



**UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA
FACULTAD DE CIENCIAS
PEDECIBA GEOCIENCIAS
CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL ESTE**

***TESIS DE MAESTRIA
GEOCIENCIAS***

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DE
ACUÍFEROS KÁRSTICOS DE LA FORMACIÓN POLANCO –
EDIACÁRICO, URUGUAY.**

AUTOR: LIC. LETICIA IVÓN GONZÁLEZ CARREIRA

TUTOR: DR. CLAUDIO GAUCHER

COTUTORA: DRA. PAULA COLLAZO

MONTEVIDEO

Marzo 2016

TUTOR: Dr. Claudio Gaucher.

COTUTORA: Dra. Paula Collazo

TRIBUNAL: _____

FECHA: _____

CALIFICACIÓN: _____

AUTOR: Leticia Ivón González Carreira.

TÍTULO: “Caracterización geológica e hidrogeológica de acuíferos kársticos de la formación Polanco – Ediacárico, Uruguay.”

Tesis de Maestría – PEDECIBA Geociencias

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar agradezco a Claudio por su motivación, persistencia y acompañamiento en esta proceso.

A Paula por sus aportes y sugerencias.

Agradezco a los correctores por su dedicación y compromiso.

Quiero expresar mi especial agradecimiento a mis compañeros del CURE por su aliento, apoyo y estímulo.

A GeoAmbiente, por las comunicaciones útiles y oportunas.

Agradezco a Daniel quien aportó con el manejo del dron y los modelos digitales de terreno.

Agradecer también a colegas, y amigos que participaron con aportes, salidas de campo, material y consejos, como Ana, Federico, Josefina, Leticia, Gonzalo, Jorge, Gabriela y Héctor.

Especialmente a mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional, especialmente a la paciencia y compañía de Gonzalo, Ainara y Kenai.



CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
CONTENIDO	4
RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Antecedentes.....	8
1.1.1 Geología.....	8
1.1.2 Hidrogeología.....	11
1.2 Área de estudio	20
2. OBJETIVOS	24
2.1 Objetivo general.....	24
2.2 Objetivos específico.....	24
3. METODOLOGIA	25
3.1 Métodos de gabinete.....	26
3.2 Métodos de campo.....	27
3.3 Laboratorio.....	32
3.4 Tratamiento de datos.....	33
4. ANTECEDENTES GEOLOGICOS	34
4.1 Grupo Arroyo del Soldado.....	34
4.1.1 Formación Yermal.....	36
4.1.2 Formación Polanco.....	38
4.1.3 Formación Cerro Espuelitas.....	41
4.2 Características Geológicas por región.....	41

4.2.1 Región I (Sinclinal del Este).....	41
4.2.2 Región II (Sinclinal Tapes).....	44
4.2.3 Región III (Minas)	46
5. ANTECEDENTES HIDROGEOLOGICOS.....	48
5.1 Provincia Hidrogeológica Lavalleja.....	48
5.2 Características Hidrogeoquímicas.....	54
6. RESULTADOS.....	57
6.1 Análisis Geológico y Geomorfológico.....	58
6.1.1 Región I (Sinclinal del Este).....	60
6.1.2 Región II (Sinclinal Tapes).....	71
6.1.3 Región III (Minas)	79
6.2 Hidrogeología.....	81
6.3 Hidrogeoquímica.....	85
7. CONCLUSIONES.....	94
8. BIBLIOGRAFIA.....	98
9. ANEXOS.....	103

RESUMEN.

Los antecedentes geológicos e hidrogeológicos de la región objeto de estudio, sumado a datos prospectivos recientes, generaron interés en la profundización en estudios de modelos prospectivos de aguas subterráneas en la formación Polanco, sumada a su caracterización hidroquímica. La formación Polanco pertenece a la secuencia sedimentaria plataformal Grupo Arroyo del Soldado (GAS), de edad Ediacárico, integra la provincia hidrogeológica Lavalleja. Esta conforma una faja de rumbo regional NNE que se extiende desde los departamentos de Maldonado hasta Cerro Largo, Uruguay. Esta presenta una intensa estructuración tectónica, con numerosos pliegues, fallas y cabalgamientos donde los carbonatos de esta formación están afectados. El área de estudio se dividió en 3 regiones: I (Sinclinal del Este), II (Tapes) y III (Minas); concentrando los mayores esfuerzos en las regiones I y II, por ser las más inexploradas. Se realizó el relevamiento de campo, fotogeológico (*SGM Y Google Earth*) y relevamiento aerofotográfico con el uso de un *drone*, generando un modelo digital de terreno en 3D, para interpretar las características morfo estructurales del relieve kárstico asociado a los carbonatos de la formación Polanco. Se relevó información de subsuelo disponible. Para el análisis hidroquímico se colectaron 6 muestras de agua, 4 de aguas subterráneas y 2 de la red de drenaje asociada, se realizaron los análisis de iones mayoritarios en el laboratorio y se registró in situ las características fisicoquímicas de cada muestra. Como resultados se obtuvo que en la Región I, el pliegue constituye un relieve invertido, albergando en el eje, dirección N 40° a 45° E, depresiones kársticas, caracterizadas como dolinas

tipo “taza” y “tubo, estructuras de circulación y acumulación de agua subterránea y es en esta estructura que se ubica la perforación estudiada de caudal 30 m³/h. En la Región II se desarrolla un relieve kárstico tipo lapiaz con desarrollo de hoyos y nichos cilíndricos, que se concentran en sectores donde se entrecruzan las estructuras N 60° E y N 120° y se identificaron 3 manantiales donde la So y la estructura N 60° E permiten la surgencia de agua subterránea como manantiales. Las muestras de agua relevadas se caracterizan como bicarbonatadas-cálcicas, notándose un incremento en la concentración de magnesio en las muestras de la Región II, donde los carbonatos se presentan como ritmitas milimétricas de calizas-dolomías, en relación a las otras 2 regiones donde predominan las calizas puras. Es de destacar el bajo contenido de ion sodio que presentan estas fuentes minerales naturales, por debajo de 8 mg/l.

Palabras clave: carbonatos, Formación Polanco, calizas, agua mineral natural.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

1.1.1 Geología.

El Grupo Arroyo del Soldado (GAS) se define como una sucesión plataformal marina preservada como cobertura del Terreno Nico Pérez (TNP; Gaucher et al., 1996; Gaucher, 2000). Se integra según Gaucher (2014), de base a tope, por las formaciones Barriga Negra (conglomerados y areniscas), Yerbal (areniscas, pelitas, chert, BIF, dolomías), Polanco (carbonatos), Cerro Espuelitas (pelitas, chert, BIF), Cerros San Francisco (cuarzoarenitas) y Cerro Victoria (dolomías estromatolíticas y oolíticas).

La potencia total calculada para esta secuencia depositacional es de 4500 m y su registro se preserva en el TNP, comprendiendo los departamentos de Lavalleja, Florida, Treinta y Tres, Cerro Largo y Rivera (Fig.1).

La edad de depositación del GAS está acotada como Ediacárico tardío por edades U-Pb en zircón detrítico en su base de 566 ± 8 Ma (Blanco et al. 2009), edades Rb-Sr en granitos intrusivos de 532 ± 11 Ma (Kawashita et al., 1999) y *Cloudina riemkeae*, fósil guía del Ediacárico aparece en niveles inferiores de GAS. Datos quimioestratigráficos de $\delta^{13}\text{C}$ y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Gaucher et al., 2004, 2007, 2009; Frei et al., 2011) y la ocurrencia del icnogénero

Thalassinoides, (Sprechmann et al., 2004) le confiere a la cima del GAS la edad Cámbrico Inferior.

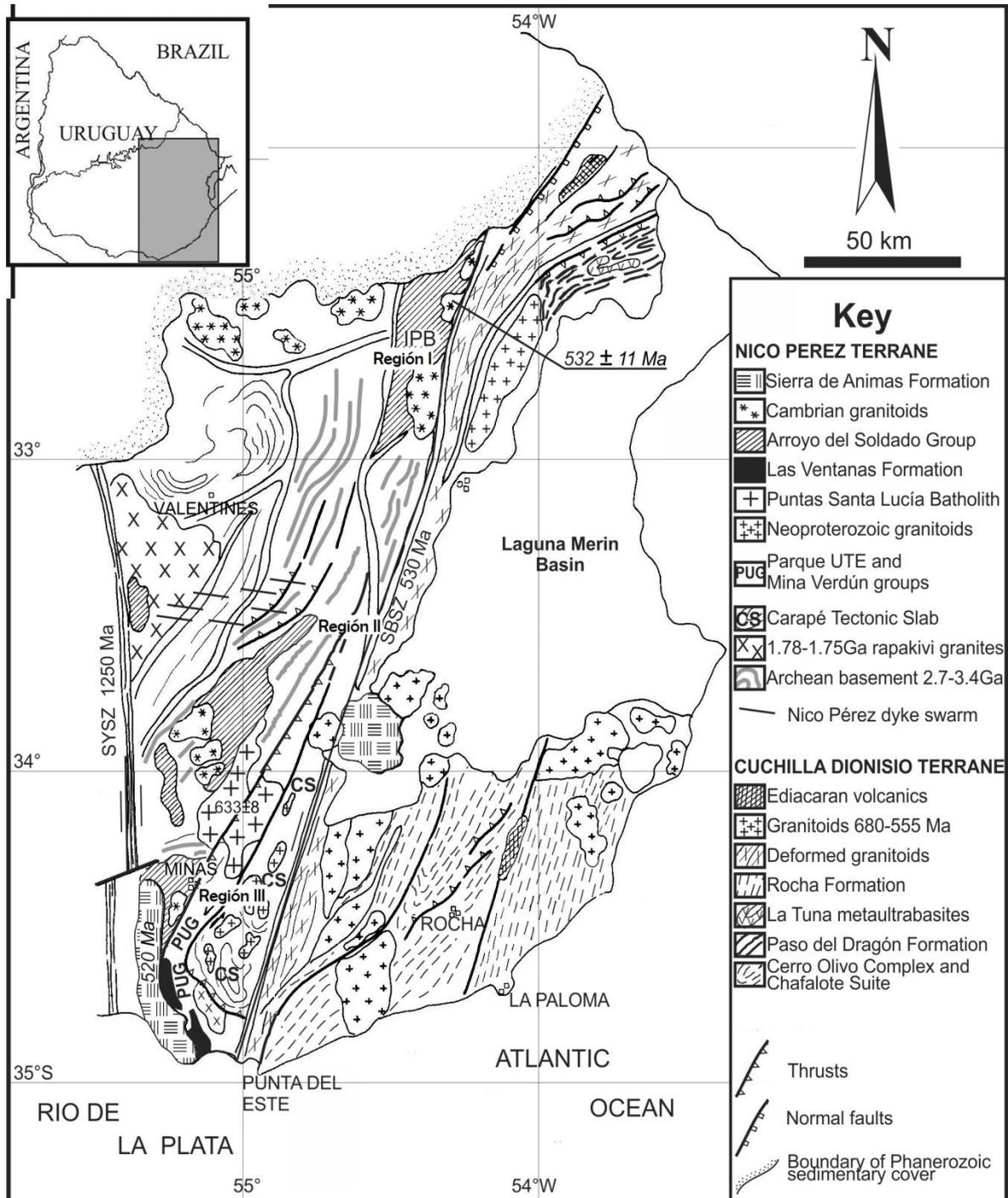


Figura 1. Mapa geológico del Terreno Nico Pérez con las áreas de afloramiento del Grupo Arroyo del Soldado. Se observan las regiones donde se hicieron estudios a detalle (Bossi & Gaucher, 2004; Frei et al., 2011).

El GAS es parte de una plataforma regional de primer orden, correlacionable con el Grupo Corumbá (Brasil) y Grupo Sierras Bayas (Argentina), aportando a la reconstrucción del Supercontinente Gondwana (Gaucher et al., 2003, 2005; Gaucher, 2014).

En este paquete de rocas sedimentarias hay importantes espesores de carbonatos, principalmente en las Formaciones Polanco (900 m de espesor) y Cerro Victoria (400 m).

La Formación Polanco es una de las unidades de mayor extensión geográfica del GAS, representada por potentes depósitos carbonáticos de hasta 900 m de espesor medido, cuya facies predominante son las ritmitas caliza-dolomía, ocurriendo también calizas y dolomías puras (Gaucher et al., 1996, 1998, 2004, 2009; Gaucher, 2000, 2014). Se apoya de manera concordante sobre la Formación Yermal y se le superpone de forma concordante la Formación Cerro Espuelitas.

Los carbonatos que integran la Formación Polanco se caracterizan por un importante contenido de materia orgánica, que les da una coloración gris oscuro. Las rocas más características son las ritmitas caliza-dolomía, descritas por Gaucher (2000).

En superficie estas áreas calcáreas están karstificadas y presentan una cobertura de suelos rojos (“terra rossa”) a veces de varios metros de potencia (Fig. 2) (Preciozzi et al., 1988).

Estas formas kársticas superficiales se generan a partir de la disolución de los carbonatos, generando un modelado del terreno, al cual se le denomina “paisaje kárstico”. Así como estas estructuras se manifiestan superficialmente, existe un modelado subterráneo que acompaña. Las formas de disolución más comunes en el relieve kárstico son: lapiaz, dolinas, úvulas, poljes, ponor, entre otros (Huizar Álvarez & Oropeza Orozco, 1989).



Figura 2. Perfil de suelo desarrollado sobre calizas de Formación Polanco (Sinclinal del Este – Treinta y Tres).

1.1.2 Hidrogeología.

Los acuíferos kársticos presentan una serie de singularidades que los diferencian notablemente de los acuíferos de porosidad intergranular y fisural, aunque la tipología de los acuíferos kársticos puede ser variada, en función de la importancia relativa de las discontinuidades, porosidad de la matriz, grado e intensidad de la kástificación, entre otros factores (Pulido Bosch, 2001).

Según Custodio & Llamas (1983) los acuíferos kársticos se componen de rocas de naturaleza carbonáticas (calizas, dolomías, margas) donde la porosidad se desarrolla en forma secundaria (tubos verticales, huecos y cavernas) por disolución de carbonato.

La disolución de estas litologías es el proceso donde se altera la red cristalina de los minerales que forman la roca (carbonato de calcio, cloruros, sulfatos), por el pasaje de agua de precipitación que contiene gases atmosféricos (CO₂ y O₂), junto con ácidos húmicos y otros productos orgánicos incorporados en el recorrido superficial y aumentando su agresividad. La disolución de la calcita se puede expresar como:



La circulación del agua en estos sistemas, ocurre a través de las estructuras anteriormente mencionadas, con mayor velocidad que en otros tipos de acuíferos, generalmente en régimen de flujo turbulento.

Los rangos de conductividad hidráulica y la porosidad efectiva de las rocas carbonatadas son muy amplios. En general las areniscas calcáreas bioclásticas tienen una mayor porosidad efectiva, las calizas y dolomías a su vez presentan una mayor conductividad hidráulica. Las calizas margosas y los

mármoles presentan porosidades efectivas y conductividad hidráulica mucho menor que los grupos anteriores (Motyka et al. 2002)

Los acuíferos kársticos presentan un notable interés económico ya que la infiltración en estos terrenos suele ser muy superior a la de los terrenos detríticos, dando aguas de muy buena calidad y caudales significativos. Al mismo tiempo por su propia característica suelen ser más vulnerables a la contaminación que los de porosidad intergranular. Diversos métodos aplicados a la investigación de acuíferos kársticos se utilizan en función de las características intrínsecas de cada sistema, desde velocidades de tránsito muy elevadas, escaso tiempo de residencia, hasta acuíferos intensamente inerciales, de grandes reservas, karstificación homogénea, matriz porosa o microporosa, condiciones que generan diversidad de comportamiento para cada sistema (Motyka, 1998)

En la Carta Hidrogeológica escala 1:2.000.000 (www.dinamige.gub.uy), indica que las litologías que se ubican en la región sureste y noreste del territorio uruguayo están compuestas por esquistos, bancos y lentes de calizas y dolomitas, filitas, cuarcitas, metaareniscas, entre otras litologías. Constituyen acuíferos en rocas con porosidad de fractura y/o niveles de alteración, arrojando caudales específicos inferiores a 0.5 m³/h/m (Heinzen et al., 1986).

Datos actualizados indican que para la región de la Sierras del Este, para un total de 1892 perforaciones, los valores de caudal medio corresponde a 4,8 m³/h y se indica una profundidad media de 24 m (DINAMIGE, 2009).

El modo de ocurrencia de aguas subterráneas en litologías metamórficas es por porosidad secundaria, debido a fracturaciones y/o alteraciones, que permitan el almacenamiento y circulación del agua, diferencia principal con las

rocas sedimentarias, que presentan porosidad primaria. En particular las rocas carbonáticas, sean calizas o dolomías, la principal modalidad de ocurrencia de agua subterránea es mediante discontinuidades (fallas y juntas), complementándose con cavidades de disolución (Tabla 1) (Montaño et al. 2014).

Grupo de rocas	Tipos de rocas	Principal modo de ocurrencia de agua subterránea
Cristalinas	Granitos, dioritas, gabros. Gneises, esquistos, filitas.	Manto alterado y discontinuidades (juntas, fallas y planos de foliación).
Volcánicas	Basaltos, andesitas, riolitas	Manto de alteración y discontinuidades (juntas, fallas, alveolos, superficies de contacto entre coladas, etc.)
Carbonáticas	Calizas y Dolomías	Discontinuidades (juntas y fallas) y cavidades de disolución, desde canalículos a cavernas.
Clásticas	Areniscas, conglomerados y sedimentos consolidados	Espacios intergranulares y discontinuidades (juntas y fallas)

Tabla 1. Clasificación hidrogeológica de las rocas y formas de ocurrencia de agua subterránea.

La Formación Polanco es de relevancia como fuente de recursos minerales, ya sean las calizas para la producción de cemento y cal, como

también los avances que se han realizado en torno a la producción de Clinker (Gaucher et al., 2013).

Otro recurso de importancia considerable y cada vez más valioso, son las aguas minerales naturales, donde empresas de reconocimiento nacional e internacional desarrollan sus fuentes de explotación en la Formación Polanco.

Según Bossi & Navarro (2000) se determinaron diferentes provincias hidrogeológicas para el territorio uruguayo (Fig. 3), donde la número siete, presenta características propicias para la explotación de agua mineral de calidad de exportación.

Esta provincia puede definirse por lo menos en dos grandes regiones acompañando rasgos geológicos diferentes: una región en el Sur en los alrededores de la ciudad de Minas, con intensos plegamientos, con predominio de bancos calcáreos de rumbo NS a N30E; otra región en el Norte, donde los plegamientos son menos pronunciados, el metamorfismo es incipiente, abundan los buzamientos de 10° a 50° y ocupa la cuenca superior del Río Olimar.

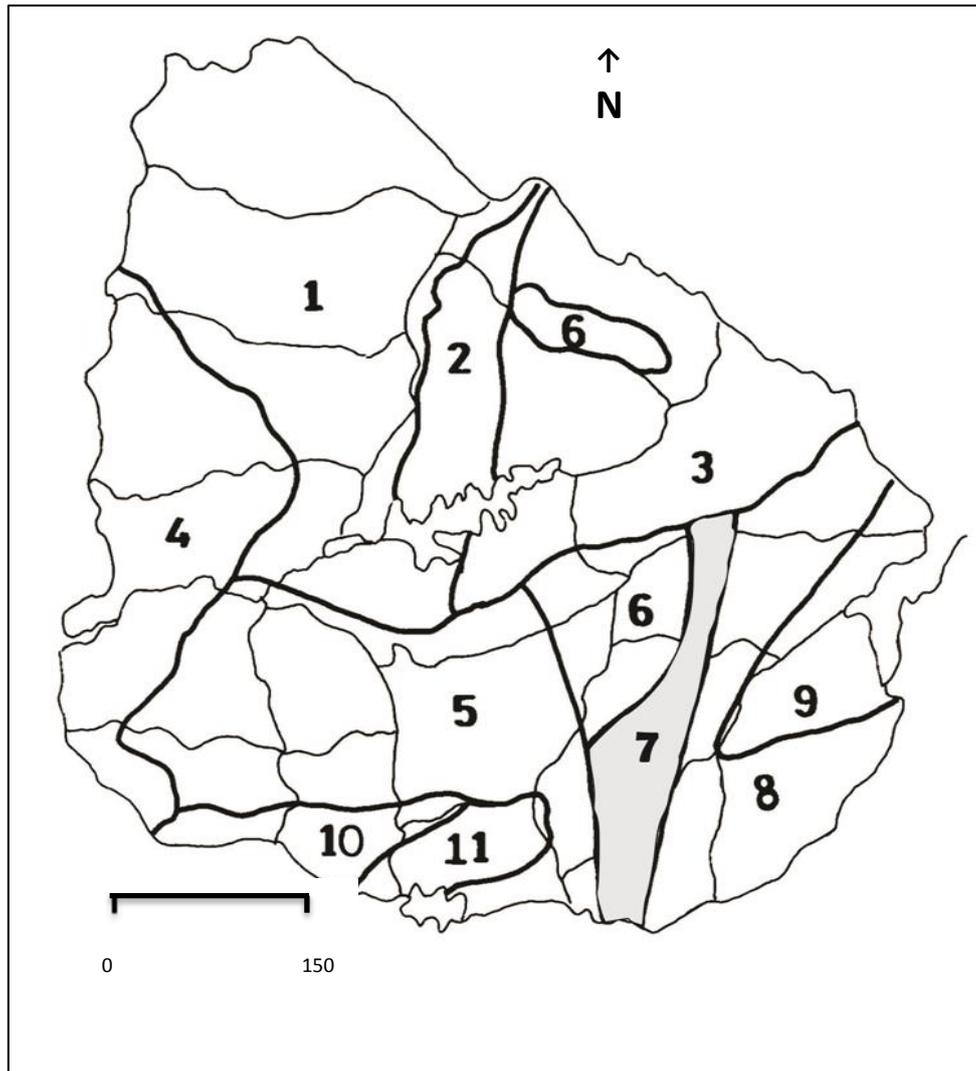


Figura 3. Provincias Hidrogeológicas identificadas en Uruguay (Bossi & Navarro 2000).

El rasgo dominante de esta provincia hidrogeológica es la abundancia de rocas carbonatadas, desde calizas puras hasta dolomías puras, pasando por calizas magnesianas. Dentro de la faja así definida pueden diferenciarse zonas de comportamiento variable, pero se mantiene la composición de las aguas subterráneas como bicarbonatadas cálcicas. En las distintas zonas varía el relieve, el grado de fracturación, los caudales puntuales y la viabilidad de surgencia natural, pero la composición química se mantiene constante (Bossi & Navarro, 2000).

Según Pulido (1978) las aguas minerales naturales pueden clasificarse por su contenido iónico en tres grandes grupos:

- 1) Bicarbonatadas – Cálctica
- 2) Cloruradas – Cálctica – Sódica
- 3) Magnésico –Clorurada – Cálctica – Sódica

Las aguas minerales más valoradas, contienen entre 250 y 850 ppm de solidos totales disueltos y los iones dominantes corresponden a bicarbonato y calcio, observar el diagrama de Piper que muestra la clasificación hidrogeoquímica de aguas minerales de calidad aprobada (Fig. 4).

