



Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Naturales y Museo

Trabajo Final de la Licenciatura en Geología

**Caracterización geotécnica de macizos rocosos, a nivel de prefactibilidad, en el área de implantación de presas de laminación de crecidas extraordinarias actuales y proyectadas sitas en la Hoja Tandil 3760-IV**

**Villarreal María Cristina**

Dirección:

Lic. Luis Mario Giaconi

2020

## Resumen

El conocimiento de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos resulta fundamental para asegurar la estabilidad de una obra y mitigar los posibles riesgos geológicos. Para ello, existen diferentes metodologías que cuantifican la calidad de los mismos y permiten predecir su comportamiento geomecánico e hidráulico.

Este Trabajo Final de Licenciatura se realizó con el fin de caracterizar geomecánicamente, a nivel de prefactibilidad, los macizos rocosos presentes en las áreas de implantación de las presas existentes en la Hoja Tandil 3760-IV, ubicadas en la ciudad de Tandil denominadas Dique del Fuerte y Presa del Ramal H y de una tercera presa proyectada hacia el SO de dicha ciudad cuya identificación es Presa del Arroyo Blanco.

Basada en información de estudios precedentes, se llevó a cabo una caracterización de los materiales de fundación en campo. Para ello, se analizaron las propiedades de las rocas superficiales y las discontinuidades en cada sector. Este análisis se realizó según metodologías indicadas y homologadas por la International Society of Rocks Mechanics. Posteriormente se aplicó la clasificación RMR de Bieniawski (1989) para determinar la parametrización geotécnica del macizo rocoso en cada sitio.

Cabe destacar que, desde el análisis geomecánico, los aspectos de mayor importancia se centran en el análisis de las discontinuidades de los macizos rocosos por tener las mismas directa implicancia en la estabilidad mecánica de las fundaciones en roca.

En las rocas de estudio, que forman parte del Basamento ígneo-metamórfico de Tandilia, se reconocieron cuatro familias de discontinuidades presentes en todos los sectores analizados, cuyos rumbos e inclinaciones respondían a las orientaciones de los tres dominios tectónicos definidos para el sistema de Tandilia bajo estudio. Asimismo, se diferenciaron cinco zonas, de acuerdo a variaciones en las características litoestructurales de los materiales. Se determinó que dichas zonas constituyen, a grandes rasgos, dos macizos rocosos con propiedades contrastantes: por un lado el macizo rocoso de la zona geotécnica 1, y por el otro el macizo conformado por las zonas restantes. El primero de ellos comprende las rocas con descomposición textural, cizalladas y altamente meteorizadas, y presentó valores RMR que lo ubican en la clase VI cuya calidad de roca es mala a muy mala. A partir de esta clasificación se estimaron los parámetros de resistencia y deformabilidad de dicho macizo, definiendo para el mismo una baja resistencia y alta deformación, por lo que debería ser excavado en el caso de ser objeto de fundación. Las zonas restantes, que abarcan rocas frescas diaclasadas a levemente meteorizadas, presentaron valores RMR tales que todas fueron ubicadas en la clase II, constituyendo un macizo rocoso de buenas características geotécnicas con alta a media capacidad portante. El trabajo demuestra concluyentemente en la práctica, la viabilidad de la metodología desarrollada y aquí explicitada, para el nivel de prefactibilidad establecido.

## Abstract

An understanding of the geomechanical properties of rock masses is critical to ensure the stability of engineering building works and to mitigate its geological risk. There exist different methodologies to quantify rock masses quality and to predict their hydraulic and geomechanical behaviour.

The aim of this final bachelor work was to geotechnically parametrize, to a level of pre-feasibility, the rock masses present in the area of two existing dams in Tandil Sheet 3760-IV, located in Tandil city, named Dique del Fuerte and Presa del Ramal H, and a third dam projected towards Tandil SW, whose identification is Presa del Arrollo Blanco.

Based on preceding studies, a characterization of the foundation materials was done in field. For that purpose, the properties of surface rocks and joints were analyzed in each area. This analysis was done according to the methodologies indicated and homologated by the International Society of Rocks Mechanics. Afterwards, the RMR classification of Bieniawski (1989) was applied to determine the geotechnic parametrization of the rock masses in each sector.

It is worth noting that, from the geomechanical analysis, the most important issues are focused on the analysis of the rock masses joints, since they are directly involved in the mechanical stability of rock foundations.

In all the studied rocks, which are part of Tandilia's igneous-metamorphic basement, the presence of four joint sets were recognized in all analyzed sectors. Dips and directions of joints correspond to the orientations of the three tectonic domains determined for the Tandilia system under study.

Furthermore, five areas were differentiated, according to the variations in the rocks' litho-structural characteristics. From these five areas, two types of rock masses with contrasting geomechanical properties were determined: the rock mass of geotechnical zone 1 on one side, and the remaining litho-structural areas on the other side. The former generally includes rocks with textural decomposition, jointed, partly sheared and highly weathered that have values that place them, according to the RMR classification, in class VI whose rock quality goes from poor to very poor. From this class, the resistance and deformability parameters of the rock mass were determined, defining a low resistance and high deformation for that mass, so it should be excavated in case of being the foundation of an engineering work. The remaining areas determined litho-structural zones, which includes fresh, slightly altered, jointed rocks, presented such RMR values that they were all classified as class II, establishing a rock mass with good geotechnical characteristics, low deformability and with medium to high bearing capacity. This work presents empirical evidence on the feasibility of the developed and explained methodology, to a level of agreed prefeasibility.

# Índice

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Índice</b> .....                                    | <b>4</b>  |
| <b>1. Introducción</b> .....                           | <b>6</b>  |
| <b>1.1 Área de estudio</b> .....                       | <b>11</b> |
| <b>1.2 Objetivos</b> .....                             | <b>13</b> |
| <b>1.3 Metodología</b> .....                           | <b>14</b> |
| <b>2. Características del área de estudio</b> .....    | <b>14</b> |
| <b>2.1 Marco Geológico Regional</b> .....              | <b>15</b> |
| 2.1.1 Basamento Cristalino .....                       | 16        |
| 2.1.2 Cubierta sedimentaria .....                      | 19        |
| <b>2.2 Estructura</b> .....                            | <b>24</b> |
| <b>2.3 Geomorfología</b> .....                         | <b>26</b> |
| 2.3.1 Unidades Geomorfológicas.....                    | 26        |
| <b>2.4 Hidrografía</b> .....                           | <b>30</b> |
| 2.4.1 Cuenca del Arroyo Langueyú .....                 | 31        |
| 2.4.2 Clima.....                                       | 32        |
| 2.4.3 Hidrología .....                                 | 34        |
| <b>2.5 Hidrogeología</b> .....                         | <b>36</b> |
| 2.5.1 Marco general .....                              | 36        |
| 2.5.2 Hidrolitología.....                              | 38        |
| 2.5.3 Hidrodinámica.....                               | 40        |
| <b>2.6 Unidades geológico-geotécnicas</b> .....        | <b>40</b> |
| 2.6.1 Sedimentos cuaternarios .....                    | 41        |
| 2.6.2 Sedimentitas paleozoicas .....                   | 42        |
| 2.6.3 Rocas metamórficas y plutónicas.....             | 42        |
| <b>3. Parametrización de los macizos rocosos</b> ..... | <b>43</b> |
| <b>3.1 Metodología</b> .....                           | <b>43</b> |
| 3.1.1 Meteorización .....                              | 44        |
| 3.1.2 Resistencia de las rocas.....                    | 45        |
| 3.1.3 Estructura del macizo rocoso .....               | 46        |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.4 Características geomecánicas de las discontinuidades .....            | 46        |
| <b>3.2 Características detectadas .....</b>                                 | <b>47</b> |
| 3.2.1 Presa Arroyo Ramal H .....                                            | 47        |
| 3.2.2 Presa Arroyo del Fuerte .....                                         | 55        |
| 3.2.3 Presa Arroyo Blanco .....                                             | 63        |
| <b>3.3 Conclusiones de las características geotécnicas detectadas .....</b> | <b>68</b> |
| <b>4. Clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos.....</b>              | <b>70</b> |
| 4.1 Rock Mass Rating (RMR) .....                                            | 71        |
| 4.2 Geological Strenght Index (GSI).....                                    | 73        |
| 4.3 Índice Q.....                                                           | 76        |
| <b>5. Zonificación de macizos rocosos .....</b>                             | <b>78</b> |
| <b>6. Determinación de las clases de macizo rocoso.....</b>                 | <b>79</b> |
| 6.1 Parámetros geotécnicos de entrada y clasificación .....                 | 79        |
| 6.2 Parámetros geotécnicos de salida.....                                   | 83        |
| 6.3 Deformabilidad de los macizos rocosos.....                              | 83        |
| <b>7. Conclusiones .....</b>                                                | <b>84</b> |
| <b>8. Bibliografía .....</b>                                                | <b>90</b> |

## 1. Introducción

Las masas de rocas se encuentran generalmente afectadas por discontinuidades (diaclasas, fallas, entre otras) o superficies de debilidad (zonas de cizalla, etc.) de origen tectónico y/o sedimentario y/o mecánico, que separan bloques de matriz rocosa o ‘roca intacta’ conformando en conjunto los macizos rocosos.

Dichas discontinuidades y los bloques de matriz rocosa constituyen en conjunto la estructura del macizo rocoso determinando el comportamiento del mismo, imperando uno u otro según sus magnitudes, propiedades relativas y la escala o ámbito de estudio.

En el caso de la geología de ingeniería, la expresión macizo rocoso se refiere entonces, al conjunto de uno o varios tipos de rocas atravesados por planos de discontinuidades en el que se inserta una obra de ingeniería. Es por ello que el estudio y evaluación de dichos componentes es de suma importancia para determinar las características geotécnicas de los mismos.

Estudiar el macizo rocoso, es decir, determinar sus propiedades tanto físicas como geomecánicas e hidráulicas, resulta imprescindible para comprender el comportamiento y la respuesta geotécnica del mismo ante la aplicación de distintas fuerzas y la diversidad de esfuerzos generados por las distintas actividades constructivas antrópicas, como lo son: el desarrollo de las obras públicas y privadas (caminos, puentes, puertos, aeropuertos, edificios, etc.), energéticas (presas de generación eléctrica, centrales nucleares, centrales termoeléctricas), ambientales (presas de laminación de crecidas extraordinarias, escolleras, etc.), mineras (explotación en canteras, en open pits y en túneles) y petroleras (aplicación de la mecánica de rocas en la explotación de yacimientos de shale gas y shale oil).

La finalidad de realizar estudios geotécnicos es garantizar que los factores geológicos de los materiales constituyentes de las obras de ingeniería sean considerados e interpretados adecuadamente, asegurando así la construcción de obras económicas y seguras, como también mitigar riesgos geológicos.

Las características geológicas y geotécnicas tienen gran importancia en la implementación de obras de infraestructura hídrica, por lo tanto, la interpretación y aproximación a las condiciones físicas del subsuelo son indispensables, ya que serán éstas las variables consideradas al realizar los cálculos para las estructuras que garanticen la factibilidad, viabilidad y estabilidad de las mismas.

Para ello, desde el enfoque metodológico, primariamente es necesario dilucidar las características de la matriz rocosa y las características de las discontinuidades en el macizo rocoso.

Para caracterizar la matriz rocosa se debe tener en cuenta su identificación (composición mineralógica, forma y tamaño de los granos, color y transparencia, dureza de Mohs), la presencia de meteorización o alteración y la resistencia a la compresión simple ( $\sigma_{ci}$ ).

En el caso de las discontinuidades, siendo que las mismas condicionan en forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos, es necesario determinar los parámetros físicos y geométricos que caracterizan su comportamiento mecánico. La descripción y dimensionamiento de estos parámetros para cada una de las familias de discontinuidades existentes en el macizo rocoso debe ser realizada en el campo y comprende la orientación, el espaciado, la continuidad o persistencia, la rugosidad, la resistencia de las paredes, la abertura, el relleno y las filtraciones de agua.

*Así, para la caracterización global del macizo rocoso a partir de los datos de los afloramientos, además de la descripción de sus componentes, la matriz rocosa y las discontinuidades, deben ser considerados también otros factores representativos del conjunto, como son el número y orientación de las familias de las discontinuidades, el tamaño de bloque e intensidad de la fracturación y el grado de meteorización (González de Vallejo, 2003).*

Respecto al número y orientación de las familias de las discontinuidades, es necesario expresar que el comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura se encuentran condicionados precisamente por el número de familias de discontinuidades en tanto que la orientación de las diferentes familias en relación al eje de obra puede determinar el grado de estabilidad de la misma.

El tamaño de los bloques que forman el macizo rocoso condiciona su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. La dimensión y tamaño de los bloques se encuentran definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, espaciado y continuidad, cualquiera sea su origen y clase. El grado de fracturación se expresa habitualmente por el valor del índice RQD (Rock Quality Designation), parámetro que se mide en testigos de roca obtenidos mediante perforaciones o bien puede estimarse en afloramientos mediante la aplicación de correlaciones empíricas como las de Palmstrom, 1975, correlación que ha sido homologada en 1981 por la International Society of Rocks Mechanics (ISRM).

La evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realiza por la observación directa del afloramiento y su comparación con los índices estándares instituidos y homologados por el ISRM en 1981.

Así, la descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades y de los parámetros del macizo rocoso, proporcionan los datos necesarios para la evaluación geomecánica global del macizo. A partir de estos datos, *la aplicación de las clasificaciones geomecánicas permite estimar la calidad y los parámetros resistentes aproximados del macizo en términos de cohesión y fricción y mediante la formulación de ecuaciones empíricas, la deformabilidad genérica de un macizo rocoso.* (Giaconi, 2009).

Para completar la caracterización global del macizo rocoso es también necesario evaluar otros aspectos que, en gran manera, *influyen en su comportamiento mecánico: resistencia y deformabilidad, comportamiento hidrogeológico y estado tensional* (González de Vallejo, 2003). Estos factores recién mencionados no pueden ser cuantificados en afloramientos, pero sí pueden ser realizadas observaciones que permitan conocer, al menos en forma cualitativa, las características correspondientes de los macizos rocosos.

La determinación de la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos fracturados puede ser compleja al depender de las propiedades resistentes de la matriz rocosa y las discontinuidades, más aún considerando los diversos tipos y características de estas últimas que pueden coexistir en el macizo. Por otra parte, *la existencia de zonas tectonizadas, alteradas, de diferente composición, húmedas y la presencia de estructuras asociadas a los materiales rocosos (pliegues, fallas, diques) implican zonas de debilidad y anisotropía con diferentes comportamientos y características resistentes y deformacionales* (González de Vallejo 2003).

La combinación de los comportamientos resistentes y deformacionales pueden ser comparados mediante la determinación del módulo de elasticidad ( $E_i$ ), en GPa., y la determinación del valor resistente a la compresión simple ( $\sigma_{ci}$ ), en MPa, del macizo rocoso que, de acuerdo a la clasificación de Deere and Miller (1966), estos valores resultan generalmente en alto módulo relativo cuando, por ejemplo,  $E_i/\sigma_{ci} > 500$ .

Los factores hidrogeológicos que deben ser detectados y mensurados en el análisis clasificatorio de los macizos rocosos a partir de los estudios de prefactibilidad técnica son la presencia o no presencia de agua en las discontinuidades superficiales a través de la observación de filtraciones y surgencias. Como parte de la resolución en el mismo escenario también deberán individualizarse la ocurrencia de zonas singulares que puedan constituir sectores preferenciales de circulación de agua como cavidades o fracturas (diaclasas, fallas, etc.) o bien que puedan constituir una barrera al paso del agua como pueden ser la presencia de diques pegmatíticos o de rellenos arcillosos en las fracturas.

Cabe mencionar que las determinaciones de tipo hidráulico en cuanto al comportamiento hidrogeológico de un macizo rocoso durante los estudios más avanzados y detallados, denominados de factibilidad técnica, se realiza a través del desarrollo de perforaciones geotécnicas mediante la cuantificación de la admisión de agua a través de los denominados ensayos Lugeon, cuestión no abordada en el presente trabajo final de licenciatura dado el carácter de prefactibilidad en el análisis de macizos rocosos planteado.

Respecto a la descripción del estado tensional al que está sometido un macizo rocoso, no es posible la cuantificación de los esfuerzos activos a través de los datos de campo, pero sí es posible realizar observaciones geológicas que indiquen las direcciones generales esperables de los esfuerzos en el ámbito específico del macizo. La historia geológica, y más precisamente tectónica, de la zona pueden ser elementos complementarios en la dilucidación de las tensiones. En el caso de obras subterráneas, la aplicación de la clasificación geomecánica NGI o Q permite determinar el estado tensional del macizo donde se proyecta o se construye un túnel, cuestión no abordada en el presente trabajo por no ser el ámbito de desarrollo del mismo.

Así entonces, actualmente en el proyecto y construcción de las obras de ingeniería, para el estudio y evaluación de las características geotécnicas de los macizos rocosos, se emplean en forma generalizada las mencionadas clasificaciones geomecánicas. A través de su aplicación se obtiene una predicción del comportamiento geomecánico e hidráulico de los macizos rocosos. Su utilidad radica en la inmediatez de su aplicación en el estudio de dichos afloramientos y la fiabilidad de los resultados producto de su aplicación.

Las clasificaciones geomecánicas son de uso relativamente nuevo, siendo recién a fines del siglo pasado que se comenzaron a utilizar de manera generalizada a nivel internacional y constituyéndose en un elemento metodológico importantísimo y de capital importancia en el estudio geotécnico de los macizos rocosos. Así se reconocen la clasificación RMR (Rock Mass Rating), de Bieniavski quien expuso su vigencia a partir de 1973 en Sudáfrica, siendo por él modificada sucesivamente en 1976, 1979, 1984 y 1989. Otra de las clasificaciones geomecánicas muy utilizadas es la clasificación NGI (Norwegian Geological Institute) cuyos autores son Barton, Lien y Lunde, 1974, también conocida internacionalmente como clasificación Q, a partir de la información de numerosos túneles. Posteriormente fue revisada estando en vigencia en la actualidad la formulación del índice Q realizada por Barton en el año 2000. Finalmente, y para el caso de macizos rocosos de baja resistencia y alta deformabilidad, es muy utilizada la clasificación GSI (Geological Strength Index) de Hoëk, 1984.

