499	240	Basalto
538	568527	6508046	234	Basalto
539	569221	6507381	227	Basalto
540	569880	6507080	230	Basalto
541	570132	6507365	231	Basalto
542	570433	6507665	218	Basalto
543	570613	6508059	205	Basalto
544	571059	6508357	192	Basalto
545	571375	6508727	201	Basalto
546	571749	6509064	205	Basalto
547	572215	6509428	223	Basalto

548	572580	6509716	230	Basalto
549	572905	6509973	230	Basalto
550	573263	6510249	220	Basalto
551	573671	6510553	232	Basalto
552	574060	6510854	243	Basalto
553	574374	6511100	274	Basalto
554	574751	6511399	289	Basalto
555	575103	6511689	281	Basalto
556	575498	6511990	286	Brecha
557	575754	6512209	300	Arenisca
558	574376	6511173	275	Basalto
559	574096	6511223	276	Basalto
560	573930	6511228	274	Basalto
561	573887	6511652	277	Brecha
562	574082	6511661	282	Basalto
563	574336	6511770	285	Basalto
564	574482	6511632	290	Basalto
565	574687	6511475	284	Basalto
566	574519	6511392	278	Basalto
567	574359	6511471	259	Basalto
568	574028	6512097	277	Basalto
569	574028	6512097	277	Basalto
570	573871	6512200	254	Basalto
571	573647	6512059	282	Basalto
572	574019	6511930	286	Basalto
573	563450	6513843	299	Basalto