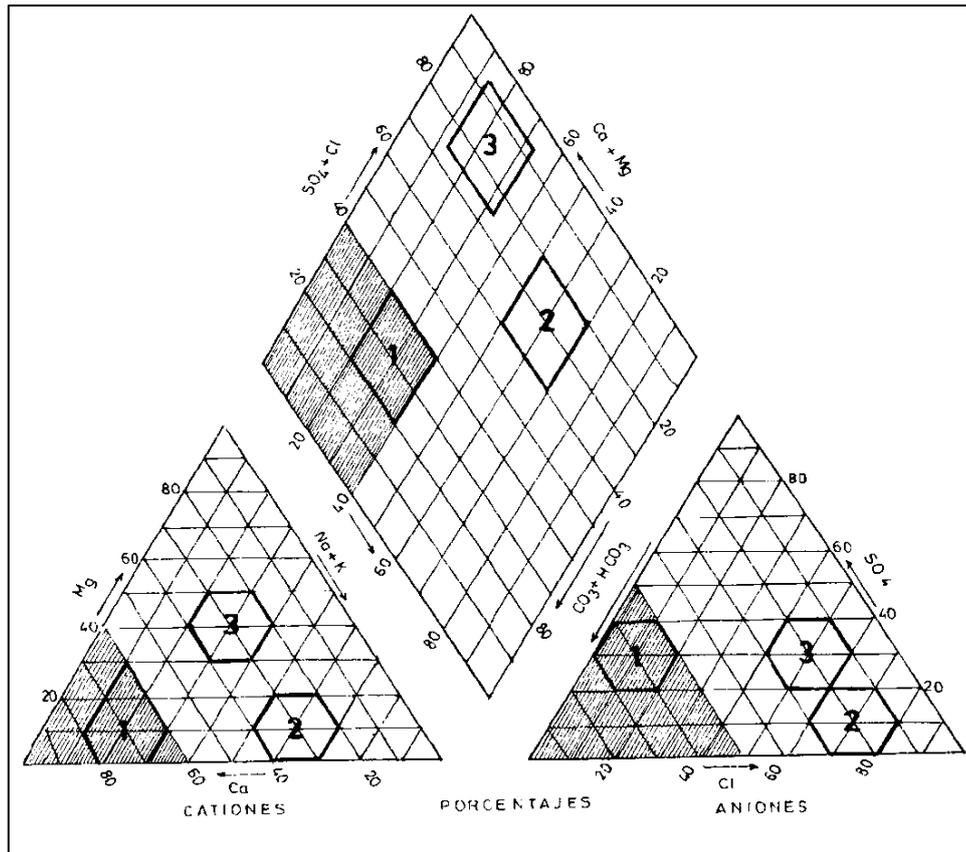


Figura 4. Diagrama de Piper para la clasificación hidrogeoquímica de aguas minerales. Grupo 1: aguas bicarbonatadas - cálcicas (más favorables). Grupo 2: aguas cálcico – sódicas – cloruradas y Grupo 3: sódico – cálcico – magnesianas – cloruradas. La presencia de cloro y/o sulfato es inconveniente para aguas de consumo humano. (Pulido, 1978)

También se pueden visualizar en diagramas de Stiff las características de composición iónica de las aguas minerales, identificando las de mayor interés según sus condiciones de calidad.

El diagrama (Fig. 5) muestra las características de un agua de calidad excelente, comparando la composición iónica de un agua de menor calidad, donde se observa claramente que los iones predominantes son bicarbonato y calcio (Pulido, 1978).

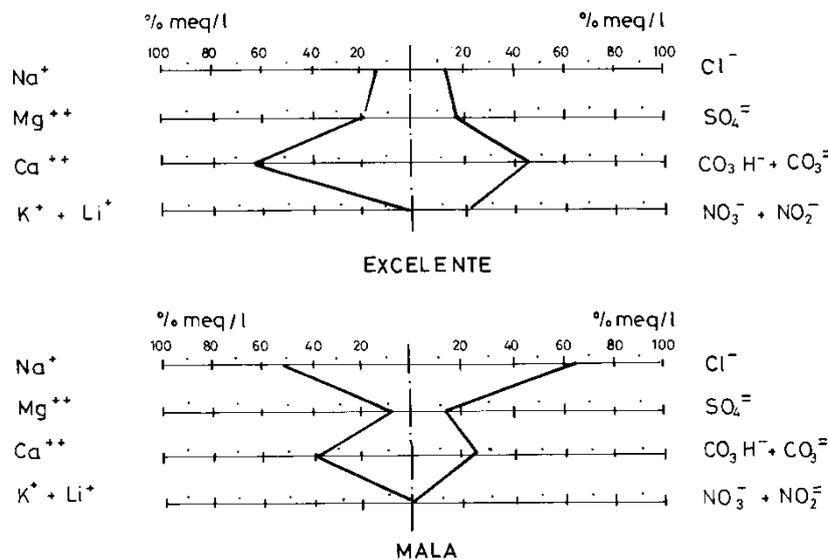


Figura 5. Diagramas de Stiff, comparan composición hidrogeoquímica de dos muestras de agua mineral, (superior) muestra de excelente composición y (inferior) de composición iónica no favorable para su uso como agua mineral. (Pulido, 1978).

Según Gaucher et al. (2004b) las fuentes de agua mineral de la empresa Salus, como la Fuente del Puma, manan de carbonatos de la Formación Polanco. Se trata de la empresa con explotación de mayor caudal de agua mineral del país. Otras fuentes menores se conocen en Lavalleja y, especialmente, en Treinta y Tres (Bloque Isla Patrulla: Gaucher, 2000).

Desde el punto de vista geoquímico e isotópico es de destacar que los carbonatos han sido caracterizados detalladamente en cuanto a elementos traza, tierras raras e isótopos de C, O, Sr y Cr (Gaucher et al., 2004b, 2009, Frei et al., 2009, 2011). Así mismo se han realizado avances en la geología y la

estratigrafía del área (Gaucher, 2014), pero hasta ahora no se conocían las características hidrogeológicas de los carbonatos de la Formación Polanco en esta región.

1.2 AREA DE ESTUDIO.

El área de estudio se incluye en el Terreno Nico Pérez (TNP), sensu Bossi et al. (1998), el cual se desarrolla al este de la Zona de Cizalla Sarandí del Yí (ZCSY) o Lineamiento Sarandí del Yí – Piriápolis (LSYP) descrito por Bossi & Campal (1992) y al oeste de la Zona de Cizalla Sierra Ballena (ZCSB) (Gómez Rifas, 1995), identificada como el límite oriental del TNP por Gaucher et al. (1998).

Particularmente las litologías de objeto de este estudio corresponden a un episodio sedimentario plataformal GAS del periodo Ediacárico superior a Cámbrico inferior bajo (Gaucher, 2000; Gaucher et al., 2004b).

Corresponde a una faja con gran abundancia de rocas carbonáticas plegadas, de rumbo N30E, que se extiende desde la ciudad de Minas (Dpto. de Lavalleja) hasta Puntas de Parao (Dpto. de Treinta y Tres).

Para un mejor manejo y sistematización de los datos, el área de estudio se subdividió en tres regiones, que de norte a sur son (Fig. 6):

- Región I: Sinclinal del Yerbalito y Sinclinal del Este, Treinta y Tres (Preciozzi et al., 1988; Gaucher, 2000)

- Región II: Sinclinal del Arroyo Tapes Grande, Lavalleja (Gaucher, 2000)
- Región III: Minas, Lavalleja (Gaucher et al., 2004).

A la region I (Sinclinal del Este), se accede desde el kilómetro 329 de la ruta nacional n°8, en el ingreso norte por ruta n°8 al área protegida “Quebrada de los Cuervos”, a 14 km por camino vecinales, próximo al paraje “Puntas de Otazo”, al norte del Departamento de Treinta y Tres.

Para la region II (Sinclinal Tapes Grande), el acceso tambien es desde ruta n°8 en el kilometro 192 y se recorren 22 km por camino vecinal hacia el W, llegando al Arroyo Tapes Grande, en la porcion media del departamento de Lavalleja.

Al sur del area de estudio se encuentra la region III (Minas), proximo a la ciudad de Minas, capital departamental de Lavalleja, el acceso es desde ruta n°8 sobre el kilometro 112.



Figura 6. Ubicación general de las regiones donde se focalizo este estudio. (Google Earth).

Desde el punto de vista geomorfológico y siguiendo los criterios propuestos por Panario (1988) el área de estudio se ubica en la región del territorio uruguayo denominado como colinas y lomadas del este.

Datos oficiales del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), indican que el área se sitúa en la región subtropical húmeda, con una isoterma media máxima para el norte del territorio de 19 °C y una isoterma media mínima de 16°C al sur.

La precipitación media anual es de 1300 a 1400 mm calculados para el periodo 1961-1990.

Los valores de insolación media anual se encuentran entre 2400 a 2500 horas (www.meteorologia.com.uy/ServCli/caracteristicasclimaticas).

La clasificación climática de Koppen es de tipo “Caf”, siendo “C” del tipo templado moderado lluvioso, “f” temperie húmedo y “a” la temperatura media del mes más cálido 22°C.

2. OBJETIVOS.

2.1 Objetivo General:

Mediante el estudio geológico y la caracterización de las condiciones hidrogeológicas en calizas de la Formación Polanco, se pretende identificar las condiciones geológicas que permiten la generación de un acuífero kárstico y fuentes de agua mineral.

2.2 Objetivos Específicos:

2.2.1 Estudiar la geología de detalle de dos áreas de afloramiento de la Formación Polanco donde se extrae agua o se conocen fuentes surgentes, en los departamentos de Treinta y Tres y Lavalleja.

2.2.2 Determinar las características hidráulicas del acuífero y las condiciones geológicas que permiten la acumulación del recurso.

2.2.3 Caracterización de las propiedades hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas de la Formación Polanco.

2.2.4 Elaborar un modelo prospectivo para aguas minerales en carbonatos de la Formación Polanco.

3. METODOLOGIA

A continuación se describen cada una de las fases metodológicas aplicadas para llevar a cabo esta investigación, en la cual se aplicaron técnicas especializadas en el área de Geociencias como: mapeo geológico, análisis geológico estructural, geomorfológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico. Se integró información de superficie y de subsuelo obtenida en el marco de esta investigación, como también datos proporcionados por técnicos especialistas en carácter de comunicación personal.

Se consideraron para este estudio, tres regiones ya mencionadas donde aflora la Formación Polanco, en los departamentos de Treinta y Tres y Lavalleja, que de norte a sur se identifican como:

- Región I: Sinclinal del Yerbalito y Sinclinal del Este (Preciozzi et al., 1988; Gaucher, 2000).
- Región II: Sinclinal del Arroyo Tapes Grande (Gaucher, 2000)
- Región III: alrededores de la ciudad de Minas (Gaucher et al., 2004)

La ruta 8 (Brigadier General Juan Antonio Lavalleja) es la vía de acceso a las tres regiones, cada área presenta sus características particulares de acceso.

3.1 Métodos de Gabinete

La primera etapa consistió en la recopilación de datos existentes para el área de estudio. Se realizó una amplia revisión bibliográfica, análisis crítico y evaluación de la información pertinente a la investigación.

Para la interpretación geológica, estructural y geomorfológica, se realizó la fotointerpretación a escala 1/20.000 de las fotos aéreas (133-074 a la 076; 177-140 a la 141; 35-152 a la 154) del Plan Cartográfico del Servicio Geográfico Militar (SGM) del año 1966-67, así como el análisis de imágenes satelitales obtenidas a través del programa *Google Earth*.

La selección de las estaciones de muestreo se basó en el estudio previo de las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, sumado a la disponibilidad de perforaciones, junto a la accesibilidad y permiso de los propietarios de los predios.

Se contó con datos de dos perforaciones en la región I, datos estructurales para la región II y datos químicos de agua de pozos pertenecientes a fuentes de particulares para la región III.

3.2 Métodos de Campo

Se realizó el relevamiento geológico y geomorfológico del área de estudio, poniendo especial atención a la geología estructural (pliegues, fallas, diaclasado) y las geoformas kársticas.

Se registraron con fotografías los rasgos geomorfológicos kársticos en superficie más destacados de las regiones I y II.

Fue utilizado un vehículo aéreo no tripulado (VANT), más conocido por el término *drone* (Fig. 7), con el cual se sobrevolaron en las regiones I y II. Se trata de un DJI Phantom II Vision +. Para su uso, fue preciso seleccionar las condiciones climáticas óptimas para la operación del dispositivo, el factor viento y ráfagas locales fue determinante, impidiendo la ejecución de esta tarea en una oportunidad. In situ y en base a la fotointerpretación, se diseñó el plan de vuelo. Los vuelos se hicieron a 150 m de altura, con la obtención de ortofotos con solapamiento de un 60% entre sí.

Fueron relevadas las perforaciones en el área, determinando profundidad, nivel piezométrico, caudal y posición en el terreno.



Figura 7. Dispositivo aéreo no tripulado (*DRONE DJI - Phantom II Vision +*).

La colecta de muestras en campo implicó dos acciones que se manejaron en forma casi simultánea, una es la toma de las muestras de agua para análisis químico de iones mayoritarios en el laboratorio y la otra es la determinación de los valores de pH, temperatura, conductividad y sólidos totales, características que pueden sufrir modificaciones en el tiempo, ambas campañas de muestreo se realizaron en setiembre, octubre y diciembre de 2014.

La composición química de las aguas meteóricas está afectada por los equilibrios químicos de los carbonatos y varía con el tiempo. Por esta razón, los análisis químicos y las mediciones de pH, así como la conductividad eléctrica deben hacerse “in situ” (Fagundo, 1996).

Para la determinación de estos valores, se realizó la medición in situ utilizando un equipo electrónico portátil multiparámetro (Tester Hanna Combo Multiparámetro) (Fig. 8), de propiedades físicas como: temperatura (°C), pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y sólidos totales disueltos (ppm).



Figura 8. Medidor Multiparámetro Hana Combo, utilizado para la toma de propiedades físicas in situ.

Las muestras colectadas para análisis químico de iones mayoritarios en pozos, se realizaron mediante bombeo continuo, para el cual se utilizó una motobomba portátil, en los casos donde no existía instalación de bombeo (Fig. 9).



Figura 9. Bombeo continuo de perforación, para la toma de muestra de agua para análisis químico.

Fueron colectados 2 litros de agua por muestra, en envases de polipropileno enjuagados 3 veces con el agua a analizar y se utilizó tapa rosca como cierre. También se incluyeron muestras de agua de cañadas o arroyos

cercanos a las fuentes donde se tomó la muestra (sea pozo o manantial) (Fig. 10).

Durante la recolección se evitó la permanencia de burbujas de aire en el cuerpo del líquido, para limitar la modificación potencial de la calidad química original del agua durante su almacenamiento y traslado, el cual no superó las 48 horas de entrega en el laboratorio.



Figura 10. Toma de muestra para análisis químico en cañada próxima a la perforación en calizas.

Los envases fueron etiquetados en cada sitio de muestreo con tinta indeleble, incluyendo nombre de la muestra y fecha. Estos se mantuvieron en una conservadora portátil a una temperatura de < 4 °C hasta llegar al laboratorio, de forma de evitar que ocurran reacciones y alteraciones en la muestra.

3.3 Laboratorio.

Las muestras almacenadas provisoriamente en conservadora, se transportaron en las siguientes 48 hs de ser colectadas. Se realizó el análisis fisicoquímico de iones mayoritarios como: calcio, magnesio, sodio y potasio (cationes), bicarbonatos, cloruros, sulfatos y fosfatos (aniones) y alcalinidad total como carbonato de calcio, utilizando los protocolos analíticos recomendados. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio Industrial Montevideo S.A. por los métodos estandarizados de Espectrometría de Absorción Atómica, para la mayoría de los iones y en el caso de los carbonatos se utilizó EDTA Titrimetric (American Public Health Association, 1992).

3.4 Tratamiento de datos

Para el diseño de mapas geológicos-estructurales se utilizó el programa *MapInfo-Discover* (versión 10.5), complementando con datos de fotos aéreas e imágenes satelitales de *Google Earth Pro*.

En el procesamiento y representación de los datos estructurales, rumbos de los lineamientos de relieve y drenaje, se empleó el programa *StereoNet* (versión 1.0.1).

El análisis morfoestructural se completó con el estudio de la geomorfología de las áreas, para lo cual las imágenes obtenidas mediante el vuelo del *drone* fueron de gran utilidad y permitieron generar un modelo digital de terreno en 3 dimensiones. Para la realización de este modelo fue aplicado el software *Agisoft Photoscan*, con el cual se realizó el procesamiento de estas imágenes.

Para la realización de los diagramas y el tratamiento de las imágenes tomadas a las estructuras y afloramientos, fueron empleados los programas *Corel Draw X6* y *Adobe-PHOTOSHOP*.

Los datos químicos de las muestras de agua, se procesaron mediante el programa *EASY_QUIM 5.0* (versión 2012), permitiendo generar los principales diagramas para realizar la interpretación y caracterización hidrogeoquímica.

4. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS.

4.1 Grupo Arroyo del Soldado.

El GAS (Gaucher et al., 1996; Gaucher, 2000), se trata de una secuencia de rocas sedimentarias, de un muy bajo grado de metamorfismo, que ocurre como cobertura del TNP. Anteriormente estas litologías se reconocían como integrantes del Grupo Lavalleja (Bossi & Navarro, 1991).

Los límites estructurales más destacados son: la ZCSB, la cual constituye el límite al E del Grupo y a su vez coincide con el límite oriental del terreno tectonoestratigráfico en el cual ocurre. Al W esta unidad está limitada por la ZCSY que lo separa del Terreno Piedra Alta.

El Grupo está conformado por las Formaciones Barriga Negra, Yermal, Polanco, Cerro Espuelitas, Cerros San Francisco y Cerro Victoria descrito en base a consideraciones bio y químico estratigráficas por Gaucher (2014).

Estos depósitos se dieron en condiciones de escudo continental estable, seguido de una transgresión debido al ascenso del nivel del mar.

La figura 11 presenta la litoestratigrafía del Grupo actualizada, de forma sintética, donde se muestra la distribución de los fósiles y las variaciones de la composición isotópica de carbono en los carbonatos que conforman el GAS.

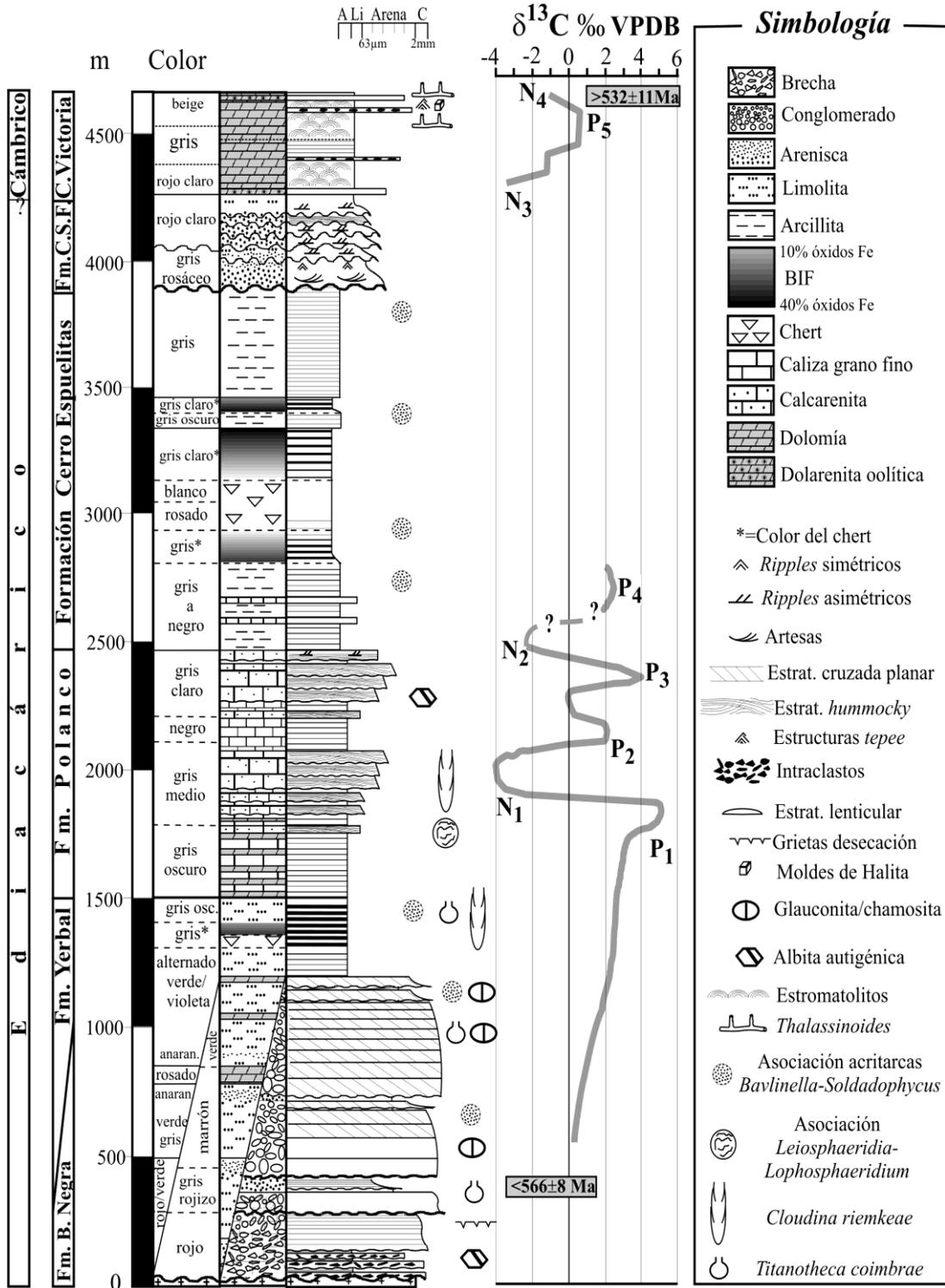


Figura 11. Columna estratigráfica actualizada del GAS de Gaucher (2014).

Las regiones donde se realizaron los estudios de detalle involucran mayoritariamente, tres formaciones del GAS: Yerbal, Polanco y Cerro Espuelitas.

Las tres regiones que se estudiaron en este trabajo, se caracterizan por presentar una gran estructuración y plegamientos, que le asignan una complejidad particular para la exploración y prospección de aguas subterráneas.

4.1.1 Formación Yerbal.

La Formación Yerbal es una secuencia silicoclástica grano y estratodecreciente con más de 1500 m de potencia. Comienza con areniscas bien seleccionadas y culmina con un espeso paquete pelítico (limolitas) (Fig. 12) e intercalaciones de dolomías, BIF y Chert (Gaucher, 2000). La composición de las arcillas es principalmente de illita +clorita, en la base, aumentando hacia el tope el contenido de caolinita (Pamoukaghlián et al., 2004).



Figura 12. Limolitas bandeadas de la Formación Yerbal, presenta niveles ricos en materia orgánica y pirita (Departamento de Treinta Y Tres).

Presenta estratos carbonáticos en su tercio superior (Gaucher et al. 2004b) de composición predominantemente dolomítica, con potencia de hasta decena de metros, anunciando el pasaje progresivo a la sedimentación carbonática con la suprayacente Formación Polanco.

La riqueza fosilífera de la Formación Yerbal es importante, incluyendo *Cloudina riemkeae*, *Titanotheca coimbrae*, *Soldadotubulus siderophoba*, *Bavlinella faveolata*, *Waltheria marburgensis*, *Paleodiscus mendezalzolai*; ellos indican un ambiente marino para la unidad.

El grado de deformación de esta unidad varía dependiendo de la proximidad a la ZCSB, los cabalgamientos con vergencia al SE y se observa metamorfismo de contacto con el Granito de Guazunambí.

4.1.2 Formación Polanco.

Compuesta por 900 metros de carbonatos puros sin intercalaciones siliciclásticas, sobreyace a la unidad anterior de forma concordante. El estratotipo se describe en el Sinclinal del Arroyo Tapes Grande, donde afloran los contactos con las unidades supra y sobreyacentes (Gaucher, 2000).