La metodología de aplicación del estudio de los macizos rocosos, la densidad de datos y la oportunidad de realización de ensayos geotécnicos de campo y laboratorio depende del grado de avance del proyecto de una obra de ingeniería. Así, las fases de proyecto en nivel de complejidad y costo creciente son: inventario, prefactibilidad, factibilidad, proyecto ejecutivo y conforme a obra.

La etapa de inventario comprende la recopilación y análisis de toda la información geológica y geotécnica antecedente inherente al proyecto, el análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas, etc. todo lo cual se sistematiza en un informe de inventario, de tal manera del poder apreciar ordenadamente la plataforma del conocimiento de partida.

La etapa de prefactibilidad para un geólogo geotécnico comprende el trabajo de campo y, entre otras tareas, el estudio geológico y geotécnico de los afloramientos del sitio de trabajo mediante la utilización del martillo geológico, la brújula y la cinta métrica avanzándose a lo sumo en la definición y realización de estudios indirectos geofísicos. En esta etapa, en base a los elementos mencionados y mediante la utilización de las clasificaciones geomecánicas, es posible avanzar en el análisis de diferentes alternativas y, si las hubiera, en cada una de ellas realizar la parametrización geotécnica de macizos rocosos con un grado de aproximación significativo,  $\pm 35\%$ .

La etapa de factibilidad profundiza las alternativas planteadas para finalmente seleccionar una de ellas. El grado de aproximación al proyecto final es ahora de  $\pm 15\%$ . En esta etapa, los estudios geotécnicos se realizan a través de la ejecución de estudios directos mediante perforaciones, calicatas y trincheras y ensayos específicos de campo y laboratorio.

Finalmente, en la etapa sucesiva se eleva la alternativa seleccionada en la etapa anterior a Proyecto Ejecutivo. En la misma se maximizan los estudios y trabajos geotécnicos a los fines de justipreciar un proyecto definitivo cuyo costo determinado será de un ajuste superior al 3% del costo real de ejecución.

En síntesis, los estudios a realizarse en cada una de las etapas de proyectos son:

- **1) Inventario:** Recopilación de antecedentes. Comparación global con los otros proyectos posibles y seleccionar aquellos cuyas características económicas justifiquen un nivel de investigación más avanzado. Se utilizan imágenes satelitales, bibliografía geológica y mapeo geológico existente a pequeña escala (1:500000 a 1:100000). Análisis y síntesis de los estudios geológicos y geotécnicos antecedentes.

- **2) Prefactibilidad:** Se realizan reconocimientos geológicos y geotécnicos de campo y estudios básicos indirectos: estudios sísmicos y/o geoelectrónicos de bajo costo. Estudio de fundación y materiales a gran escala. Planteo de alternativas. Dan lugar a los **Anteproyectos Preliminares**.  $\pm 35\%$  del costo de la obra.
- **3) Factibilidad:** Estudio de fundación y materiales con mayor detalle. Etapa donde se realizan la mayor cantidad de estudios geológicos (mapeos a escala media: 1:25000 a 1:5000) y geotécnicos: se realizan perforaciones, ensayos de campo in situ y muestreo de suelos y/o rocas para ensayos de laboratorio. Estudio y selección de alternativas. Evaluación de impacto ambiental de cada una de las alternativas seleccionadas. Selección de la alternativa más conveniente. Da lugar al **Anteproyecto Definitivo**.  $\pm 15 \%$  del costo de la obra.
- **4) Proyecto Ejecutivo:** Optimización de la alternativa seleccionada. Estudio de fundación y materiales con todo detalle. En esta etapa no se realizan estudios geológicos, excepto que exista un problema puntual que deba resolverse con precisión (mapeo a gran escala: 1:1000 a 1:500, excepcionalmente 1:100). Se realizan estudios geotécnicos de detalle: galerías y/o pozos de gran diámetro y ensayos geotécnicos especiales in situ. Da lugar al **Proyecto Constructivo**.  $\pm 3-5 \%$  del costo de la obra definitiva.

Así, en el marco de este Trabajo Final de Licenciatura, se realiza una caracterización y clasificación de macizos rocosos de las obras de ingeniería de envergadura ubicadas en el ámbito de la Hoja Tandil 3760-IV, a nivel de proyecto de prefactibilidad. Dicho trabajo se llevó a cabo según las obras de magnitud significativa existentes en la región, reconociéndose en la actualidad la presencia de dos presas de laminación de crecidas extraordinarias, ambas sitas en la cuenca del arroyo del Fuerte, afluente del arroyo Langueyú. La más antigua, de gravedad de hormigón, fue construida en la década de los años 50 y se la conoce con el nombre de Dique del Fuerte. La segunda, de reciente construcción, también de gravedad de hormigón, se encuentra en las cercanías de la anterior en un arroyo afluente del Arroyo del Fuerte y se la conoce con el nombre de Presa del Ramal H. Asimismo se conoce una actual presa en vías de proyecto, Presa del Arroyo Blanco, también ubicada en el ámbito periurbano de la ciudad de Tandil, al oeste de las anteriores.

## 1.1 Área de estudio

El área de estudio se enmarca en la carta geológica Tandil 3760- IV de escala 1:250000 (Figura 1) realizada por el Instituto de Geología y Recursos Minerales dependiente del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

Dicha carta abarca una zona rectangular localizada en su totalidad en la provincia de Buenos Aires entre las coordenadas de 60° 00' y 58° 30' Longitud Oeste y 37°00' y 38°00' Latitud Sur (Fig. 1). Comprende varios partidos, entre los que se destacan Tandil, Benito Juárez y pequeños sectores de los Partidos de Ayacucho, Azul, Gonzáles Chaves, Necochea, Lobería y Balcarce.

El área de estudio propiamente dicho se limita a los afloramientos de macizo rocoso del Basamento Cristalino Precámbrico sitios en la ciudad de Tandil. Los mismos constituyen los materiales de fundación de las existentes Presa del Arroyo del Fuerte y Presa del Ramal H y de la futura Presa del Arroyo Blanco. Todas son presas de laminación de crecidas extraordinarias.

Siendo estas las únicas existentes en el ámbito de la Hoja Tandil 3760-IV, se encuentran dentro de la cuenca del arroyo Langueyú (Figura 2), formado aguas abajo de la ciudad de Tandil a partir de la confluencia de los arroyos Del Fuerte (donde se ubican las presas actuales) y Blanco (lugar de la presa proyectada).

Esta cuenca tiene sus cabeceras en el sistema serrano de Tandilia y posee una extensión aproximada de 600 km<sup>2</sup>, desde las nacientes en el faldeo norte de las sierras de Tandil hasta el límite del partido de Tandil con el de Ayacucho.

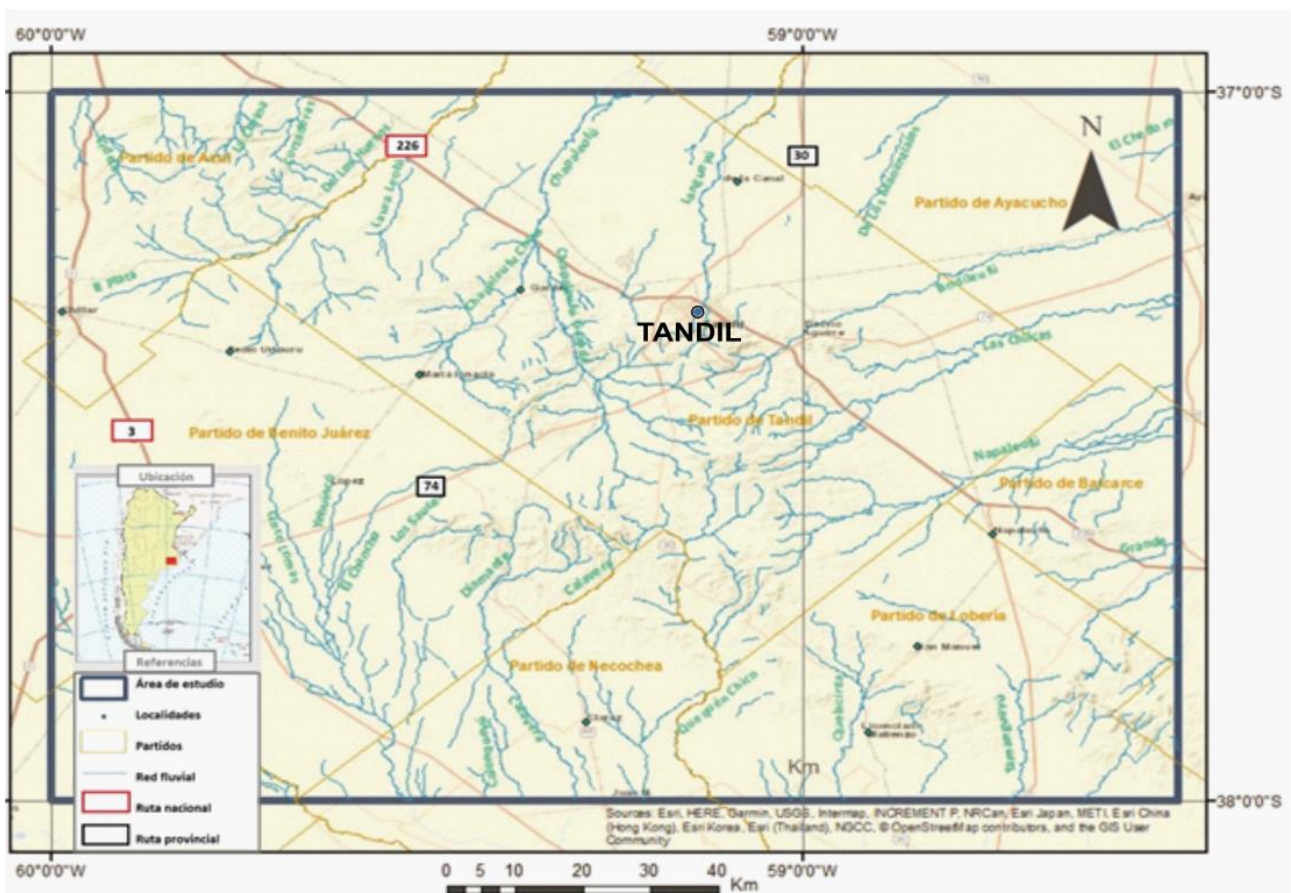


Figura 1.- Hoja geológica Tandil 3760-IV, se muestra al centro norte la localidad de Tandil, modificado de Manassero, 2019.

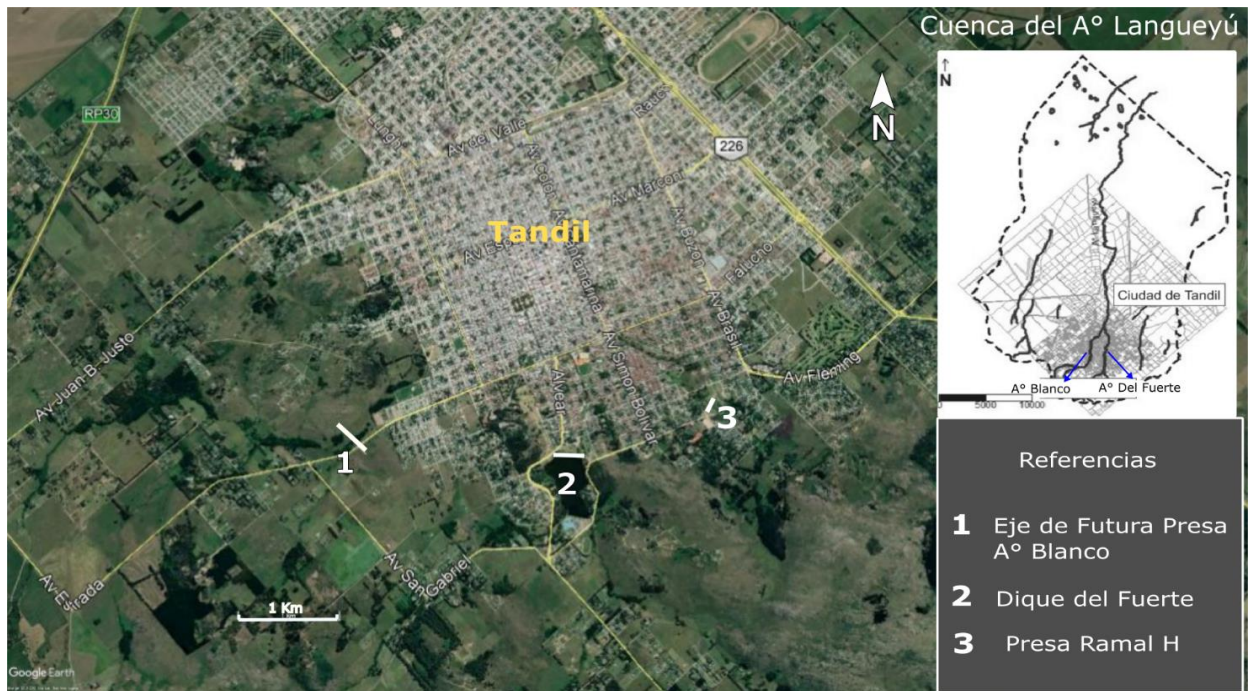


Figura 2.-Ubicación de las presas actuales y proyectada en la localidad de Tandil, dentro de la cuenca del Arroyo Langueyú.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de este Trabajo Final de Licenciatura es caracterizar geotécnicamente, a nivel de prefactibilidad, los macizos rocosos presentes en el área de implantación de las dos presas existentes y una proyectada dentro de la Hoja 3760-IV.

En dicho marco general, los objetivos específicos a desarrollar son:

1.- Análisis y síntesis de las características geotécnicas detectadas de los materiales sujeto de las obras de presas existentes (Del Fuerte y Ramal H) y proyectadas (actual cierre previsto en el área del Arroyo Blanco).

2.- Desarrollo y aplicación de las clasificaciones de macizos rocosos de uso actual (RMR, Q y GSI) para la caracterización de macizos rocosos a los fines de la fundación de las presas citadas en el punto anterior. Ello comprende también el desarrollo metodológico de las determinaciones de las características resistentes, deformacionales e hidráulicas de los macizos rocosos a los fines clasificatorios en afloramientos rocosos representativos en el área específica de los emprendimientos hidráulicos mencionados.

### **1.3 Metodología**

La metodología consistió en tareas de recopilación bibliográfica, cartográfica y satelital, y trabajos de campo.

Se recopiló información proveniente de publicaciones e informes relacionados con las características hidrológicas, geológicas y geomorfológicas de la región. Se dispuso de información bibliográfica antecedente en organismos e instituciones gubernamentales, de información hidrogeológica de publicaciones científicas divulgadas tanto en revistas indizadas como en congresos geológicos y también de información geotécnica sita en revistas, simposios y congresos de la especialidad geológica aplicada a la ingeniería.

La cartografía básica que se utilizó es la Carta Topográfica de Tandil a escala 1:250.000 del IGRM y la carta litológica de la Línea de Base Ambiental Tandil 3760- IV conforme al sistema de proyección Gauss-Kruger, Datum Campo Inchauspe. También se utilizaron imágenes satelitales de Google Earth.

Los relevamientos o control de campo que se realizaron para desarrollar la caracterización de los macizos rocosos, se basaron en la aplicación de técnicas y determinaciones geotécnicas expeditivas indicadas y homologadas por la ISRM (International Society of Rocks Mechanics), a nivel de pre-factibilidad, en los afloramientos de los macizos rocosos sitios en el área adyacente de las presas, con base en los trabajos antecedentes puntuales que de ellas se ha obtenido en la cátedra de Geología Aplicada. Para ello se realizaron mediciones con brújula geológica y cinta métrica, se utilizó el martillo geológico o piqueta a fin de efectuar las observaciones y descripciones megascópicas de los afloramientos, con el propósito de la posterior aplicación de las clasificaciones geotécnicas.

## **2. Características del área de estudio**

Como se mencionó previamente, el área de estudio se compone de los afloramientos del Basamento Cristalino Precámbrico sitios en la ciudad de Tandil, los cuales constituyen los materiales de fundación de las actuales Presa del A° del Fuerte y Presa del Ramal H y futura Presa del A° Blanco, presas de laminación de crecidas extraordinarias que constituyen elementos de mitigación de inundaciones recurrentes por precipitaciones extraordinarias en el sitio. La presencia de dicho macizo rocoso de edad Precámbrica responde a un contexto geológico regional que a continuación se describe.



Se encuentra limitado al noreste con la Cuenca del Salado mediante un sistema de fallas normales con vergencia al noreste y al suroeste con la Cuenca de Claromecó (Ramos, 1999).

Presenta afloramientos discontinuos, con elevaciones interrumpidas por valles y abras, por lo que ha sido subdividido en grupos orográficos cuyos nombres corresponden a la ciudad o partido más cercano:

Sierras de Olavarría (Sierras de Quilla Lauquen, de la China, Dos Hermanas, Chica y Bayas).

Sierras de Azul (Cerros La Crespa, Las Chilcas, Boca de la Sierra La Plata).

Sierras de Tandil (Sierras Alta de Vela, del Tigre, cerros de las Ánimas o Albión y La Blanca). Donde se ubican los afloramientos estudiados.

Sierras de La Tinta (Sierras de la Tinta y de la Juanita, Cuchilla de las Águilas, cercanas a la localidad de Barker).

Sierras de Balcarce (Sierras Chata, Hunco, Vulcán -o Volcán o del Abra-, Vigilancia, Brava y Ginocchio; serranías de Cinco Cerros, Bachicha, La Barrosa y San Agustín).

Sierras de Mar del Plata (Sierras de La Peregrina, Las Mostazas, de los Padres y luego lomadas suaves en Chapadmalal y Batán).