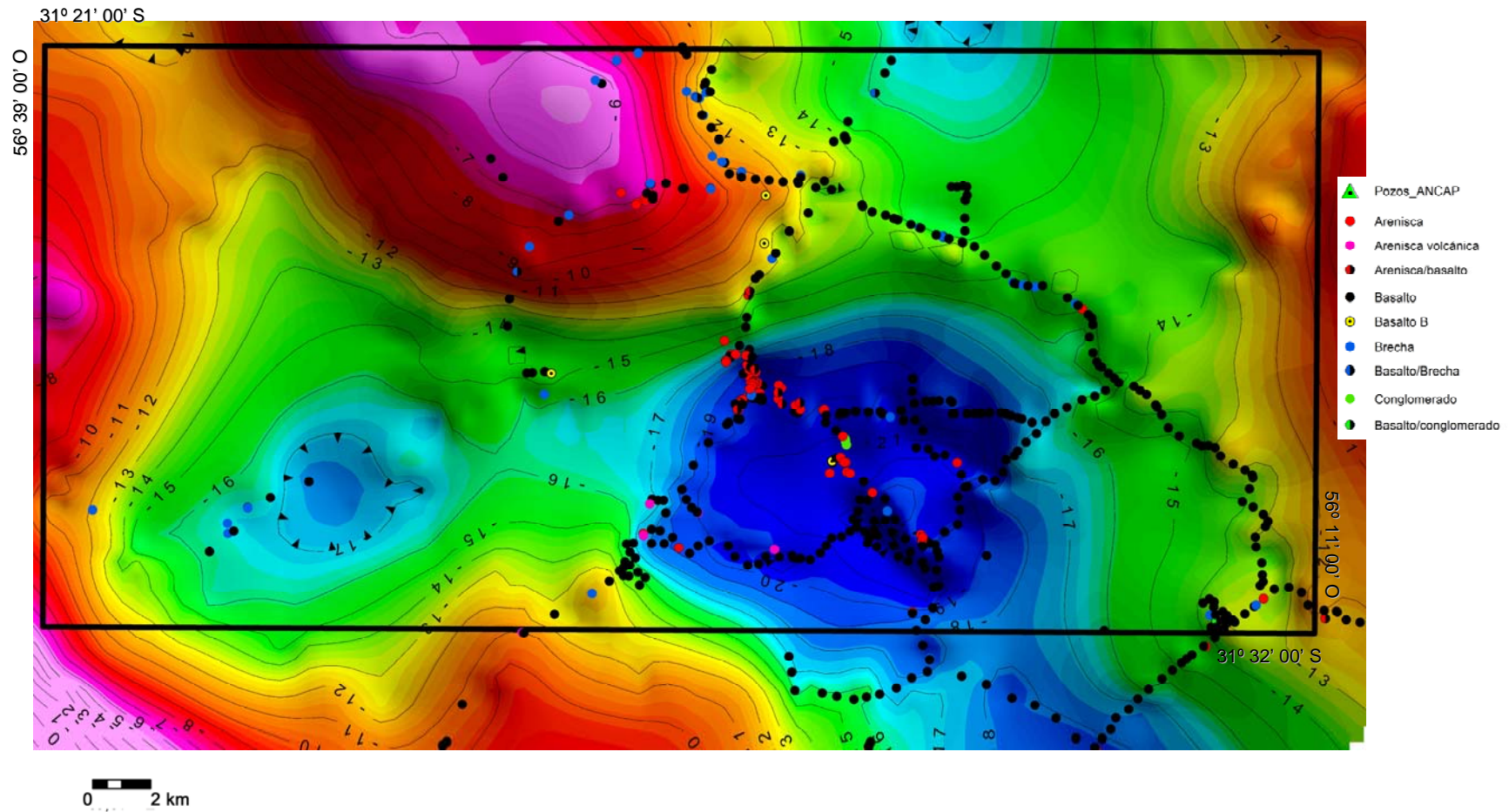
ANEXO F

Mapa de puntos GPS (con numeración referida al Anexo E) y litologías.



ANEXO G

Ídem anexo F, sobre mapa de anomalía gravimétrica Bouguer.



ANEXO H

Fotografías de testigos de pozos estratigráficos.



Figura H1. Detalle de granito rosado isótropo (basamento cristalino) en el pozo Pepe Núñez E-1b. Profundidad: 465 m.

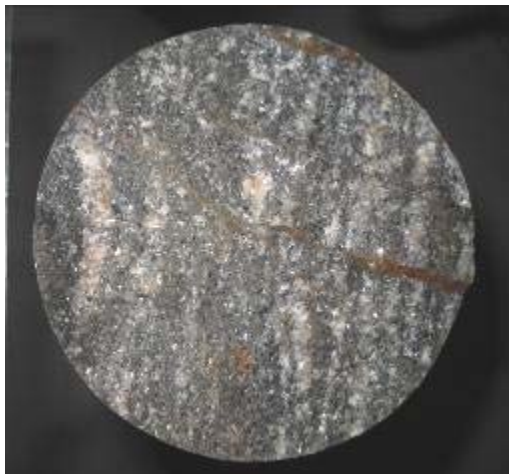