Es una secuencia grano y estrato decreciente, se evidencia la disminución de la paleobatimetría hacia el techo de la unidad, lo que indica una regresión marina, al tope de la unidad se describe estratificación cruzada de bajo ángulo, denotando actividad de olas y condiciones más someras (Gaucher et al. 2004b).

Las litologías que componen esta formación, en orden de abundancia decreciente, son las ritmitas caliza – dolomía (Fig.13), calizas y dolomías. Se caracterizan por contener abundante materia orgánica, característica que le aporta un color gris azulado a negro.

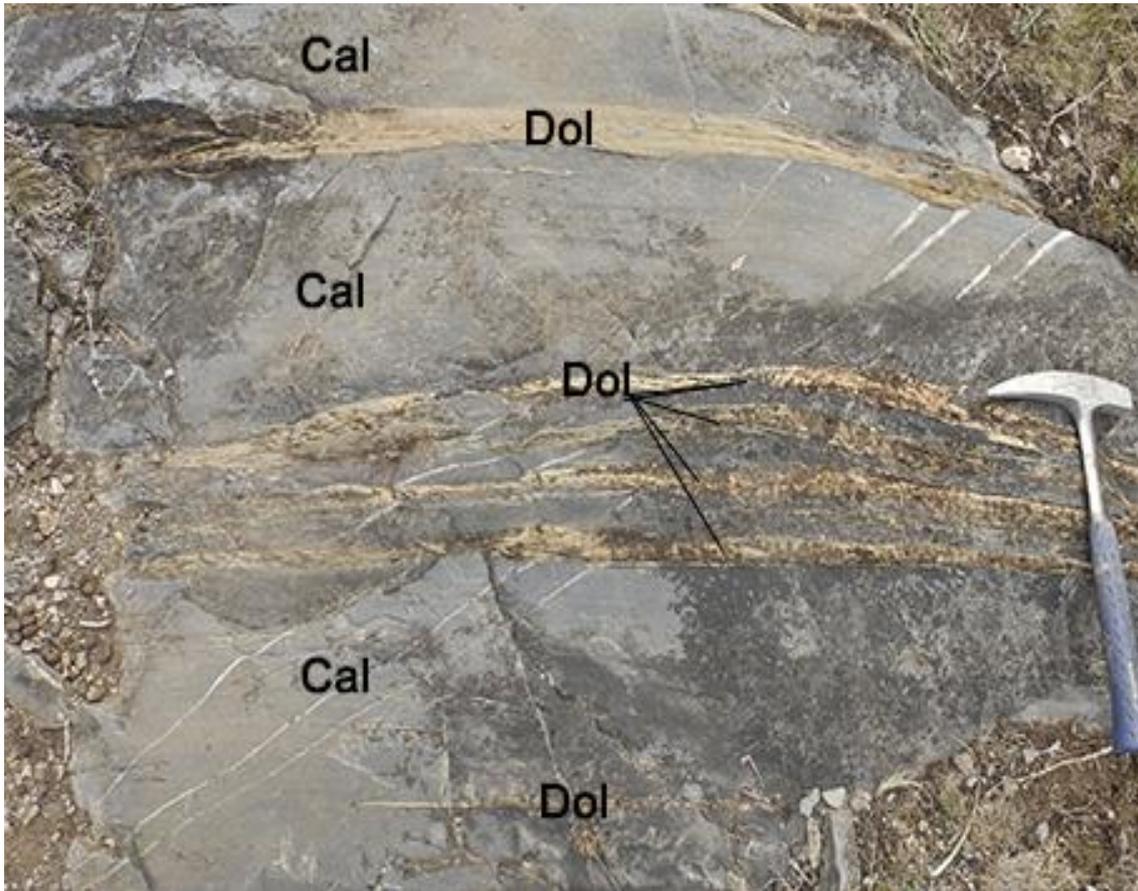


Figura. 13: Ritmita caliza-dolomía, los estratos dolomíticos (Dol) se meteorizan menos y se alteran a un color amarillo, los estratos de caliza (Cal) presentan coloración de alteración gris oscura.

Las calizas presentan características clásticas evidentes, se observan calcarenitas gradadas de origen tempestítico con dolosiltitos a dololutitas ricas en materia orgánica y pirita. Las dolomías son también de origen primario (Gaucher, 2000), dada la alternancia, a veces milimétrica con calizas y la presencia de intraclastos dolomíticos en las calcarenitas (Fig. 14). Las ritmitas y dolomías son más abundantes en la base y las calizas tienen mayor presencia en la parte media y superior (Gaucher et al., 2004b).



Figura 14. Ritmita Caliza – Dolomía, con estratificación milimétrica a centimétrica, Sinclinal Tapes Grande.

Se reconocen seis miembros informales para esta formación, (unidades A – F), con características particulares de relación caliza/dolomía, composición isotópica de C, O, Sr y Cr y diferentes facies sedimentarias (Gaucher et al. 2004, 2009).

El registro fósil es escaso, registrándose *Cloudina riemkeae*, fósil guía del Ediacárico tardío, también acritarcas de los géneros *Leiosphaeridia* y *Lophosphaeridium* (Gaucher & Poiré, 2009).

4.1.3. Formación Cerro Espuelitas.

La Formación Cerro Espuelitas está integrada por pelitas oscuras en la base y el tope y depósitos de BIF y Chert en su parte media. La formación sobreyace a la Formación Polanco de forma concordante. El espesor total de la unidad supera los 1200 m, significando los depósitos quimiogénicos el 50% de la potencia total. Los fósiles que aparecen en la formación son acritarcas de los géneros *Bavlinella* y *Soldadophycus* (Gaucher, 2000).

4.2. CARACTERISTICAS GEOLOGICAS POR REGION.

4.2.1 REGION I (SINCLINAL DEL ESTE).

El área corresponde litoestratigráficamente a una secuencia sedimentaria neoproterozoica que se conoce como Sinclinal del Este, donde se integran formaciones de la porción media-inferior del GAS, incluyendo, de base a tope, a las formaciones Yermal, Polanco y Cerro Espuelitas.

En la región estudiada el GAS corresponde una secuencia sedimentaria, integrada por la Formación Yermal en la base, la cual pasa de forma transicional hacia la Formación Polanco, representando sucesiones de

areniscas-limolitas-carbonatos, y es recubierta de forma concordante por la Formación Cerro Espuelitas (Gaucher et al., 2004).

En el mapa geológico del área central del Bloque Isla Patrulla, se observan las áreas de afloramiento de la Formación Polanco en particular el que se conoce como Sinclinal del Este y es objeto de estudio de este trabajo (Fig. 15)

La deformación y estructuras son características en este área, condicionadas por la influencia de la ZCSB al E, la Zona de Cizalla Isla Patrulla al W y la intrusión del Granito de Guazunambí al N del área cartografiada, generando metamorfismo de contacto (Fig. 15). Predominan buzamientos en el entorno de 40° y calizas puras como litologías principales, las cuales muestran cierto metamorfismo de contacto por la intrusión del Granito de Guazunambí.

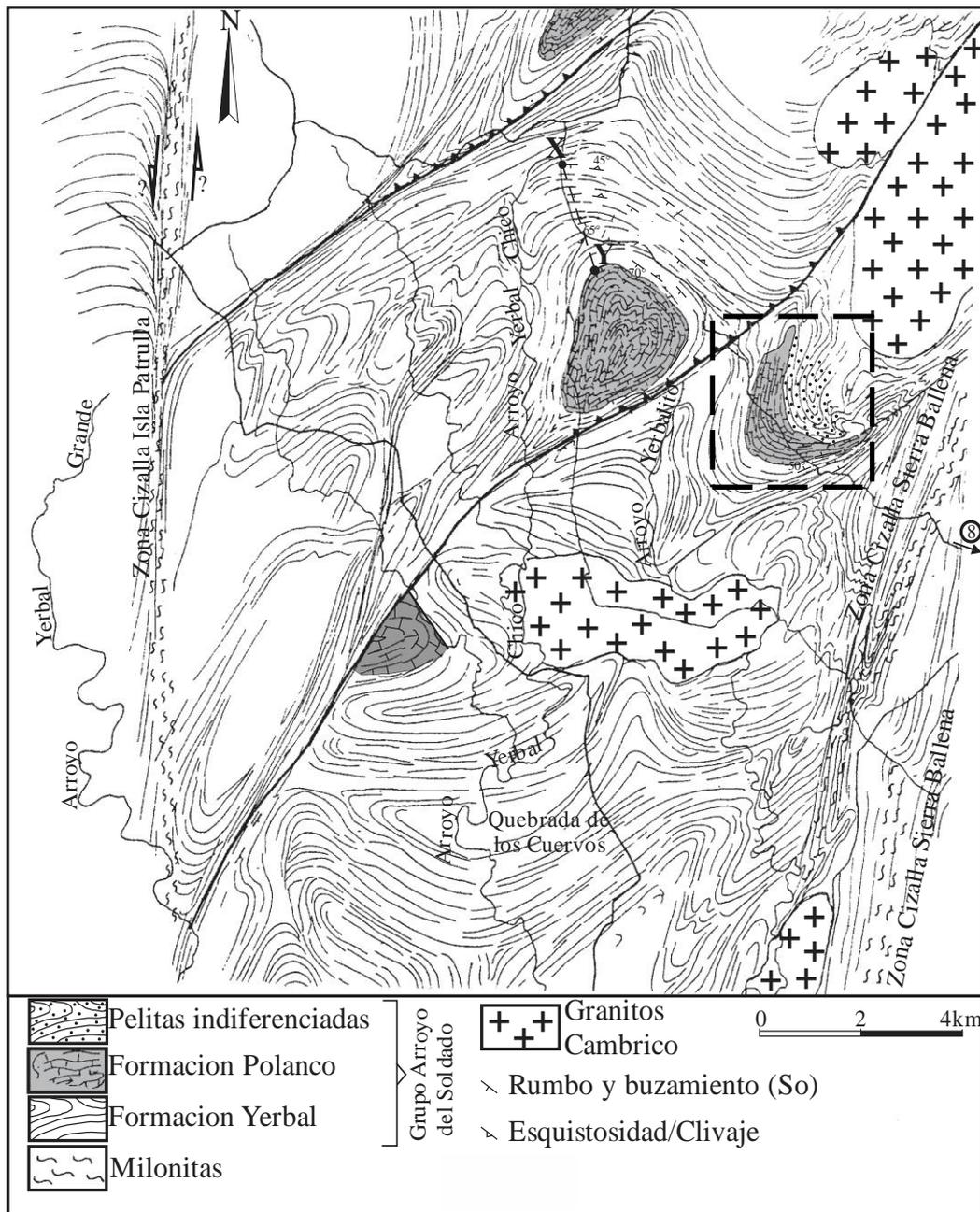


Figura 15. Mapa geológico del área central del Bloque Isla Patrulla, mostrando áreas de afloramiento de la Formación Polanco. Se enmarca la ubicación del Sinclinal del Este (modificado de Gaucher, 2000).

4.2.2 REGION II (SINCLINAL ARROYO TAPES GRANDE).

Esta región corresponde a la cuenca de los arroyos Tapes, especialmente al A° Tapes Grande, cerca de la localidad de Los Tapes, al N del Departamento de Lavalleja.

Corresponde a un sinclinal, el cual se conoce como el Sinclinal de Tapes Grande (Gaucher, 2000), con la particularidad de estar afectado por importantes cabalgamientos con buzamientos mayormente verticales o subverticales. Las litologías predominantes en esta región son las ritmitas calizas – dolomías, con interestratificación milimétrica a centimétrica de ambas y en proporciones similares de calizas y dolomías (Fig. 16).

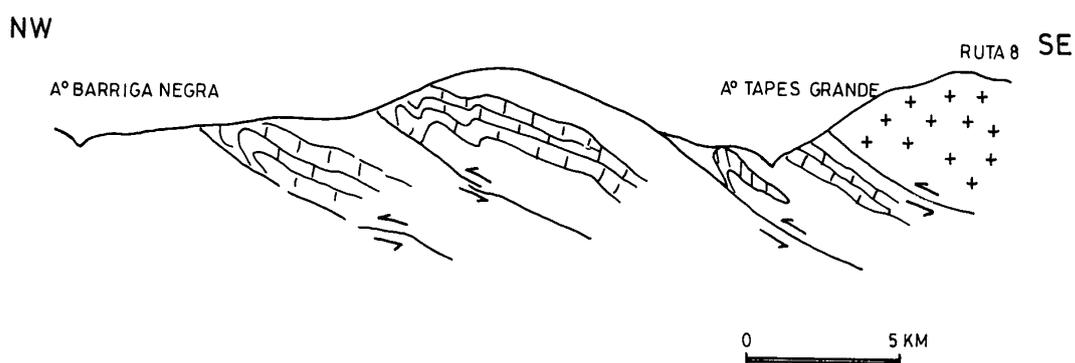


Figura 16. Corte geológico NW-SE, al S del río Cebollatí (Bossi & Navarro, 2000), alrededores de la localidad de Los Tapes, departamento de Lavalleja.

4.2.3 REGION III (MINAS).

Al SW de la ciudad de Minas se reconocen afloramientos que corresponden al GAS, los cuales fueron descritos como Grupo Lavallega (Almeida et al., 1971; Sánchez Bettucci, 1998). Posteriormente se diferenciaron de otros carbonatos de la zona y se registró la presencia de las formaciones Yermal, Polanco y Cerro Espuelitas (Oyantçabal et al., 2001; Gaucher et al., 2004)

Esta región es la más austral del área de relevamiento de este trabajo, la cual se caracteriza por presentar grandes bancos de rocas carbonáticas, siendo una de las principales actividades económicas de esta localidad la producción de cemento portland, mediante la explotación en canteras, históricamente conocidas en esta región.

Vale aclarar, que existe una gran variedad de carbonatos descritos en esta región, con características litoestratigráficas y edades diferentes. No todos corresponden a la Formación Polanco, siendo esta última el objetivo de estudio de este trabajo, por lo cual los datos que se presentan corresponden siempre a descripciones de esta formación en particular, considerando que las demás unidades carbonáticas, también pueden ser portadoras de agua y de calidad de agua mineral natural, pero este estudio se centró en la Formación Polanco.

Los afloramientos carbonáticos de la formación Polanco en la localidad de Minas, están afectados intensamente por grandes fallas y cabalgamientos, al igual que las otras dos regiones, pero con la particularidad de estar en un sector más estrecho y próximo a las dos megacizallas transcurrentes que limitan el Terreno Nico Pérez, lo cual intensifica el plegamiento.

Se observa claramente la estructuración de las litologías constituyentes del área con notorios pliegues y cabalgamientos, la representación a detalle de esta región, corresponde a Gaucher et al. (2004) (Fig. 17). Estudios de prospección de agua mineral realizados por Bossi & Navarro (2000), se consideraron como referencia para este estudio.

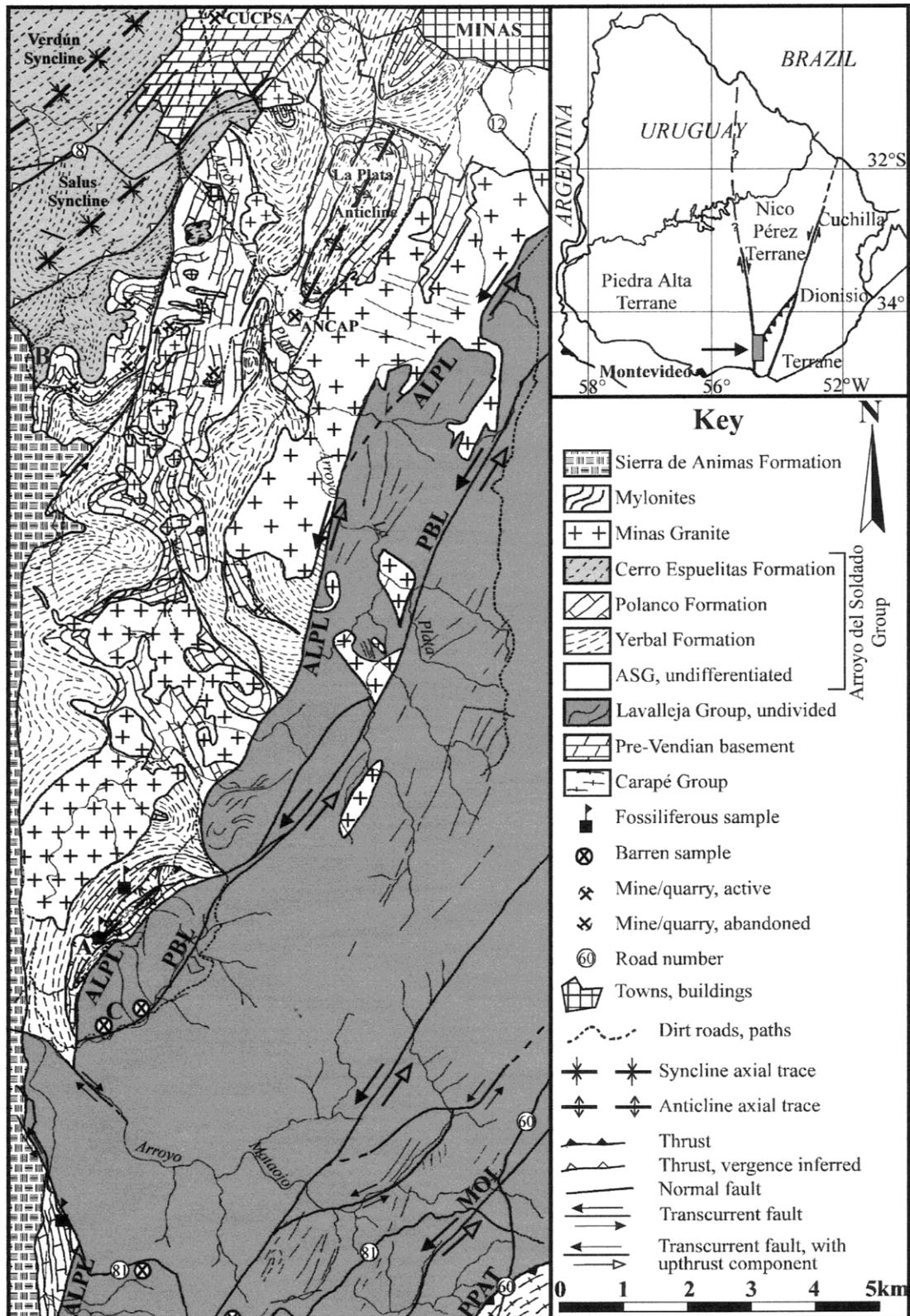


Figura 17. Mapa geológico de la Región de Minas, se observa la estructuración de las Formaciones Yermal, Polanco y Cerro Espuelitas (Gaucher et al., 2004).

5. ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS.

5.1. Provincia Hidrogeológica Lavalleja.

La Provincia Hidrogeológica Lavalleja, se identifica por sus características geológicas homogéneas como una faja de rumbo regional NNE que se extiende desde el Departamento de Maldonado hasta el Departamento de Cerro Largo (Fig. 3) según Bossi & Navarro (2000). El rasgo dominante de esta provincia es la abundancia de rocas carbonáticas, desde calizas puras, dolomías e intercalaciones de ambas litologías.

Esta provincia que pertenece al Terreno Nico Pérez, presenta características en comunes, siendo la estructuración tectónica la más relevante. Si bien hay aspectos en comunes, se pueden identificar características particulares, por lo que se sugiere identificar 2 regiones, una porción al S y otra más al N, según Bossi & Navarro (2000).

El límite S, se establece en áreas cercanas a la localidad de Pan de Azúcar (Bossi & Navarro, 2000), que hasta los alrededores de la ciudad de Minas, constituyen un sector continuo de intensos plegamientos de bancos carbonáticos verticales, desarrollados entre dos grandes elevaciones de rumbo NS a N30E. Esta región conforma la porción sur de esta provincia hidrogeológica.

Al N del Terreno Nico Pérez, en los departamentos de Treinta y Tres y Cerro Largo, ocupando la cuenca superior del río Olimar, se identifican

plegamientos menos pronunciados, litologías de grado metamórfico bajo y con fuertes elevaciones al este, conformando la región N de esta provincia.

Bossi & Navarro (2000) identifican estas dos regiones como la subprovincia Minas – Pan de Azúcar en el S y la subprovincia Olimar al N.

Se expone de forma sintética la totalidad de la provincia de Lavalleja y se indica la posición geográfica dentro del Terreno Nico Pérez.

En la provincia al S, Minas – Pan de Azúcar, se observa un importante desarrollo de bancos de calizas y dolomía con fallas transcurrentes y cabalgantes. Se conocen para esta provincia varias fuentes surgentes con caudales iguales o superiores a 20.000 l/h, caracterizadas hidrogeoquímicamente como aguas bicarbonatadas – cálcicas (Bossi & Navarro, 2000).

Bossi & Navarro (2000) realizaron un estudio con cartografía de detalle, análisis químicos y toma de temperatura periódica durante un año, dando como resultado, caudales de 23.000 l/h, temperatura media 23 ± 1 °C y la composición química indicada en la tabla adjunta (Tabla 1).

ANALITO	MEDIDAS	TSD (ppm)	EQUIVALENTES meq %
Ca ⁺⁺	8	36 ± 3	48
Mg ⁺⁺	7	20 ± 2	43
Na ⁺	8	6 ± 0.6	8
CO ₃ H ⁻	10	215 ± 7	86
Solidos Totales	6	240 ± 20

Tabla 1. Datos químicos de aguas surgentes en la subprovincia Minas – Pan de Azúcar (Bossi & Navarro, 2000).

Se complementan estos datos químicos con información detallada de la geología del área, donde se observa claramente la estructuración de las litologías constituyentes con notorios pliegues y cabalgamientos.

Con el objetivo de destacar los aspectos particulares de esta área, Bossi & Navarro (2000) realizaron un mapeo detallado en un sector particular de una de las surgentes, donde se describen las litologías existentes, su estructuramiento y un corte geológico se representan de forma exagerada en su componente vertical, con el fin de inferir la circulación del agua en las distintas estructuras de las rocas mapeadas en el terreno (Fig. 18).