Sierras de Necochea-Lobería (Sierras del Piojo, La Tigra, Larga, Guitarra y de los Barrientos).

Se reconocen tres grupos principales: en el extremo Septentrional las Sierras de Olavarría-Sierras Bayas-Azul; en el sector central las Sierras de Tandil-Barker y en el extremo sur-oriental las Sierras de Balcarce-Lobería-Mar del Plata.

El Basamento Cristalino está expuesto en todos los grupos, pero se halla en parte cubierto en los extremos por las sedimentitas del Grupo Sierras Bayas o La Tinta seguidas por la Formación Cerro Negro, ambas de edad precámbrica (al oeste) y por la Formación Balcarce de edad ordovícica, al sudeste.

### **2.1.1 Basamento Cristalino**

Las rocas del basamento cristalino de Tandilia, denominadas en conjunto Complejo Buenos Aires (Marchese y Di Paola, 1975), conforman una asociación ígneo-metamórfica (Figura 4) de gneises graníticos a tonalíticos, migmatitas, anfibolitas y numerosos plutones graníticos, escasos esquistos, mármoles y rocas ultramáficas. Con anchos y largos cinturones miloníticos y rocas metavolcánicas, configuradas en enjambres de diques de ácidos y básicos. Dalla Salda (2006) señala su estabilización hacia 1700 Ma, siendo el complejo consecuencia de la Orogenia Transamazónica, que se interpreta

como producto de un evento colisional continente-continente sugerido por la presencia de los leucogranitos, los cinturones miloníticos, las rocas oceánicas y el apilamiento cortical en la región.

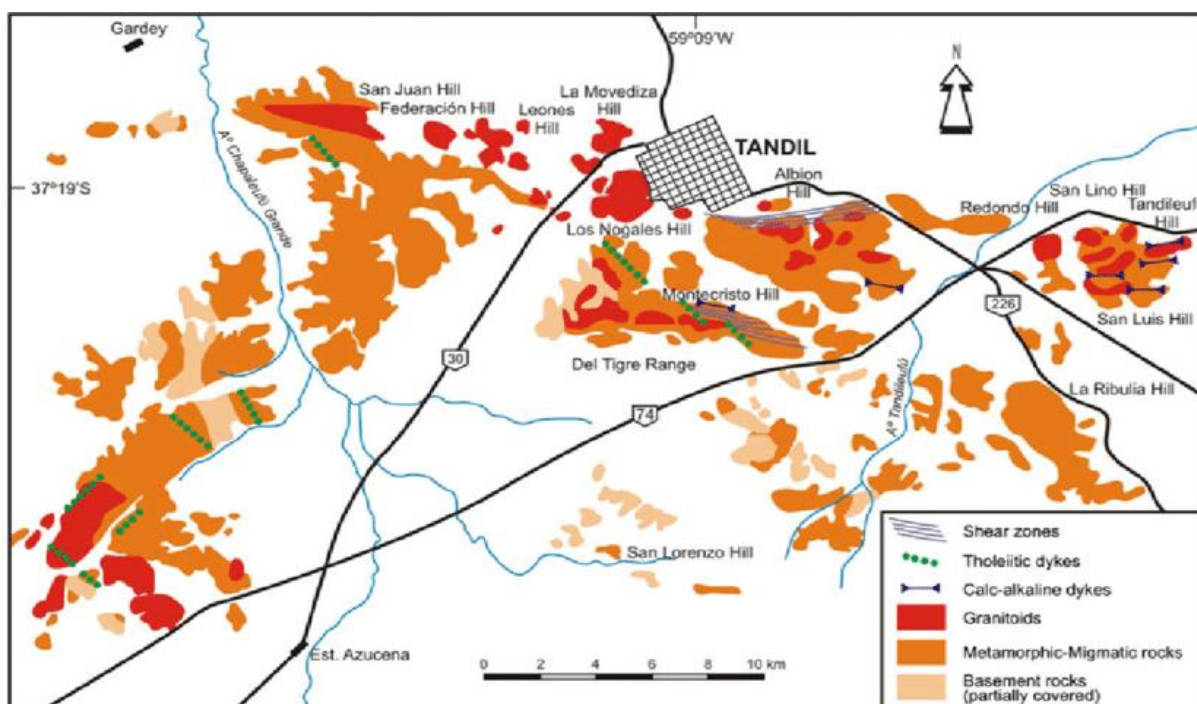


Figura 4.- Mapa geológico mostrando la distribución de las principales metamorfitas y plutones graníticos en los alrededores de la ciudad de Tandil (Cingolani 2011, modificado de Dalla Salda et al. 2006)

Los granitos en sentido estricto, afloran en mayor medida en la porción noroccidental y a lo largo del borde austral de las Sierras de Tandil.

Los granitoides presentan una composición predominantemente tonalítica a granodiorítica (Dalla Salda et al., 2005) y están, en general, emplazados en metamorfitas parcial a casi totalmente migmatizadas (Dalla Salda et al. 2006). Estas rocas afloran desde el arroyo de los Huesos hasta Tandil, continuando luego hasta las Sierras de Balcarce.

Asimismo, los granitoides presentan una distribución preferencial en la región central de las Sierras de Tandil, pudiendo diferenciarse dos fajas de distinta composición: una faja Septentrional que tiene como centro la ciudad de Tandil extendida en dirección este-oeste y una faja Austral limitada a la Sierra del Tigre y al sur de la Sierra Alta de Vela (Dalla Salda et al. 1992).

La faja septentrional, que se encuentra íntimamente vinculada al área de estudio y su caracterización geológica, se desarrolla asociada a rocas miloníticas y presenta una variación composicional entre tonalítica y granítica, cuyos granitoides podrían formar parte de un cuerpo mayor constituido por varios plutones menores, emplazados en varias fases.

Respecto a la distribución de estas rocas a lo largo de los cerros y canteras que abarca la faja septentrional, Dalla Salda et al. (1992) determinaron que:

*Los Cerros Tandileufú (canteras San Luis, Tandileufú 71y San Lino) y Los Nogales se caracterizan por rocas tonalíticas, que en la cantera San Luis se asocian a granitos, granodioritas y a milonitas grises. Hacia el oeste, en la cantera Tandileufú, en el extremo norte del cerro homónimo, reaparecen las tonalitas grises también asociadas a granitos; allí la milonitización es abundante y los granitos heterogéneos, muestran zonas de grano más grueso ricas en feldespatos potásicos, alternando con otras más finas. Las variaciones composicionales son de contactos netos, pero no muestran relaciones de intrusividad. “Las rocas granudas constituyen grandes lentes o fajas relictuales de cataclasis. En la cantera San Lino se reconocen dos variedades de granitoides grises, uno claro y otro oscuro, éste último es de composición tonalítica y está contenido en espesas fajas de milonitas grises y rosadas. Otras rocas tonalíticas afloran en el área del Cerro Los Nogales, asociadas a abundantes apfilitas y pegmatitas de texturas granudas...”. Cingolani et al, (2002) ha datado a las tonalitas de El Calvario y alrededores de la ciudad de Tandil en edades de 2234, 2166, 2183 y 2228 Ma, U-Pb, SHRIMP.*

En cuanto a la Faja austral reconocen dos áreas principales donde se identifican agrupamientos en las rocas graníticas: Sierra del Tigre (Granito Montecristo) y la zona sur de la Sierra Alta de Vela. El Granito Montecristo presenta dos facies leucocráticas, mientras que en los granitos de la Sierra Alta de Vela se distinguen dos tipos, uno de mayor extensión biotítico, y otro, limitado al oeste de la sierra, muscovítico.

Formando parte del basamento también se incluye, alojado en las rocas descriptas anteriormente, un complejo enjambre de diques proterozoicos. Los más antiguos datados a 2020 Ma (Teixeira et al, 2002), están orientados en dirección este-oeste y corresponden a un volcanismo bimodal de composición calcoalcalina (Fernández y Echeveste, 1995; Iacumin et al., 2001), con diques andesíticos y riolíticos que afloran en las Sierras de Tandil, Sierra del Tigre, Cerro Albión y especialmente en el Cerro Tandileufú. Los diques más jóvenes, dispuestos generalmente con rumbo N 30° O, son de edad ~1600 Ma (Teixeira et al., 2002), y presentan una composición basáltica de asociación toleítica (Echeveste y Fernández, 1994, Iacumin et al., 2001). Dentro de estos se diferencian dos grupos de diques de distinta composición: diabasas, en las Sierras de Azul y Tandil (Teruggi et al., 1974) y diques basálticos, en las Sierras de Tandil (Teruggi et al., 1988).

Respecto la presencia de milonitas, en Tandilia se han reconocido largas y amplias zonas de cizalla que afectan las rocas del basamento cristalino. Se identifican dos fajas principales, una de las cuales

aflora desde el Cerro Albión hasta la Sierra del Tigre (Dalla Salda, 1981), al sudeste de la ciudad de Tandil con una orientación principalmente es este-oeste, observándose algunas ramificaciones oeste-noroeste.

*Estas fajas de cizalla están compuestas por milonitas, protomilonitas y cataclasitas; estas últimas principalmente en los laterales y en tabiques menos deformados dentro de las zonas de cizalla. Se ha registrado una blastesis feldespática vinculada a estas rocas cizalladas; en menor medida hay blastesis de anfíboles, así como deformaciones posteriores. Estas rocas se describieron como derivadas principalmente de granitoides (González Bonorino et al., 1956, Teruggi y Kilmurray, 1975, 1980).*

También conforman al basamento de las Sierras Septentrionales rocas metamórficas de bajo grado diferenciadas como Formación El Cortijo (Teruggi et al. 1988) aflorantes en las cercanías de la ciudad de Tandil, más específicamente en el cerro Albión.

Consisten en metacherts, metagrauvacas y metabasitas, estas últimas de 1540Ma de edad, según dataciones con K-Ar (Cortezzi y Rabassa, 1976) y se interpretan como una porción de corteza oceánica (Cingolani 2011, Chernicoff et al. 2014).

Por último, se reconocen como parte del basamento del sistema de Tandilia rocas halladas en una perforación puntual próxima a la localidad de Mar del Plata, denominadas como La Metapelita Punta Mogotes (Borrello, 1962). Esta Formación evidencia una edad Neoproterozoico- Cámbrico Medio (900-500 Ma) y una composición de pelitas pizarreñas, rojizas, verdosas y grises, con venillas de cuarzo (Marchese y Di Paola, 1975).

## **2.1.2 Cubierta sedimentaria**

### *a. Cobertura sedimentaria proterozoica-eopaleozoica*

En los sectores norte y sur del sistema de Tandilia, no así en la zona de estudio, se dispone por encima de basamento una cobertura sedimentaria premesozoica (Tabla 1) representada por Grupo Sierras Bayas (Dalla Salda e Iñiguez, 1979; Poiré, 1993). Es un conjunto de rocas sedimentarias de plataforma de edad precámbrica donde predominan secuencias silicoclásticas y carbonáticas con *conglomerados, brechas, arenitas y vaques cuarzosas, areniscas glauconíticas, fangolitas, limolitas, arcilitas, lutitas, ferrilitas, mudstones, grainstones, boundstones dolomíticos - estromatolíticos y ftanitas* (Poiré y Spalletti, 2005). Se diferencian las siguientes unidades: Formación Villa Mónica (Poiré, 1987, 1993), Formación Cerro Largo (Poiré, 1987, 1993), Formación Olavarría (Andreis et al., 1996) y Formación Loma Negra (Borrello, 1966).

Continuando en discordancia con el Grupo Sierras Bayas, se ubica la Formación Cerro Negro (Iñiguez y Zalba, 1974), constituida por psamopelitas de edad ediacareana-cámbrica. Sobreyace Formación Balcarce (Dalla Salda e Iñiguez, 1979) de composición silicoclástica, asignada al Ordovícico-Silúrico. Dado que aflora desde la localidad de Balcarce hacia la costa atlántica, esta formación no se halla en el área de estudio. En la misma región de las sierras Spalletti y del Valle (1984) definieron, en la Sierra del Volcán, una unidad de diamictitas que se encuentra entre el basamento y la Formación Balcarce, asignada al proterozoico superior.

| Era                                       | Período          | Unidad estratigráfica |                  |                                |                      | Secuencia deposicional   |
|-------------------------------------------|------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------|
|                                           |                  | Región NO             |                  | Región Central                 |                      |                          |
| Paleozoico                                | Silúrico         |                       |                  | Formación Balcarce             |                      | Secuencia Batán          |
|                                           | Ordovícico       | Formación Balcarce    |                  | Formación Balcarce             |                      |                          |
| Neoproterozoico                           |                  | Fm. Cerro Negro       |                  | Fm. Cerro Negro                |                      | Secuencia La Providencia |
|                                           |                  |                       |                  | Diamictitas Sierras del Volcán | Fm. Punta Mogotes    |                          |
|                                           |                  | Fm. Loma Negra        |                  | Fm. Loma Negra                 |                      | Secuencia Villa Fortabat |
|                                           |                  | Fm. Olavarría         |                  | Fm. Las Águilas                |                      | Secuencia Diamante       |
|                                           |                  | Fm. Cerro Largo       |                  | Fm. Cerro Largo                |                      | Secuencia Malegni        |
|                                           | Fm. Colombo      |                       |                  |                                |                      |                          |
|                                           | Fm. Villa Mónica |                       | Fm. Villa Mónica |                                | Secuencia Tofolletti |                          |
| Complejo Buenos Aires (Paleoproterozoico) |                  |                       |                  |                                |                      |                          |

Tabla 1.- Cuadro estratigráfico de la cobertura sedimentaria precámbrica-eopaleozoica en el Sistema de Tandilia. (Poire y Spalletti, 2005).

*b. Cubierta Sedimentaria Cuaternaria*

En la zona de estudio abundan los sedimentos cuaternarios dispuestos sobre el Basamento Cristalino y constituyen el componente litológico de mayor extensión en la zona.

La depositación de los sedimentos cenozoicos continentales en la provincia de Buenos Aires se produjo a partir del Mioceno Tardío (< 12 Ma) con fuerte influencia del orógeno Andino como la principal área de aporte con evidencias de redepositación por acción fluvial (Teruggi, 1957).

Los numerosos trabajos que contribuyeron al conocimiento sobre la geología de la Provincia de Buenos Aires, produjeron heterogeneidades en los nombres formacionales a los distintos afloramientos de los depósitos cuaternarios. Por ello, se adjunta un cuadro estratigráfico (Tabla 2) para facilitar y mostrar las equivalencias en los nombres de las Formaciones. El mismo fue realizado a partir de información extraída del Mapa Geológico de la Provincia de Buenos Aires (LEMIT/MOP, 1975), como de trabajos de diversos autores: Enrique Fucks y Cecilia M. Deschamps (2008); Tófaló et. Al (2005).

| Era       | Período                   | Época                                | Nombres formacionales según diversos autores |                        |                               |                     |                           |                               |
|-----------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|
|           |                           |                                      | Ameghino (1889)                              | Frenguelli (1957)      | Riggi (1986)                  | De Salvo (1969)     | Fidalgo (1973)            | Rabassa (1973)                |
| Cenozoico | Neógeno                   | Pleistoceno tardío – Holoceno        |                                              | Postpampiano           |                               | Fm Lujan y Fm Junín | Fm Luján y Fm La Postrera | Fm Tandileufú y Fm Las Ánimas |
|           |                           | Plioceno tardío – Pleistoceno tardío | Pampeño                                      | Pampeano (Fm Ensenada) | Fm Buenos Aires y Fm Ensenada | Fm Ensenada         | Fm Pampiano               | Fm Vela                       |
|           | Mioceno tardío - Plioceno |                                      |                                              |                        |                               |                     | Fm Barker                 |                               |

*Tabla 2.- Cobertura cuaternaria de la Provincia de Buenos Aires según diferentes autores, para distintas regiones de la provincia.*

Los sedimentos son denominados en conjunto genéricamente como “Pampeano”, loess o “Loess Pampeano” (Frenguelli,1955). Comprenden limos arenosos y limos arcillosos de colores castaños con niveles de arenas y conglomerados con abundantes intercalaciones calcáreas en forma de cemento y como muñecos y venas verticales, subverticales y horizontales (tosca) y en algunos casos costras. Se caracterizan por ser depósitos macizos, es decir, que carecen de estratificación y por la gran estabilidad que poseen para permanecer en paredes verticales debido a la alta fricción que poseen por la existencia de trizas vítreas en su constitución. Se originaron a partir de sedimentación principalmente eólica y, en menor grado, fluvial con participación de eventos piroclásticos explosivos.

Rabassa en el año 1973 definió el esquema estratigráfico de la cubierta cenozoica para el área de las sierras de Tandil más aceptado actualmente. El mismo diferencia dos áreas y divide los sedimentos en 5 unidades litoestratigráficas: en las áreas interfluviales se ubican la Formación Barker, la Formación Vela y la Formación Las Ánimas; mientras que las áreas fluviales están representadas por la Formación Tandileufú y sedimentos aluviales recientes.

El esquema entonces queda conformado de la siguiente manera:

| Era                                              | Periodo   | Época                                | Unidad Litoestratigráfica |                 |
|--------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------|
|                                                  |           |                                      | Áreas interfluviales      | Áreas fluviales |
| Cenozoico                                        | Neógeno   | Pleistoceno tardío – Holoceno        | Fm Las Ánimas             | Aluvio          |
|                                                  |           | Plioceno tardío – Pleistoceno tardío |                           | Fm Tandileufú   |
|                                                  | Paleógeno | Mioceno tardío - Plioceno            | Fm Vela                   | Fm Barker       |
|                                                  |           |                                      |                           |                 |
| Roca de base (Paleozoico + Basamento Cristalino) |           |                                      |                           |                 |

Tabla 3.-Cuadro estratigráfico esquemático de la cobertura sedimentaria cenozoica de Tandilia. Basado en Rabassa, 1973.