Figura H2. Detalle de gneiss máfico (basamento gristalino) recortado por una diabasa en el pozo Quintana E-1. Profundidad: 303 m.

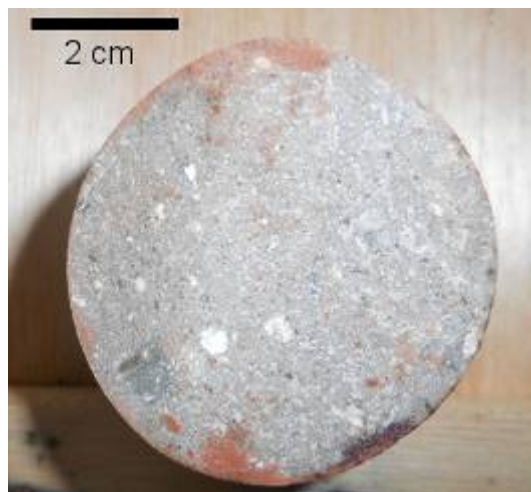
A**C****B**

Figura H3. Detalle de cuarcitas fracturadas (¿base de Formación San Gregorio?). **A-B**, pozo Cañada del Charrúa E-2 (profundidad: 510,10 m). **B**, pozo Quintana E-2 (profundidad: 349 m).



