



**ADENDA N° 1  
RESPUESTAS AL INFORME CONSOLIDADO  
DE SOLICITUD DE ACLARACIONES, RECTIFICACIONES  
Y/O AMPLIACIONES N ° 1  
DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL:**

**3372-0000-MA-ADD-001-0**

**ANEXO 2  
GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA  
"PUERTO DE EMBARQUE DE MINERAL DE HIERRO-FASE I"**

**ANEXO 2**  
**GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA**  
**"PUERTO DE EMBARQUE DE MINERAL DE HIERRO-FASE I"**

**CONTENIDO**

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>GEOLOGÍA PUERTO CALDERA NORTE .....</b> | <b>3</b>  |
| 1.1      | MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....              | 3         |
| 1.2      | ESTRATIGRAFÍA .....                        | 4         |
| 1.2.1    | <b>Geología Estructural .....</b>          | <b>7</b>  |
| 1.3      | MARCO GEOLÓGICO LOCAL .....                | 10        |
| <b>2</b> | <b>MORFOLOGÍA PUERTO CALDERA .....</b>     | <b>17</b> |
| 2.1      | MARCO GEOMORFOLÓGICO GENERAL.....          | 17        |
| 2.2      | MARCO GEOMORFOLÓGICO LOCAL .....           | 19        |
| <b>3</b> | <b>RECURSO HÍDRICO E HIDROLOGÍA .....</b>  | <b>20</b> |
| 3.1      | METODOLOGÍA.....                           | 20        |
| 3.2      | RESULTADOS .....                           | 21        |
| <b>4</b> | <b>RIESGOS GEOLÓGICOS .....</b>            | <b>22</b> |
| <b>5</b> | <b>REFERENCIAS.....</b>                    | <b>23</b> |

## 1 GEOLOGÍA PUERTO CALDERA NORTE

### 1.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El área de estudio se ubica en el borde costero de la Bahía de Caldera la que se inserta en un marco geológico conformado principalmente por rocas plutónicas jurásicas, probablemente relacionadas al arco magmático de la formación La Negra, unidad volcánica de amplia distribución en la zona costera y Cordillera de La Costa del Norte de Chile, y sobre la cual se ha depositado una cubierta cenozoica de depósitos litorales, aluviales y fluvio-litorales y finalmente depósitos eólicos, todos ellos propios de un ambiente geotectónico de plataforma costera emergente. La geología regional a la que se hace referencia en el texto ha sido extractada de la Hoja Caldera, Serie Carta geológica de Chile N° 76, escala 1:100.000, año 2003 (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación del sector de interés respecto de la ciudad de Calderas y de la ruta 5 Norte.

## 1.2 ESTRATIGRAFÍA

### GABRO CALDERA Jgbc (Jurásico)

Corresponde a un intrusivo cubierto, en gran parte, por depósitos litorales y eólicos cuaternarios, de forma elíptica aproximada de unos 25 por 13 Km y eje mayor orientado norte-sur, sus afloramientos se ubican principalmente en la zona costera y planicie Litoral, entre Caldera y Bahía Inglesa. En su borde oriental corta al Complejo Epimetamórfico Chañaral (DCce) y es instruido tanto por dioritas del Plutón Sierra El Roble (Jsr) como por diques andesíticos subverticales de rumbo noroeste-sureste (Godoy et al. 2003).

En este macizo de roca intrusiva predominan gabros de olivino y dioritas de clinopiroxeno y/o anfíbola, estas últimas en parte cuarcíferas. Subordinadamente afloran melanodioritas de anfíbola. En los gabros predomina ampliamente el clinopiroxeno, a veces en avanzado estado de anfibolitización, por sobre la olivina y la biotita. Son de color negro con pátina de meteorización rojiza, grano grueso a medio y textura hipidiomorfa. Presentan leve cataclasis, expresada en el curvamiento de las plagioclasas y en la recristalización dinámica de cuarzo intersticial. Ocasionalmente, se reconocen gabros noríticos de clinopiroxeno y biotita.

Las dioritas, de color gris oscuro a claro y grano medio a grueso, muestran una foliación magmática de rumbo noreste-suroeste definida por la orientación de las anfíbolas. Usualmente están más alteradas que los gabros y, en algunos casos, un agregado de actinolita, esfeno y clorita reemplaza por completo a los clinopiroxenos. Se observan también vetillas de dichos minerales y de prehnita. En las variedades leucodioríticas, grandes cristales de brookita están en proceso de alteración a esfeno.

Las edades radiométricas obtenidas en una leucodiorita del extremo norte del plutón (Farrar et al. 1970) reportan una edad K-Ar en biotita de  $191,9 \pm 2,9$  Ma (recalculada), considerada como edad de cristalización.

### GRANODIORITA MORRO COPIAPÓ Jgmc (Jurásico)

Consiste en un cuerpo alargado Norte Sur que en superficie se presenta en la forma de afloramientos dispersos que sobresalen entre la cubierta neógena en la zona costera, desde el morro Copiapó (donde está mejor expuesto) hacia el sur. Litológicamente corresponde a granodioritas, dioritas cuarcíferas y tonalitas.

Las Granodioritas son de color gris oscuro y afloran principalmente en el Morro Copiapó Las dioritas cuarcíferas también de color gris oscuro, predominan hacia la mitad sur del Morro Copiapó. Estas rocas intrusivas predominan la biotita, anfíbola y piroxenos entre los minerales máficos.