## Áreas interfluviales

La Formación Barker, asignada al Mioceno tardío-Plioceno (Samús y Bidegain, 2014) corresponde a una limolita castaño rojiza arcillosa sin estratificación aparente, de génesis probablemente eólica que se ubica mayormente en las zonas pedemontanas, mientras que en el resto de la región se la halla sólo excepcionalmente aflorante en superficie, debido a que está cubierta por sedimentos más modernos.

La Formación Vela posee una edad Plioceno tardío- Pleistoceno tardío, y se compone de limos arenoso-arcilloso castaño claros, originados por sedimentación eólica con indicios de acción hídrica. Los sedimentos se extienden como un manto de poco espesor, cubriendo casi totalmente los afloramientos de la Formación Barker. Ocupan gran parte de las zonas pedemontanas y la totalidad de las áreas distales de éstas. Se caracteriza por presentar un gran contenido de carbonato de calcio en todo su espesor, identificándose en los niveles superiores, una costra calcárea de extensión regional, denominada Paleosuperficie Tandil (Teruggi et al. 1973).

Esta unidad se correlaciona con la Formación Ensenada (Fidalgo, 1973) y corresponde a los denominados “sedimentos pampeanos”.

La Formación Ensenada incluye sedimentos limo arcillosos con proporciones variables de la fracción arena. En la región de Tandil la litología presenta variaciones en sentido lateral y vertical, que por lo general evidencian un aumento considerable en el porcentaje de la fracción arena. En Tandil alcanza un espesor máximo de 4 metros (Rabassa, 1972).

La Formación Las Ánimas corresponde a la unidad estratigráfica más moderna desarrollada preferentemente sobre las divisorias. Se extiende como un manto casi continuo de espesor muy variable, que cubre el relieve preexistente. Ocasionalmente se presentan pequeños niveles de concentración de rodados. Está representada por limos arenosos, de color castaño amarillento, sin estructuras ni estratificación, con escaso carbonato de calcio, en general ausente. Estos sedimentos tienen un aspecto loésico muy marcado. Alcanzan un espesor máximo de tres metros (Rabassa, 1972)

Esta unidad se corresponde con la Formación Junín (De Salvo, 1969) y la Formación La Postrera (Fidalgo, 1972). Ambas unidades integran los sedimentos “postpampeanos”.

## Áreas fluviales

En los valles fluviales se muestra un desarrollo de unidades muy restringido. En general, el perfil observado consta solamente de la unidad sobre la cual se ha excavado el cauce y depósitos aluviales recientes.

En algunas zonas, los sedimentos aluviales sobreyacen en discordancia a la Formación Tandileufú, cuyos sedimentos fluviales depositados simultáneamente a los basales de la Formación Las Ánimas, se apoyan en discordancia sobre la Formación Vela.

La Formación Tandileufú está dividida en dos miembros claramente diferentes: El miembro inferior es arenoso, hasta sabulítico, de color castaño. Presenta en su base rodados del Basamento Cristalino. Se trata de una arena que hacia los niveles superiores disminuye su contenido gradando a una arena limosa, para pasar a limoarena; el miembro superior es limo arcilloso, de color verde a gris verdoso, presentando impregnaciones ferruginosas. Granulométricamente son limo-arcillas arenosas, con contenidos de arena variable, con una mineralogía es similar a la de la Fm Las Ánimas.

Esta unidad se puede correlacionar con la Formación Luján, constituida por sedimentos que corresponden pura y exclusivamente a depósitos de valles y lacustres. La misma se apoya en discordancia erosiva sobre los sedimentos de la Formación Pampiano o de la Formación Ensenada, y están también cubiertos por el aluvio actual en discordancia erosiva. Puede suceder que en algunos valles esté ausente y se observa sobreyaciendo la roca de base directamente el aluvio actual.

El aluvio de edad reciente fue definido texturalmente como arcillas y limos de coloración clara asociados con material orgánico redepositado y pueden encontrarse apoyados sobre cualquiera de las unidades ya descriptas por sobre las que se instaló el drenaje actual. Aparentemente, el drenaje es muy joven, dado el incipiente desarrollo de los valles.

## 2.2 Estructura

Como en todos los complejos ígneo-metamórficos proterozoicos, en la zona de estudio las estructuras del basamento son más complicadas de observar e interpretar que la litología, dado que la cubierta sedimentaria, la alteración y el nivel expuesto, dificultan la identificación de los procesos tectónicos.

La evolución tectónica del sistema de Tandilia comprende más de un episodio de deformación, que produjeron estructuras de alta complejidad, caracterizadas por la existencia de bloques del basamento cristalino fracturados por fallas de alto ángulo con fuertes rechazos verticales.

En el sistema de Tandilia, se reconocen varias fases deformacionales, que se corresponderían con planos estructurales preexistentes los cuales, durante el desarrollo de la Orogenia Andina, fueron reactivados produciendo la elevación de las Sierras (Teruggi et al, 1980).

Las estructuras del sistema propiamente dichas, como lo son los planos de fallas y/o diaclasas, la cataclatización de las rocas componentes y la milonitización y ultramilonitización de las mismas en fajas de cizalla se originaron como consecuencia de los esfuerzos dinámicos producidos por dichas fases. Es así, que Teruggi et al diferenciaron en el basamento tres dominios tectónicos:

- Dominio tectónico A, consistente en estructuras laminares afectadas por deformaciones posteriores. Se compone de rocas de grano fino y granitoides y pliegues con ejes de rumbo este-oeste (E-O). Se extiende en sierras y cerros hacia el sur y sudeste de Tandil.
- Dominio tectónico B donde predominan estructuras de migmatitas plegadas con direcciones noreste-sudoeste (NE-SO). Se desarrollan principalmente en las Sierras de Tandil y en las de Balcarce.
- Dominio tectónico C, el cual presenta una foliación regional en sentido noroeste-sudeste (NO-SE) resultado de la orientación preferencial de ejes buzantes al sureste. Posee rocas esquistosas de grano fino intruidas por rocas graníticas. Se encuentra en las Sierras de Tandil reducido a una franja angosta.

Las fracturas que afectan al complejo deformado y metamorfizado siguen, en general, las tres direcciones antes citadas para los trenes de pliegues y coinciden con las lineaciones principales que caracterizan los dominios tectónicos que describieron Teruggi et al. (1973). Estas tres direcciones fundamentales se mantendrían en el subsuelo de la provincia, a través de sistemas de fallas directas con esos rumbos.

También se debe tener en cuenta la presencia superficial y subsuperficial de un cuarto juego de diaclasas subhorizontales que atraviesa a los tres sistemas anteriores. La existencia de éste es responsable de las redondeadas pendientes, domos rocosos a gran escala y a bolos graníticos a pequeña escala, de los afloramientos rocosos del Basamento. Tendría circunscripta su aparición sólo a los niveles superiores del macizo rocoso como consecuencia de relajamiento cortical, ligado a la acción de esfuerzos compresivos sobre macizo rocoso (Vidal Romaní y Rowland Twidale, 2005, 2006). Los citados autores concluyen que este diaclasamiento disminuye su frecuencia en profundidad.

Como conclusión se puede establecer que el diaclasamiento subhorizontal aludido y los que corresponden a los dominios tectónicos definidos, de inclinación básicamente subvertical son

elementos que contribuyen a la formación de bloques de dimensiones variables (desde 3cm a varios metros cúbicos) a lo que coadyuva la existencia de fajas ultramilonizadas y alteradas susceptibles de erosión.

## 2.3 Geomorfología

A partir de información geomorfológica extraída de la carta de línea de base ambiental Tandil 3760-IV, la Hoja Tandil 3760-IV se integra de tres grandes unidades fisiográficas: Las Sierras Septentrionales, la Pampa Pedemontana y La Pampa Deprimida-Interserrana.

Las Sierras Septentrionales o Sistema de Tandilia (Nágera, 1940) constituye una cadena de cerros de escasa altura y aislados que están compuestos por rocas de edad paleozoica inferior y precámbrica. Esta cadena discontinua de sierras se extiende desde la ciudad de Mar del Plata hasta algo más al oeste de la localidad de Olavarría. En esta unidad se encuentran los afloramientos que constituyen la zona de estudio.

La Pampa Pedemontana es el ambiente de transición entre la sierra y las zonas más bajas de la llanura. Es una zona de acumulación de sedimentos provenientes de la degradación de la sierra y donde dominan las geoformas modeladas por la acción hídrica. Según la posición geográfica con respecto a las sierras de Tandilia, la Pampa Pedemontana es diferenciada en Intraserrena y Periserrana.

La Pampa Deprimida y la Pampa Interserrana (Tricart, 1973) ocupa la parte norte y sur del área. Constituyen una llanura sin ondulaciones y con escasas pendientes que fue y es modelada por la acción eólica e hídrica. El modelado está en cierta manera controlado por la presencia de bancos de duricóstras calcáreas ("tosca").

### 2.3.1 Unidades Geomorfológicas

Para una mayor facilidad, se ha dividido la descripción de las unidades geomorfológicas según su presencia en tres sectores (Tabla 4), que abarcan los distintos ambientes en donde se enmarcan las unidades fisiográficas antes descriptas. También se adjunta la Carta Geomorfológica (Figura 5), donde se observan los rasgos geomorfológicos que afloran en cada sector.

| Sector  | Unidad fisiográfica     | Ambiente geomorfológico | Geoformas                                                                      |
|---------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Serrano | Sierras Septentrionales | Ambiente serrano        | -Cerros y sierras.<br>-Cuestas Homoclinales Disectadas, Mesillas o Mesetillas. |

|              |                              |                                                  |                                                                                                       |
|--------------|------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              |                              |                                                  | -Escarpas de erosión.                                                                                 |
|              | Pampa pedemontana            | Ambiente pedemontano intraserrano y peri-serrano | -Niveles pedemontanos -Terrazas aluviales<br>-Planicies aluviales<br>-Cerros residuales y Montes isla |
| Nororiental  | Pampa Deprimida-Interserrana | Llanura fluvio-eólica                            | -Paleocauces<br>-Cubetas de deflación                                                                 |
| Interserrano |                              |                                                  | -Planicies Aluviales<br>-Planicie estructural loésica controlada por duricostra calcárea              |

Tabla 4.-Esquema de las unidades geomorfológicas presentes en los diferentes sectores.



CARTA GEOMORFOLÓGICA

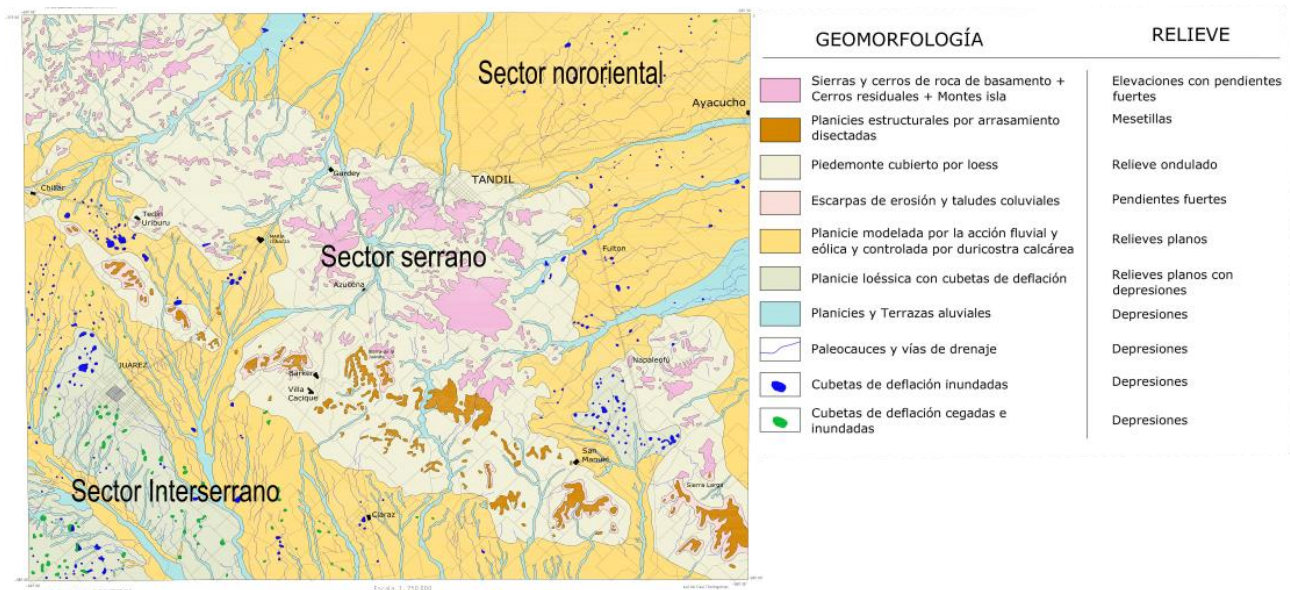


Figura 5.-. Carta geomorfológica Tandil 3760-IV. Modificado de Tchilinguiria et al. (2004)

a. Sector serrano

En el ambiente serrano, se incluyen primeramente las Sierras Septentrionales de Buenos Aires. A escala regional están orientadas en dirección NW-SE, cuya disposición está controlada en general, por las fallas y las diaclasas resultantes de los tres dominios estructurales del Basamento. Los cerros

y las sierras, que constituyen las geoformas principales, se encuentran separadas por ambientes intraserranos que coinciden con las zonas de debilidad donde las corrientes de agua sirvieron de agentes erosivos que actuaron intensamente originando las redes de drenaje.

De esta forma bloques compuestos por rocas del basamento y rocas paleozoicas se desarrollan sobre elevados entre 50 a 200 m sobre el nivel de la llanura lindante (Tchilinguiria et al. 2004).

La morfología serrana depende básicamente de las características estructurales y litológicas aflorantes, evidenciándose en este sector dos tipos de relieves: uno redondeado y suave como resultado de la erosión de rocas ígneo-metamórficas, donde es común observar que las laderas tienen una pendiente segmentada: en la zona superior de la pendiente es común encontrar rasgos del relieve con indicios de meteorización o descamación catafilar importante, como tors y rocas ovaladas. En los sectores medios de la pendiente, se encuentran los gradientes más abruptos (10 a 30%) y es común la presencia de laderas rocosas que coinciden con planos de fractura paralelos a la pendiente. En la zona inferior de las pendientes se desarrollan laderas coluviales con gradientes de 5 a 10%. En esta zona son comunes los procesos de reptaje.

El otro tipo de relieve que se reconoce, se caracteriza por un paisaje dominado por serranías mesetiformes con un frente escarpado hacia el norte controlado por la estratificación subhorizontal de las rocas sedimentarias precámbricas-eopaleozoicas, principalmente ortocuarcitas (Dalla Salda, 2005).

La erosión hídrica, conjuntamente con los procesos de remoción en masa, degradan y disectan la meseta de cuarcita desarrollando valles en V y escarpas rocosas. Cuando la degradación es muy avanzada, se forman remanentes de erosión desmembrados de la mesilla principal. Geomorfológicamente, estas unidades son denominadas "Cuestas Homoclinales Disectadas" y cuando son mucho más pequeñas y no se puede distinguir la inclinación del sector cumbral se las denomina "Mesillas o Mesillas de Cuarcitas" de acuerdo al tamaño que presentan.

En el sector serrano, se distingue también el Ambiente pedemontano donde se puede diferenciar dos subambientes: el ambiente intraserrano y el ambiente pedemontano periserrano.

El Ambiente intraserrano ocupa zonas del paisaje que se ubican dentro del ambiente serrano o entre los bloques serranos. Constituye relieves dominados por colinas de poca altura (20 a 80 m) con una red de drenaje de diseño dendrítico y bien definida. Estas ondulaciones podrían conformar remanentes de erosión de niveles antiguos de piedemontes. Aparecen aquí cerros residuales, que se manifiestan como colinas aisladas de hasta 90 m de altura conformada por rocas de basamento.

El Ambiente periserrano, ocupa la región entre el pie de la sierra y la llanura. Topográficamente constituye una planicie que inclina hacia la llanura con gradientes entre 1° a 2° y que se extiende entre 15 a 30 km. desde el pie serrano. En esta gran unidad, la agradación y la construcción del piedemonte es realizada tanto por procesos fluviales como eólicos.

Como geoformas, se observan Cerros residuales o Montes isla de basamento, que son elevaciones aisladas que emergen en las zonas intraserrana o periserrana, como también cuevas homoclinales disectadas de cuarcita y mesillas de cuarcita, mesetillas o remanentes de erosión, lomadas con afloramientos de rocas poco resistentes, llanuras, piedemonte, escarpas de erosión rocosas que marginan las mesillas y piedemonte disectado.

#### *b. Sector interserrano*

Ubicado en el sur del área de estudio, abarca la Pampa Interserrana que, junto con la Pampa deprimida, conforman la llanura fluvio-eólica. Corresponde a la zona de transición entre la sierra y las zonas más bajas de la llanura. Se encuentra comprendida entre el cordón de Tandilia y el sistema de Ventania. Constituye una planicie con una amplia y baja divisoria de dirección aproximada este-oeste que se extiende a través de unos 140 km desde la ciudad de Chillar hasta la zona de Abra de Sierra de La Ventana (Fidalgo et al. 1991).

Es una zona de acumulación de sedimentos provenientes de la degradación de la sierra, con predominio de geoformas modeladas por la acción hídrica, caracterizada principalmente por la presencia de ondulaciones de amplia distribución superficial. Su substrato está constituido por los sedimentos pampeanos ya citados sobre los cuales se depositaron sedimentos fluviales más recientes.

En el sector interserrano, se distingue una planicie loésica con duricostra calcárea y una gran densidad de cubetas de deflación inactivas excavadas en sedimentos del pleistoceno inferior, siendo la red de drenaje anárquica.

La planicie loésica corresponde a un delgado manto de limos loésicos, de hasta un metro de espesor, que se apoya sobre la duricostra calcárea y enmascara y tapa la morfología pre-existente.