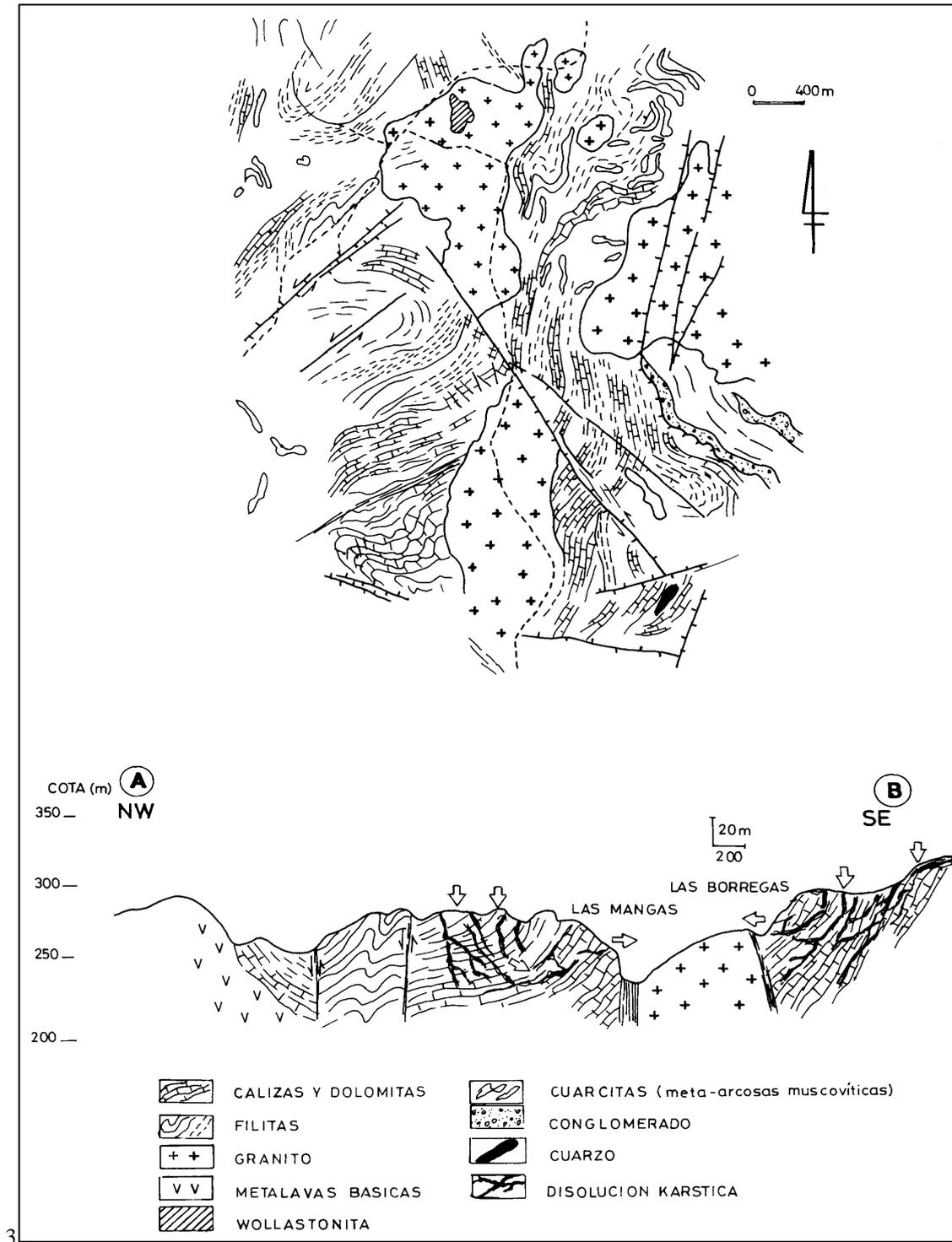


Figura 18. Mapa a detalle de una surgente en la provincia Minas – Pan de Azúcar, corte geológico E – W (exagerado), mostrando la recarga y circulación del agua subterránea para este sistema (Bossi & Navarro, 2000).

Este estudio también incluye datos de la subprovincia al N, Olimar, para la cual la densidad de datos es menor, en comparación con la porción S.

Anteriormente se realizó el relevamiento y caracterización de los afloramientos de rocas carbonáticas entre la localidad de María Albina y Parao, departamento de Treinta y Tres, por Grehs (1979). Los datos del relevamiento de rocas carbonáticas se superponen a la cartografía geológica de la región al N de la provincia hidrogeológica Lavalleja, con el fin de mostrar la abundancia, distribución y diversidad de áreas potenciales para la exploración y prospección de aguas subterráneas con similares características (Fig. 19).

Los datos registrados son escasos en esta región, aunque se conocen surgentes con caudales importantes y datos hidrogeoquímicos parciales que corroboran la composición bicarbonatada cálcica para estas aguas subterráneas (Bossi & Navarro, 2000).

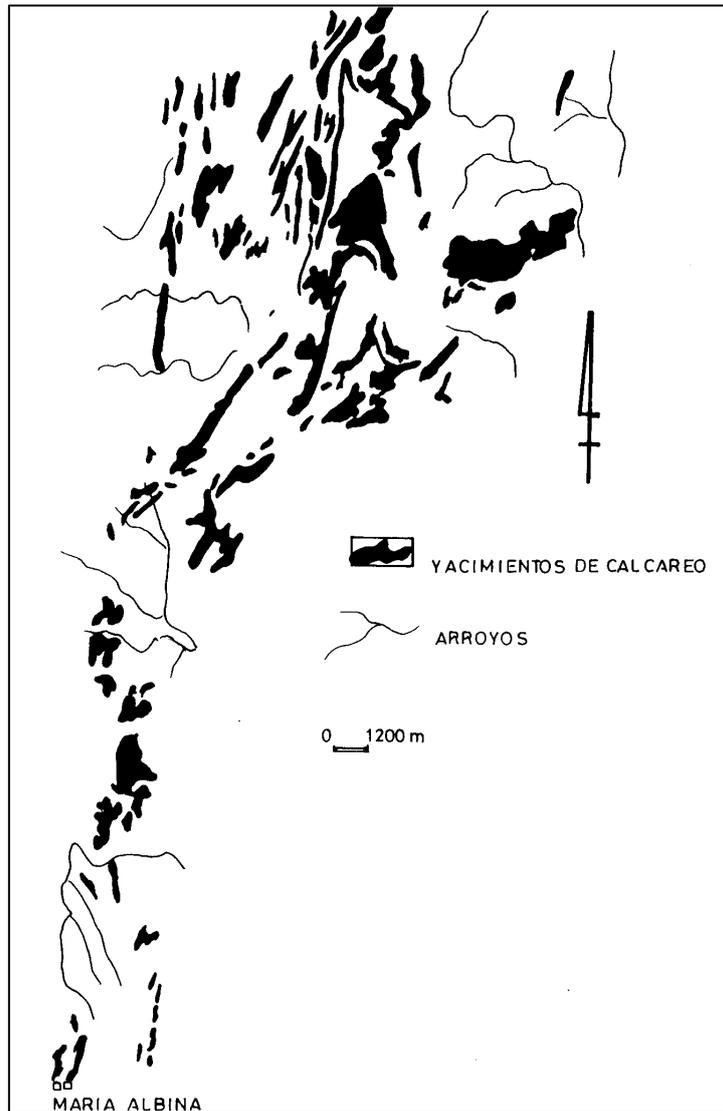


Figura 19. Distribución de rocas carbonáticas al N de la localidad de María Albina, departamento de Treinta y Tres (Grehs, 1979).

En el relevamiento geológico se evidencio la existencia de abundantes afloramientos de carbonatos, donde la topografía de quebrada facilita la infiltración y circulación profunda del agua y la posibilidad de generación de estructuras kársticas.

Bossi & Navarro (2000) incluyen en la descripción de la región N de la provincia hidrogeológica Lavalleja, un área más al N que denominan en su cartografía como Puntas del Yerbal. Incluye una extensa área de calizas con bajo contenido de magnesio, con estructuras plegadas de bajo buzamiento.

Esta característica en particular, se considera favorable para la formación de estructuras kársticas y la posible presencia de volúmenes significativos de aguas subterráneas, posiblemente de calidad mineral natural de mesa.

5.2. Características Hidrogeoquímicas.

Algunos datos hidrogeoquímicos fueron expuestos en el punto anterior al describir las características hidrogeológicas y la relevancia de este recurso para su explotación y comercialización como agua mineral natural, de calidad de mesa, a pesar de la variabilidad estructural de cada área.

Datos hidrogeoquímicos presentados por Bossi & Navarro (2000) indican que las aguas subterráneas se caracterizan por ser bicarbonatadas cálcicas. Aunque en la diversidad de áreas de afloramiento de la provincia hidrogeológica haya variaciones de relieve, grado de fracturación, disponibilidad de caudales y posibilidad de surgencia natural, la composición química mantiene una constante.

Se representan en un diagrama de *Piper* los resultados de análisis químicos realizados en aguas subterráneas de las distintas provincias hidrogeológicas identificadas para Uruguay (Bossi & Navarro, 2000).

Los resultados de cada especie hidrogeoquímica se expone en el diagrama con la numeración que figura en la bibliografía de referencia (Fig. 3) y se superponen los valores con los campos de aguas bicarbonatadas cálcicas de excelente calidad conocidas internacionalmente (Fig. 20).

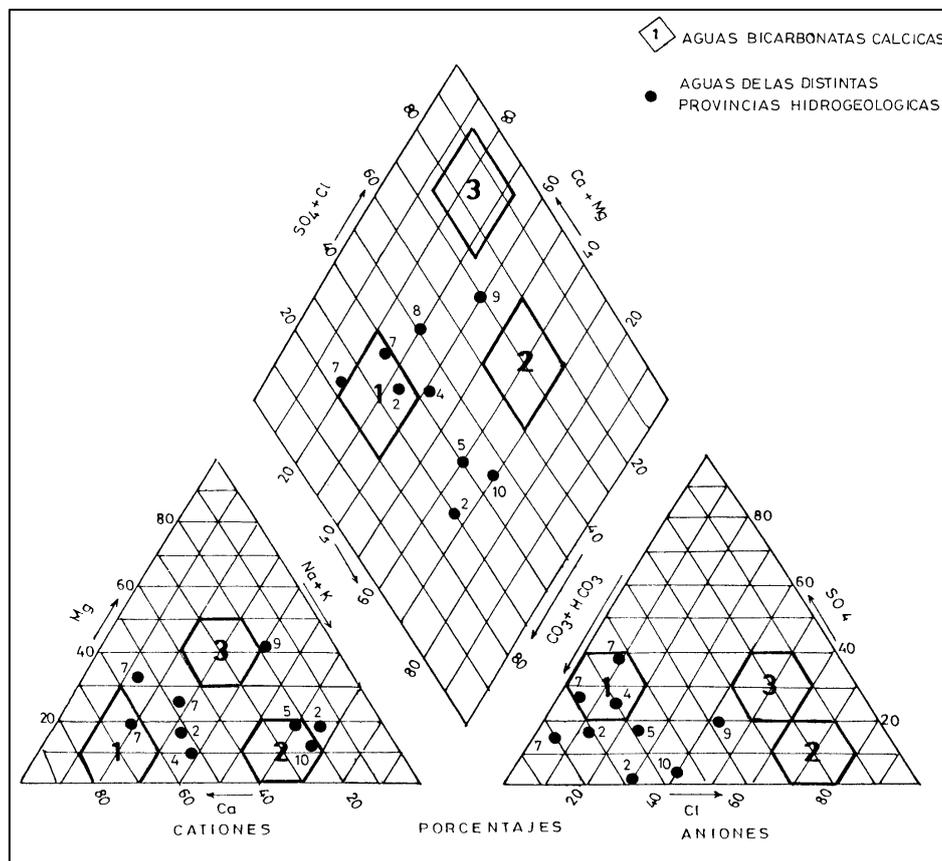


Figura 20. Caracterización hidrogeoquímica de muestras de las distintas provincias hidrogeológicas de Uruguay, numeradas de 1 a 11 como aparece en la figura 3. Se superpusieron a los campos de las distintas especies de agua en el diagrama de *Piper*. Se muestra que la provincia de Lavalleja (n° 7) cae en el campo de las bicarbonatadas cálcicas (Bossi & Navarro, 2000).

Se observa que la muestra de la provincia N° 7, correspondiente a la provincia hidrogeológica de Lavalleja cae dentro del campo de las aguas bicarbonatadas-cálcicas.

Bossi & Navarro (2000) realizan la comparación de la composición química de aguas minerales naturales de mesa internacionales con aguas de igual condición pero uruguayas. En este caso, en la figura 21 se ofrece la comparación local, advirtiéndose que caen en el campo de calidad buena.

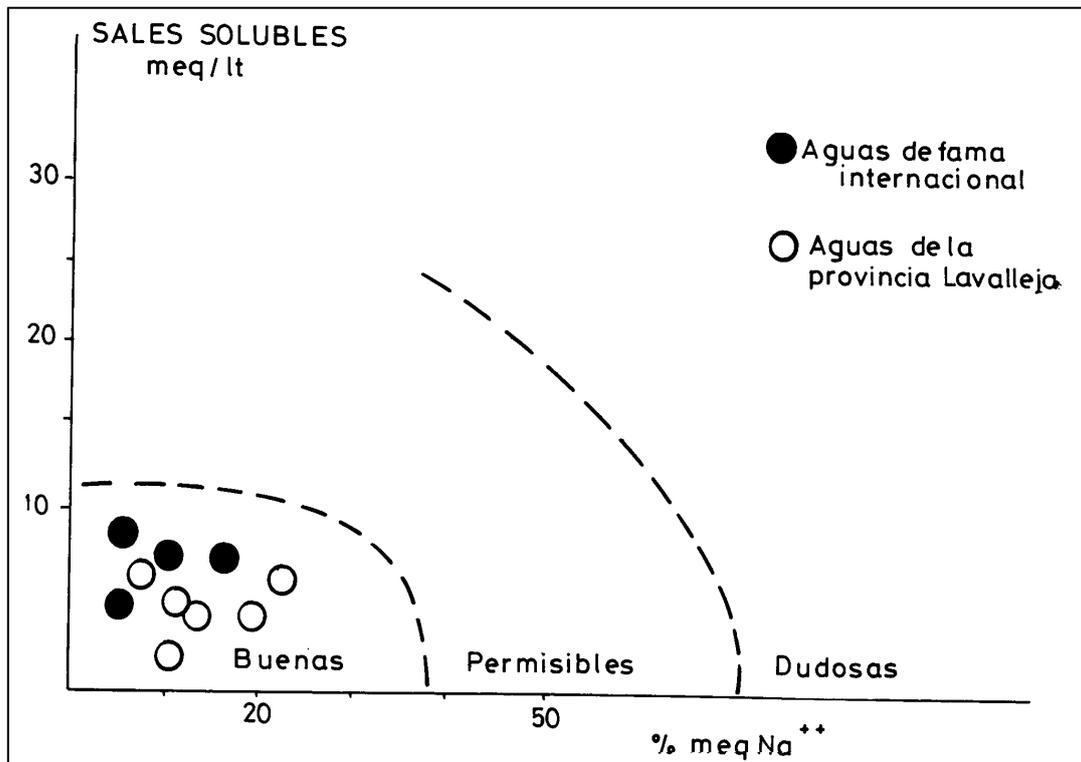


Figura 21. Grafico comparativo de composición de aguas minerales naturales de mesa internacional con aguas de la provincia hidrogeológica Lavalleja (Bossi & Navarro, 2000).

6. RESULTADOS.

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en esta tesis.

En primer lugar se muestran los resultados del análisis geológico y geomorfológico de las regiones caracterizadas en este estudio, (Región I – Sinclinal del Este, al N del Departamento de Treinta y Tres), (Región II – Sinclinal de Tapes Grande, al N del Departamento de Lavalleja) y (Región III – área próximo a la ciudad de Minas).

Se incluyen mapas geológicos a detalle de cada área, mapas de lineamientos, cortes geológicos y el análisis de modelos digitales de terreno en 3 dimensiones para interpretar el sistema hidrogeológico en cada región.

Estos estudios se realizaron con mayor precisión en la región I (Sinclinal del Este) y II (Sinclinal de Tapes Grande), que son los sectores de la provincia hidrogeológica Lavalleja con menor conocimiento, en relación a la región III (Minas).

Junto a los resultados anteriores, se presentan los datos de análisis de subsuelo, en los casos donde se contó con esta información para ser incluida en la tesis.

En particular se accedió a datos perforaciones en la Región I, disponiendo de la descripción litológica de dos perforaciones y sondeos eléctricos verticales (SEV) (Dr. Jorge Montaña en comunicación personal, julio 2015).

También se complementó el análisis estructural con las imágenes obtenidas por el *drone*, sobre las cuales se realizó un modelo digital de terreno en 3 dimensiones.

Por último, se describen las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas, a partir de valores medidos en el campo y resultados de los análisis químicos de muestras de agua de cada región. Se emplearon diagramas de representación gráfica comparativos y se presenta la interpretación de estos datos.

6.1 Análisis geológico y geomorfológico

Se presentan los resultados obtenidos mediante el relevamiento sobre el terreno. Incluye la descripción de afloramientos, fotolectura, cortes geológicos, estudio de lineamientos de la red de drenaje, fracturas, cabalgamientos y aspectos geomorfológicos característicos del relieve de un sistema kárstico.

6.1.1 Región I (Sinclinal del Este).

Las litologías que conforman el Sinclinal del Este, corresponden en orden estratigráfico, como ya se dijese a las formaciones: Yermal, Polanco y Cerro Espuelitas, desde la base hacia el tope, siendo transicional el pasaje entre cada unidad. Particularmente la Formación Polanco se caracteriza por estar representada por bancos de calizas puras en esta región.

La estructura plegada, es un Sinclinal recumbente, con plano axial N45°E, buzando entre 35° y 40° al NW. Junto a las mega estructuras (cizallas), operan cabalgaduras con vergencia al SE, que generan límites marcados al N y S del área del sinclinal.

Estos rasgos estructurales se observan en el mapa geológico del área de estudio (Fig. 22) y en el mapa de lineamientos (Fig. 23), y ya fueron anticipados en el capítulo anterior.

Desde el NW hacia el SE, se realizó un corte geológico, sobre el área del sinclinal, donde se aprecia la disposición de las unidades y las estructuras que operan (Fig. 24). La dirección del corte geológico corresponde al sector donde se cuenta con datos de sondeos verticales del cual se tomaron los datos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, los cuales serán presentados más adelante en este capítulo.

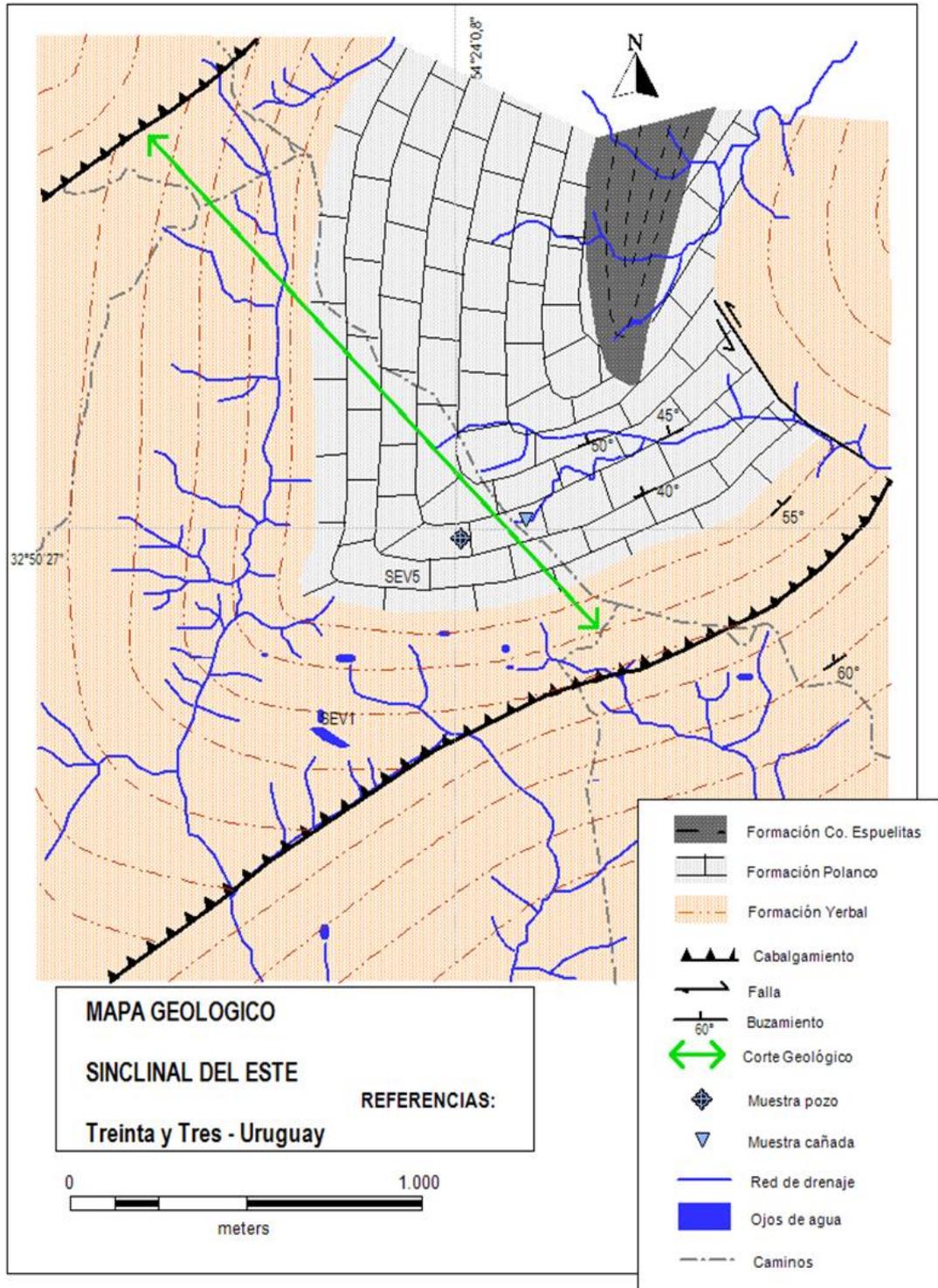


Figura 22. Mapa geológico de la Región I (Sinclinal del Este), Treinta y Tres.

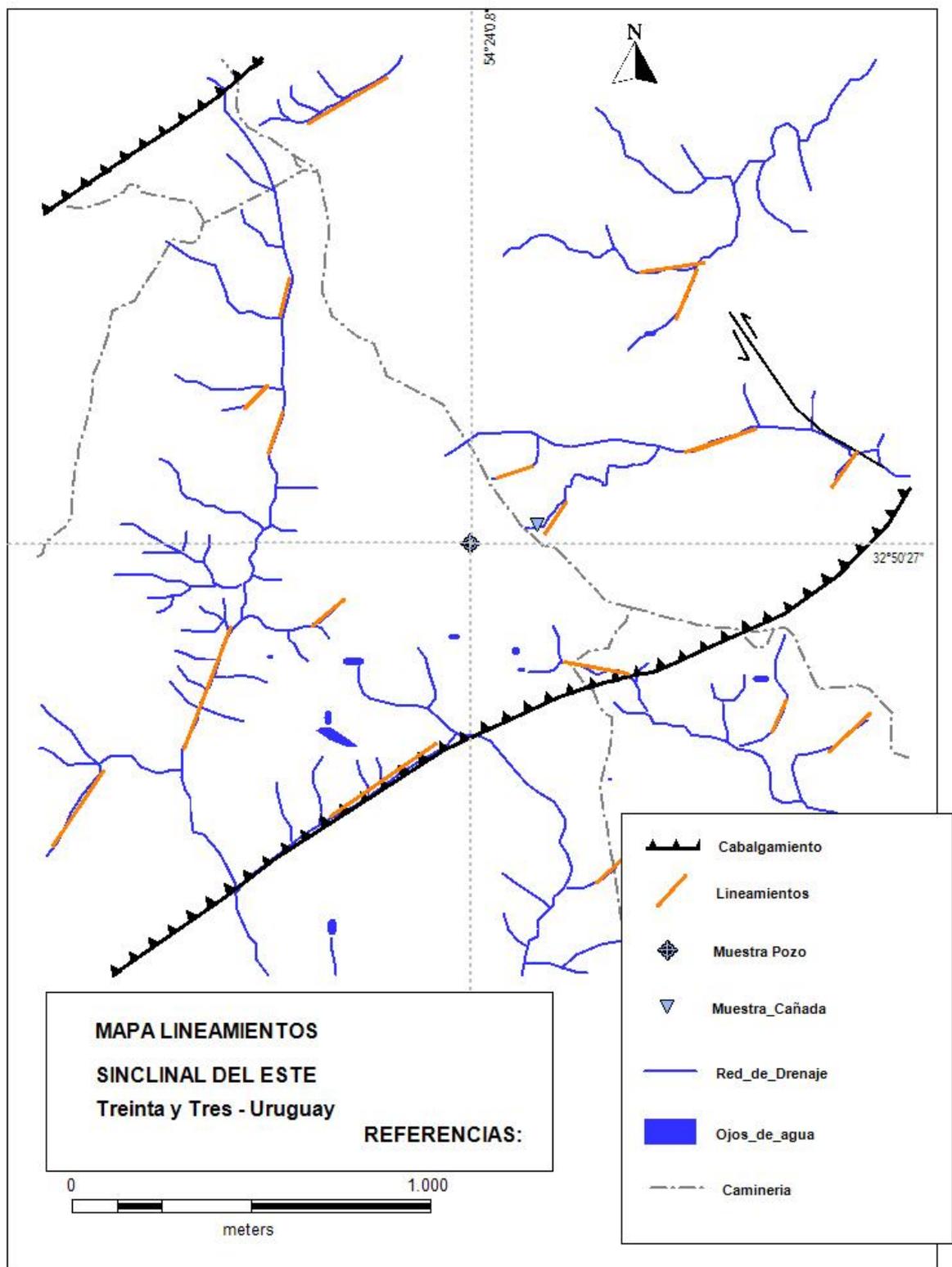


Figura 23. Mapa de lineamientos de la Región I (Sinclinal del Este), Treinta y Tres.