Figura H4. Detalle de diamictitas intercaladas con láminas pelíticas violáceas (base de Formación San Gregorio) en el pozo Pepe Núñez E-1b. Profundidad: 436 m.



Figura H5. Detalle de pelitas grises a negras (base de Formación San Gregorio). **A-B**, pozo Pepe Núñez E-1b. **A**, profundidad: 432 m. **B**, profundidad: 423,50 m. **C**, vista en sección de un testigo del pozo Cañada del Charrúa E-2 (profundidad: 490 m).



Figura H6. Detalle de diamictitas grises (Formación San Gregorio) en el pozo Pepe Núñez E-1b. Profundidad: 414,50 m.



Figura H7. Detalle de ritmitas grises con deformación convoluta (Formación San Gregorio) en el pozo Cañada del Charrúa E-1. Profundidad: 396,70 m.



Figura H8. Detalle de diamictitas rojizas (Formación San Gregorio) en el pozo Cañada del Charrúa E-2. Profundidad: 410,5 m.



Figura H9. Detalle de areniscas anaranjadas con estratificación deformada (tope de Formación San Gregorio) en el pozo Cañada del Charrúa E-2. Profundidad: 377,5 m.

A**B****C**

Figura H10. Detalle de Formación San Gregorio en el pozo Quintana E-2. **A**, cuarcitas (profundidad: 352 m). **B**, lutitas violáceas (profundidad: 333 m.). **C**, brecha clasto sostén (profundidad: 323,50 m).

A**B**

Figura H11. Detalle de areniscas rojizas, con estratificación cruzada de alto ángulo (con evidente bimodalidad granulométrica), y subordinadamente laminación horizontal y niveles masivos (Formación Buena Vista) en el pozo Cañada del Charrúa E-2. **A**, profundidad: 320,5 m. **B**, profundidad: 368,5 m.



Figura H12. Detalle de areniscas rojizas con estratificación cruzada de alto ángulo (Miembro Rivera de la Formación Tacuarembó). Pozo Cañada del Charrúa E-2, profundidad: 46,50 m.



Figura H13. Detalle de areniscas blanquecinas y amarillentas, con estratificación horizontal o masivas, y niveles de limolitas arenosas verdosas (Miembro Batoví de la Formación Tacuarembó). Pozo Quintana E-2, profundidad: 107,50 m.

A**B**

Figura H14. **A**, detalle de areniscas violáceas con estratificación cruzada del pozo Cañada del Charrúa E-2, profundidad: 232,50 m. **B**, detalle de areniscas anaranjadas con laminación horizontal del Pozo Quintana E-2, profundidad: 230,50 m. (Miembro Batoví de la Formación Tacuarembó).



Figura H15. Detalle de areniscas rosado claras con intraclastos de areniscas blanquecinas (Miembro Batoví de la Formación Tacuarembó), en la proximidad de la intrusión de un dique básico de color violáceo en el pozo Quintana E-2. Profundidad: 157,00 m.

A**B**

Figura H16. Detalle de basaltos masivos (Formación Arapey). **A**, pozo Quintana E-2 (profundidad: 74,50 m). **B**, pozo Cañada del Charrúa E-1 (profundidad: 32,50 m).



Figura H17. Detalle de basaltos amigdaloides del pozo Quintana E-2 (Formación Arapey). Profundidad: 50,50 m.



Figura H18. Detalle de brechas volcánicas del pozo Quintana E-3 (Formación Arapey). Profundidad: 27 m.

A**B**

Figura H19. Detalle de niveles de areniscas de *intertrap* (Formación Arapey). **A**, pozo Quintana E-2. Profundidad: 47,80 m. **B**, pozo Quintana E-3. Profundidad: 91,00 m.