Las cubetas de deflación son depresiones que en planta tienen formas ovales y ocupan entre una a cinco hectáreas y tienen hasta un metro y medio de profundidad. En el área de estudio aparecen con mayor densidad en las zonas alejadas de la sierra, donde la pendiente del terreno no es superior a 2%. Se habría formado por la erosión eólica localizada cuando los climas eran más secos que en la actualidad y los suelos no se encontraban húmedos (Tricart, 1973). Como consecuencia del mayor grado de humedad las cubetas se inundaron y comenzaron a ser cegadas por sedimentos.

### *c. Sector Nororiental*

En este sector se extiende la Pampa Deprimida (Tricart, 1973) desarrollada como una amplia llanura con escasa pendiente, y sin ondulaciones. Constituye un área tectónicamente deprimida en donde tiene lugar la de acumulación sedimentaria, que coincide con la Cuenca del Salado.

Aquí la red de drenaje fluvial tiene un diseño paralelo y distributivo, con frecuentes inundaciones, siendo estas el proceso más importante de las últimas décadas.

La escasa profundidad de los cauces, los bajos valores de infiltración y los bajos valores de pendientes generan un rápido desborde del agua y provoca inundaciones en forma de manto. Las geoformas modeladas por la acción hídrica más representativas son las terrazas y planicies aluviales y antiguos cauces de arroyos provenientes de las sierras.

En este sector la estratigrafía demuestra que la agradación y la construcción del piedemonte está vinculada a procesos fluviales y eólicos constituyendo geoformas denominadas “derrames” o “bajadas del loess retransportado” (Pereyra, 2018). Aunque en este sector la acción hídrica es más intensa y ha desarrollado cuencas definidas con drenaje exorreico, también presenta otras geoformas modeladas por la acción eólica como lo son las cubetas de deflación. Aquí la Planicie de Duricostra Calcárea se encuentra erosionada por la acción hídrica y, en consecuencia, la densidad de las cubetas es escasa, no presentan gran superficie y están integradas a la red fluvial.

## **2.4 Hidrografía**

La zona de estudio se enmarca en las regiones hídricas correspondientes al “Sistema Río de La Plata y Provincia de Buenos Aires hasta el Río Colorado”. Estas regiones hídricas constituyen cuencas de vertiente atlántica y son consideradas cuencas exorreicas.

La Sierra de Tandil, constituye un área de división de drenaje hacia el noreste, en dirección a la Pampa Deprimida y hacia el sur, donde se encuentra la Pampa Interserrana Bonaerense. Hacia el sur las aguas desembocan en la cuenca del Río Quequén, y hacia el noreste el drenaje se efectúa a través de las cuencas de los arroyos de los Huesos, Chapaleofú, Langueyú, Tandileofú, Las Chilcas y Napaleofú (Figura 6). Poseen disposición subparalela con cierto grado de divergencia a partir del frente serrano hacia el noreste. Sin embargo, existiría marcado control estructural en los rumbos que toman los arroyos.

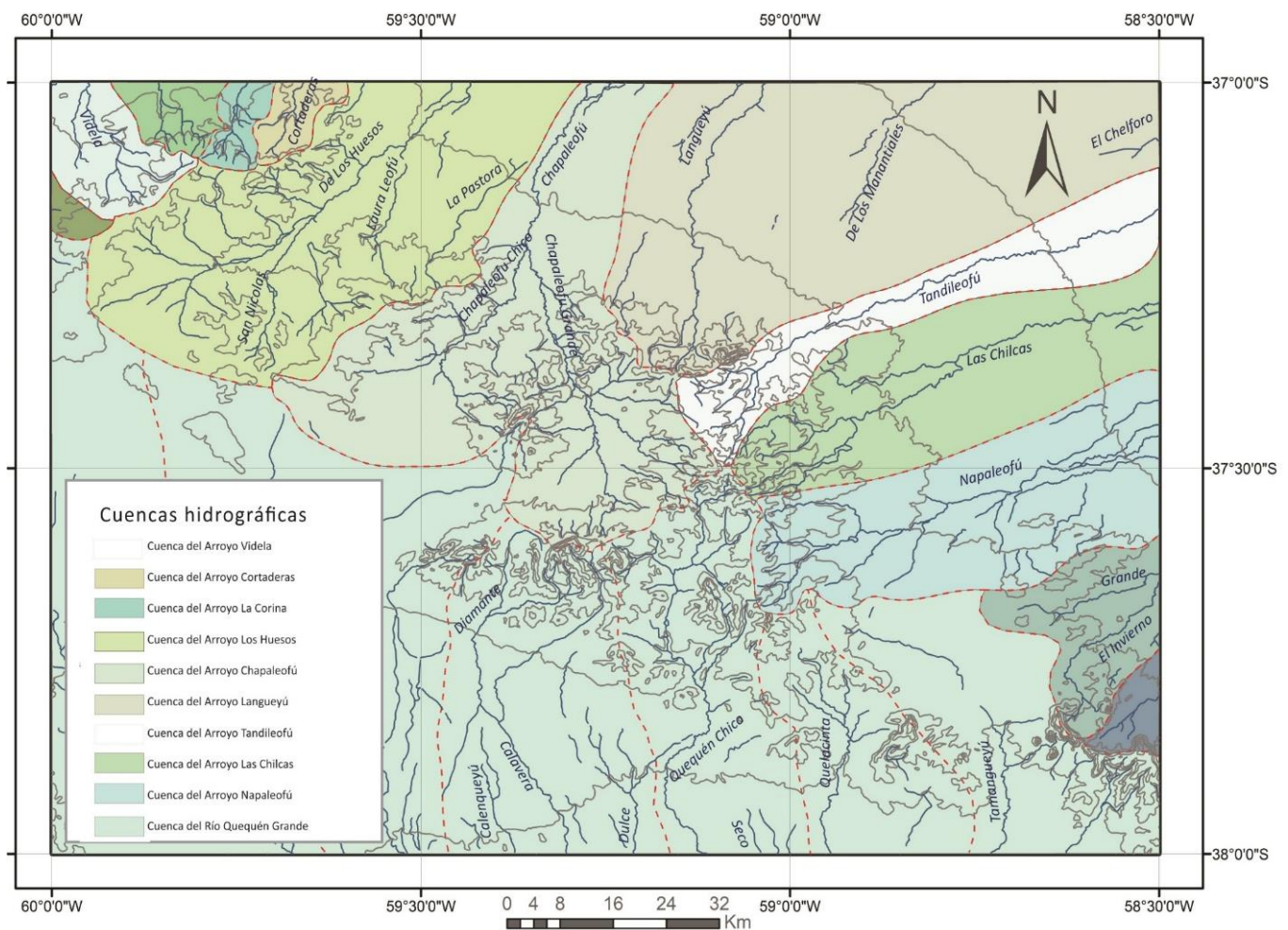


Figura 6.- Mapa de cuencas hidrográficas. (Manassero, 2019)

### 2.4.1 Cuenca del Arroyo Langueyú

Dado que en el ámbito de la Hoja Tandil 3760-IV, la cuenca del Arroyo Langueyú es la única que posee control para regulación de crecidas se procede a la descripción hidrológica e hidrogeológica de la misma ya que sus características fueron de vital importancia para determinar la colocación de las presas, en cuyas áreas de implantación se fundamenta este Trabajo Final de Licenciatura.

A su vez, debido a que la localidad de Tandil se halla emplazada en parte del piedemonte y valle del sistema serrano de la cuenca, y siendo ésta la localidad más grande e importante de la zona, la mayoría de los trabajos antecedentes sobre la hidrología e hidrogeología de la región se han realizado para dicha localidad. Asimismo, la información obtenida resulta igualmente representativa de las características de las cuencas presentes en la Hoja Geológica Tandil 3760-IV.

La cuenca del Arroyo Langueyú posee una superficie aproximada de 600 km<sup>2</sup> (Figura 7). Se extiende desde las nacientes, ubicadas sobre el faldeo N de las Sierras de Tandil, en el partido de Tandil, hasta algunos kilómetros al noreste del límite con el partido de Ayacucho.

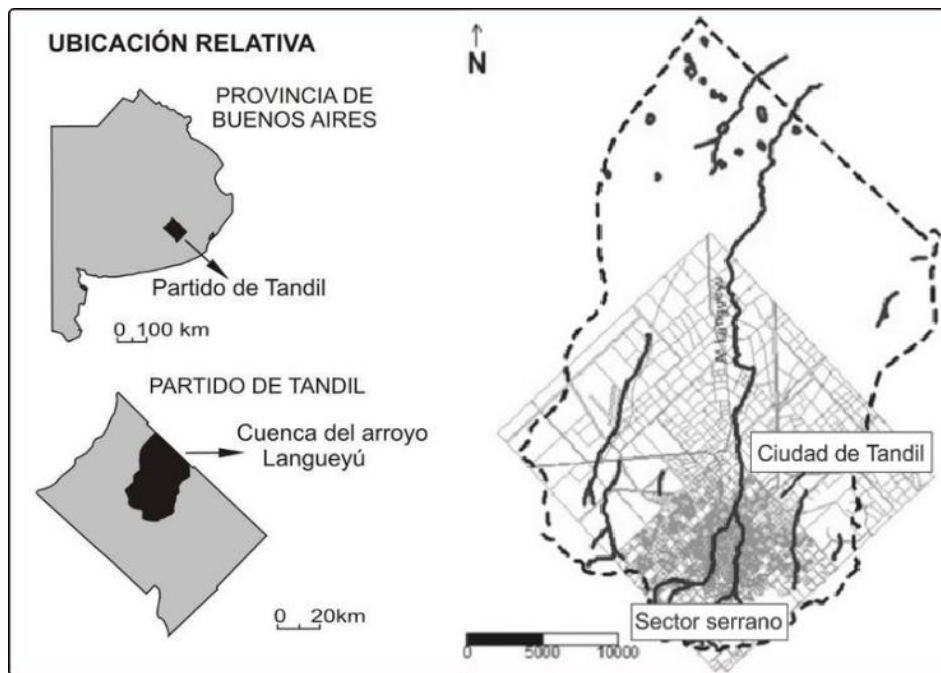


Figura 7.-Ubicación de la Cuenca del Arroyo Languayú. Modificado de Barranquero et al. (2011)

## 2.4.2 Clima

Las características climáticas de la zona de estudio, fueron analizadas por Ruiz de Galarreta, V. A. et al. (2005) a partir de los datos de la Estación Tandil del Servicio Meteorológico Nacional, la que presenta registros continuos utilizándose el período 1900-2000 (Tabla 5).

Según la clasificación agro-climática de Köppen la región presenta un clima templado húmedo con influencia oceánica (Cfb). Se presentan inviernos suaves y veranos cortos y frescos, con elevada humedad en todas las estaciones.

Considerando los balances climáticos de Thornthwaite y Mather (1957), el clima de la ciudad es subhúmedo-húmedo, con una eficiencia térmica mesotermal (C2B'2r), con un déficit de agua poco significativo y veranos frescos.

**BALANCE HIDRICO TANDIL**  
**PERIODO 1900-2000**

Latitud 35° 14' S  
 Longitud 59° 20'  
 Elevación 175 Mts

|             | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ANUAL |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| P (mm)      | 88  | 78  | 99  | 68  | 67  | 49  | 41  | 44  | 61  | 83  | 83  | 79  | 838   |
| ETP         | 124 | 95  | 83  | 51  | 29  | 17  | 18  | 22  | 33  | 55  | 78  | 107 | 712   |
| P-ETP       | -38 | -17 | 16  | 17  | 38  | 32  | 23  | 22  | 28  | 28  | 5   | -28 |       |
| P aa        | -68 | -83 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | -28   |
| Almacenaje  | 98  | 85  | 101 | 118 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 124 |       |
| Dif. Almac. | -28 | -11 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | -26   |
| Déficit     | 10  | 6   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 2   | 18    |
| Excesos     |     |     |     |     | 6   | 32  | 23  | 22  | 28  | 28  | 5   |     | 144   |
| ETR         | 114 | 89  | 83  | 51  | 29  | 17  | 18  | 22  | 33  | 55  | 78  | 105 | 694   |

Tabla 5.- Balance hídrico para el período 1900-2000. Tomado de Ruiz de Galarreta y Banda Noriega (2005).

Utilizando dichos balances para el período 1900-2000 se obtuvo un valor medio anual de precipitación (P) de 838 mm, la evapotranspiración real (ETR) y potencial (ETP) son de 694 y 712 mm, respectivamente, con un déficit poco significativo (18 mm) correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo (Figura 8). Los excesos fueron de 144 mm y se distribuyeron en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre. Existe un predominio de excesos hídricos durante la mayor parte del año excepto en el período estival, en el cual la evapotranspiración representa un 83 % del total precipitado (Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2005). Cabe destacar que las precipitaciones características en Tandil son debidas al frente frío que avanza de SO a NE o del O al E haciendo retroceder al aire cálido, por lo cual éste asciende gracias al efecto de cuña del aire frío. Ante este fenómeno además de precipitaciones suelen producirse tormentas eléctricas.

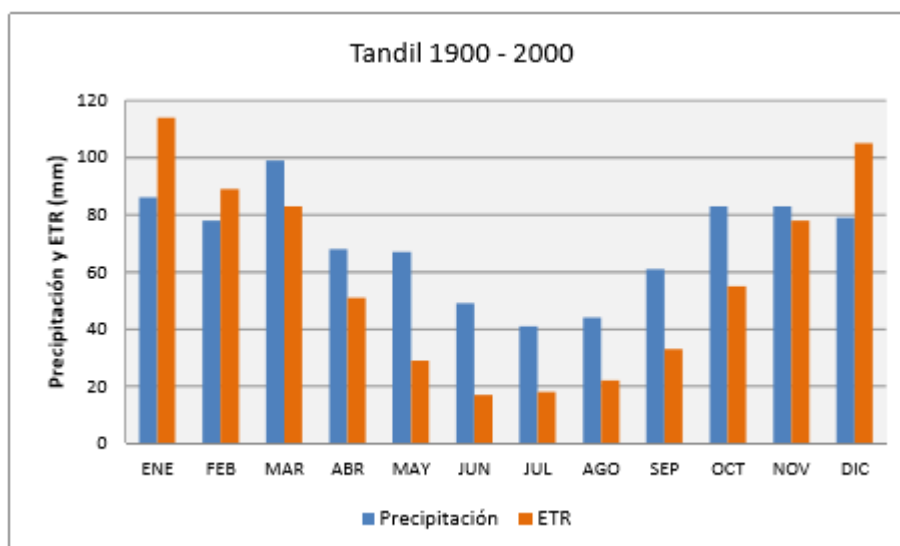


Figura 8.- Precipitación y ETR medias mensuales de la Estación Tandil para el período 1900-2000.

### 2.4.3 Hidrología

La Cuenca del Arroyo Langueyú nace en las sierras de Tandil producto del aporte de pequeñas cuencas intraserranas de arroyos de régimen torrencial, ubicadas inmediatamente al sur de la ciudad de Tandil (Figura 9). Sus principales afluentes son el Arroyo Blanco, cuyo recorrido se extiende de la zona sur y oeste de la ciudad hacia el noroeste de la misma, y el arroyo del Fuerte, que atraviesa el ejido urbano por su sector E hasta cercanías de la Ruta 226, donde confluye con el Arroyo Blanco. Ambos cursos se hallan entubados en su tránsito por la ciudad. Su confluencia al norte de la misma origina el Arroyo Langueyú.



Figura 9.-Esquema del recorrido del arroyo Langueyú y sus tributarios. (Ruiz de Galarreta et al., 2013)

Los cerros que se hallan dentro de los límites de la cuenca presentan en general formas redondeadas y suave, en base a lo cual puede señalarse que el proceso predominante ha sido la erosión de rocas ígneo-metamórficas del basamento granítico. El ámbito serrano de la cuenca carece de las cuarcitas paleozoicas sobrepuestas al basamento, ya que han sido erosionadas o no se han depositado.

En todas las cuencas, los cursos fluviales tienen bien definida la cuenca de aporte en el ambiente serrano donde los cauces están labrados en la roca o en sedimentos loésicos cuaternarios.

Considerando la red de drenaje se pueden diferenciar dos áreas: el área serrana y el área extraserrana nororiental (Giaconi y Ruiz de Galarreta, 1995).

El área serrana, constituye el sector superior de la Vertiente nororiental del Faldeo norte de las sierras de Tandilia, donde las pendientes son altas a medias y presentan una red de drenaje bien definida e integrada, con cursos controlados por la estructura de las sierras, que pueden ser permanentes, efímeros o influentes y las aguas son bicarbonatadas y poco salinas. Es en este sector donde se encuentran las tres obras hídricas de la región, cuyas rocas de fundación han sido caracterizadas y clasificadas.

Se puede considerar que la red fluvial permite la concentración del escurrimiento en el área serrana. El área extraserrana constituye el sector medio e inferior de la vertiente nororiental del Faldeo, se desarrolla en el piedemonte proximal sobre sedimentos limo arenosos, mientras que el tramo distal de la cuenca, se ubica en la llanura, donde los cauces están poco marcados y poseen comportamiento efluente. Aquí el drenaje superficial y fluvial se encuentra poco integrado. Posee menor pendiente que el área anterior, desarrollando zonas de almacenamiento temporario superficial, es decir que no hay capacidad de almacenamiento superficial en reservorios más o menos profundos.

Usualmente en estos sectores las inundaciones son prolongadas y el agua permanece por largos períodos generando grandes superficies anegadas, lagunas, bañados, charcos, etc., donde los procesos dominantes son la evapotranspiración, infiltración y almacenamiento superficial temporario. (Kruse y Laurencena, 2005). Esto se debe al exceso de lluvia en el lugar, sumado al agua recibida de las partes más elevadas. Aquí se desarrollan los denominados "derrames aluviales" que son tramos donde no se observan cauce bien definido y las crecientes inundan grandes áreas en forma de manto.