La edad de este intrusivo se ha establecido entre los 186 a 189 Ma. Edad bastante cercana a la única edad conocida para el Gabro Caldera (191 Ma) lo que estaría indicando que probablemente se trate de intrusivos cogenéticos y cuya diferenciación podría ser sólo aparente.

## FORMACION BAHIA INGLESA MPLBI (MIOCENO MEDIO-PLIOCENO INFERIOR)

Esta unidad conforma una secuencia sedimentaria clástica, fosilífera y semiconsolidada, de carácter marino litoral y fuertes variaciones laterales y verticales de facies, expuesta en forma discontinua a lo largo de la franja costera y en las Planicies Litorales entre Quebrada Blanca, por el norte, hasta Puerto Viejo por el sur (Rojo, 1985, Marquardt et al., 2000; Godoy et al. 2003).

En Playa Chorrillos, al sur de Bahía Inglesa, la formación alcanza un espesor compuesto máximo de 80 m y sobreyace directamente a rocas intrusivas jurásicas. El techo de la formación está definido por la discordancia de erosión con los Estratos de Caldera (Qec) (Godoy et al. 2003).

Entre Bahía Inglesa y Caldera, predominan litofacies de coquinas, areniscas, margas y fangolitas, en estas últimas se incluyen diatomitas, fosforitas y cenizas retrabajadas. En menor proporción afloran conglomerados y brechas. La unidad es rica en fósiles con contenidos variables de foraminíferos (unicelulares), abundantes restos óseos de cetáceos (Misticetos y Odontocetos), aves, pinipedios, dientes y vértebras de seláqueos, placas dentarias de rayas, vértebras y escamas de Teleosteos (Long, 1993; Walsh y Hume 2001; Walsh y Naish, 2002 in Godoy et al. 2003).

La edad de la unidad se ha establecido principalmente sobre la base de su contenido paleontológico, sin embargo se han obtenido además para ella una datación K-Ar en biotita para una capa clerítica ubicada hacia el techo de una de las sucesiones, en la quebrada al este del Morro Copiapó, la que dió una edad de  $7,6 \pm 1,3$  Ma (Mioceno Superior), edad considerada máxima para la unidad y que concuerda con las asignaciones paleontológicas.

## ESTRATOS DE AGUA AMARGA Plaa (Plioceno)

Consiste en una sucesión de coquinas, gravas y arenas de carácter marino-litoral en capas de espesores decimétricos a métricos. Se exponen como una franja norte-sur de hasta 7 Km de ancho en el borde oriental de las planicies litorales. Forman llanos cubiertos por fragmentos carbonáticos, disgregados por acción del retrabajo aluvial y eólico.

Sobreyacen a las Gravas del Copiapó (MPlgc) (= Gravas de Atacama) al sur del área considerada en este marco geológico, y al basamento rocoso, conformando entre los 200 y 350 m de altura una banda fuertemente erosionada adosada a lo que se interpreta como una irregular paleolínea de costa. Están cubiertos por los Estratos de Caldera (Qec) y por depósitos eólicos (Qe).

Las arenas de esta unidad son de grano fino a medio, ricas en bioclastos oncólitos micritizados.

La tanatocenosis de *Anomia atacamensis*, *Clamys coquimbensis*, *Ostrea c. maxima*, *O. ferrari* si, *Concholepas cf. nodosa*, *Lingula*, *Lima*, *Fusinus remondi*, y *Chorus cf. grandis*. Es indicadora de una edad neógena (Herm, 1969 y Guzman et al., 2000 in Godoy et al., 2003).

Por su relación morfoestratigráfica con los Estratos de Caldera y las Gravas del Copiapó, se restringe tentativamente al Plioceno. Es probable que la unidad se asocien a la máxima ingresión marina acaecida entre los 3 y 4 Ma (Marquardt et al., 2000a) y que de alguna manera representen la máxima extensión de la Formación Bahía Inglesa, tanto en el espacio como en el tiempo. Los sedimentos de esta unidad se depositaron en una plataforma litoral somera, localmente sometida a condiciones de alta energía y en parte en condiciones supralitorales.

#### ESTRATOS DE CALDERA Qec (Cuaternario)

Se trata de una secuencia marino-litoral de sedimentos carbonáticos (principalmente coquinas y lentes de lumachellas) y clásticos que forma un conjunto de terrazas de abrasión marinas. Las terrazas y depósitos litorales asociados se distribuyen a lo largo del dominio costero y planicies litorales (Godoy et al. 2003). Alcanzan un ancho variable entre 5 a 15 Km desde la línea de costa actual y se ubican por debajo de los  $210 \pm 20$  m.s.n.m. Esta unidad sobreyace, en discordancia de erosión, tanto a la Formación Bahía Inglesa (Mioceno Medio-Plioceno Inferior) como a los Estratos de Agua Amarga (Plioceno) y, a su vez, es cubierta por depósitos eólicos y aluviales del Cuaternario (Marquardt et al., 2000).

Al interior de esta unidad se reconocen varios niveles de terrazas, incluyendo la playa actual, al interior de Bahía Inglesa. En esta unidad se diferencian una facies de conglomerado basal y otra facies constituida por las areniscas y coquinas (+ lumachellas) superiores.