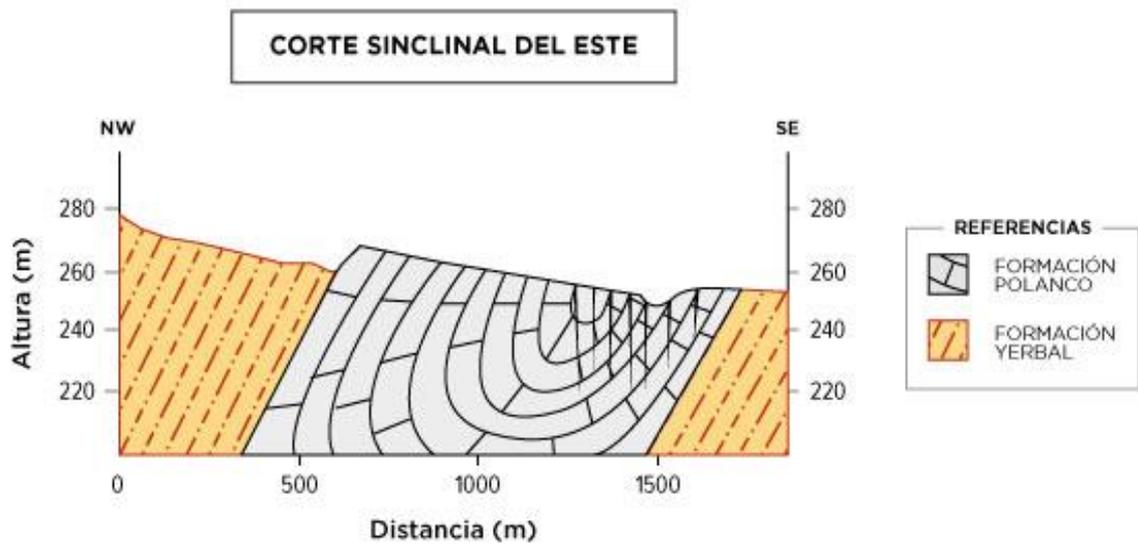


Figura 24. Corte geológico de la región I (Sinclinal del Este), Treinta y Tres.

El análisis de los lineamientos se complementó con diagramas de rumbos (Fig. 25).

Estos diagramas tipo rosa de los vientos, en los que se representaron los principales lineamientos, fueron dispuestos en la imágenes sobre la red de drenaje y corroborados en el terreno. Se representaron en el diagrama las direcciones comprendidas en el sinclinal, particularmente las que se localizan en los carbonatos y próximo a los pozos.

La dirección predominante corresponde a N 35° a 45° E, valor que coincide con el rumbo de los cabalgamientos en los sectores NW y SE del área y con la dirección del eje del pliegue.

En menor proporción se observan lineamientos con rumbo N 60° a 70° E.

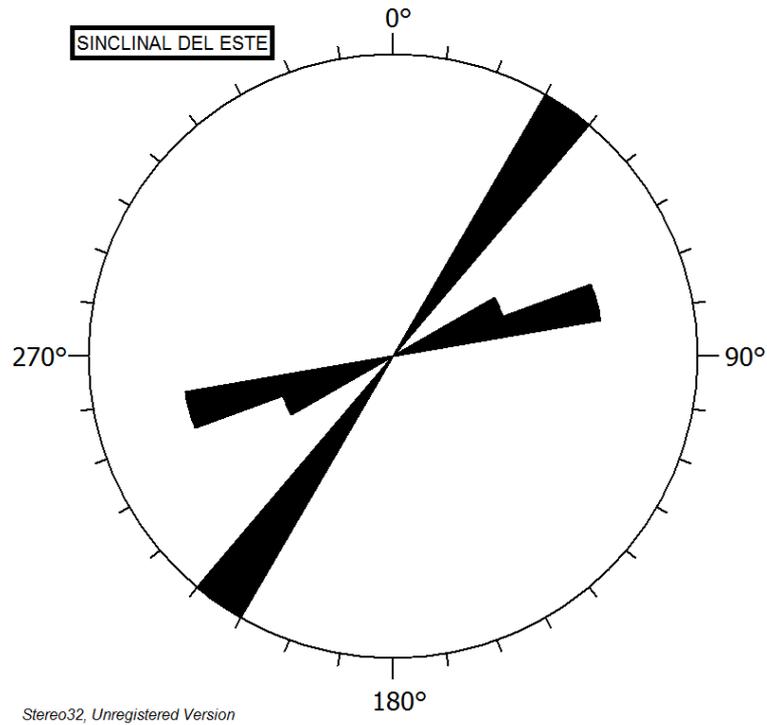


Figura 25. Rosa de rumbos de lineamientos para la Región I, Sinclinal de Este, Treinta y Tres. La dirección N 35° a 45° E corresponde al eje del sinclinal, estructura sobre la cual se desarrolla la perforación Sinclinal del Este 1 y a los cabalgamientos que se indican en la cartografía. La dirección N 60° a 70° E corresponde a fallas de menor presencia en el área.

El mapa geológico revela la existencia de estructuras en superficie, que en primera instancia, se consideran posibles manifestaciones superficiales de la existencia de un sistema kárstico.

Estas estructuras se consideraron relevantes en este estudio y corresponden a cuerpos de agua temporales (“ojos de agua”), los cuales se disponen en su mayoría, sobre los metasedimentos de la Formación Yerbal.

En las imágenes tomadas por el *drone* se pudo corroborar el aspecto temporal de estos cuerpos de agua, ya que en las fotos aéreas del año 1966-67, la distribución de los “ojos de agua”, no coinciden y a su vez, difiere con imágenes satelitales históricas registradas en *Google Earth*.

Se constató que la mayor concentración de este fenómeno de acumulación de agua, ocurre sobre las pelitas de la Formación Yerbal (Fig. 26).

Según los datos proporcionados por el *SEV*, indican que estos “ojos de agua”, corresponden a manifestaciones superficiales, ya que esa agua se acumula en una zona plana, sobre un sustrato de baja permeabilidad con un espesor de 20 metros y estos materiales resultan poco favorables para la circulación del agua en dirección vertical. En otras palabras, se trata de acumulaciones de aguas pluviales.



Figura 26. Cuerpos de agua temporales desarrollados sobre la Formación Yermal, próximos al contacto con los carbonatos de la Formación Polanco en el Sinclinal de Este. Foto tomada desde el *drone* (coordenadas al centro de la foto: X: 32°50'36'', Y: 54°24'10'', fecha: 19/9/15).

Continuando con el análisis de las imágenes de las distintas fuentes, en el área de afloramiento de los carbonatos, se observa el desarrollo de depresiones en el terreno, que se disponen respetando determinado patrón lineal. Estas estructuras fueron corroboradas en el terreno y se registraron con un padrón de escala de referencia.

La dirección en la cual se disponen estas estructuras corresponde al rumbo N 40° E, valor que coincide con la dirección que prevalece en el diagrama de la rosa de lineamientos y a su vez coincide con el rumbo del eje del pliegue y los cabalgamientos que afectan este sector.

Las dolinas son estructuras exokársticas, que se caracterizan por ser depresiones en la superficie del terreno que se comportan como áreas de infiltración, ya que se comunican con el drenaje subterráneo.

Según su morfogénesis se conocen tres tipos (Huízar & Oropeza, 1989):

- Dolinas en “taza”: se originan por disolución y subsidencia del material rocoso, con base casi plana cubierta por arcillas producto de la disolución, formando “terra rossa”.
- Dolinas en “embudo”: en este caso las estructuras están condicionadas según el material en el que se originan. Si se desarrollan en calizas, generan estructuras kársticas abiertas que drenan al sistema subterráneo por medio de un “ponor” (def.: idioma protoeslavo: fosa, hoyo, abismo que oficia de vía de acceso de una corriente superficial de agua, río, arroyo, lago; total o parcialmente hacia el sistema kárstico subterráneo). Si se generan en rocas más solubles como yeso, pueden obstruirse y no resultar estructuras de buena circulación de agua.
- Dolinas en “pozo”: en esta estructura prevalece la corrosión vertical, que evoluciona con episodios de colapso de la estructura con el avance de la disolución. Su diámetro es menor que la altura y se consideran formas abiertas y de fácil infiltración del agua.

En la Región I se identificó un relieve kárstico de buen desarrollo asociado a las calizas de la Formación Polanco, con estructuras de disolución evidentes. Se registraron estas estructuras en superficie mediante foto en planta e imágenes obtenidas por el *drone* (Fig. 27).

En primer lugar se identificaron dolinas tipo “taza”, donde se observan los procesos de disolución y subsidencia, con el desarrollo de suelos tipo “terra rossa”. Se observan estas estructuras asociadas a un control estructural, vinculado a la dirección del eje del pliegue del Sinclinal del Este. La concentración de dolinas tipo “taza” está asociada a la dirección N 40° a 45° E que corresponde a la dirección del eje del pliegue. Los modelos digitales de terreno generados a partir de las imágenes capturadas por el *drone*, permiten visualizar con visión panorámica estas estructuras kársticas (Anexo 3).

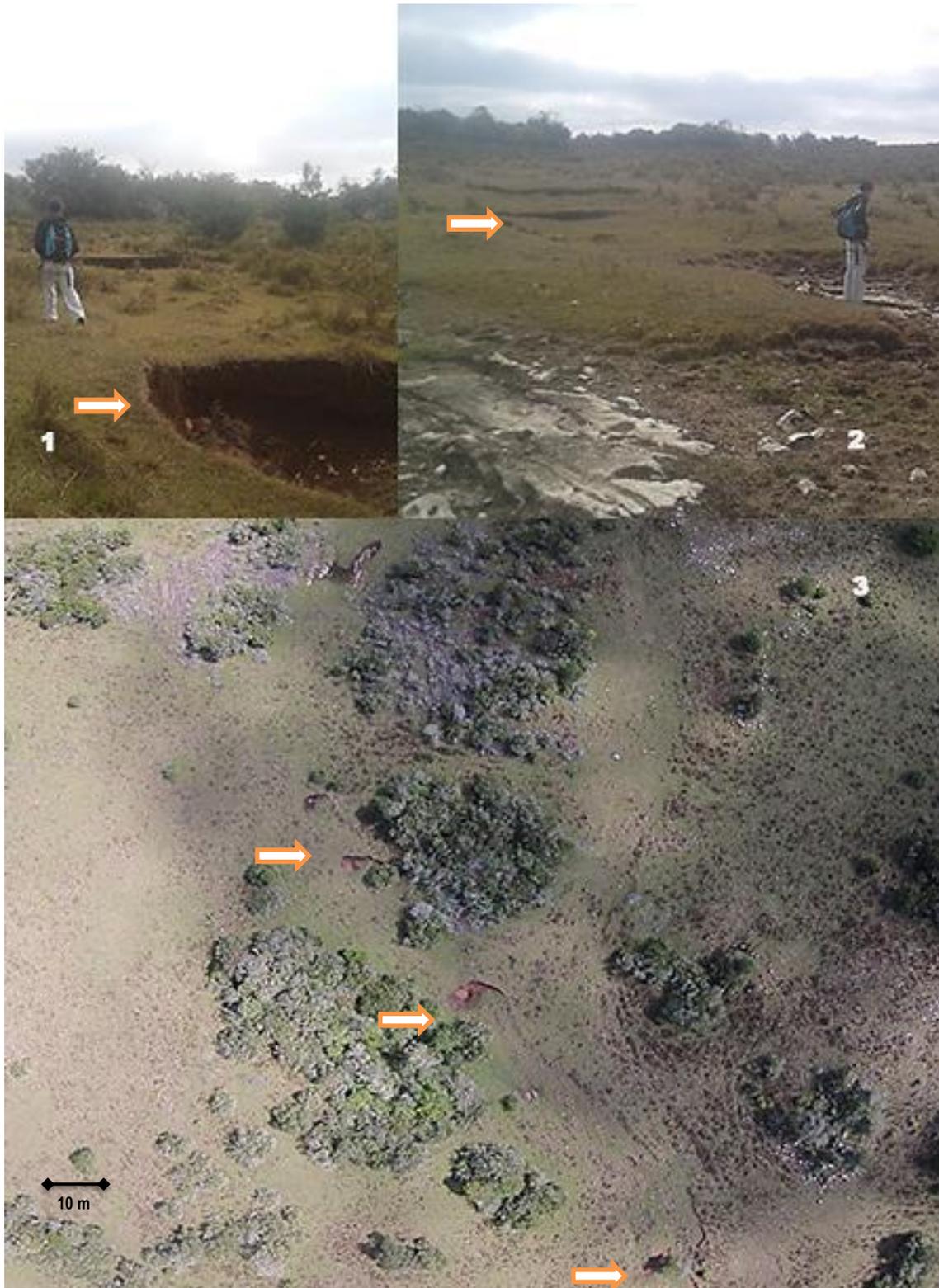


Figura 27. Distribución de estructura de depresión del terreno (Dolinas tipo “taza”), acompañan el rumbo N 45° E. Sinclinal del Este, Treinta y Tres. Dolinas tipo “taza” observadas en planta (1 y 2). Secuencia de Dolinas tipo “taza” observadas con imágenes *drone* (3) (coordenadas: X: 32°50′22″, Y: 54°24′10″, fecha: 19/9/15).

Morfoestructuralmente, este pliegue constituye un relieve deprimido, albergando en la dirección N 40° a 45° E las depresiones kársticas.

Los datos levantados con el *SEV* indican que próximo a este sector las condiciones de subsuelo son favorables para hallar aguas subterráneas, ya que los valores de resistividad descienden indicando una elevada permeabilidad, en torno al nivel -60 m (Montaño, J., com. pers., julio 2015)

En segunda instancia se identificaron estructuras de disolución en calizas del Sinclinal del Este, con aparente desarrollo vertical mayor que el diámetro de apertura en superficie, donde la corrosión vertical se profundiza y es posible encontrar bloques colapsados desde sectores más profundos en el sector deprimido.

Estas estructuras deprimidas se clasificaron como dolinas tipo “pozo”, varias se encuentran descubiertas y otras han sido aprovechadas por el monte nativo para implantarse y desarrollarse en estas cavidades profundas (Fig. 28).



Figura 28. Diversidad de formas de relieve kárstico conformando dolinas tipo “pozo”. Para 1 y 2, no fue posible alcanzar la base de la depresión. En 3 se observa la base del orificio cerca de la superficie, generando las condiciones para la implantación de retoños de monte nativo. En 4 se observa la corrosión en superficie de las calizas, con sectores de colapso en la estructura y al fondo se ve el desarrollo de monte nativo sobre este tipo de estructuras. Se observa el color gris oscuro característico de las calizas.

6.1.2 Región II (Sinclinal Los Tapes).

Las litologías que conforman el Sinclinal de Tapes Grande, corresponden en orden estratigráfico a las formaciones: Yermal, Polanco y Cerro Espuelitas, desde la base hacia el tope, siendo transicional el pasaje entre cada unidad. Particularmente la Formación Polanco se caracteriza por estar representada por ritmitas de intercalación milimétrica a centimétrica de calizas y dolomías en esta región. Sobre estas litologías se constata la presencia de manantiales, los cuales se registran en la cartografía.

Se observan el desarrollo de estructuras cabalgantes con buzamientos casi verticales o de bajo ángulo, de rumbo predominante NE-SW, que afectaron a la secuencia sedimentaria (Fig. 29).

En el mapa de lineamientos se muestran las principales direcciones estructurales sobre la red de drenaje (Fig. 30). También se realizó un corte geológico NW-SE, paralelo al desarrollo del cauce del arroyo, relevando los afloramientos de carbonatos que se disponen en esa dirección (Fig. 31).

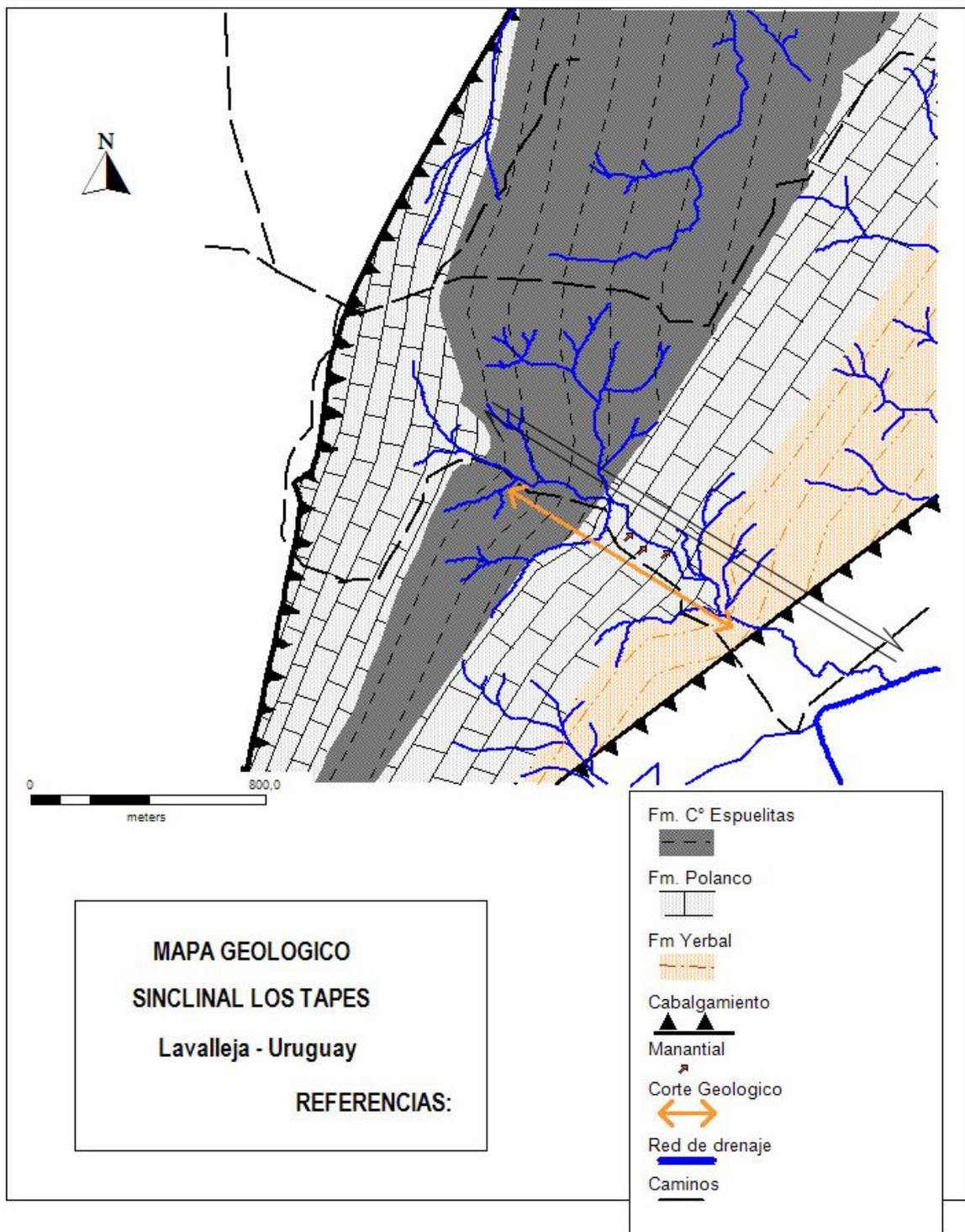


Figura 29. Mapa Geológico de la Región II (Sinclinal Tapes Grande), Lavalleja.

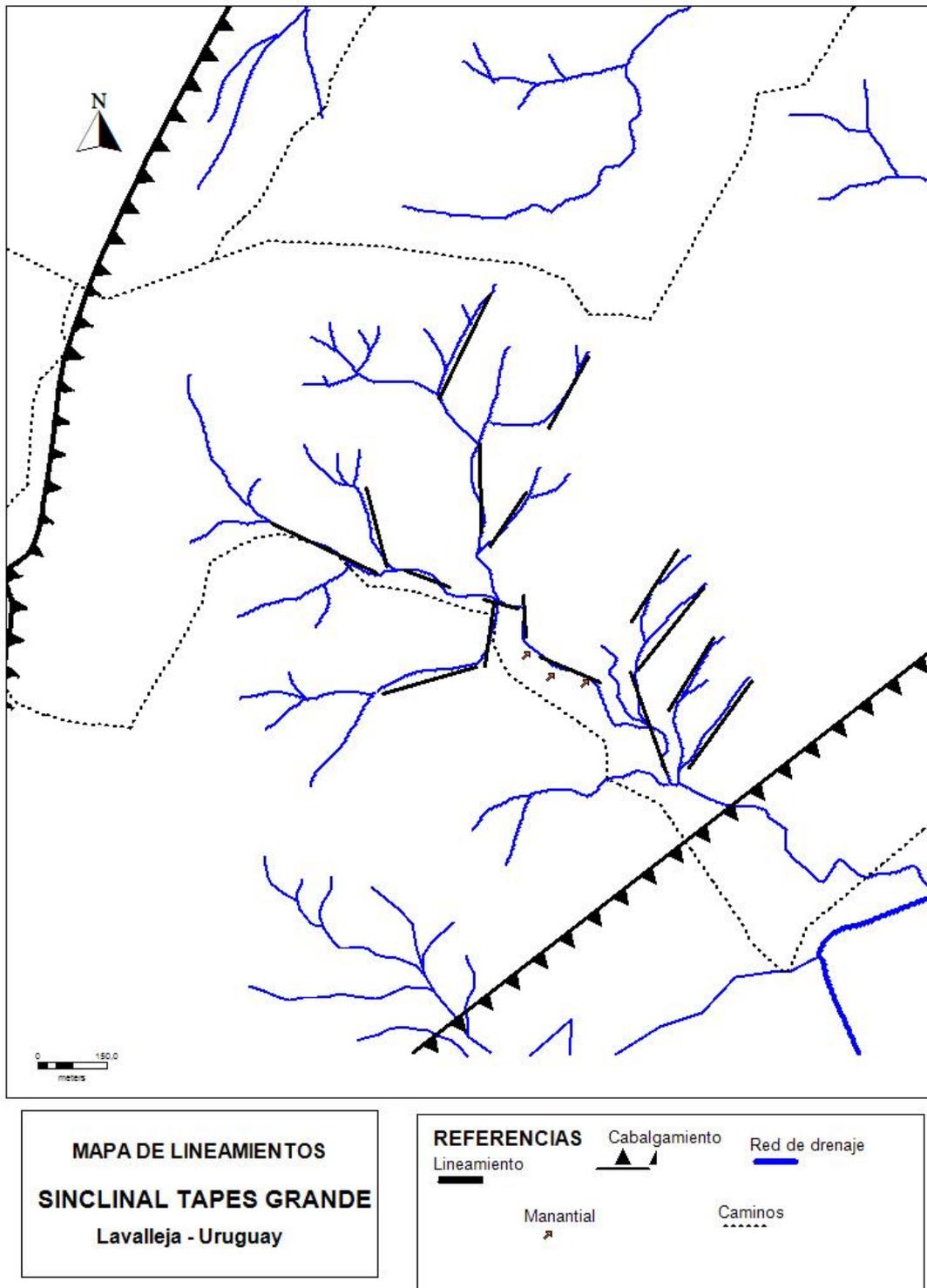


Figura 30. Mapa de lineamientos de la Región II (Sinclinal Tapes Grande), Lavalleja.