## **2.5 Hidrogeología**

### **2.5.1 Marco general**

El área de estudio se encuentra en la región hidrogeológica “Llanura Chaco Pampeana Húmeda” (Auge, 2004) (Figura 10). En esta región predominan los excedentes hídricos, debido a que la precipitación supera a la evapotranspiración. El comportamiento hidrológico se caracteriza por presentar una red hidrográfica restringida y cuencas difusas, con bordes poco marcados producto de la escasa pendiente topográfica. La mayoría de los ríos, lagunas y bañados, son efluentes, es decir constituyen ámbitos de descarga para el agua subterránea. Los sitios de recarga preferencial coinciden con las partes altas (lomas o divisorias), donde en general el agua es de mejor calidad, aumentando su contenido salino en el sentido del flujo.

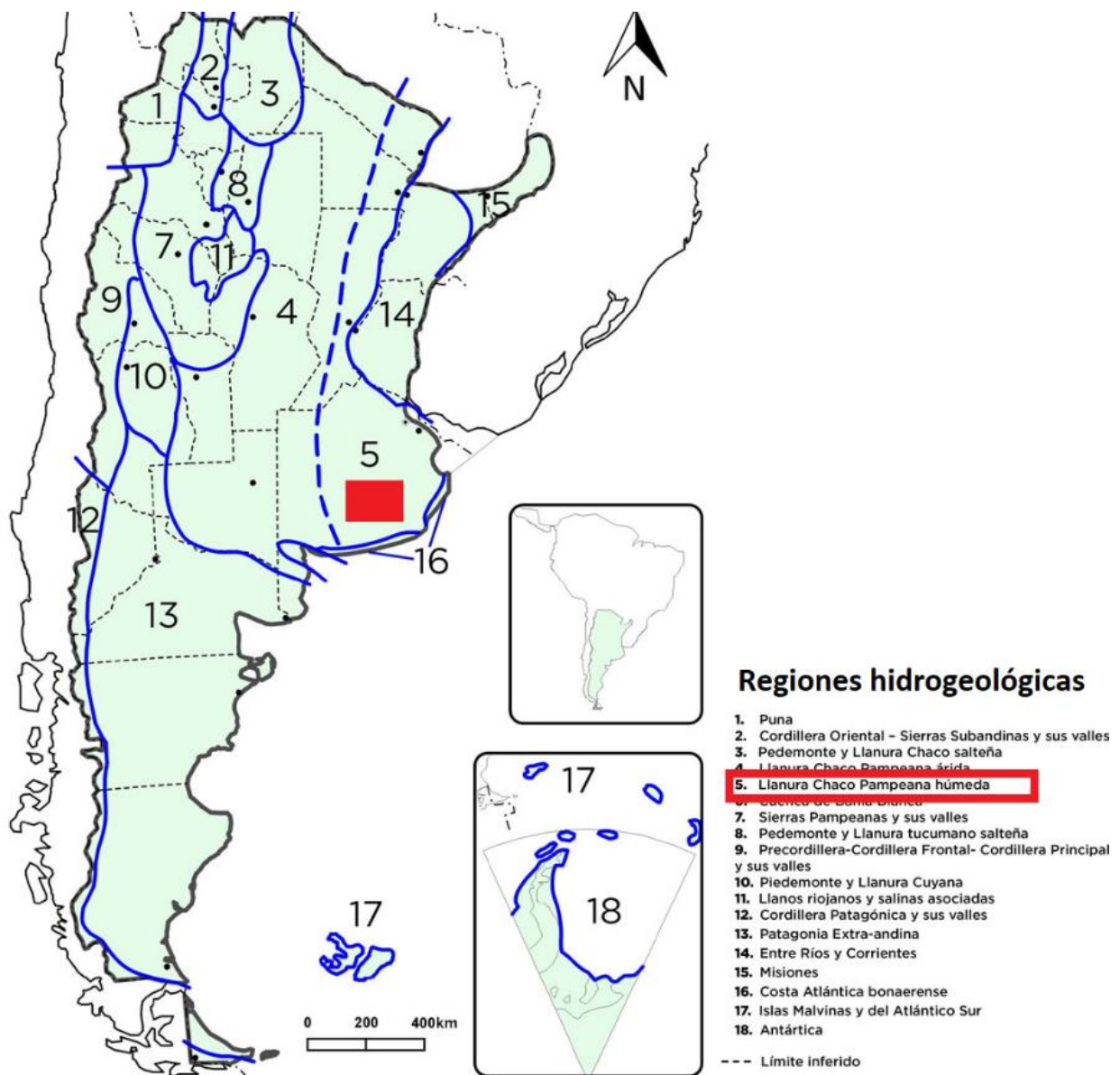


Figura 10.- Regiones hidrogeológicas de Argentina (Auge, 2004)

Hernández et al. (1975) incluyen esta región en el “Ambiente Hidrogeológico Central” de la provincia de Buenos Aires.

Busso y Amato (2011) definen posibles rasgos geológicos-hidrogeológicos más significativos y característicos del área: en primer lugar, el control hidrolítico que ejerce el basamento cristalino y su profundidad que puede variar en cortas distancias, incluso en decenas de metros. La ausencia en subsuelo, de sedimentos marinos de edad miocena, asimilables a la Formación Paraná o anteriores como parte de la cubierta sedimentaria moderna, tan extendidos por todo el resto de la Región Pampeana argentina. La posibilidad de captar agua no solo de la cubierta clástica moderna sino también de la sección superior meteorizada o fisurada del basamento cristalino, muy profundo en las

áreas de llanura. La existencia en el área alta y media de estas serranías de pequeños manantiales de aguas subterráneas.

## 2.5.2 Hidrolitología

### *a. Hidrolitología Regional*

En la provincia de Buenos Aires puede decirse que la hidrogeología regional es bastante uniforme, en la que se han identificado tres unidades hidrogeológicas (Sala, 1975), éstas son:

-Sección Hipoparaniana: Está formada por una sucesión sedimentaria de origen continental. se desarrollaría en la cuenca sedimentaria del Salado (Zambrano, 1974) alcanzando un espesor de más de +600 m. por lo cual estaría presente en el subsuelo pero no en el sector serrano. Se ha deducido hasta el momento que posee una recarga alóctona directa desde el ambiente serrano y periserrano y, en algunos casos puntuales, su recarga sería por aporte vertical. Su comportamiento predominante es de acuitado, aunque existen sectores que pueden clasificarse como acuíferos e incluso acuícludos.

-Sección Paranaiana: corresponde al paquete sedimentario resultante de la ingesión marina homónima (Frenguelli, 1950) no ha sido identificada en el área serrana ni en el área interserrana central, posee un mecanismo de recarga-descarga coincidente. En esta sección predominan los sedimentos acuícludos, en parte acuitados, con intercalaciones acuíferas.

-Sección Epiparaniana: esta unidad se halla extendida en todo el ámbito provincial, excepto donde se produce el afloramiento del basamento impermeable. Componen esta sección, tanto los sedimentos pampeanos y postpampeanos como la Formación Puelche. La sección se caracteriza por ser el vehículo de recarga o descarga de los acuíferos profundos, recibiendo su propia recarga en forma areal por filtración vertical.

Las tres secciones descriptas se sitúan sobre el Basamento Hidrogeológico, límite inferior y, en ocasiones, también lateral. se encuentra formado por distintas rocas acuífugas, de edades precámbricas y paleozoicas, que en todos los casos poseen sólo porosidad secundaria. La misma puede ser por diaclasamiento, por superficies de estratificación o menos frecuentemente por esquistosidad. Aflora en el Cordón Serrano, constituyendo los afloramientos de macizos rocosos que son el objeto de estudio, y se va profundizando hasta alcanzar, en las cercanías de General Guido, una profundidad aproximada de 900 metros.

### *b. Hidrolitología de la Cuenca del Arroyo Langueyú*

En la cuenca se distinguen dos unidades hidrogeológicas que se comportan de manera diferente, por su constitución, textura y estructura, en cuanto a la admisión y circulación del agua subterránea (Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2005). Estas unidades son el Basamento Cristalino y los Sedimentos Cenozoicos, que se corresponden con los ambientes hidrolitológicos fisurado y poroso clástico, respectivamente.

En concordancia, Giaconi (2008) describe que el marco hidrogeológico está constituido por un medio poroso clástico superior de escaso espesor, altamente permeable (sedimentos fluviales gruesos del Postpampeano en cabeceras) a medianamente permeable (sedimentos finos con presencia de “tosca” del Pampeano y sedimentos fluviales finos del Postpampeano) al cual subyace un medio rocoso fisurado (Basamento Cristalino) que se comporta como hidroapoyo o basamento hidrogeológico del sistema. El basamento Cristalino está conformado por rocas acuífugas. Tienen la propiedad hidráulica de no poseer permeabilidad primaria. La permeabilidad secundaria, por fracturación, está restringida preferentemente a los niveles superiores liberados de la presión litostática.

El basamento está compuesto por rocas precámbricas ígneas plutónicas con diferentes grados de metamorfismo, rocas primariamente acuífugas, que presentan distintos grados de fracturación que determinan un ambiente fisurado, con porosidad y permeabilidad secundarias, por lo que este sector del acuífero resulta de bajo rendimiento. El cuerpo aflorante en las sierras, constituye el basamento en profundidad del sistema acuífero poroso clástico suprayacente al alejarse de la zona serrana. El ambiente fisurado en este basamento cristalino, presenta una porosidad y permeabilidad secundarias, con respecto al agua subterránea, dada por una importante fisuración por fallas y diaclasas. Esto le confiere una alta vulnerabilidad al recurso frente a las cargas contaminantes, debido a la elevada velocidad de circulación fisural.

Específicamente en el ámbito de la cuenca, la cubierta sedimentaria cenozoica se encuentra en su mayor parte constituida por sedimentos Pampeanos y, en menor medida, por sedimentos Postpampeanos. Estos últimos son de origen loésico y, sobrepuestos a la unidad geológica anterior se corresponden con un medio poroso clástico, constituyendo el acuífero freático multiunitario, que es, dado su alto rendimiento, donde se ubica la batería de pozos de explotación utilizada por Obras Sanitarias de Tandil (OST) para el abastecimiento de agua potable a la ciudad. Estos Sedimentos se caracterizan, en el área de estudio, por la escasa presencia de materiales arcillosos, excepto en los horizontes superiores del suelo. Predominan, en cambio, los materiales gruesos, arenosos y

limoarenosos. Se observan además, de manera discontinua, estratos limosos con altos contenidos de carbonatos de calcio. Su permeabilidad es primaria y el flujo natural es de forma laminar.

### **2.5.3 Hidrodinámica**

A nivel regional, el movimiento del agua posee un sentido general de circulación SO-NE, coincidente con las características morfológicas superficiales, pero con un menor gradiente. La recarga del acuífero es regionalmente autóctona por precipitaciones, ubicándose las zonas preferenciales en el sector de serranías (Ruiz de Galarreta et al. 2007). Las aguas subterráneas en general, poseen carácter influente respecto a las aguas superficiales, descargando las primeras en los arroyos de régimen perenne. Sin embargo, existen algunas anomalías locales respecto a este comportamiento regional. En algunos sectores las aguas superficiales pueden aportar a los acuíferos, cambiando así la relación influente-efluente, siendo incluso a veces la misma indiferente por los cambios de las condiciones hidráulicas y/o geológicas-estructurales a lo largo del recorrido.

## **2.6 Unidades geológico-geotécnicas**

Partiendo de información obtenida de la Carta de Línea de Base Ambiental 3760-IV Tandil, donde se realizó un análisis cualitativo de las permeabilidades del sustrato geológico y de sus características geotécnicas básicas, se agruparon las unidades geológicas según criterios geotécnicos y litológicos (Figura 11). En base a este criterio se definieron tres grandes unidades geológico-geotécnicas:

- 1) Sedimentos limosos y limo –arenosos cuaternarios.
- 2) Sedimentitas paleozoicas.
- 3) Rocas metamórficas y plutónicas de edades precámbricas.

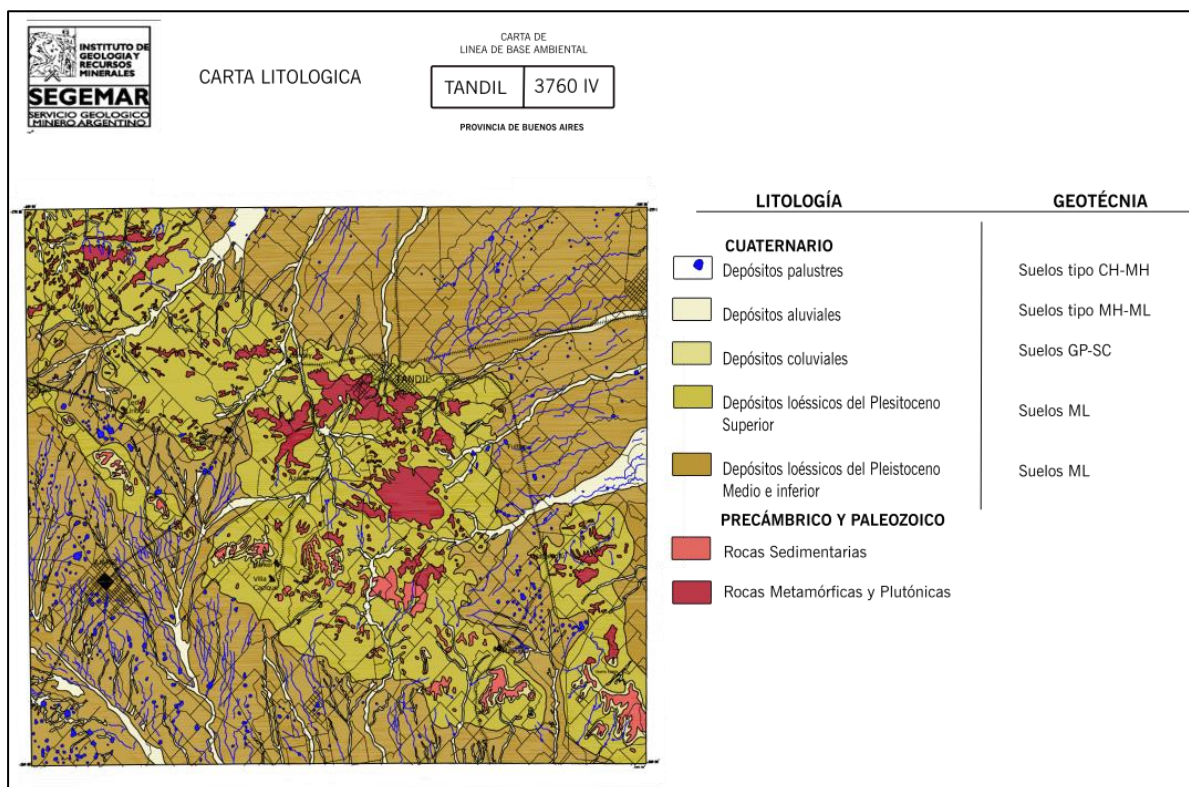


Figura 11.- Carta litológica de la zona de estudio. Modificado de Tchilingurian et al., 2004.

### 2.6.1 Sedimentos cuaternarios

Dentro de este grupo se diferencian los sedimentos loéssicos del pleistoceno inferior y medio, los sedimentos loéssicos del pleistoceno superior, sedimentos aluviales, sedimentos coluviales y el solum.

Los primeros tienen texturas limo-arenosas, con estructuras masivas, algo duros y rompen en húmedo. Geotécnicamente se clasifican como suelos del grupo ML y SC (limos de baja plasticidad y arenas arcillosas, respectivamente). Los valores de penetración STP y la permeabilidad tienen valores variables de acuerdo a la presencia o ausencia de las duricostras calcáreas. Donde estas están presentes, se hallan de forma mantiforme o lenticular y en espesores de dos metros, siendo en general, las capacidades portantes muy buenas debido a que están cementados por sales y carbonatos.

Los sedimentos loéssicos del pleistoceno superior tienen texturas limo-arenosas finas. Son más friables en seco y en húmedo se disgregan fácilmente. Son poco plásticos y se clasifican como suelos del grupo ML (limos de baja plasticidad). Las capacidades portantes no son buenas en seco y en húmedo son algo plásticos y pueden originar problemas de adhesión. Tienen buena permeabilidad. Los sedimentos aluviales recientes se disponen en los arroyos ubicados en proximidad a las sierras, tienen texturas arenosas medias a finas y mezcladas con un gran porcentaje de limos provenientes de

la erosión del loess. En los sectores más alejados de las sierras, las texturas dominantes son limos y arcillas y dominan los grupos ML y MH (limos de baja y alta plasticidad). Generalmente, no están cementados por el carbonato de calcio, sino algo más cementados por sales o poseen pequeñas concreciones de carbonato, nunca alcanzando el mismo nivel de dureza que los depósitos loésicos.

Los sedimentos coluviales se ubican en las laderas de las sierras. Poseen una composición arenosa con variables porcentajes de limo de entre diez y cuarenta mezclado con gravas y bloques irregulares de cuarcitas y granitos. A escala del mapeo, estos sedimentos no han sido diferenciados. Se clasifican como sedimentos tipo SC y ML según el porcentaje de material fino (arena arcillosa y limos de baja plasticidad).

Por último, el solum comprende a los horizontes orgánico-minerales que se desarrollan en los sedimentos previamente descriptos. Este tiene entre 0,5 a 1,5 m de profundidad y está constituido por el horizonte A y B del suelo. Ambos no son aptos para fundaciones y trazado de caminos.

### **2.6.2 Sedimentitas paleozoicas**

Las sedimentitas paleozoicas agrupadas en la Formación Cerro Negro y el Grupo Sierras Bayas, se apoyan sobre el basamento y afloran al sur de la zona de estudio. Comprenden un conjunto de litologías compuestas por estratos bien definidos, siendo predominantes las ortocuarcitas en la columna estratigráfica y en superficie, dado que poseen una elevada resistencia a la erosión. Las ortocuarcitas son rocas que presentan diaclasas verticales determinando que el macizo se encuentre fracturado en bloques regulares. Se presentan con espesores de sesenta a ochenta metros, en estratos delgados, que buzan entre 1° a 5° al suroeste.