El contenido paleontológico es abundante. Estos depósitos se relacionan con dos categorías de rasgos morfológicos bien desarrollados: terrazas marinas s.s. y cordones litorales. Los acantilados que limitan tierra adentro las terrazas, alcanzan una altura promedio de 5 m, pero, localmente, como por ejemplo en el acantilado actual de playa Chorrillos, pueden llegar hasta 50 m, Los cordones litorales, constituidos por arenas, guijarros y coquinas, representan paleolíneas de costa.

La presencia de *Argopecten Purpuratus* y *Concholepas Concholepases* es considerada por Herm (1969) y Guzmán et. al. (2000) indicadora de una edad cuaternaria.

Sobre la base de asociaciones faunísticas específicas y relaciones morfoestratigráficas, los Estratos de Caldera se han dividido en:

- Sucesión alta, Qec(1): incluye las 3 terrazas de abrasión marina superiores, con sus depósitos litorales asociados, los que se desarrollan entre las cotas  $105 \pm 18$  y  $210 \pm 20$  m. Contienen, en su terraza más baja, ejemplares de fauna fósil de aguas cálidas tales como *Donax peruvianus* y *Trachycardum procerum*, por lo que se asigna tentativamente al Estadio Isotópico 11, de ca.400 Ka (Ortlieb et al, 1997; Guzmán et al, 2000 in Godoy et al. 2003).
- Sucesión baja, Qec(2): las terrazas de abrasión marina inferiores (hasta 6) con depósitos litorales asociados, los que contienen solo fauna fósil de aguas frías, similar a la actual (*Diplodonta incospicua*, *Ensis macha*, entre otras). Se encuentran ubicadas entre el nivel del mar actual y los  $105 \pm 18$  m de altura y habrían sido formadas durante los últimos ca. 330 Ka (Marquardt, 1999; Marquardt et al., 2000).

## DEPÓSITOS ALUVIALES Qal (Cuaternario)

Son depósitos no cohesivos a moderadamente consolidados de gravas y bloques y, en menor proporción, arenas y limos y que forman abanicos aluviales. Tienen una escasa distribución en toda el área, concentrándose, principalmente, al pie de relieves de la Cordillera de la Costa. Se sobreponen a depósitos litorales pliocenos (Plaa) y cuaternarios (Qec), cubiertos o engranando con depósitos eólicos activos Qe(2) holocenos.

## DEPOSITOS EOLICOS Qe (Cuaternario)

Corresponden a depósitos de arenas cuarzo-fetdespaticas, en parte bioclásticas, expuestas a lo largo de la franja costera y, tierra adentro, principalmente al norte del río Copiapó. Las arenas, mantiformes o conformando dunas, cubren sedimentos cuaternarios (Qec, Qal) y secuencias miocenas-pliocenas (MPIbi, Plaa) y en parte son producto de su retrabado.

Corresponden a arenas, por lo general bien seleccionadas, no cohesivas y de madurez textural buena a muy buena, de grano grueso a fino, redondeados a subredondeados, con esfericidad variable. En ocasiones, forman afloramientos cementados por carbonatos y sales. Contienen gastrópodos pulmonados actuales, en ocasiones fosilizados, de las especies *Bostryx* (*Lissoacme*) cf. *erythrostomu*, *Bnstryx* (*Lissoacme*) cf. *affinisy* *Bostryx* (*Lissoacme*) cf. *pruinosis* (C. Valdovinos, 1998 com. escrita).

### 1.2.1 Geología Estructural

Los rasgos estructurales de la zona costera de Caldera-Bahía Inglesa consisten en estructuras desarrolladas en las sedimentitas neógenas. Destaca la falla inversa, de fuerte manteo al NNW, expuesta en el sector del Morro Copiapó, la cual sobrepone la Granodiorita Morro Copiapó (Jgmc) a las areniscas de la Formación Bahía Inglesa (MPIbi) del Mioceno Medio-Plioceno Inferior (Godoy et al. 2003).

Al sur de la desembocadura de quebrada Chorrillos, otra falla inversa similar, pero expresada sólo en la Formación Bahía Inglesa, origina discordancias intraformacionales, engrosamiento de las capas y brechas de talud en la unidad. Asociadas a este evento de deformación sinsedimentaria se reconocen otras fallas inversas menores y pliegues asimétricos amplios con ejes ligeramente buzantes hacia el noreste (Marquardt, 1999).

Por otra parte, en la Formación Bahía Inglesa (MPIbi) se registran fallas normales de salto centimétrico, en parte sinsedimentarias de orientación NNW-SSE. Sus ejes de extensión muestran una orientación noreste-suroeste, perpendicular al acortamiento asociado al fallamiento inverso. Se las interpreta como resultantes de eventos de acomodo superficiales cosísmicos durante el Mioceno Tardío a Plioceno Temprano (Marquardt, 1999). Durante el Cuaternario se documenta un conjunto de fallas normales de desplazamientos centimétricos a métricos y tensor extensional noroeste-sureste, que cortan a los Estratos de Caldera (Qec) (fotos 1, 2 y 3). Este fallamiento estaría relacionado a la acomodación de la cobertura sedimentaria al juego de fallas preexistentes.



**Fotografía 1.** Vista general Hacia el SW del lugar en donde se observa la Falla normal que marca el límite NW del graben de Calderilla (entre Bahía Inglesa y Calderilla) de orientación NE. Se aprecian las recientes construcciones de un condominio que se ha edificado sobre la traza de la falla la que se indica en color negro. Las flechas negras indican desplazamiento respectivo de cada bloque.