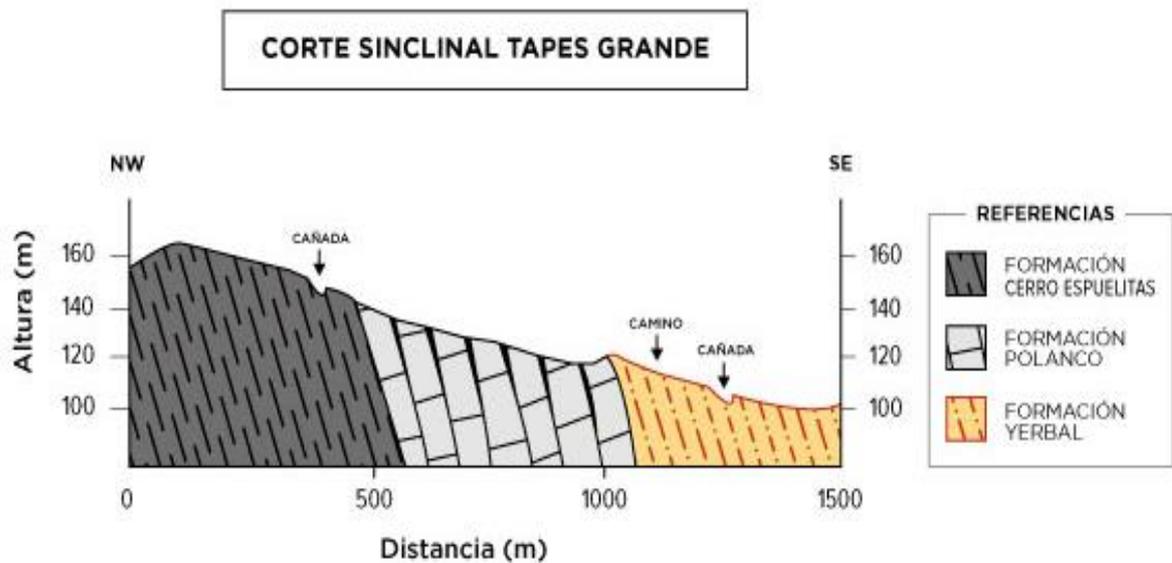


Figura 31. Corte geológico NW-SE (Sinclinal Tapes Grande), Lavalleja.

El análisis de los lineamientos se complementó con diagramas de rumbos (Fig. 32), donde se representaron los rumbos de mayor presencia en el área, considerando las direcciones de lineamientos sobre la red de drenaje y estructuras de menor escala relevadas sobre los afloramientos.

La dirección de mayor presencia es $N 50^\circ$ a 60° E, se observa este patrón paralelo a la interestratificación de los carbonatos aflorantes. Este fenómeno es un indicio favorable de circulación de agua, ya que en esos planos se observa disolución de carbonatos.

En segundo lugar se encuentran los lineamientos de dirección $N60^\circ W$ y N - S, los cuales se asocian a fallas que se observan sobre la red de drenaje. Estas orientaciones se asocian probablemente a la acción de las cabalgaduras

con vergencia al NW, que actúan al NW y SE de esta zona y que notoriamente generan un patrón de estructuración intenso.

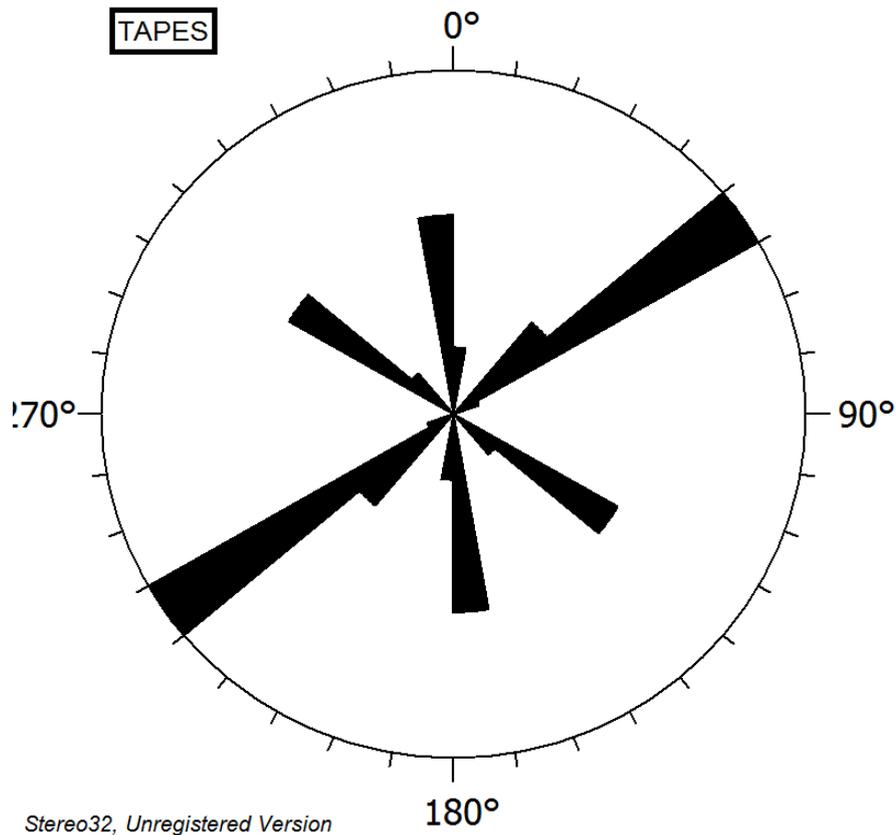


Figura 32. Rosa de rumbos de lineamientos para la Región II, Sinclinal de Tapes Grande, Lavalleja. La dirección N50°-60°E es la de mayor presencia coincide con la superficie S_0 y se asocia probablemente a la cabalgadura que actúa al SE del área. El valor N 60° W corresponde a fallas transcurrentes que direccionan la red de drenaje. Los lineamientos N-S corresponden a la cabalgadura al NW del área.

La distribución de los rasgos estructurales relevados en el terreno, especialmente sobre los carbonatos de la formación Polanco, permite que se genere una intensa fracturación en superficie. Estas estructuras se registraron en el terreno con imágenes en planta y con el vuelo del *drone* (Fig. 33)

Las estructuras exokársticas que se desarrollan en la superficie de la roca, de forma irregular, que se produce por la erosión del agua a través de fracturas y diaclasas. Los Modelos digitales de terreno generados a partir de las imágenes capturadas por el *drone*, permiten visualizar con visión panorámica estas estructuras kársticas (Anexo 4).

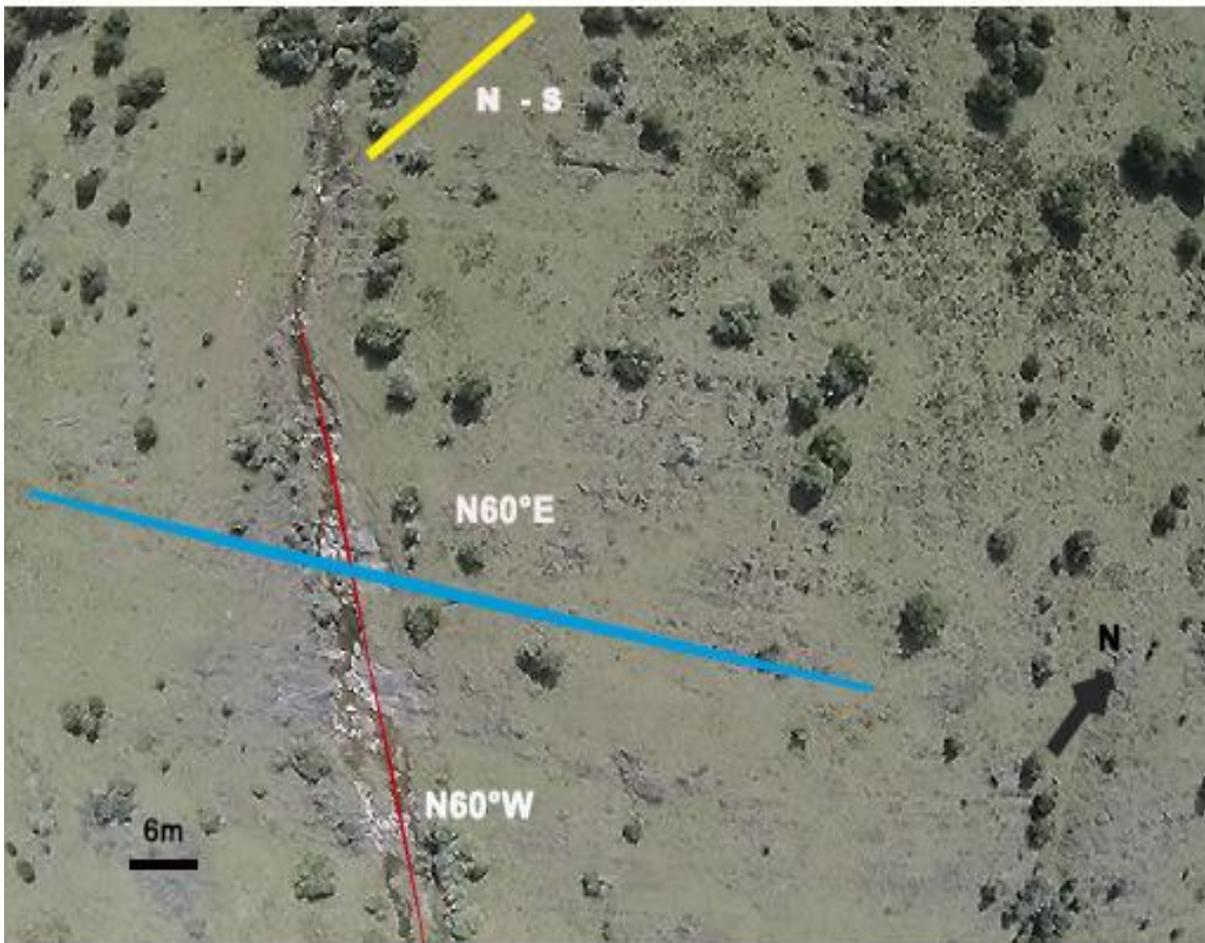


Figura 33. Imagen *drone* donde se visualizan los lineamientos estructurales en superficie, se observan con claridad la estratificación N60°E y la falla N60°W, las estructuras N-S, se ven suaves sobre el extremo superior de la foto. Sinclinal Tapes Grande, Lavalleja (coordenadas del centro de la foto: X: 33°57'59'', Y: 54°57'36'', fecha: 19/9/15).

Los lineamientos de dirección N60°W relevado sobre la red de drenaje, se asocian a fallas transcurrentes.

En el relevamiento de superficie se observa que la alineación N60°E coincide con la orientación de la cabalgadura al SE del área y corresponde a la estratificación de las ritmitas carbonáticas.

Esta característica favorece al desarrollo de un relieve kárstico característico que se denomina Lapiaz. Esta forma de disolución kárstica, se caracteriza por presentar en superficie un relieve irregular, producto de la corrosión del agua a través de las discontinuidades (Fig. 34).

Esta forma kárstica superficial se genera por disolución de la roca calcárea, generando surcos paralelos y longitudinales, que pueden interferir con las diaclasas y generar estructuras arborescentes. La ausencia de cobertura edáfica y una pendiente mayor a 10° favorecen la dinámica del sistema (Fig. 34; 2)

También se encuentran hoyos y nichos cilíndricos, que se concentran en sectores donde se entrecruzan las estructuras N60°E y N60°W (Fig. 34; 1, 3 y 4).

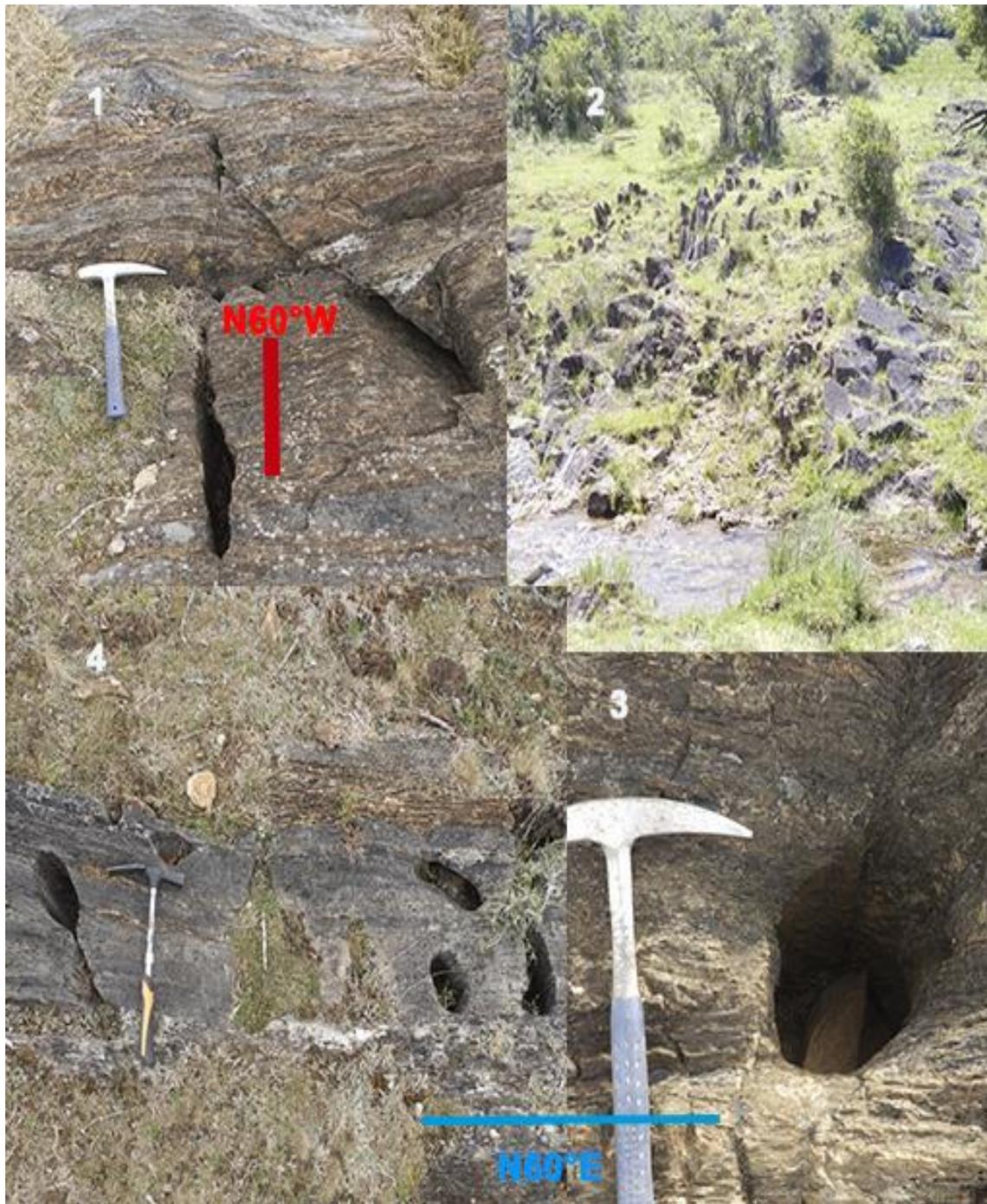


Figura 34. Estructuras kársticas relevadas en afloramientos. Se muestra la concordancia de la estructura con las orientaciones, N60°E coincide con lineamientos y estratificación, N60°W corresponde a fallas que favorecen al desarrollo de estructuras kársticas (foto 1 y 4). Relieve kárstico, de características irregulares en superficie asociado a las diaclasas (foto 2). Estructura kárstica de fractura, desarrollado por diaclasas (foto 3).

6.1.3 Región III (Minas).

En los alrededores de la ciudad de Minas, especialmente al SW de esta localidad, se conocen para la cartografía geológica nacional, afloramientos del GAS. Se ha relevado el pasaje transicional de las formaciones Yerbal, Polanco y Cerro Espuelitas (Ediacárico), con intrusiones del Granito de Minas y en contacto tectónico con otras unidades (Gaucher et al., 2004) (Fig. 35)

Se reconocen grandes elevaciones de rumbo NS (ZCSY) y N30°E (Lineamiento Arroyo La Plata) en esta región e intensos plegamientos, donde la secuencia sedimentaria del GAS se encuentra afectada.

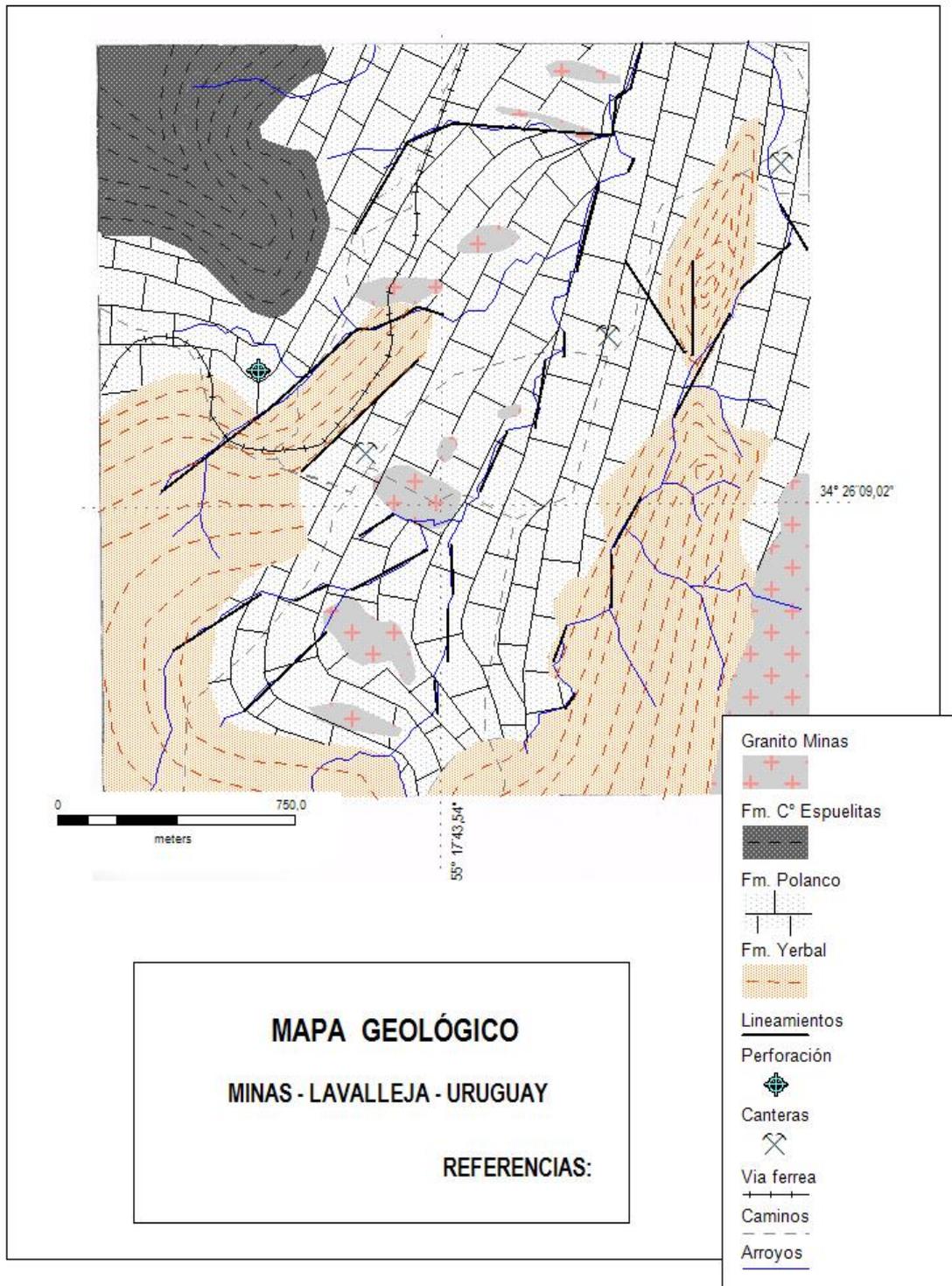


Figura 35. Mapa geológico-estructural de la Región III (Minas). Se muestra la ocurrencia de la secuencia sedimentaria del GAS, particularmente los afloramientos de los carbonatos de la formación Polanco. Ampliado del mapa presentado por Gaucher et al. (2004 a), ver Fig. 17.

6.2 Hidrogeología.

Se presenta el procesamiento y análisis de los datos de perforaciones y manantiales relevados en este estudio. Incluyendo valores de caudal y nivel piezométrico. Vale destacar que las Regiones I y II, son áreas con escasos datos de sondeos, para el caso de la región II, nulos. Por ende no se dispone de información potenciométrica que permita determinar la dirección de flujo subterráneo.

Para la Región I (Sinclinal del este) se accedió a datos de descripción litológica, caudal y nivel piezométrico de dos perforaciones (Anexo 1 y 2).

La perforación Sinclinal del Este 1 se desarrolla en calizas puras de la formación Polanco, con una profundidad desde superficie de 45 m, un caudal de 30.000 l/h y nivel estático de 5,9. En esta región también se cuenta con la perforación Sinclinal del Este 2, la cual describe como “limolitas grafitosas”, a posibles metapelitas de la Formación Yermal, con una profundidad de 94 m, arrojando un caudal de 200 l/h y nivel estático de 6,0 m. Sin embargo en base al relevamiento geológico de superficie esta perforación se construyó sobre calizas de la Formación Polanco (Anexo 2) y no sobre pelitas de la Formación Yermal.

Se tomaron medidas de nivel de agua de cada pozo para un periodo comprendido entre marzo 2012 y agosto 2015. Se graficaron estos datos, mostrando el comportamiento del nivel de agua en cada uno (Fig. 36).

Se comparan las variaciones del nivel de agua en los pozos, con el índice de precipitación estandarizado, el cual mide el exceso o déficit de precipitación para un lugar dado en un periodo de tiempo, comparando con valores históricos del periodo comprendido entre: 1981 a 2010 (Fig. 37) (www.meteorologia.com.uy/ServCli/caracteristicasclimaticas).

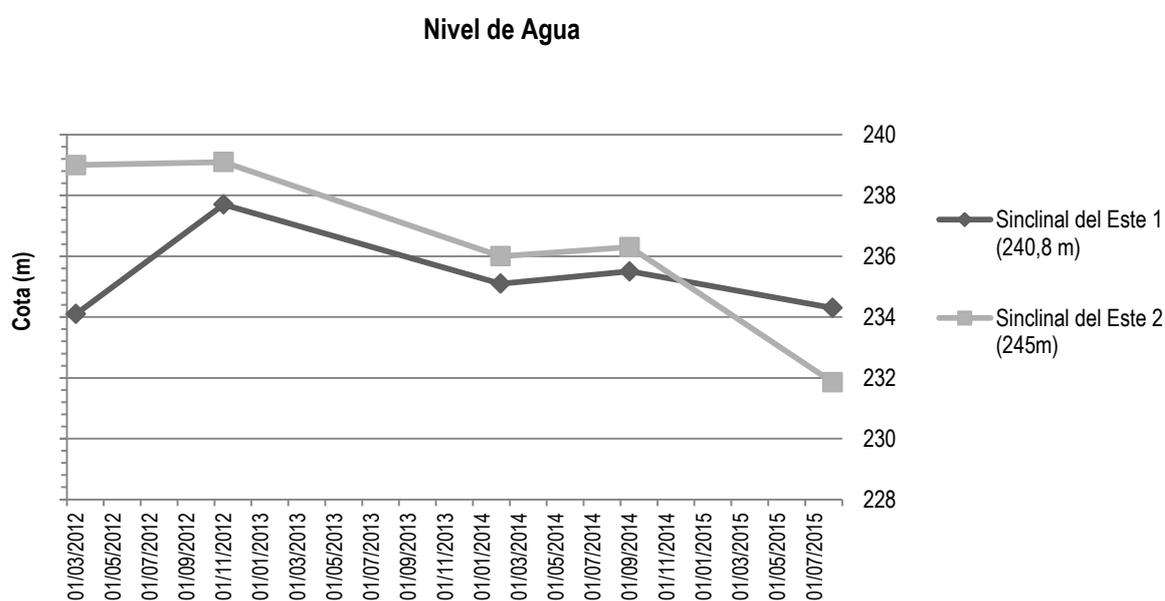


Figura 36. Gráfico de Nivel de agua en 2 pozos del Sinclinal del Este, Treinta y Tres.