A



B



Figura H20. Detalle de conglomerados y brechas con clastos de basalto y granito del pozo Quintana E-3 (Formación Arapey). **A**, clasto decimétrico de granito. **B**, intercalación de brecha dentro del basalto (posible contacto por falla).



Figura H21. Detalle de areniscas brechoides (con clastos de basalto vacuolar) intercaladas con niveles de basalto vacuolar. Pozo Quintana E-3, profundidad: 138 m.

ANEXO I

Transectas magnetotéluricas.

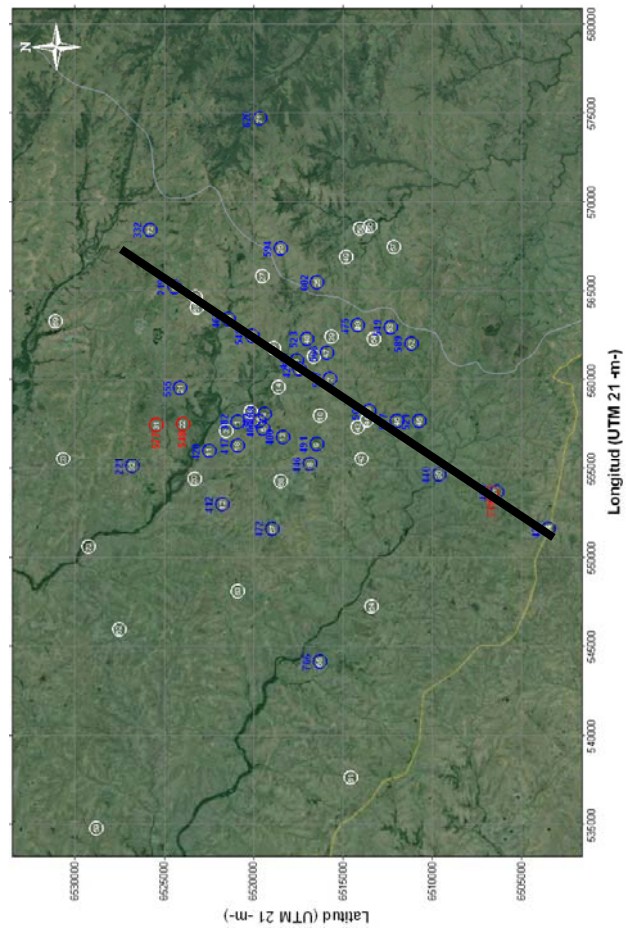
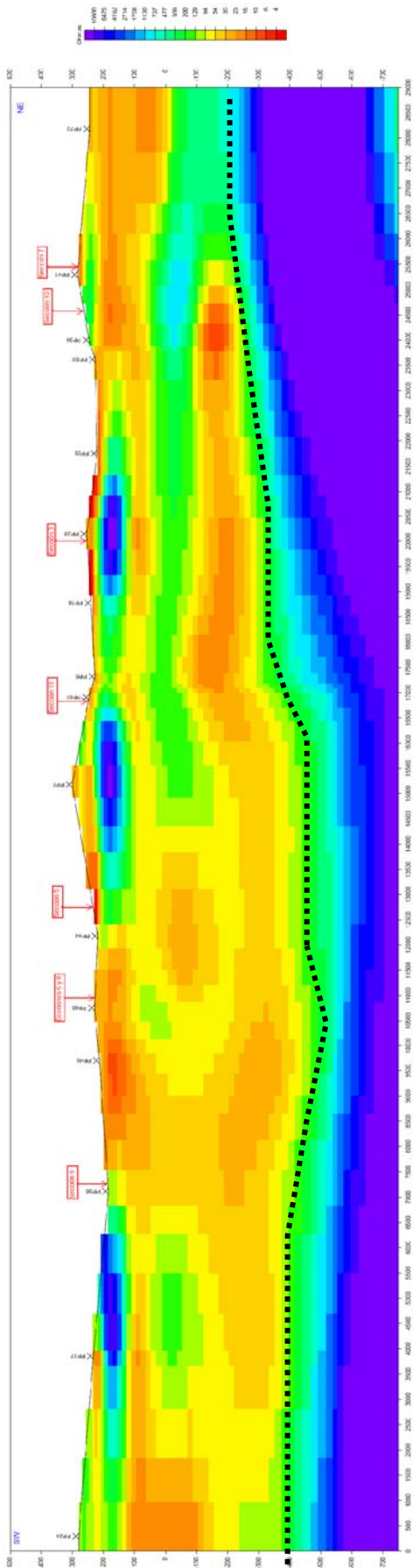