### **2.6.3 Rocas metamórficas y plutónicas**

Según la información extraída de la Línea de Base Ambiental, estas rocas geotécnicamente constituyen macizos fracturados, con una red de diaclasas espaciadas entre 0,5 a 2 m que dan lugar a bloques y prismas rocosos. Las diaclasas son subverticales y subhorizontales cerca de la superficie y por debajo del contacto con las sedimentitas paleozoicas, se observa que las rocas están alteradas, con espesores que varían de dos a diez metros según el lugar de observación. Este regolito o zona de meteorización determina que los taludes de corte sean algo más inestables cuando estas rocas alteradas afloran. Los regolitos no son aptos para la fundación de obras de envergadura y pero sí pueden ser usados como material de préstamo (“gransa”) para la construcción de caminos.

Esta última unidad conforma el objeto de estudio del presente Trabajo Final de Licenciatura. A continuación, se procede a la descripción de las características geotécnicas detectadas en los afloramientos existentes en el campo, en las inmediaciones a las obras hídricas de la región.

### **3. Parametrización de los macizos rocosos**

Como se mencionó previamente, las presas hidráulicas existentes en la Hoja Tandil 3760-IV se ubican en su totalidad en la cuenca del Arroyo Langueyú. Este está integrado por dos arroyos mayores (del Fuerte y Blanco) que se hallan entubados en su tránsito por la localidad de Tandil.

El Arroyo del Fuerte en el área en que se encuentra entubado, presenta un desagüe pluvial afluyente también entubado denominado Ramal H. Ambos arroyos poseen obras hidráulicas para regulación de laminación de crecidas para evitar la inundación de los barrios adyacentes aguas abajo de las presas.

A su vez en el Arroyo Blanco se da la existencia de un proyecto ingenieril para posibilitar a construcción de una presa con el mismo fin que las anteriores.

De acuerdo a las observaciones realizadas, y tal como puede verse en las figuras, el conocimiento geológico se encuentra enmascarado por la existencia de suelos vegetales en toda el área de implantación de las obras, lo que dificulta en algunos casos y dado el nivel de prefactibilidad establecido, el conocimiento intensivo.

A continuación, se procede a la descripción de la metodología empleada en el trabajo de campo para definir la disposición, grado de alteración y estructura de las rocas enunciadas en el estudio de los macizos rocosos.

#### **3.1 Metodología**

A continuación, se expone la metodología que ha sido empleada en el trabajo de campo, para definir las características de los macizos rocosos. Dichas características, han sido utilizadas para establecer los parámetros necesarios en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas.

### 3.1.1 Meteorización

Se denomina meteorización de las rocas a las modificaciones experimentadas en su composición o estructura como consecuencia de la acción de agentes atmosféricos, con participación de agentes biológicos.

Es un proceso estático por el cual la desintegración, de origen físico, afecta a la parte más superficial de los macizos rocosos y favorece a la penetración del agua que puede dar lugar a la descomposición de los mismos en el interior, generando que las rocas se rompan en pequeños fragmentos, se disuelvan y se descompongan. Debido a esto se formen nuevos minerales, posibilitando la remoción y el transporte de detrito, es decir, la erosión.

La importancia que tiene la meteorización desde el punto de vista de geomecánico se debe a que esta altera las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos. Esta alteración se manifiesta con profundos cambios físicos (descarga mecánica, carga mecánica y térmica, absorción y pérdida de agua, cristalización de sales, etc.) y químicos (disolución, oxidación, reducción, hidratación, hidrólisis, intercambio de cationes, lixiviación, carbonatación, etc.) de los minerales que constituyen las rocas del basamento.

En general la meteorización no llega a gran profundidad, pero una vez realizada la excavación de la roca entra en contacto con la atmósfera, por lo que puede sufrir una meteorización.

La IAEG (International Association of Engineering Geology) ha estandarizado desde el punto de vista geológico ingenieril los distintos tenores de la alteración clasificándolos de acuerdo a su intensidad en 6 grados desde A1 (rocas prácticamente inalteradas) a A6 (suelos residuales) (Dearman W, Sergeev E. y Shibakova V, 1989). Dicha clasificación fue aplicada en el estudio de los macizos rocosos respecto al alcance de la alteración-meteorización.

| CLASIFICACIÓN<br>ALTERACIÓN DE ROCAS | INTERNACIONAL<br>ASSOCIATION OF<br>ENGINEERING GEOLOGY                                                                                                                                   | Publicado en Engineering<br>Geology of Earth, Dearman<br>W., Sergeev E. y Shibakova<br>V.. Moscú. 1989 |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TÉRMINO                              | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                              | GRADO                                                                                                  |
| Fresca                               | No hay signos visibles de alteración. Quizás una débil decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores.                                                                  | A1                                                                                                     |
| Débilmente Alterada                  | El material puede encontrarse decolorado por alteración ya sea en su masa como en las discontinuidades.                                                                                  | A2                                                                                                     |
| Moderadamente Alterada               | Menos de la mitad de la masa rocosa esta descompuesta o alterada como un suelo.                                                                                                          | A3                                                                                                     |
| Muy Alterada                         | Mas de la mitad de la masa rocosa esta descompuesta o alterada como un suelo.                                                                                                            | A4                                                                                                     |
| Completamente Alterada               | Toda la masa rocosa esta descompuesta o desintegrada como un suelo. La estructura de la masa rocosa esta básicamente conservada.                                                         | A5                                                                                                     |
| Suelo Residual                       | Toda la masa rocosa se ha convertido en suelo. Se ha destruido su textura y estructura. Se manifiesta un importante cambio de volumen, pero el suelo resultante no ha sufrido transporte | A6                                                                                                     |

*Tabla 6.- Clases de meteorización.*

### 3.1.2 Resistencia de las rocas

El análisis de resistencia a la compresión de la matriz rocosa en campo se obtuvo estimando la resistencia a partir de la dureza superficial de las rocas. Para ello se empleó el método del martillo geológico, que consiste en golpear una sección de matriz rocosa y evaluar su comportamiento frente al impacto, según la información obtenida con este análisis se puede aproximar un rango de resistencia a la compresión en MPa según la Tabla 7. Dichas determinaciones han sido homologadas por International Society of Mechanics Rocks en 1981, siendo de uso común en las determinaciones de tipo expeditivo como las realizadas en la etapa de prefactibilidad.

De todos modos, la parametrización realizada con este método fue posteriormente corroborada con información extraída del informe geológico-geotécnico para el proyecto de Presa Ramal H (Giacconi, 2009).

| CLASIFICACION                  | IDENTIFICACION                                                                                                                               | RANGO APROX. DE RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAXIAL (Mpa) |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Roca extremadamente débil      | El espécimen es indentado por la uña del dedo pulgar                                                                                         | 0.25 - 1.00                                                |
| Roca muy débil                 | Se desmorona con golpes firmes, con la punta del martillo de geólogo- Puede ser descascarillado con un cuchillo de bolsillo                  | 1.0 - 5.0                                                  |
| Roca débil                     | Se descascarilla con dificultad, con un cuchillo de bolsillo; indentado poco profundo con golpes firmes con la punta del martillo de geólogo | 5.0 - 25.0                                                 |
| Roca moderadamente resistente  | No se puede raspar o descascarillar con un cuchillo de bolsillo. El espécimen puede ser fracturado con un solo golpe firme de martillo.      | 25.0 - 50.0                                                |
| Roca resistente                | El espécimen requiere más de un golpe de martillo par ser fracturado.                                                                        | 50.0 - 100.0                                               |
| Roca muy resistente            | El espécimen es fracturado con muchos golpes de martillo                                                                                     | 100.0 - 250.00                                             |
| Roca extremadamente resistente | El martillo produce solamente el descascarillado de la muestra. Sonido metálico al golpe                                                     | > 250.0                                                    |

Tabla 7.- Clasificación de las rocas según el rango de resistencia a la compresión basado en el método del martillo geológico (ISRM, 1981).

### 3.1.3 Estructura del macizo rocoso

Se realizaron observaciones y descripciones megascópicas de las rocas que componen los afloramientos vistos en el campo y se definió, corroborando los antecedentes geológicos regionales, la estructura de los sitios dominada por la existencia de discontinuidades de origen tectónico, principalmente diaclasas y planos y zonas de cizalla.

### 3.1.4 Características geomecánicas de las discontinuidades

A fin de determinar la orientación, espaciado, continuidad (dimensión), rugosidad, grado de apertura, presencia o no de relleno y de agua en las discontinuidades, se realizaron mediciones con brújula geológica, cinta métrica, observaciones y descripciones de las mismas.

Se definió además la existencia de familias o sets de discontinuidades y tamaño de los bloques componentes de los afloramientos de macizo rocoso, teniendo en cuenta las discontinuidades mayores dentro de estos.

Respecto al grado de fracturación, para la determinación del RQD, se utilizó una medida de espaciado de las discontinuidades, aplicando en campo el método de  $J_v$  (discontinuidades volumétricas) que consiste en calcular la cantidad de discontinuidades presentes por metro cúbico de cada una de las

familias existentes, contabilizando a distancias apropiadas en una dirección aproximadamente perpendicular al rumbo del conjunto de discontinuidades.

$$J_v = \sum \frac{n^\circ \text{ de discontinuidades}}{\text{Longitud medida}}$$

Se aplico la correlación empírica definida por Palmstrom (1975) entre  $J_v$  y RQD, tomada del libro “Ingeniería Geológica” (González de Vallejo et al., 2003):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad \text{Para } J_v > 4,5$$

$$RQD = 100 \quad \text{Para } J_v \leq 4,5$$

## 3.2 Características detectadas

### 3.2.1 Presa Arroyo Ramal H

El propósito de esta presa reguladora es contener las crecientes torrenciales que, en ocasiones, suelen provocar anegamientos en el barrio Falucho ubicado aguas abajo en el contenido valle. Por sus características hidráulicas, dicha presa no posee embalse permanente. En la Figura 12 se puede visualizar la ubicación de la presa al SE de la localidad de Tandil, y en el sector del eje de presa, de rumbo  $N40^\circ E$ , donde se observan en color rojo los afloramientos de macizo rocoso a ambos márgenes de la presa. A su vez puede identificarse, dado que se visualiza una “faja” correspondiente a una mayor densidad de vegetación en dirección sureste-noroeste, el curso actual del arroyo ramal H cuyo sentido de escurrimiento es de derecha a izquierda en la fotografía. El azimut general del arroyo en el área específica es  $N300$ .



Figura 12.- ubicación de la presa Ramal H. en rojo se señalan los afloramientos de macizo rocoso aflorantes en cada margen.

Las características litológicas de las rocas del Basamento Cristalino Precámbrico en el sitio, se conocen gracias a las determinaciones realizadas por Giaconi (2009) megascópicamente en el campo y luego con análisis de laboratorio. De acuerdo a dicha información, macroscópicamente, las rocas dominantes en el área de fundación son granitoides, gneises gris verdosos de composición tonalítica que han sido intruidos por rocas de origen pegmatítico de grano muy fino, de color rosado. La presencia de estas últimas se detecta mayormente en la margen derecha, mientras que en la margen izquierda se encuentran mayormente las rocas gnéisicas.

Las rocas se encuentran meteorizadas producto de la exposición del Basamento a la intemperización. En las inmediaciones de la presa Ramal H, se observaron diferencias en la respuesta del macizo rocoso a la meteorización-alteración, que se deberían a diferencias en las características propias de cada roca como también a los procesos actuantes en el pasado geológico.



*Figura 13.-Vista general del estribo derecho de la presa. Se observan dos afloramientos de material rocoso ubicadas aguas arriba de la presa, en margen derecha. Nótese la carencia de embalse permanente en dicha presa de control de crecidas extraordinarias.*

Se identificaron afloramientos en ambos márgenes de rocas graníticas, poco diaclasadas y escasamente alteradas. Las rocas presentan un leve grado de decoloración en superficie y en los planos de las discontinuidades, principalmente en la margen derecha (Figura 14), mientras que en los afloramientos de la margen izquierda se reconoce un macizo rocoso con rasgos de meteorización catafilar, típica en rocas de esta composición, acompañado por patinas de líquenes.



*Figura 14.- Afloramiento identificado en el estribo derecho de la presa Ramal H. Se observa decoloración en la superficie de los bloques y de las discontinuidades, con presencia de lajosidad.*

También se identificó un rasgo vinculado a la incidencia de la meteorización/alteración y erosión sobre el macizo, existiendo en toda el área un bandeamiento o "franjitas" verticales a subverticales (Figura 15) altamente meteorizadas y erosionadas, de escaso espesor, en contacto con roca con menor grado de alteración y erosión. Ello se debería al contacto de fajas con un alto grado de fracturación o cizallamiento con otras adyacentes de menor magnitud alternadas.



*Figura 15.- Detalle de meteorización diferencial en el margen derecho de la presa Ramal H. Se observan bloques de material rocoso levemente alterados, limitados por discontinuidades subverticales y entre estos, un bloque altamente cizallado, meteorizado y en gran parte erosionado. Tomado de Giaconi (2009).*

En este sentido, sobre la margen derecha, se distinguieron en un afloramiento dos bloques de matriz rocosa entre los cuales se identificó una abertura (Figura 16), que se debería a la existencia del macizo

bandeado donde el bloque faltante entre ambos, habría sido completamente meteorizado/alterado y erosionado. El rumbo de esta apertura es N275°.



*Figura 16.- Abertura producto de la erosión de rocas adyacentes cizalladas entre bloques de matriz rocosa, de rumbo N275 sobre la margen derecha de la presa Ramal H. Lo aquí referido responde al mismo esquema de la Figura 15.*

En las rocas gneisicas tonalíticas, se observa que las matrices rocosas entre fisuras presentan superficialmente diversos grados de meteorización. En las zonas más fracturadas y cizalladas la alteración es de mayor intensidad en estas rocas que en las de composición pegmatítica.

Lo anterior es visible en ambas márgenes y alcanza mayor intensidad en el área del arroyo. Un ejemplo de ello es la zona ubicada entre los afloramientos de la margen derecha (Figura 17), donde

se halla una roca con alto grado de microfracturación y alteración, totalmente disgregada y parcialmente cubierta por el desarrollo de suelo vegetal, que presenta a su vez un bloque de material rocoso relictual.



*Figura 17.- Acercamiento de el margen derecho de la presa. A la izquierda se observa el afloramiento próximo al eje de la presa, de dimensiones menores y a la derecha parte del afloramiento caracterizado; entre ambos se visualiza una zona de cizalla, meteorizada y cubierta por el suelo vegetal actual.*

Este segmento de aproximadamente 45 m se correspondería con una de las zonas de cizallamiento y meteorización intensa. En estas zonas, el macizo rocoso de composición tonalítica aún conserva la estructura de la roca y exhibe un alto grado de alteración tipo A4 (muy alterada) o superior, siendo frecuentemente atravesado por filones de cuarzo pegmatítico de espesor decimétrico, que han sufrido una menor alteración, tal como se observa en la Figura 18.



*Figura 18.- Detalle del macizo rocoso con grado de meteorización-alteración A4, en el margen derecho de la presa Ramal H. Se observan pequeñas venas de cuarzo con menor grado de meteorización.*

Por último, a partir de información extraída de los sondeos realizados para el análisis geotécnico de la fundación (Giaconi, 2009), se conoce que en los sectores no afectados por cizallamiento la alteración disminuye en profundidad más rápidamente. Así, en los testigos (Figura 19) se han descrito mayormente rocas no alteradas o poco alteradas (A1-A2) subyaciendo a las rocas con mayor grado de alteración (A3, A3–A4) dispuestas más superficialmente.



*Figura 19.- Testigo de gneiss tonalítico con grado de alteración A1-A2, en sondeo de la margen derecha del eje de la presa Ramal H. Sondeo S2, tomado de Giaconi, 2009.*

Respecto a la resistencia de la matriz, frente al golpe de martillo geológico, las rocas levemente meteorizadas presentan un sonido metálico, de poco rebote y no se fracturan fácilmente, mientras que las bandas o franjas de rocas con alto grado de meteorización-alteración al golpe del martillo presentan un sonido opaco, sin generar rebote y no se oponen, sino que se fracturan al menor impacto.

El cuadro estructural reconoce cuatro familias de discontinuidades a nivel superficial. Las mediciones realizadas evidencian, tal como muestra la Figura 20, una predominancia de fracturas con rumbos Noroeste-Sureste cuyas inclinaciones son en su mayoría verticales a subverticales, u oblicuas (30° y a 45°) en menor proporción, al Suroeste y Noreste respectivamente. Secundariamente se hallan fracturas de rumbo Este – Oeste, con inclinaciones subverticales y oblicuas configurando la expresión de la estructura del Basamento en este sector.

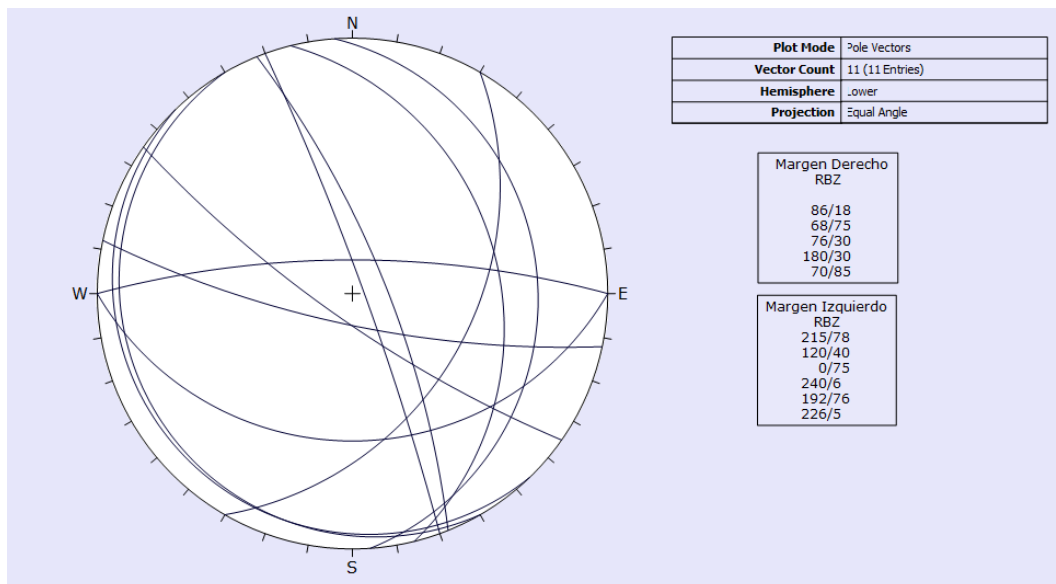


Figura 20.- Diagrama estereográfico de las mediciones tomadas en las estructuras de los afloramientos sitios en la Presa Ramal H.