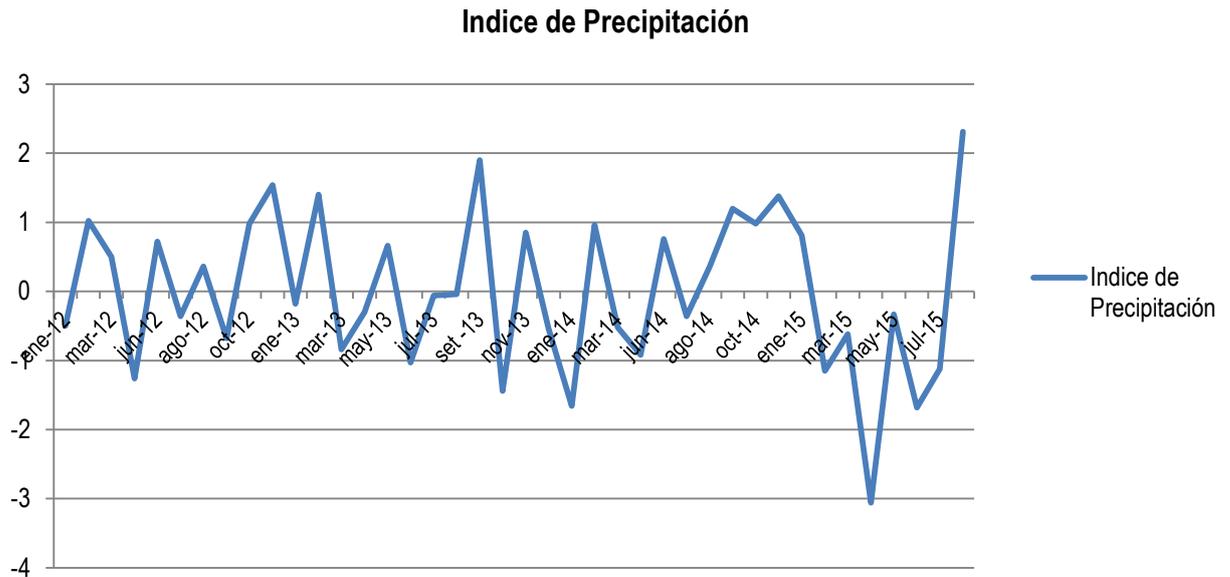


Figura 37. Gráfico de Índice de Precipitación Estandarizado, para Treinta y Tres, entre 1/12 y 8/15. Valores mayores que cero indican que la precipitación fue superior al valor normal del lugar, valores menores a cero indican que la precipitación fue menor que el valor estándar.

Se observa que existe relación entre la recarga de los pozos Sinclinal del Este 1 y 2. En el gráfico se deduce que entre el periodo (diciembre 2012 – setiembre 2014) la recarga entre ambos sistemas se mantiene en relación constante. Luego cuando la recarga disminuye sensiblemente, considerando que entre febrero y mayo de 2015 hubo un descenso pluviométrico registrado en la región, se observa que el nivel de agua en el pozo Sinclinal del Este 2 desciende con mayor pendiente que el pozo Sinclinal del Este 1. Esto es coherente con la hidrodinámica de los sistemas kársticos: rápida respuesta inicial a la recarga y evolución condicionada por los circuitos de circulación en cada caso.

En la región II (Tapes) se registró un sistema de manantiales, que surgen a los lados de la red de drenaje en los niveles de ritmitas finas de calizas y dolomías.

La red de drenaje responde a un sistema de fallas de dirección N60°W que se superpone a la estratificación N60°E y un tercer evento de dirección N-S afecta estas litologías.

Entre la intersección de las estructuras N60°W y N60°E se generan estructuras propias del relieve kárstico como hoyos y nichos cilíndricos. En los niveles de interestratificación de calizas y dolomías se da la surgencia natural de aguas subterráneas (Fig. 37).

Para este sistema se midió el caudal de la surgente, arrojando un valor de 1200 l/h en setiembre de 2014 y en junio de 2015 estos niveles de agua subterránea, no se manifiestan en superficie.



Figura 36. Manantial surgente en la Región II, Tapes.

Se infiere que el descenso del nivel de agua que se registró en boca de pozo en la Región del Sinclinal del Este, también se observó, con menor precisión, en la Región del Sinclinal de Tapes con la ausencia de surgentes.

Para la Región III solamente se dispuso de datos hidroquímicos.

6.3 Hidrogeoquímica.

A partir de 6 análisis químicos de agua, 3 correspondientes a muestras tomadas en pozos, 1 muestra de manantial y 2 muestras de la red de drenaje, entre setiembre y diciembre de 2014, se realizó la caracterización hidrogeoquímica de las aguas en cada región pertenecientes a la Formación Polanco y se ofrece la ubicación de las muestras en las figuras (22 y 29).

Las características fisicoquímicas generales de las aguas pertenecientes a la Formación Polanco son: la conductividad varía entre 188 y 414 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el pH es alcalino y está comprendido entre 7,1 y 8,0 y la temperatura promedio es de 18,4 °C. La alcalinidad total varía entre 234 mg/l y 280 mg/l, con un valor anómalo de 116 mg/L correspondiente posiblemente a aportes de otra unidad geológica en un pozo de la región de Minas. Los sólidos totales disueltos oscilan entre 200 ppm a 240 ppm (Anexo 5).

En cuanto a la concentración iónica se presentan de forma independiente los resultados de los cationes y aniones.

Cationes: los valores de calcio van desde 27,4 mg/l a 73,0 mg/l; el magnesio se concentra entre 5,8 mg/l y 25 mg/l; el sodio va desde 2,9 mg/l a 8,5 mg/l y el potasio entre 0,5 mg/l y 1,0 mg/l.

Aniones: los valores de bicarbonato van desde 280 mg/l a 116 mg/l; el cloruro registra valores <2 mg/l y 15 mg/l; el sulfato presenta valores <2 mg/l y 4,5 y el fosfato presenta valores poco representativos que no supera 5,0 mg/l.

La representación gráfica de los datos hidroquímicos constituye una herramienta de trabajo eficiente en la interpretación de las propiedades de un agua, así como para hacer comparaciones.

Se representan la concentración de aniones de las muestras de agua analizadas, utilizando diagramas de Schoeller, Piper y Stiff.

En el diagrama de [Schoeller](#) o de Columnas Verticales se representa el valor en mili equivalentes por litro (meq/l) de los distintos aniones y cationes, utilizando una escala logarítmica y uniendo los puntos mediante una secuencia de líneas.

Se muestra la representación de los valores en (meq/l) de los iones representativos de las muestras analizadas según el diagrama de Schoeller – Berkloff (Fig. 37).

DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF

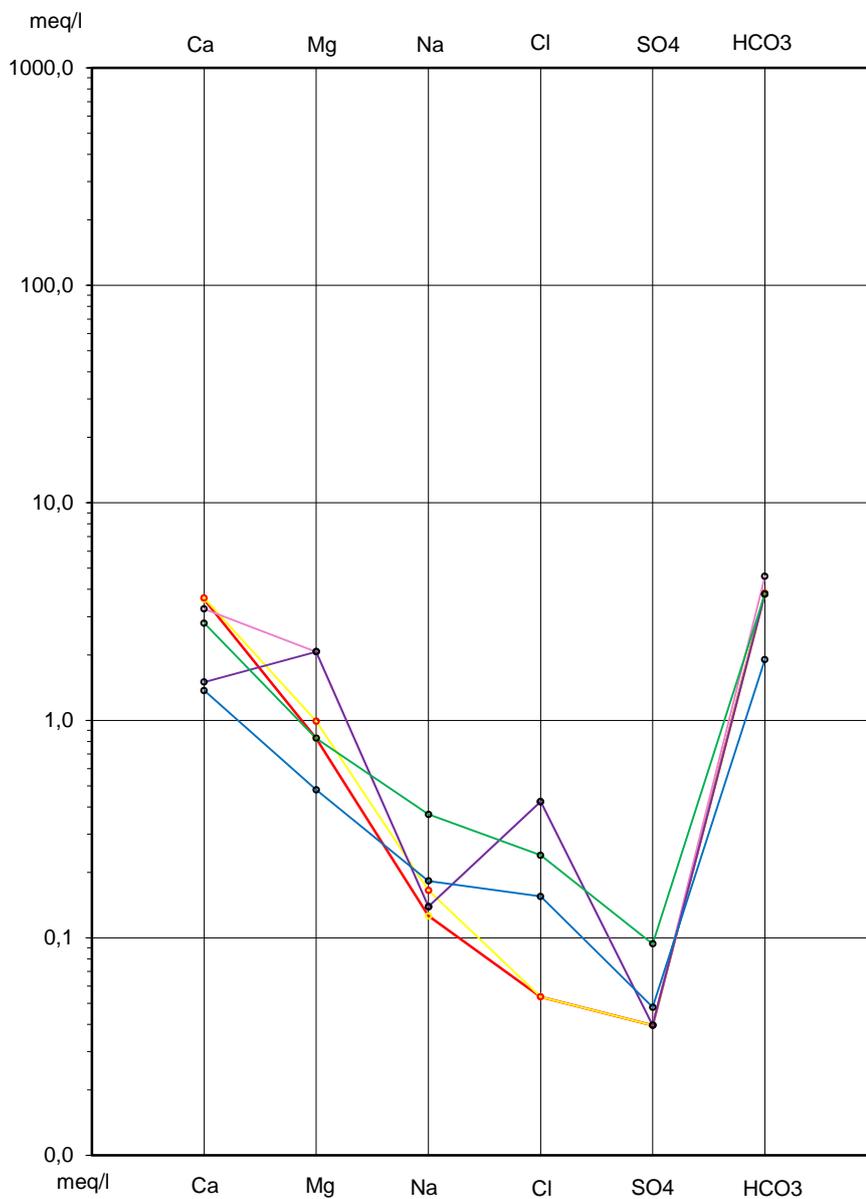


Figura 37. Concentración de iones representada según diagrama de Schoeller-Berkaloff.

En este diagrama se marca claramente el predominio de los iones de calcio y bicarbonato, sobre las especies iónicas restantes. A su vez se observa que en las muestras de la región de Tapes, el ion magnesio se destaca en relación a las demás regiones. Por otra parte, la rama aniónica refleja claramente un estadio de agua joven, con poco recorrido ($\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{Cl}^-$).

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representa, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua y un campo central romboidal en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Se utilizan los valores en % de miliequivalentes / litros y permite representar la totalidad de los análisis en una misma imagen, agrupando en áreas bien definidas aguas geoquímicamente similares.

La distribución de las diferentes muestras según su composición, se puede observar en el Diagrama de Piper, en donde se diferencian claramente según la simbología las distintas muestras representadas (Fig. 38).

Se detectó un tipo de agua predominante en el total de aguas analizadas, siendo la composición bicarbonatada cálcica. Se observa un mayor contenido de magnesio en las muestras pertenecientes a la región de Tapes.

DIAGRAMA DE PIPER

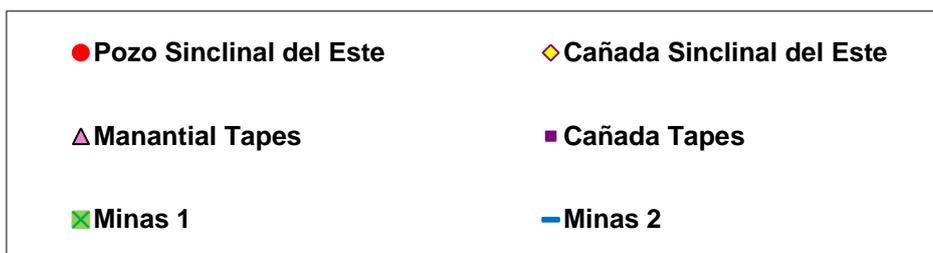
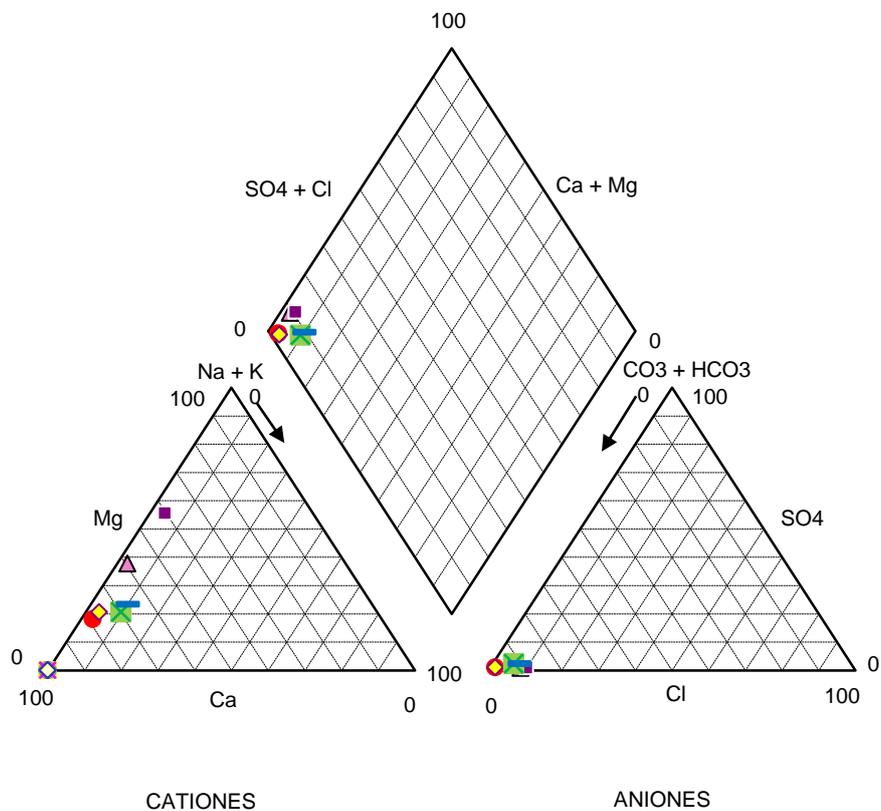


Figura 38. Distribución de la composición de las muestras según el diagrama de Piper.

El diagrama de Stiff emplea un sistema de ejes horizontales paralelos y un eje vertical, en cada uno de los ejes horizontales se coloca un ion determinado. Una forma adecuada consiste en colocar en los ejes de la izquierda las concentraciones (meq / l) de los iones Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} de arriba hacia abajo y, en el mismo orden, en los ejes de la derecha, los iones Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ y SO_4^{2-} .

Se observa en los diagramas de Stiff que el ion predominante para todas las muestras es el bicarbonato y la composición química predominante es del tipo bicarbonatada-cálcica, con la particularidad que en la Región de Tapes se registró un incremento en el catión magnesio, en relación a las muestras de las demás regiones (Fig. 39).

En la región I, Sinclinal del Este, se observó el dominio del catión calcio sobre el magnesio. Se relacionan estos valores con resultados de análisis químicos de roca caliza en puntos cercanos en esta región (Anexo 4), donde prevalece sustancialmente el contenido de calcio sobre el magnesio.

En la región III, Minas, la concentración del ion calcio prevalece sobre el ion magnesio, en similar relación que en la región I.

En cambio en la región II, Tapes, el calcio sigue prevaleciendo, pero su concentración disminuye en relación al magnesio. Estas características se corresponden con las litologías de la Formación Polanco en esta región donde predominan las ritmitas de calizas y dolomías, considerándose un relación aproximada del 50%.

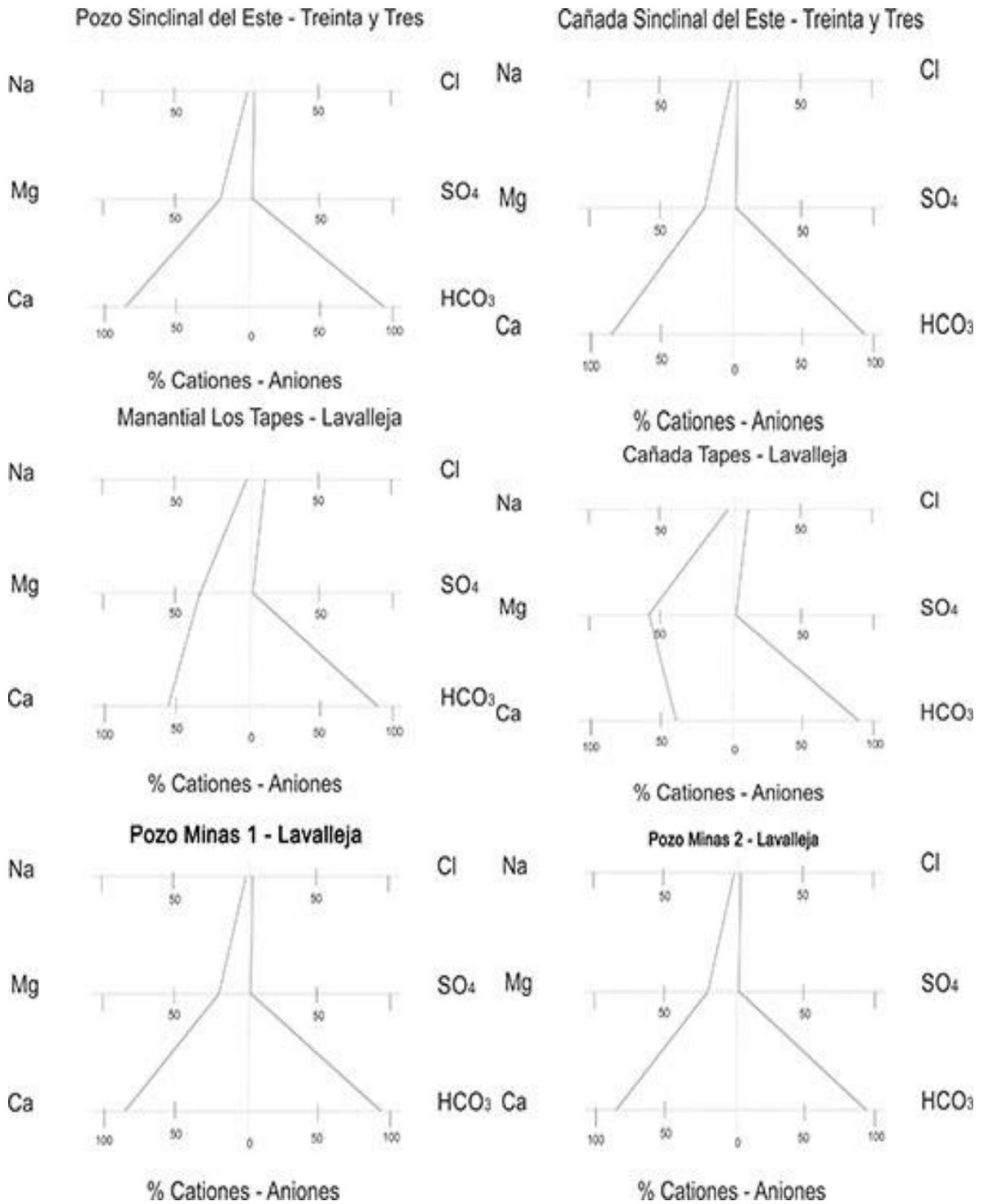


Figura 39. Porcentaje de iones representados en diagramas de Stiff para cada muestra.

La composición química de las aguas subterráneas es muy similar a la red de drenaje próxima a la fuente, por lo que se infiere una relación estrecha entre la circulación de subsuelo y superficial. Algunas variaciones menores detectadas en el área Tapes Grande, se discuten más adelante.

Considerando la composición química de las aguas minerales naturales, las fuentes relevadas en la Formación Polanco, tanto al N como al S del área de estudio, presentan similares características, tanto en la composición iónica como fisicoquímica.

7. DISCUSION Y CONCLUSIONES.

Dada la complejidad de los rasgos morfo-estructurales del área de estudio, se presentan las características hidrogeológicas y la posibilidad de acumulación de agua en particular para cada región.

En las tres regiones analizadas la secuencia sedimentaria del GAS está representada por las formaciones: Yerbal, Polanco y Cerro Espuelitas, desde la base hacia el tope, siendo transicional el pasaje entre cada unidad.

Los carbonatos de la Formación Polanco en la Región I (Sinclinal del Este) y III (Minas) se caracterizan por constituir bancos de calizas puras. En cambio para la Región II (Tapes) la Formación Polanco es tipificable por estar representada por ritmitas de intercalación milimétrica a centimétrica de calizas y dolomías.

En la Región I la Formación Polanco se dispone conformando un sinclinal con plano axial N 45° E, entre dos cabalgaduras una al NW y otra al SE del área de afloramiento. Esta estructura coincide con los rumbos de los lineamientos registrados sobre la red de drenaje, los cuales oscilan entre N 35° a 45° E.

Las Formaciones Yerbal y Cerro Espuelitas se comportan como niveles muy poco permeables hidrogeológicamente. En particular la Formación Yerbal que se ubica en los niveles topográficos más elevados del área, genera en superficie depresiones en las que se desarrollan cuerpos de agua temporales. Los resultados del SEV, indican que no corresponden a manifestaciones

superficiales de agua subterránea, ya que el sustrato presenta un nivel que supera los 20 m con valores altos de resistividad.

Es de resaltar que en este estudio, se definen por vez primera, estructuras kársticas en los carbonatos de las Formación Polanco, cuyas características se detallan a continuación.

Se desarrolla un relieve kárstico sobre la Formación Polanco, donde se identifican dolinas tipo “taza” con dirección N 45° E, en igual dirección del eje del pliegue, las estructuras cabalgantes y los principales lineamientos.

Se relevaron dolinas tipo “pozo” abiertas con colapso de las estructuras de las que no se alcanzó la base y que permitieron a su vez, la implantación de monte nativo en los casos en que los orificios estuviesen rellenos.

Morfoestructuralmente, el pliegue constituye un relieve deprimido, albergando en las cercanías del plano axial, de dirección N 40° a 45° E, depresiones kársticas, estructuras de circulación y acumulación de agua subterránea. Se estima que el karst en calizas plegadas se desarrolla aprovechando el drenaje de plano axial y es en esta estructura que se ubica la perforación de caudal 30 m³/h.

En la Región II se desarrollan cabalgaduras de rumbo NE-SW que afectan a la secuencia sedimentaria. De todos modos los lineamientos N 50° a 60° E son dominantes y corresponden a la So de estratificación de los carbonatos. También se encuentran fallas N 60° W y N-S. A partir de estas estructuras se identifica un relieve kárstico tipo lapiaz con desarrollo de hoyos y nichos cilíndricos, que se concentran en sectores donde se entrecruzan las

estructuras N 60° E y N 120° y se identificaron 3 manantiales donde la So y su intersección con la falla N 60° W permiten la surgencia de agua subterránea. En este caso se observa un comportamiento diferente al de las calizas puras, donde el karst aprovecha el clivaje de plano axial. En los carbonatos más dolomíticos, las fallas parecen jugar un papel importante en el desarrollo del karst. Esto responde posiblemente a la diferente reología de la calcita y la dolomita. El esfuerzo necesario para que fluya la dolomita a bajas temperaturas (~ 200°C) es de 10 órdenes de magnitud superior a la calcita (Delle Piane et al., 2008). Esto significa que a bajas temperaturas, la dolomita presentará deformación frágil, pero la calcita puede deformarse de forma plástica. A temperaturas de 550 – 600 °C, empero, ambas presentan similares valores de esfuerzos de flujo (“flow stress”, Delle Piane et al., 2008).