**Fotografía 2.** Detalle del plano de falla de la Fotografía anterior se observa la deformación del sedimento en el que los clastos adoptan una posición vertical paralela al plano de falla (indicado en línea negra de trazos). Las flechas indican desplazamiento y la línea roja marca la interface sedimento/roca.



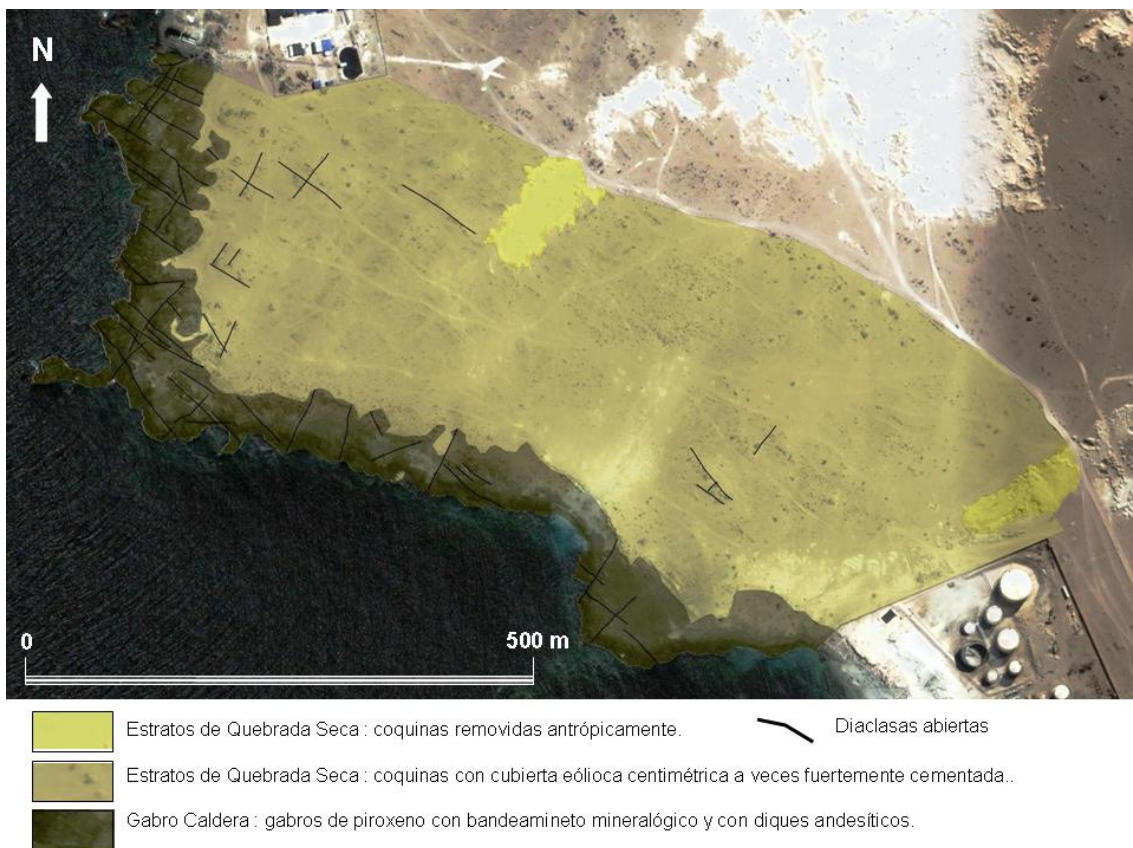
**Fotografía 3.** Falla NW de extensión que afecta al Morro Copiapó. Vista hacia el SE.

La línea de puntos negra indica traza probable de la falla, las flechas negras indican desplazamiento relativo de los bloques. En rojo la inclinación local de las capas de los estratos de Quebrada Seca.

El estudio de las terrazas asociadas a los Estratos de Caldera (Qec) ha permitido determinar tasas de alzamiento de 0,2 a 0,4 m/Ka para el Cuaternario (Marquardt et al., 1999; Marquardt et al, 2000b; Godoy et al. 2003).

### 1.3 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El área de estudio se ubica en la parte norte de la Bahía de Caldera al norte de dicha localidad (Figura 1). Principalmente el proyecto se emplaza en rocas intrusivas correspondientes a la unidad Gabro Caldera (Jgbc) la que conforma el material de fundación del Puerto Caldera Norte, aflora en el área donde se desarrollará el proyecto y es en gran parte cubierto por depósitos litorales (estratos de Caldera) (Figura 2), a su vez recubiertos por parches irregulares y discontinuos de sedimentos eólicos cuaternarios de espesores centimétricos.



**Figura 2.** Esquema Geológico del área del sitio de interés.

En general en el área se observan en la costa afloramientos (Fotografía 4) de gabros de olivino y dioritas de clinopiroxeno y/o anfíbola, éstas últimas en parte cuarcíferas. En forma subordinada afloran facies de melanodioritas de anfíbola que tendrían contactos graduales con los gabros y dioritas descritos precedentemente.



**Fotografía 4.** Vista aérea del sitio de interés mostrando la franja de afloramientos costeros del Gabro Caldera y en tonos más claros la cubierta de sedimentos de los estratos de Quebrada Seca, en tonos muy claros o blancos parte de los Estratos de Quebrada Seca que han sido removidos antrópicamente- los lineamientos oscuros que se observan cortando a los Estratos de Quebrada Seca corresponden a escolleras del Gabro Caldera. (cortesía GOOGLE EARTH).