Figura I1. Inversión 2D de datos magnetotéluricos. Transecta A. Modificado de Ingesur (2013). La línea punteada indica el tope de basamento.

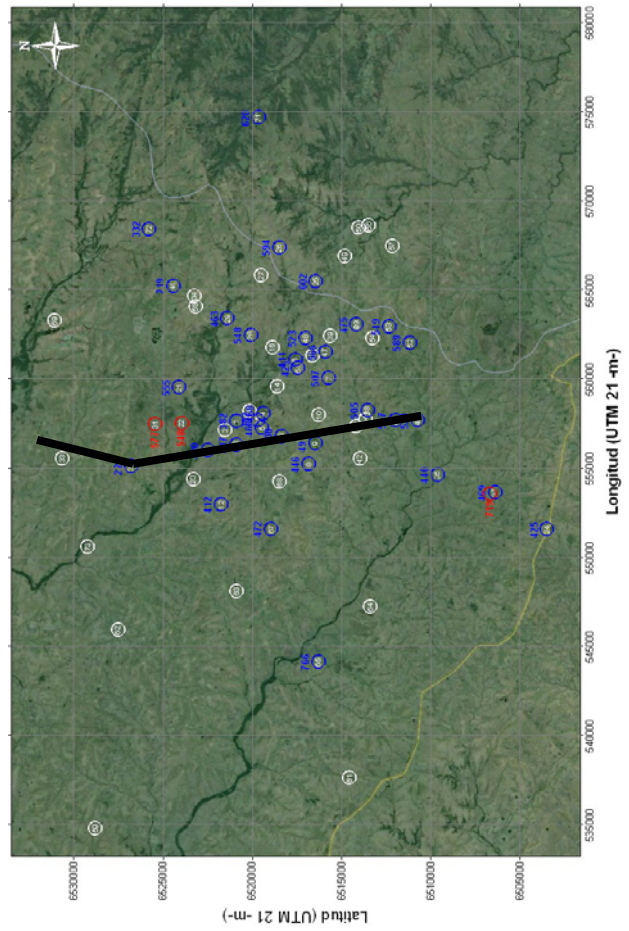
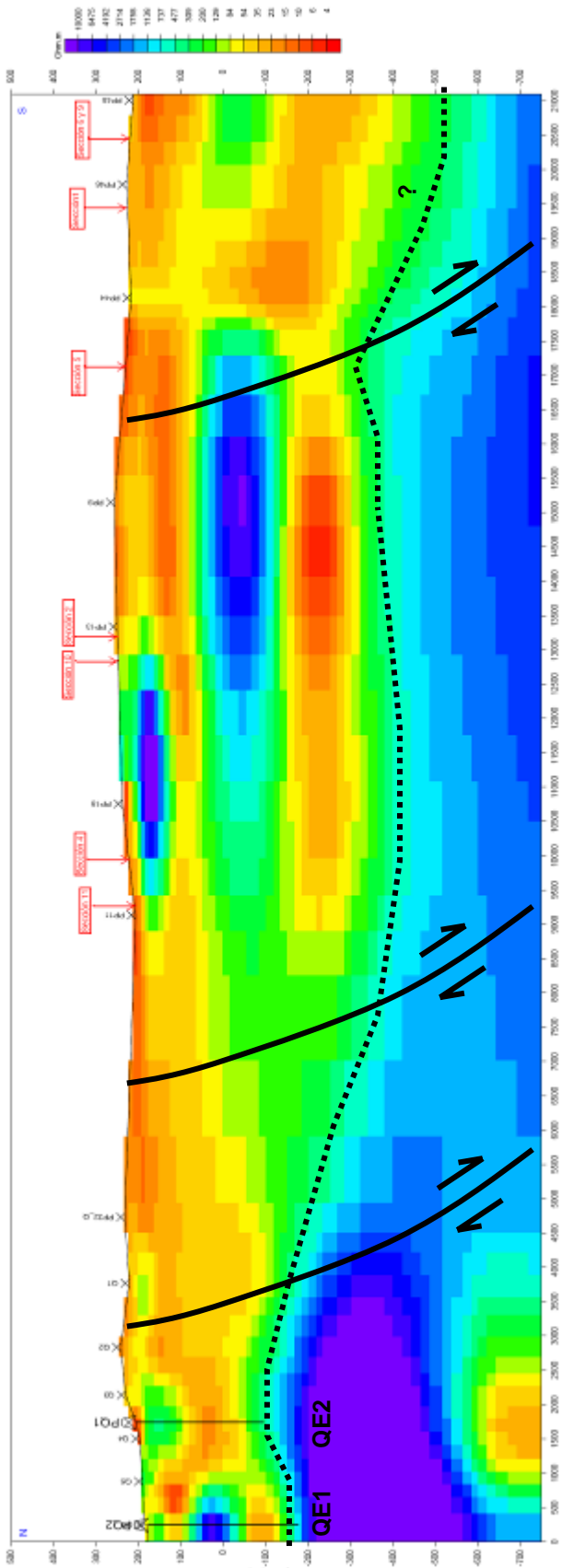