El déficit hídrico registrado para la región, entre febrero y mayo de 2015, afectó la surgencia, impidiendo su registro en superficie. Las perforaciones en el Sinclinal del Este están relacionadas en la recarga, presentando mayor estabilidad frente a las condiciones climáticas el pozo de mayor caudal. Considerando la diferencia de cota en el nivel estático de los pozos Sinclinal del Este, se estima que existe independencia en el sistema kárstico del pozo 1, respecto al pozo 2.

De acuerdo a las características químicas de las aguas subterráneas, se ha observado para las 3 regiones (I, II y III), que prevalece el tipo bicarbonatadas-cálcicas.

Se nota la semejanza composicional de las aguas subterráneas y las aguas superficiales en los puntos donde se tomaron ambas muestras, siendo

prácticamente de igual composición. Una excepción a resaltar la constituyen las muestras analizadas en la región II, donde el manantial presentó 65 mg/L de Ca y 25 mg/L de Mg, mientras el agua de la cañada de Tapes Grande presenta menor contenido de Ca (25 mg/l de Mg y 30 mg/L de Ca). Esto puede responder a la precipitación de CaCO_3 en el curso de la cañada, evidenciada por patinas de cristales en su cauce y márgenes (Fig. 40). Esta precipitación baja la concentración relativa de Ca y aumenta la de Mg en el agua de la cañada. A su vez acompaña la disminución del contenido de bicarbonato, que es de 280 mg/L en el manantial y 232 mg/L en la cañada.



Figura 40. Se muestra la precipitación de CaCO_3 en la cañada de la región II (Tapes). El mineral precipita en sectores donde circuló el agua y por intervalos quedan expuestos a la evaporación atmosférica.

Los valores de STD se encuentran entre 200 y 240 ppm, dentro de los establecidos para aguas minerales naturales, así como también los valores de pH que van desde 7,1 a 8,0.

Se resalta el bajo contenido de ion sodio que presentan estas fuentes minerales naturales, por debajo de 8 mg/l, siendo 20 m/l el valor máximo recomendado según la Organización Mundial de la Salud. (www.who.int/nutrition/publications).

Se destaca la variación del contenido de magnesio que presentan, en particular las muestras de la región Tapes, duplicando el contenido de este ion respecto a las aguas de la región I y III. Este resultado es coherente con la variación composicional de los carbonatos de la formación Polanco en esta región, donde predominan las ritmitas calizas-dolomíticas a diferencia de la región I y III, donde se describen calizas puras.

Este trabajo representa un paso significativo orientado a la prospección de fuentes de agua, con especial énfasis en las aguas minerales de mesa, que constituyen uno de los recursos minerales de Uruguay y su explotación se encuentra en creciente desarrollo nacional, regional y mundial.

8. BIBLIOGRAFÍA.

Almeida, F.F.M. de, Amaral, G., Cordani, U.G. and Kawashita, K.(1971) The Precambrian evolution of South American cratonic margin south of the Amazon River. In: Nairn, A.E.M. and Stehli, F.G. (Eds.). The ocean basins and margins. Vol. 1: The South Atlantic. Plenum, New York-London, pp. 411-446.

American Public Health Association(2012). Standard Methods, for the examination of water and wastewater. 22nd Ed. Washington D.C.

Blanco, G., Rajesh, H. M., Gaucher, C., Germs, G. J. B., Chemale Jr., F., (2009). Provenance of the Arroyo del Soldado Group (Ediacaran to Cambrian, Uruguay): Implications for the paleogeographic evolution of southwestern Gondwana. *Precambrian Research* 171, 57-73.

Bossi, J., Ferrando, L., Montaña, J., Campal, N., Morales, H., Gancio, F., Schipilov, A., Piñeyro, D., Sprechmann, P., (1998). *Carta geológica del Uruguay. Escala 1:500.000*. Geoeditores, Montevideo.

Bossi, J. & Navarro, R. (2000). *Recursos Minerales del Uruguay*. Ediciones Rojobona, Montevideo (CD-ROM).

Bossi, J., Gaucher, C. (2004). The Cuchilla Dionisio Terrane, Uruguay: an allochthonous block accreted in the Cambrian to SW-Gondwana. *Gondwana Res.* 7 (3), 661-674.

Custodio, E. & Llamas, E. (1983). *Hidrología Subterránea*. Tomo 1 y 2. Editorial Omega. España.

Delle Piane, C., Burlini, L., Kunze, K., Brack, P., Burg, J.P. (2008). Rheology of dolomite: large strain torsion experiments and natural examples. *Journal of Structural Geology* 30, 767-776.

DINAMIGE (2009). Estimación de la extracción de aguas subterránea principales de acuíferos del Uruguay. Informe División de Aguas.

Fagundo, J. R. (1996). Química del agua kárstica en: "Hidroquímica del Karst". Ed. OSUNA, Universidad de Granada (España), págs. 13-212.

Frei, R., Gaucher, C., Poulton, Døssing, L. N., Sial, A. N. (2011). Chromium isotopes in carbonates – a tracer for climate change and for reconstructing the redox state of ancient seawater. *Earth and Planetary Science Letters* 312, 114-125.

Gaucher, C., Sprechmann, P., Shipilov, A., (1996). Upper and Middle Proterozoic fossiliferous sedimentary sequences of the Nico Pérez Terrane of Uruguay lithostratigraphic units, paleontology, depositional environments and correlations. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh*, 199: 339-367.

Gaucher, C., Sprechmann, P., Montaña, J., (1998). New advances on the geology and paleontology of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado Group of the Nico Perez Terrane of Uruguay. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh*, 2: 106-118.

Gaucher, C. (2000). Sedimentology, paleontology and stratigraphy of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay). *Beringeria* 26, 1-120.

Gaucher, C., Boggiani, P.C., Sprechman, P., Sial, A.N., Fairchild, T.R. (2003). Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corumbá Groups (Uruguay and Brazil): palaeogeographic, palaeoclimatic and palaeobiologic implications. *Precambrian Res.* V120: 241-278.

Gaucher, C., Chiglino, L. and Pecoits, E., (2004a). Southernmost exposures of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay):

Palaeogeographic implications for the amalgamation of W-Gondwana. *Gondwana Research*, 7(3): 701-714

Gaucher, C., Sial, A.N., Blanco, G. and Sprechmann, P., (2004b). Chemostratigraphy of the Lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and palaeoclimatic implications. *Gondwana Research*, 7(3): 715-730.

Gaucher, C., Poiré, D.G., Gómez Peral, L. y Chiglino, L., (2005). Litoestratigrafía, bioestratigrafía y correlaciones de las sucesiones sedimentarias del Neoproterozoico – Cámbrico del Cratón del Río de la Plata (Uruguay y Argentina). *Latinoamerican Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. Vol 12 – No.2. pp: 145-160.

Gaucher, C., Sial, A. N., Ferreira, V. P., Pimentel, M. M., Chiglino, L. And Sprechmann, P. (2007). Chemostratigraph of the Cerro Victoria Formation (Lower Cambrian, Uruguay): evidence for progressive climate stabilization across the Precambrian - Cambrian boundary. *Chemical Geology*, 237: 28 - 46.

Gaucher, C. & Poiré, D. G., (2009). Biostratigraphy. Neoproterozoic Cambrian evolution of the Río de la Plata Palaeocontinent. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds.): *Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*, Elsevier. 4: 103-114.

Gaucher, C., Sial, A.N., Poiré, D., Gómez-Peral, L., Ferreira, V.P., Pimentel, M.M., (2009). Chemostratigraphy. Neoproterozoic-Cambrian evolution of the Río de la Plata Palaeocontinent. In: C. Gaucher, Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Editor), *Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*. Elsevier, Amsterdam, págs. 115 -122.

Gaucher, C. (2014). Grupo Arroyo del Soldado. In: Bossi, J., Gaucher, C.

(Editores), *Geología del Uruguay – Tomo 1: Predevónico*, págs. 313 – 339, Montevideo.

Grehs, S. (1979). Prospeccao Mineral a través de criterios fotogeológicos. *Act. Geol. Leopoldensia III* 7 págs. 3 - 22.

Gómez Rifas, C. (1995). A zona de cizalhamento sinistral de “Sierra Ballena” no Uruguai. Tesis doctoral, Instituto de Geociencias, Universidade de Sao Paulo, 244pp.

Heinzen, W., Velozo, C., Carrión, R., Cardozo, L., Mandracho, H., Massa, E., (1986). Elementos del Ciclo Hidrologico. Memoria Explicativa. Carta Hidrogeologia. 1:2.000.000. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología. Division Aguas Subterranas.

Huizar Alvarez, R. & Oropeza Orozco, O., (1989). Geomorfologia karstica de la región de Galena, Estado de Nuevo León. Univ. Nac. Autón. México, *Inst. Geologia. Revista*, Vol. 8:1, págs. 71-83.

Kawashita, K., Gaucher, C., Sprechmann, P., Teixeira, W. and Victória, R. (1999). Preliminary chesmostratigraphic insights on carbonate rocks from Nico Pérez Terrene (Uruguay). In: *Actas, II South Amer. Symp. on Isotope Geology*. Cordoba (Argentina), págs. 399–402.

Montaño, J., Collazo, P., Alvez, M. C., Montaño, M. (2014). Caracterizacion hidrogeologica del basamento cristalino de Uruguay. In: Bossi, J. & Gaucher, C. (Editores) *Geologia del Uruguay – Tomo I: Predevónico*, pags.421 – 427, Montevideo.

Motyka, J. (1998). A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeology Journal*, 6:469-482, Springer-Verlag.

Motyka, J., Pulido-Bosch, A., Pulido-Leboeuf, P., Borczak, S. (2002).

Propiedades hidrogeológicas de la matriz de rocas carbonatadas de la Cordillera Betica (sur de España). GEOGACETA 32, pág. 311-314.

Panario, D. (1988). Geomorfología del Uruguay. Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

Pamoukaghlián, K., Gaucher, C. & Poire, D. G., (2004). Arcillas de la Formación Yermal, Grupo Arroyo del Soldado: Implicancias paleoambientales y de proveniencia. Actas IV, Congreso Uruguayo de Geología, II Encuentro de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del MERCOSUR. Montevideo-Uruguay.

Preciozzi, F; Pena, S & Arrighetti, R. (1988). Carta Geológica del Uruguay, Hoja E-18 Puntas del Yermal, Escala 1:100.000. Memoria Explicativa.

Pulido J.L. (1978). Hidrogeología Practica. Ediciones Urmo. Bilbao.

Pulido Bosch, A. (2001). Investigación y exploración de acuíferos kársticos. Boletín Geológico y Minero, Vol. 112, Núm. Especial, pág. 65-76, Almería.

Sánchez Bettucci, L. (1998) Evolución tectónica del Cinturón Dom Feliciano en la región Minas-Piriápolis, R.O. del Uruguay. Ph.D. Thesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 322p.

Sprechmann, P.; Gaucher, C., Blanco, G., Montaña, J., (2004). Stromatolitic and trace fossil community of de Cerro Victoria Formation, Arroyo del Soldado Group (lowermost Cambrian, Uruguay). Gondwana Research, 7, págs. 753 – 766.

www.dinamige.gub.uy

www.meteorologia.com.uy/ServCli/caracteristicasclimaticas

www.who.int/nutrition/publications.

ANEXOS.

Anexo 1.

Perforación: SINCLINAL DEL ESTE 1
Coordenadas: S 32° 50' 27.4" O 54° 24' 8.7"
Profundidad: 45 m
Perforado: 0-15 m en 8" 15-45m en 6"
 14m PVC PN
Tubería: 10
Nivel estático: 5,9m
Caudal: 30.000 l/h
Fecha: Marzo 2012

Profundidad (m)	Litología
0-2	Manto de alteración con fragmentos líticos y arcilla marrón rojiza.
2-7	Roca carbonática (caliza), con tamaño de molienda de hasta 3cm, color gris oscuro.
7-9	Caliza, con tamaño de molienda de hasta 1cm, color gris oscuro.
9-12	Caliza fracturada, con tamaño de molienda de hasta 5cm, color gris oscuro.
12-14	Caliza con presencia de arcilla de color rojizo, tamaño de molienda de hasta 1cm.
14-43	Caliza con tamaño de molienda de hasta 1cm, trozos con presencia de planos de fractura.
43-45	Caliza muy fracturada, tamaño de molienda de hasta 10cm, presencia de arcilla marrón grisácea.

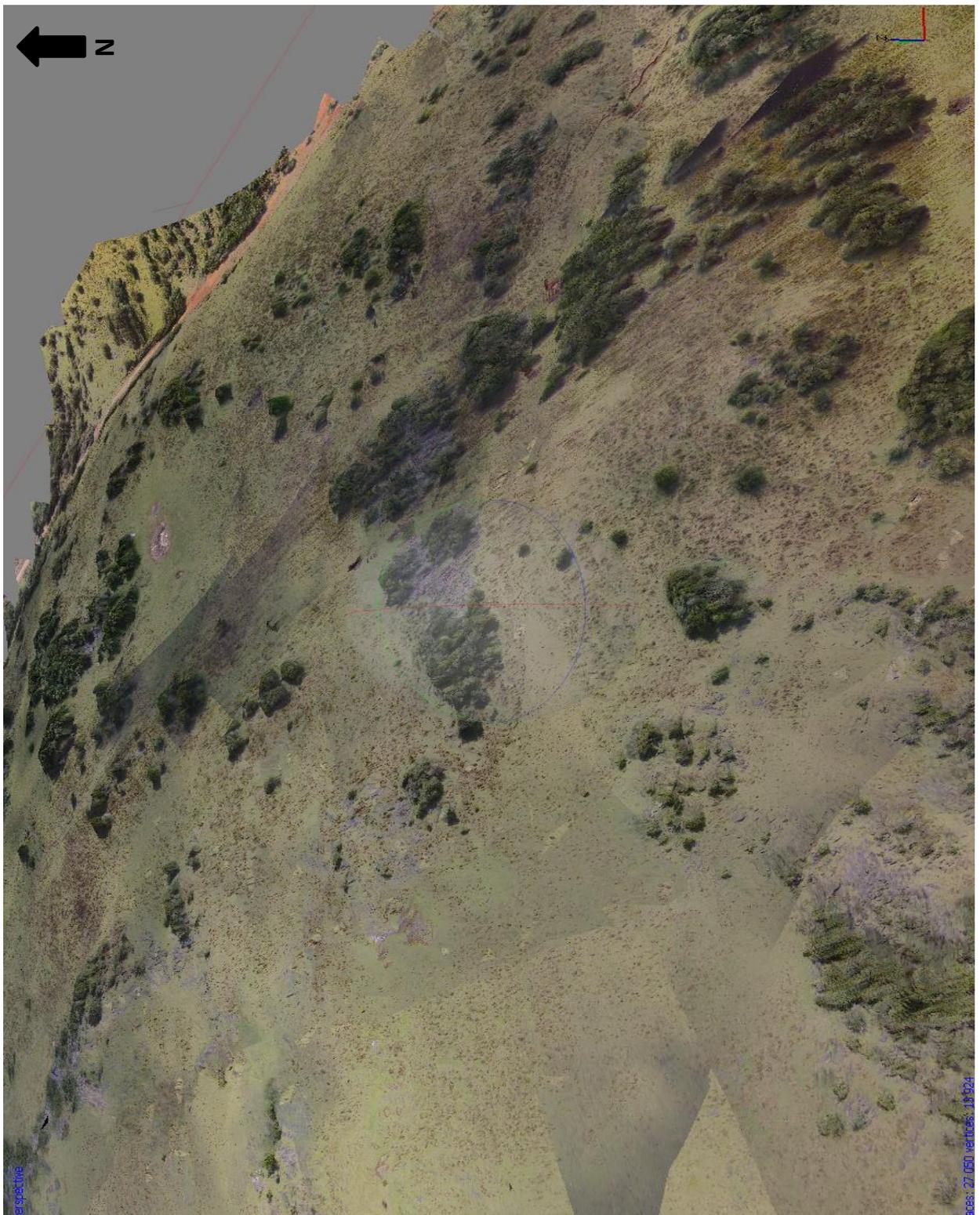
Anexo 2.

Perforación: **SINCLINAL DEL ESTE 2**
 S 32° 50'
 Coordenadas: 51,49" O 54° 24' 14,26"
 Profundidad: 94 m
 Perforado: 0-15 m en 8" 15-94m en 6"
 Tubería: 15m PVC PN 10
 Nivel estático: 6,0 m
 Caudal: 200 l/h
 Fecha: Marzo 12

Profundidad (m)	Litología *
0-2	Arcilla marrón grisáceo
2-44	Limolitas grafitosas, tamaño de molienda hasta 2 cm, color gris oscuro
44-46	Limolitas grafitosas, tamaño de molienda hasta 2 cm, color gris oscuro
46-94	Limolitas grafitosas, tamaño de molienda hasta 2 cm, color gris oscuro

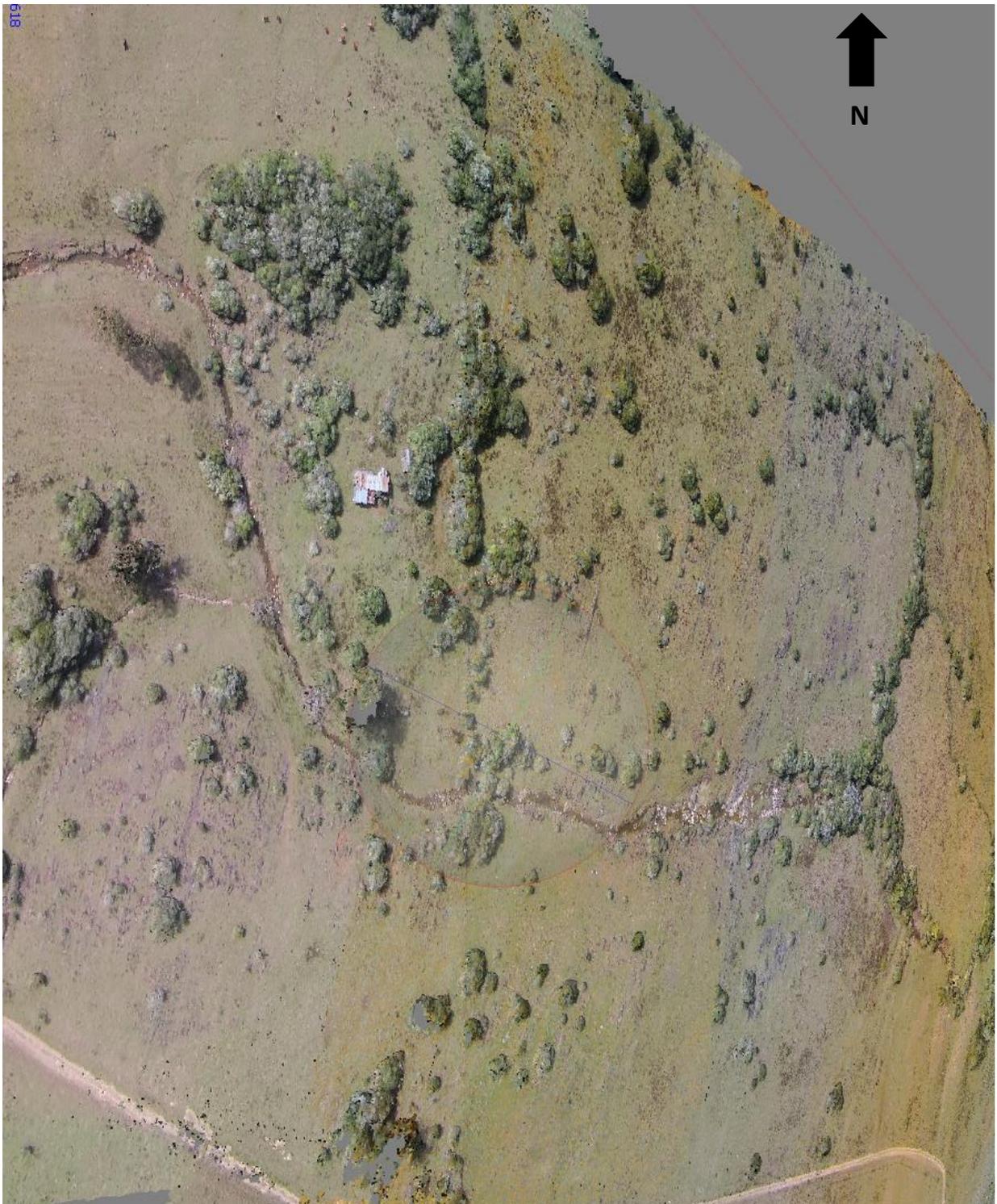
(*) Se describieron limolitas en la perforación, pero en superficie el pozo se desarrolla en calizas.

Anexo 3.



Modelo digital de terreno donde se muestra en visión panorámica de las estructuras kársticas en carbonatos de la Región I (Sinclinal de Este), Treinta y Tres.

Anexo 4.



Modelo digital de terreno donde se muestra en visión panorámica de las estructuras kársticas en carbonatos de la Región II (Tapes), Lavalleja.

Anexo 5.
**ANALISIS
FISICOQUÍMICO**

Fecha:	22/09/2014	22/09/2014	21/10/2014	21/10/2014	14/12/2014	14/12/2014
	Pozo Sinclinal del Este	Cañada Sinclinal del Este	Manantial Tapes	Arroyo Tapes	Minas	Minas
Coordenadas						
X (S)	S 32° 50' 27.4"	S 32° 50' 24"	S 33° 58' 36.8"	S 33° 58' 0.5"	SW Minas	SW Minas
Y (O)	O 54° 24' 8.7"	O 54° 23' 5.8"	O 54° 57' 41.7"	O 54° 57' 37,9"		
Temperatura °C	19.4	17.6	18.2	22.2	18	18
pH	7.9	7.9	8.0	8.0	7.1	7.3
Conductividad (µS/cm)	364	370	414	364	349	188
Solidos Totales (ppm)	200	200	240	200		
Caudal (L/h)	30.000	x	1.200	x	x	x
(mg/L)						
Alcalinidad Total	234	234	280	234	232	116
Carbonatos	0	0	0	2	0	0
Bicarbonatos	234	234	280	232	232	116
Calcio	72	73	65	30	55.9	27,4
Magnesio	10	12	25	25	10.0	5.8
Sodio	2.9	3.8	3.2	3.2	8.5	4.2
Potasio	0.8	0.5	0.5	0.5	0.6	1.0
Cloruros	<2	<2	15	15	8.5	5.5
Sulfatos	<2	<2	<2	<2	4.5	2.3
Fosfatos	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.48

Anexo 6.

Análisis químico de calizas (Sinclinal del Este).

Sample	Sr (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Al (ppm)	Mn (ppm)	Mg/Ca
SIE 1	486,20	2475,29	-0,22	430216,20	3564,38	93,82	521,34	0,008
SIE 4	441,15	1127,90	-0,31	440804,42	2881,10	74,66	61,85	0,007
SIE 5	443,20	1911,61	-0,21	437623,28	3382,24	92,09	85,70	0,008
SIE 13	264,33	1317,72	0,01	426247,30	4905,54	111,91	410,31	0,012

Análisis por ICP-OES en la Universidad de Copenhague,
Dinamarca