Los gabros son de colores gris oscuro a negro con pátinas de meteorización rojizas. Las dioritas son de color gris oscuro a claro y grano medio a grueso, muestran una foliación magmática de rumbo noreste-suroeste definida por la orientación de sus anfíbolos.

Un conjunto de filones andesíticos de orientación general NW-SE en el sector (Fotografía 5) cortan a las rocas intrusivas del Gabro Caldera.



**Fotografía 5.** Vista en detalle de un filón andesítico en el borde costero. Fotografía tomada hacia el SE.

Cubriendo parcialmente a las rocas del gabro Caldera en la zona de estudio aparecen sedimentos litorales cuaternarios correspondientes a los estratos de Caldera (Qec2) que corresponden a depósitos de terrazas marinas bajas. El espesor de estos depósitos en las cercanías del área de estudio varía entre 30 cm a más de 2 m (Fotografía 6). Litológicamente corresponden a coquinas, en parte lumachellas (Fotografía 7), parcialmente cementadas, especialmente en la parte inferior de los sedimentos. También aparecen como relleno cementado entre los bloques de roca que forman la superficie superior de los afloramientos del Gabro Caldera (Fotografía 8). En algunos sectores estos sedimentos aparecen fuertemente cementados en su parte superficial formando una costra calcárea en superficie, mientras que en otros sectores aparecen, debajo de la cubierta eólica, muy poco consolidadas (Fotografía 9).



**Fotografía 6.** Aspecto de la cornisa de coquinas de los estratos de quebrada seca en el borde litoral SW del sitio de interés. Vista hacia el ESE.



**Fotografía 7.** Detalle de afloramientos lentiformes de lumachellas en el borde NW del graben de Bahía Blanca – Calderilla. La parte inferior corresponde a coquina y la parte superior a lumachella.



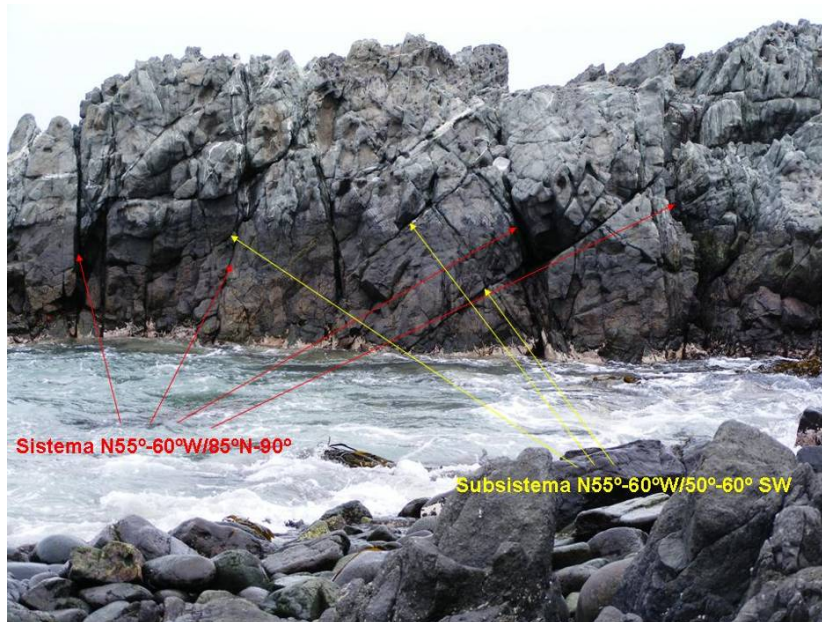
**Fotografía 8.** Vista en detalle en la borde de los Estratos de Caldera mostrando como se realiza el relleno basal sobre los bloques y/o clastos que conforman la parte superior del Gabro Caldera.



**Fotografía 9.** Aspecto de los niveles de coquina de los Estratos de Quebrada Seca que presentan un muy bajo grado de consolidación. Arriba en color café depósitos eólicos de playa, más atrás escollo de Gabro Caldera.

Finalmente un depósito de arenas eólicas con un espesor promedio de 5 cm, cubre de forma irregular todo el sector hacia el interior de la actual playa. Son arenas finas, en parte colonizadas por vegetación y que se han depositado sobre los Estratos de Quebrada Seca, enmascarando su real extensión.

Desde el punto de vista estructural, el área se ubica en un sector de rocas estables sin evidencias de la presencia de fallas que puedan afectar las futuras construcciones. Sin embargo, al igual que en otros sectores de la costa entre el Morro Copiapó y Bahía Caldera, las rocas intrusivas presentan un claro esquema de fracturamiento ortogonal el que destacan, tanto a nivel regional (Fotografía 4) como a la escala de afloramiento. El primero, y más notorio, es un sistema de fracturas de orientación N55° a 60°W, subvertical (85°N-90°) con un subsistema de igual orientación pero con fracturas que mantean unos 50° a 60° hacia el SW (Fotografía 10). El segundo sistema tiene orientaciones variables entre N30° a 45°E y es subvertical (Fotografía 11). Un tercer sistema menos definido es cercanamente subhorizontal (Fotografía 11).



**Fotografía 10.** afloramientos Costeros del Gabro caldera mostrando sistema de fracturas  $N55^{\circ}-6^{\circ}W / 90^{\circ}$  y subsistema  $N55^{\circ}-60^{\circ}/ 50^{\circ}-60^{\circ}SW$ . Vista hacia el NW.