Figura 13. Inversión 2D de datos magnetotélúricos. Transecta C. Modificado de Ingesur (2013). La línea punteada indica el tope de basamento.

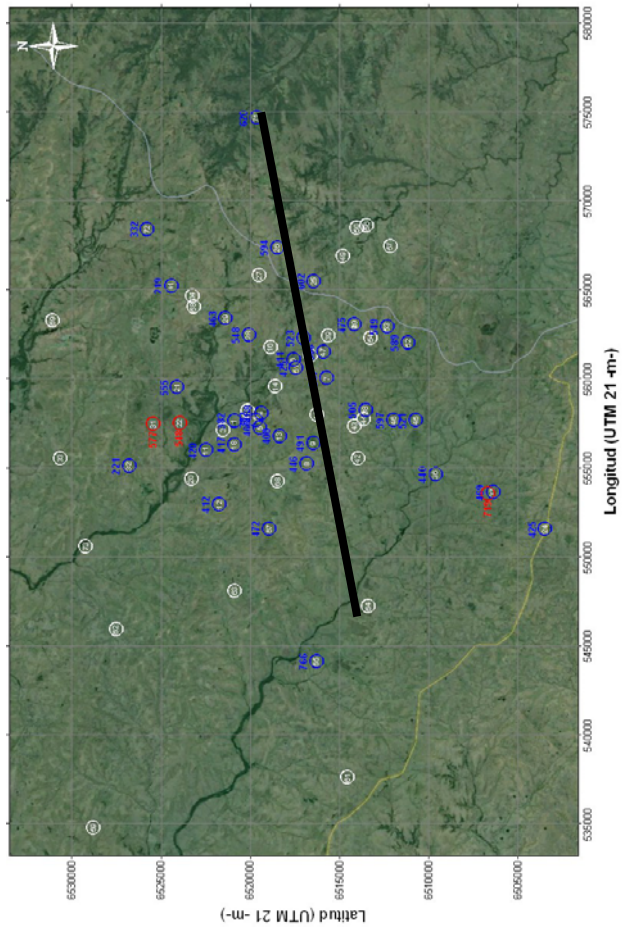
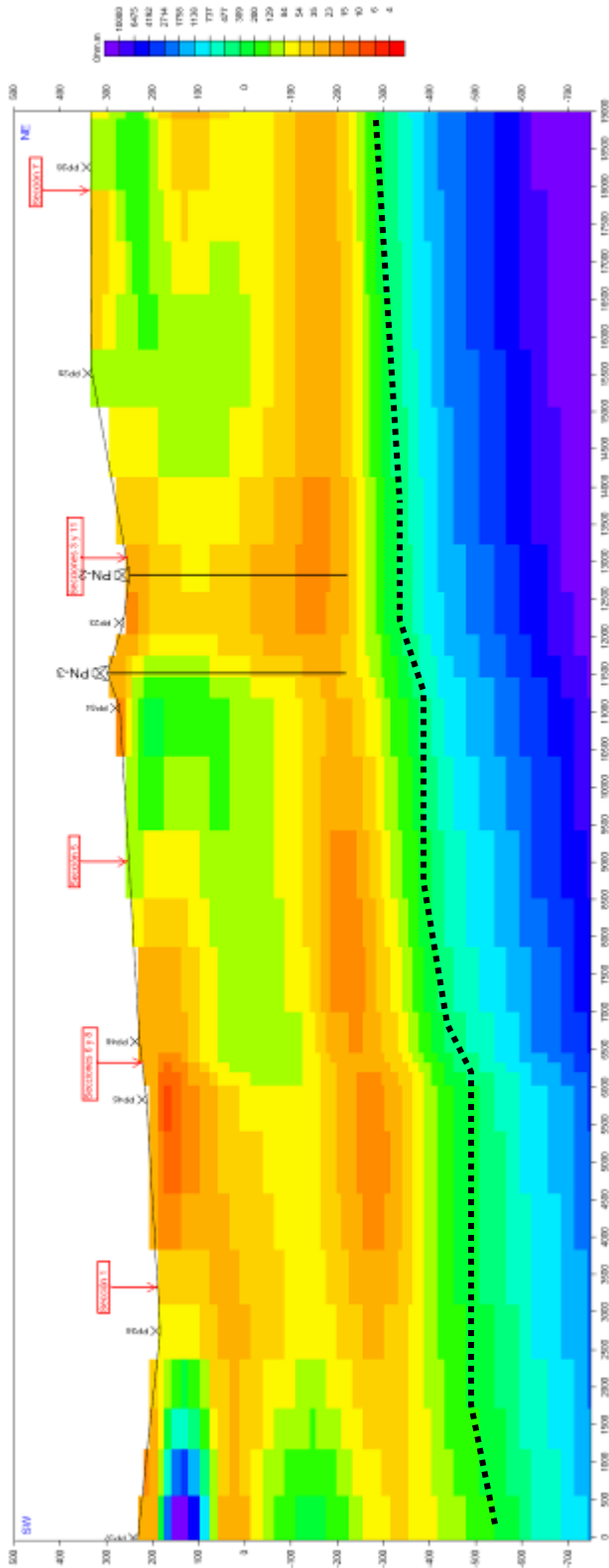


Figura 14. Inversión 2D de datos magneto-telúricos. Transecta D. Modificado de Ingesur (2013). La línea punteada indica el tope de basamento.