**Fotografía 11.** Sistema de fracturas  $N30^{\circ}-45^{\circ}E/90^{\circ}$  en afloramientos del borde costero del Gabro Caldera. Se advierte además un tercer sistema de fracturas subhorizontales menos denso. Vista hacia el SW.

En lo que respecta a la existencia de fallas en el sector se puede decir que, si bien en el área de interés para el proyecto y zonas aledañas no existen evidencias de fallamiento, como ya



se dijo, si aparecen fallas más al sur, entre Caldera y Bahía Inglesa (Godoy et al. 2003), estas fallas (fotos 1, 3 y 12) afectan a los sedimentos cuaternarios de los estratos de Caldera y por lo tanto deben considerarse como fallas activas. Los desplazamientos de estas fallas son desde centimétricos a métricos y muy probablemente este está relacionado al alzamiento paulatino que ha sufrido el borde costero durante el Plioceno y Cuaternario, tal como lo atestiguan los distintos niveles de terrazas presentes en el área (Godoy et al. 2003).

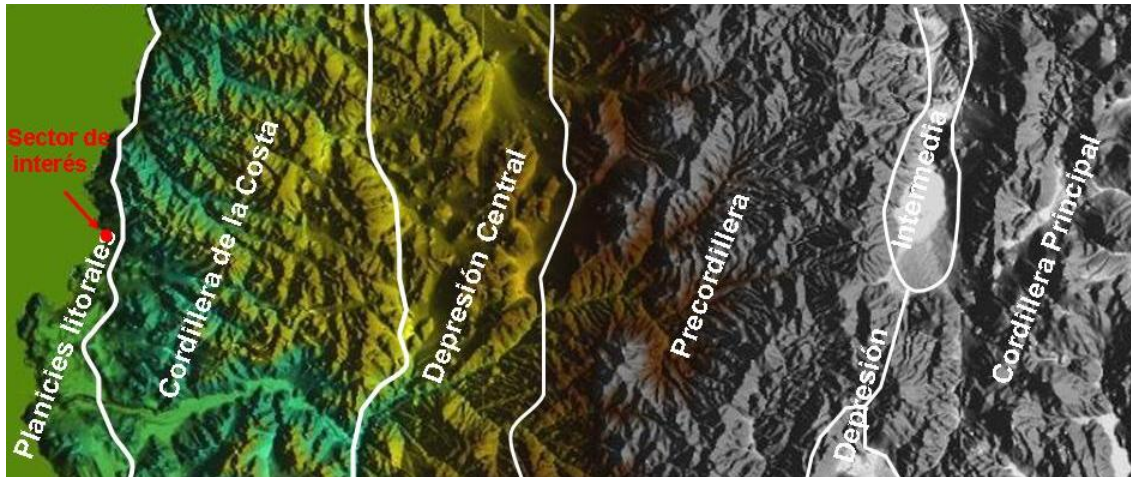


**Fotografía 12.** Vista aérea del sector Morro Copiapó. Caldera mostrando las fallas observadas en la campaña realizada para este informe. En línea de trazos las falla mapeadas por SERNAGEOMIN en 2003,

## 2 MORFOLOGÍA PUERTO CALDERA

### 2.1 MARCO GEOMORFOLÓGICO GENERAL

El marco geográfico y morfoestructural del área de influencia del proyecto, se localiza en el límite entre las zonas del Norte Chico y del Norte Grande, reconociéndose a la latitud del área del proyecto (aproximadamente 27° Lat. S) seis grandes unidades morfológicas principales (Figura 3):



**Figura 3.** Geomorfología de Chile a la latitud del sector de Copiapó-Caldera.

A - Las Planicies litorales.

Las Planicies Litorales corresponden a una estrecha franja de una antigua plataforma marina costera la que se ubica al pie de las estribaciones o cordones de cerros que marca el límite W de la cordillera de la Costa. A esta latitud aparece bien desarrollada con un ancho promedio entre 10 a 15 Km. Su altura es desde 0 m hasta unos 210 m.s.n.m.

B - Cordillera de la Costa

A esta latitud, la Cordillera de la Costa se presenta como un macizo montañoso disectada por valles transversales los que dan origen a cordones montañosos orientados generalmente EW; en general las cumbres de dichos cordones son planas y con alturas no mayores a los 1800 m.s.n.m. en su parte más oriental.

C - La Depresión Central

Presenta un relieve suave, consiste en una cuenca de desarrollo local que marca el límite sur de La Depresión Central y que no se continúa al sur de Copiapó. Conforman un pediplano que se desprende de las estribaciones occidentales de la Precordillera inclinándose suavemente hacia el oeste, de modo que las alturas promedio que alcanza en su parte occidental se ubican alrededor de los 1000 msnm mientras que hacia el este alcanza hasta los 1300. 1400 msnm. En esta unidad morfológica se destaca El Llano de Varas.

D - La Precordillera

A esta latitud se eleva entre la Depresión Central y la Depresión Intermedia o depresión de los salares. Con un ancho promedio de unos 60 Km corresponde en su mayor parte a una sucesión de sierras orientadas NNE y que van aumentando progresivamente en altura a medida que se ubican más hacia el este. A la latitud del área de estudio destacan las sierras de Fraga (2990 msnm), San Andrés (3768 msnm) y Sierra El Varillar (4.497 msnm). La mayor altura de esta unidad geomorfológica corresponde al cerro Pastillitos (5090 msnm).

#### E - La Depresión Intermedia o de Los salares

Corresponde a una zona depresionaria entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera Principal o de Los Andes con un ancho promedio de unos 15 a 20 Km y un nivel de base de unos 3750 msnm y que corresponde a la parte central del Salar de Maricunga.

#### F - La Cordillera principal o de Los Andes

Presenta un relieve áspero, con grandes diferencias de altura entre los fondos de la quebradas que la atraviesan y las cuencas intramontanas respecto de las cimas de los volcanes, que son característicos de esta unidad a estas latitudes. En general la Cordillera de Los Andes en esta zona está compuesta por un conjunto de aparatos volcánicos antiguos y modernos cuyas cimas sobrepasan con frecuencia los 5000 m. el ancho promedio, a la latitud del área de estudio es de unos 50 Km de ancho.

## 2.2 MARCO GEOMORFOLÓGICO LOCAL

En el contexto geomorfológico general previamente descrito, el área del proyecto se ubica en el borde occidental de la unidad geomorfológica correspondiente a las Planicies Litorales (Fotografía 13), la cual conforma en el sector de estudio una plataforma marina emergida de ancho máximo de 9 Km, que presenta una leve pendiente hacia el poniente (menor a 5°). Esta plataforma, hacia el este termina contra las estribaciones occidentales de la Cordillera de la Costa, las que forman lomajes que pueden llegar hasta las playas actuales. Superficialmente se reconocen depósitos eólicos de potencias menores a 5m, que recubren de manera irregular afloramientos de reducida extensión de una roca intrusiva de composición gabrica.



**Fotografía 13.** Panorama general de las Planicies litorales a la latitud de Caldera. Vista hacia el NNE.

En el sector se ubica una serie de escalones que corresponden a terrazas marinas a distintos niveles y conformadas por depósitos del Cuaternario y Mioceno, el escalonamiento de los distintos niveles de terrazas se debería a un alzamiento general y gradual del área relacionado a la subducción de la Placa de Nazca bajo el continente sudamericano.

A nivel regional la planicie litoral aparece surcada por una serie de cordones claramente delineados a nivel regional y que se alinean concéntricamente con los bordes de las correspondientes playas o bahías actuales (Figura 4).



**Figura 4.** Aspecto que muestran los cordones litorales en el área cercana a sector de interés, se aprecia el paralelismo que tienen con la costa actual. (Cortesía GOOGLE EARTH).

Asociados a los niveles de terrazas mencionados, aparecen promontorios conformados por rocas antiguas (principalmente Gabro Caldera), estas geofomas menores corresponden a escolleras.

### 3 RECURSO HÍDRICO E HIDROLOGÍA

En la siguiente sección, se describe y caracteriza la hidrogeología e hidrología del sector de las zonas costera entre las localidades de Caldera y El Totoral, correspondiente a la hoja Caldera del SERNAGEOMIN.

#### 3.1 METODOLOGÍA

Para caracterizar esta componente se analizó la información obtenida del Mapa Geológico Preliminar de Chile “Avance Geológico de la hoja de Caldera”, región de Atacama, Instituto de Investigaciones Geológicas (1978) y la Hoja Caldera, Serie Carta Geológica 1:100.000, N° 76.

## 3.2 RESULTADOS

- **Hidrogeología**

El área cubierta por la hoja Caldera corresponde a una parte de la franja del litoral cuyas condiciones hidrogeológicas son propias de las zonas áridas, en las cuales no existen posibilidades importantes de recursos hídricos subterráneos, debido al déficit pluviométrico y a la alta tasa de evaporación; ellas son aún menores dada la impermeabilidad de la mayor parte de las rocas que la constituyen.

Las rocas consolidadas (metamórficas, intrusivas y volcánicas) no ofrecen posibilidades de infiltración de agua, ya que la escasa precipitación que cae sobre ellas es evaporada o escurre superficialmente hacia los materiales inconsolidados (depósitos eólicos, pequeñas terrazas y sedimentos aluviales y fluviales). Los depósitos eólicos, por carecer de un espesor considerable, además de encontrarse cubriendo rocas impermeables y debido a la alta evaporación, no permiten la existencia de acuíferos. Los pequeños depósitos de terraza, ubicados en los márgenes de las quebradas, se encuentran hidrogeológicamente desconectados del escaso escurrimiento superficial y/o subterráneo de los cauces, debido a su posición topográfica más elevada.

Las mejores condiciones para la ocurrencia de agua subterránea la ofrece el material aluvial y fluvial depositado en el lecho del valle del río Copiapó y en la cuenca de descarga de un sistema fluvial perenne que tiene su origen en la alta Cordillera (Río Copiapó) y a un relleno de cuencas de recarga esporádica precordillerana (Cuenca Totoral).

En la sección inferior del valle del río Copiapó, el material inconsolidado constituye un acuífero freático que descarga los excedentes de agua del valle. El agua subterránea que en el borde oriental de la Hoja se encuentra de 4 a 6 m de profundidad, escurre hacia el poniente, saturando casi totalmente los sedimentos y dando origen a zonas de vegas hasta un poco al oeste de María Isabel. Algo de agua (algunas decenas de litros por segundo) escurre subterráneamente hacia las costas, donde aflora y da origen a pequeñas corrientes intermitentes.