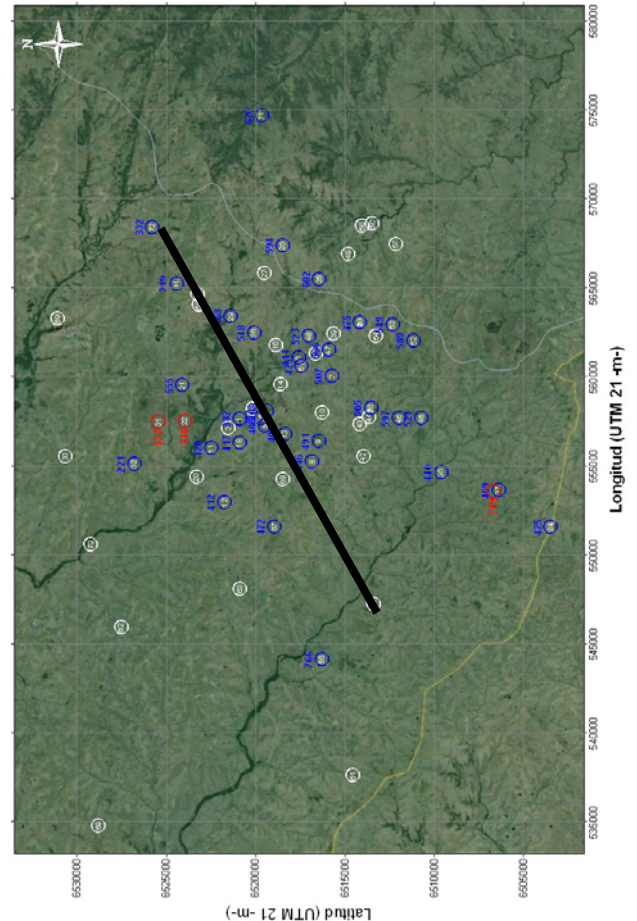
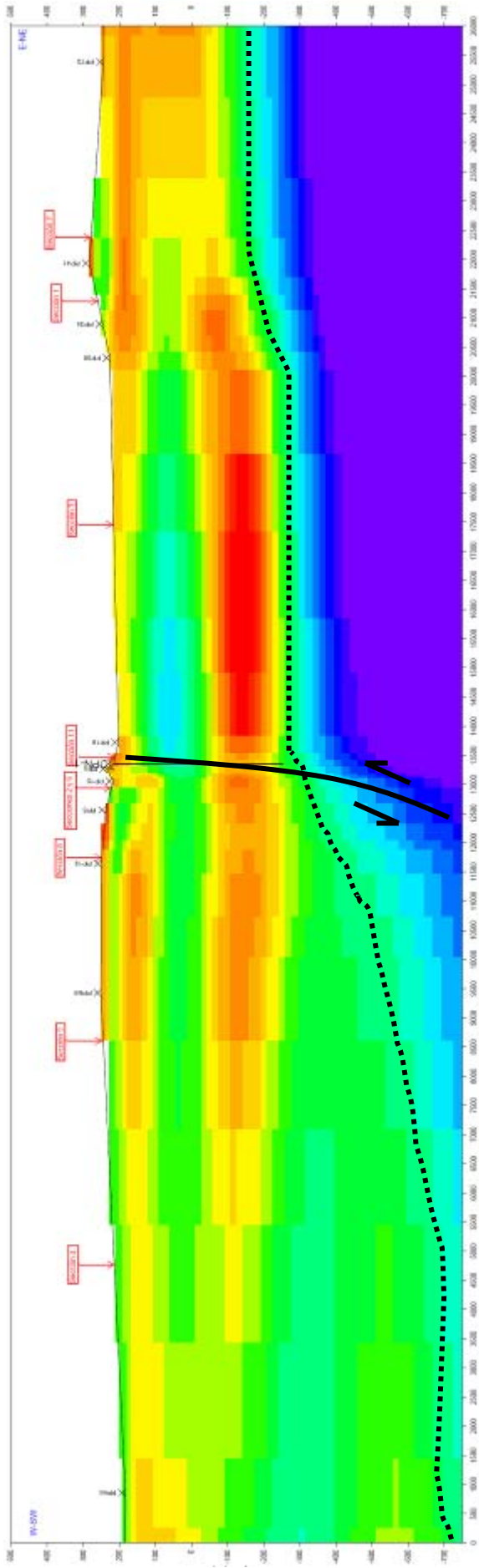


Figura 15. Inversión 2D de datos magnetotéluricos. Transecta E. Modificado de Ingesur (2013). La línea punteada indica el tope de basamento.