- **Hidrología**

El principal recurso hídrico de la comuna lo constituye el río Copiapó cuyo valle se localiza entre Latitud Sur 27° 30' y 69' - 71' 00" de Longitud Oeste aproximadamente, a unos 30 km al sur del sector del área de estudio.

El sistema hídrico se origina en el lugar denominado la Junta, al pie de la Cordillera Principal, donde confluyen sus dos más importantes tributarios, el Jorquera por el Norte y el Pulido por el Sur Este a 130 Km. en línea recta desde el mar y a 100 Km. aguas arriba de la ciudad de Copiapó.

El régimen de escurrimiento del río Copiapó es permanente desde La Junta hasta Copiapó, aunque generalmente está sometido a variaciones de caudal debido a procesos naturales de pérdida y de recuperación y a la intervención del hombre que utiliza este recurso como riego artificial.

Aguas arriba de la capital regional el río se recupera con el alumbramiento de vertientes importantes, las que permiten el riego de zonas agrícolas del curso inferior. En el sector de Angostura el régimen del río es constante e independiente, recogándose los remanentes de la cuenca con un gasto medio anual de 130 L/s de agua altamente contaminada por sales, que desemboca finalmente en el mar. Su régimen es nivo-pluvial, el gasto medio observado para una serie de dos años fue de 8,7 m<sup>3</sup>/s, siendo el valor más alto, el correspondiente a 1,71 m<sup>3</sup>/s y el menor gasto, agosto 1,43 m<sup>3</sup>/s.

En lo que concierne al sistema de escurrimiento de quebradas existentes en la comuna, está asociado al régimen pluvial que se origina en periodos invernales, considerando que es una zona árida, con precipitaciones esporádicas, frecuentemente asociadas al fenómeno del Niño, como es Quebrada del Corralillo que se encuentra aproximadamente 1 km al sur de la ciudad del Caldera.

De acuerdo a lo descrito en el punto anterior, el área de inserción del Proyecto no presenta cursos de aguas superficiales, ni escurrimiento de quebradas.

#### 4 RIESGOS GEOLÓGICOS

El área del proyecto se ubica sobre un sector de afloramientos del basamento rocoso jurásico el que es cubierto en forma parcial por depósitos cuaternarios no consolidados de poco espesor (métricos). En el sector no existiría, de acuerdo con la Hidrogeología y la Hidrología local, niveles o acuíferos subterráneos. Por otra parte el relieve del área es relativamente plano.

Todo lo anterior indica que el sector no presenta riesgos geológicos relacionados con posibles remociones en masa.

La ubicación del área de estudio tiene cotas superiores a los 10 m sobre el nivel del mar por lo que pueden descartarse riesgos de oleadas debidas a tormentas y/o marejadas. El riesgo de tsunamis para el área debe ser considerado como posible en caso de un sismo local superior a 7.5.

El riesgo de posible desarrollo o juego de fallas en el sector se puede evaluar según las consideraciones siguientes:

- 1 En general, en un sector con presencia de fallas consideradas activas o recientes cabe esperar que esas mismas fallas las que se reactiven o jueguen antes de que se generen nuevas fallas.
- 2 Los desplazamientos de las fallas registradas en el sector de la costa al norte del río Copiapó son de magnitudes métricas, sólo comparables con la magnitud del desplazamiento vertical ocurrido durante el sismo de 1960 en la costa de la zona central y sur de Chile, sismo considerado hasta ahora como el mayor magnitud registrado históricamente.

En consecuencia, se puede sugerir que el riesgo de reactivación de las fallas cuaternarias detectadas en el sector costero (ninguna de ellas cruzando o pasando a menos de 5 Km del sector de interés), tendría un período de recurrencia similar al del sismo de 1960 a nivel del borde sudamericano y, aún cuando este sismo ocurriera, es poco probable que el sector del proyecto se viera afectado por la reactivación de las fallas existentes.

## 5 REFERENCIAS

**Farrar, E.; Clark, A.; Haynes, J.; Quirt, G.; Conn, H.; Zentilli, M.** 1970 K-Ar Evidence for the post-paleozoic migration of granitic intrusion foci in the andes of northern Chile. *Earth Planetary Sciences letter*, Vol. 10, p. 60-66-

**Godoy, E.; Marquardt R., C.; Blanco, N.** 2003. Carta Caldera, Región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, escala 1:100.000. N° 76. SERNAGEOMIN.

**Herm, D.** 1969. Marines Pliozän und Pleistozän in Nord und Mittel-Chile Ander besonderen Berücksichtigung der entwicklung der mollusken fauna. *Zittelaria*. N° 2, p.1-159. München.

**Marquardt R., C.** 1999. Neotectónica de la franja costera y aportes a la geología regional entre caldera y y caleta pajonal (27°-27°45' S). IIIª Región de Atacama, Chile. Tesis de Magíster (inédito). Departamento de Geología, Universidad de Chile. 297 pp.

**Marquardt R., C.; Blanco, N.; Godoy, E.; Lavenu, A.; Ortlieb, L.; Marchant, M.; Guzmán, N.** 2000. Estratigrafía del Cenozoico Superior en el área de Caldera 826°45'-28° S). In Congreso Geológico chileno, N° 9, Actas, Vol. 2, p. 588-592. Puerto Varas

**Rojo, M.** 1985. Un aporte al conocimiento del Terciario marino: Formación Bahía Inglesa. In Congreso Geológico Chileno N°4, Actas, Vol. 1, p. 514-533. Antofagasta.