Como exhibe el gráfico, al complejo estructural descrito se le adhiere la existencia superficial de un cuarto sistema de diaclasas subhorizontales que corta a las tres familias anteriores. Este juego varía entre los 3 y los 18 grados de inclinación, con rumbos Noreste-Suroeste ( $N30^{\circ}E$ ) o rumbos Noroeste-Sureste ( $N30^{\circ}O$ ). Este diaclasamiento subhorizontal es importante e intenso en los niveles superficiales disminuyendo su frecuencia en profundidad.

Respecto al grado de fracturamiento, el cuadro estructural definido es el responsable de la existencia de un R.Q.D. de valores bajos a muy bajos a nivel superficial. La información antecedente indica que este mantiene valores bajos subsuperficialmente y una vez atravesado el espesor de rocas meteorizadas aumenta su valor en profundidad, donde en las rocas con menor grado de alteración (A1 y A1-A2), se han medido valores mayores al 75 %, llegando a valores de R.Q.D. 100 %.

En la misma línea, con los rumbos mencionados, se identificaron 6 sistemas o familias de diaclasas en la margen izquierda, cinco de ellos de inclinación subvertical y un juego con inclinación subhorizontal. El espaciado entre las discontinuidades se definió para cada familia, aplicando de índice  $J_v$  (Palmstrom, 1975) (Tabla 8).

| Sistema | Cantidad de discontinuidades | Longitud total m | Jv   |
|---------|------------------------------|------------------|------|
| 1       | 7                            | 6                | 1,16 |
| 2       | 8                            | 6                | 1,33 |
| 3       | 6                            | 6                | 1    |
| 4       | 3                            | 6                | 0,5  |
| 5       | 4                            | 6                | 0,66 |
| 6       | 2                            | 6                | 0,33 |

Tabla 8.- Sistemas de diaclasas definidos en la margen izquierda de la presa Ramal H.

Con el mismo método, se reconocieron 2 familias de diaclasas de inclinación subvertical y 1 subhorizontal en los afloramientos de la margen derecha de la presa:

| Sistemas        | Cantidad de diaclasas | Longitud total | Jv   |
|-----------------|-----------------------|----------------|------|
| 1-subvertical   | 2                     | 3m             | 0,66 |
| 2-subvertical   | 1                     | 1,60m          | 0,62 |
| 3-subhorizontal | 2                     | 3.2m           | 0,62 |

Tabla 9.- Sistemas de diaclasas de la margen derecha de la presa Ramal H.

De este modo, no se observan fragmentos menores a 10 cm en los afloramientos analizados. En la margen derecha, los bloques de macizo rocoso aflorantes son todos mayores a 2 metros, presentando uno de los bloques analizados 3,18 x 1,60 metros.

En la margen izquierda los bloques de matriz rocosa son proporcionalmente menores, pero superan los 60 cm<sup>2</sup>, distinguiendo en el afloramiento observado de 6.12 m de longitud 10 bloques de matriz rocosa. Los bloques y el tamaño de los mismos fueron determinados a partir de las discontinuidades mayores. En la siguiente tabla (Tabla 10) se muestran las medidas tomadas para cada bloque, según sus ejes medios, los mismos se numeran de izquierda a derecha.

| Bloque | Medida     | Bloque | Medida      |
|--------|------------|--------|-------------|
| 1      | 64 x 80cm  | 6      | 55 x 23cm   |
| 2      | 50 x 61cm  | 7      | 49 x 36cm   |
| 3      | 90 x 71cm  | 8      | 79 x 113cm  |
| 4      | 84 x 114cm | 9      | 75 x 63 cm  |
| 5      | 44 x 53 cm | 10     | 140 x 73 cm |

Tabla 10.- Bloques de matriz rocosa en la margen izquierda de la presa Ramal H y sus dimensiones.

Las diaclasas se presentan continuas, con magnitudes que varían desde varios cm alcanzando longitudes mayores a 1 metro, mayormente cerradas y en menor proporción abiertas, con aberturas de hasta 2 cm en superficie, sus caras son escasamente rugosas a lisas y no poseen relleno. No se ha advertido en superficie la presencia de agua en los afloramientos adyacentes a la presa.

En profundidad se han observado fallas con ligera a moderada alteración del plano de fisura, favoreciendo la pérdida de agua o bien rellenas por material blando ("jaboncillo", arcilla). Se han observado en las perforaciones la presencia de zonas de falla y/o de intenso fracturamiento de espesor aparente variable, por lo general menor de tres metros.

En algunos sondeos, la presencia y orientación de este fracturamiento intenso es concordante con una variación de la composición litológica a medida que se profundiza en el macizo, determinando la presencia de intrusiones pegmatitas subverticales, aparentemente paralelas, entre las cuales ha quedado un área cizallada de rocas gneisicas tonalítica que se correlaciona con las zonas de alteración A4 identificadas en superficie en la margen derecha. Las fajas de cizallamiento se dispondrían diagonales al eje en las inmediaciones.

En concordancia con la existencia de fajas cizalladas en dirección oblicua al eje de la presa, podría definirse que el cause del arroyo ramal H en el área, de azimuth N300, presenta un control estructural, desarrollándose el mismo sobre una faja de rocas alteradas y milonitizadas de composición tonalítica. De esta forma se evidencia la erosión diferencial que produce el curso dadas las diferencias litológicas y estructurales de las rocas del Basamento.

### **3.2.2 Presa Arroyo del Fuerte**

La presa del Arroyo del Fuerte, ubicada hacia el centro-sur de la localidad de Tandil fue construida en 1962 con la función de regular las crecidas torrenciales, reteniendo el agua y eliminando el excedente al entubado arroyo del Fuerte, disminuyendo así el riesgo a inundaciones en la ciudad fundada aguas abajo del valle. En la Figura 21 se visualiza el eje de presa, de rumbo N98E, y el lago formado producto del embalse, siendo el sentido de escurrimiento del arroyo de sur a norte en la fotografía. A cada lado de la presa se señalan en color rojo los afloramientos de macizo rocoso visitados.



Figura 21.- Ubicación de la presa del arroyo del Fuerte. En rojo se señalan los afloramientos donde se realizó la parametrización de macizo rocoso.

Los afloramientos poseen gran extensión, en comparación con los hallados en las demás obras hidráulicas que se tratan en este trabajo. Así, para la caracterización del macizo rocoso, se visitaron en el margen izquierdo los afloramientos que “atravesan” el rumbo de la presa, como se evidencia en la Figura 22 tomada desde la misma. Mientras que, en la margen derecha, dado que no se hallaron afloramientos sitios sobre el rumbo de la presa, la parametrización se llevó a cabo en un afloramiento ubicado aguas arriba de la misma próximo al eje. Esto se refleja en la Figura 23, que corresponde a la vista del embalse desde el sitio del afloramiento.



*Figura 22.- Parte del afloramiento del margen derecho del Dique del fuerte visto desde arriba del mismo, en rojo se visualiza el sector donde se llevó a cabo la caracterización*



*Figura 23.- Vista del Lago del Fuerte desde la margen izquierda, en el sitio del afloramiento caracterizado. A la derecha de la imagen se encuentra el eje de la presa.*

Las rocas del Basamento Cristalino Precámbrico en el sitio se determinaron macroscópicamente. Se presentaron rocas de similares características a las halladas en las inmediaciones de la presa del ramal H, las que se identificaron como granitoides gneissicos gris verdosos de composición tonalítica. Estas rocas se manifiestan mayormente en la margen derecha de la presa y, aunque también se hallan en la margen izquierda, las rocas de litología granítica presentan visiblemente grano más fino y se disponen en extensos afloramientos.

En superficie, el macizo rocoso se ve afectado por los procesos de meteorización producto de la exposición del Basamento, observándose en la margen derecha, la existencia de rocas alteradas superficialmente de entre cuatro y cinco metros de potencia en contacto con otras con mucho menor grado de alteración. De este modo, hacia la base coincidente con la cota de coronamiento de la presa del Arroyo del Fuerte, tal como se observa en la Figura 24 se identificó un corte o límite en el alcance de la meteorización-alteración. Los cuatro a cinco metros de espesor de rocas con grado de alteración

(A3, A3–A4) en las que aún se conserva la estructura de la masa rocosa, dan lugar a la presencia de pequeños afloramientos confinados al piso del área que presentan características totalmente distintas.



*Figura 24.- Afloramiento en el margen izquierdo de la presa del Fuerte, donde se observa un macizo altamente meteorizado en su base en contacto con un macizo con escasa a nula alteración.*

En tal sentido, en función del grado de alteración se reconocen rocas no alteradas o poco alteradas con grado A1-A2 (Figura 25) de coloración más oscura y grano fino, que presentan gran densidad de discontinuidades y una fractura concoide, característica con la que podría inferirse que la composición es silícica, en consonancia con la litología gnéisica tonalítica definida en el sector.



*Figura 25.- Material rocoso aflorante ubicado a la altura de la cota de coronamiento de la presa. se puede observar el límite del alcance de la meteorización-alteración en contacto con la roca mayormente conservada.*

De otro modo, la incidencia en la meteorización-alteración en la margen derecha se evidencia con cambios de coloración, presencia de organismos como líquenes en la superficie del material rocoso como de las discontinuidades (Figura 26) y el desarrollo de meteorización catafilar, característica en rocas de litologías graníticas como éstas, alcanzando un grado de alteración A2 (débilmente alterada).



*Figura 26.- Parte del afloramiento caracterizado en el margen de la presa del Arroyo del Fuerte. La medición que se observa, se realiza perpendicular al rumbo de la familia 3 de discontinuidades.*

Respecto a la resistencia de la matriz rocosa, se considera que las rocas levemente meteorizadas (grado A1-A2) presentan un elevado grado de resistencia uniaxial, ya que al golpe del martillo geológico se identifica un sonido metálico bien definido y el rebote es leve a nulo. Asimismo, con los consecutivos golpes del martillo el material rocoso de la margen derecha se fractura superficialmente, como consecuencia de los rasgos de meteorización catafilar que presenta. Con estas características definidas en superficie, se esperaría que en profundidad el macizo en este sector alcance valores de resistencia mayores a 250MPa.

En cuanto a la estructura del macizo rocoso, las mediciones realizadas en las rocas de buena calidad geomecánica (Figura 27) dan un elevado porcentaje de fracturas de rumbo general Noreste-Suroeste, azimut general  $N45^\circ$  aproximadamente, de inclinaciones mayormente subverticales ( $85^\circ$ ) y subhorizontales ( $2^\circ$  a  $5^\circ$ ), hacia el Sureste o el Noroeste. Como se observa en el diagrama, acompañan a esta expresión fracturas de rumbo Este-Oeste (entre  $N85^\circ E$  y  $N95^\circ E$ ) y rumbo Noroeste-Sureste (azimut  $N315$ ), de inclinaciones predominantemente subverticales ( $75^\circ$  a  $90^\circ$ ).

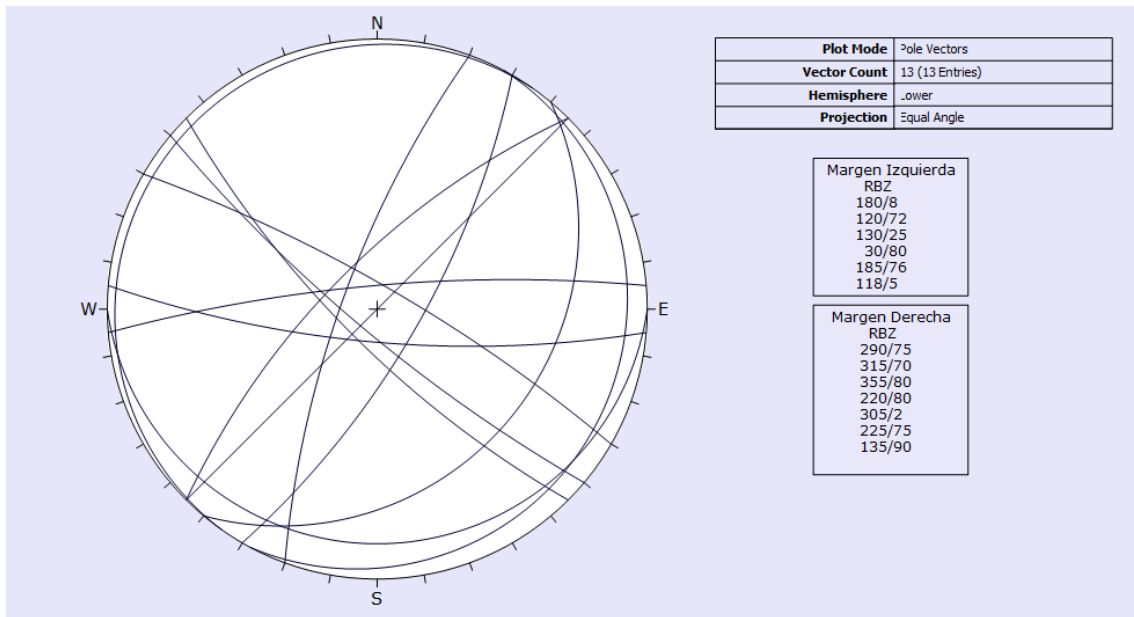


Figura 27.- Diagrama estereográfico de las discontinuidades medidas en los afloramientos de los márgenes de la presa del arroyo del Fuerte.



Figura 28.- Detalle de la medición de la orientación de un plano de discontinuidad.

Respecto al grado de fracturamiento, el cuadro estructural definido es el responsable de la existencia de bloques de matriz rocosa de entre 20 y 60 cm y bloques subordinados de 6 a 20 cm en el afloramiento de roca de buena calidad en la margen izquierda de la presa, que abarca 1.70 x 2,77 metros. Igualmente, es responsable de los bloques de matriz rocosa mayores a 2 metros que componen al afloramiento analizado en la margen derecha, cuyas dimensiones son 6,53m de longitud x 3.25m de altitud. Los bloques fueron definidos en ambas márgenes según sus discontinuidades mayores, siendo estas evidentemente más abundantes en la margen izquierda.

Ello le confiere al macizo rocoso una diferenciación en los valores del índice R.Q.D, para cada margen de la presa. Siendo el índice mayor en la margen derecha, dependiendo de la dirección en que sea medido, como se desarrollará en los próximos párrafos.

En concordancia con lo expresado anteriormente, en la margen izquierda se identificaron dos sistemas de diaclasas subverticales y un tercer juego de inclinación subhorizontal de menor abundancia, en las que se aplicó el índice  $J_v$  para definir el espaciado entre las mismas (Tabla 11). A partir de las mediciones realizadas, es posible interpretar que el  $J_v$  resulta muy bajo en este sector, coincidiendo con los tamaños de los bloques definidos.

| Sistema | Cantidad de diaclasas | Longitud total | $J_v$ |
|---------|-----------------------|----------------|-------|
| 1       | 9                     | 1.7            | 5,29  |
| 2       | 9                     | 2.77           | 3,24  |

*Tabla 11.- Sistemas de diaclasas subverticales detectados.*

Igualmente, en la margen derecha se identificaron 3 sets o familias de diaclasas: un juego horizontal (respecto al afloramiento), otro vertical y un último juego con mayor densidad de diaclasas, dispuestos en sentido oblicuo respecto al afloramiento, el cual le confiere al macizo un alto grado de fracturación.

| Familia | Cantidad de discontinuidades | Longitud total (perpendicular) | $J_v$ |
|---------|------------------------------|--------------------------------|-------|
| 1       | 14                           | 6,53                           | 2,14  |
| 2       | 6                            | 3,25                           | 1,84  |
| 3       | 24                           | 3,57                           | 6,72  |

*Tabla 12.- Sistemas de discontinuidades identificadas en la margen derecha del Dique del Fuerte.*

Las diaclasas correspondientes a la familia 3 se presentan discontinuas (hasta 40 cm de extensión), cerradas, muy apretadas, totalmente lisas y sin relleno ni presencia de agua. Estas pueden observarse en el sector superior-izquierdo de la Figura 29.

Los sets de discontinuidades restantes poseen las mismas características, a excepción de la continuidad, alcanzando en algunos casos el metro de extensión.



*Figura 29.- Detalle del macizo rocoso de la margen derecha de la presa. Se observan diaclasas en varias direcciones, muchas de ellas enmascaradas por la vegetación. En el sector superior derecho se reconocen diaclasas poco espaciadas correspondientes al set 3. Se visualiza también la patinas de líquenes y la meteorización catafilar.*

Distintamente, las diaclasas de la margen izquierda, se caracterizan por encontrarse cerradas a escasamente abiertas, muy rugosas y angulosas, reconociendo en sus planos o labios una “macrorugosidad” (Figura 30).



*Figura 30.- Detalle del material rocoso donde se observa la macrorugosidad existente en las discontinuidades.*

En las inmediaciones de la presa no se han reconocidos zonas de cizallas como las existentes en la presa del Arroyo Ramal H.

### **3.2.3 Presa Arroyo Blanco**

Se realizó la descripción y evaluación de las características geológico-geotécnicas generales de los materiales existentes en la presa Arroyo Blanco a los fines de su fundación en el sector del eje, representado en la Figura 31 como la línea A-B, de rumbo N110°E cuya longitud es de 352,10 m. a cota 210 m. en dirección perpendicular al desarrollo de las mismas. El rumbo general del arroyo en el área es N30°E y el sentido de escurrimiento es desde el Suroeste hacia el Noreste en la fotografía.

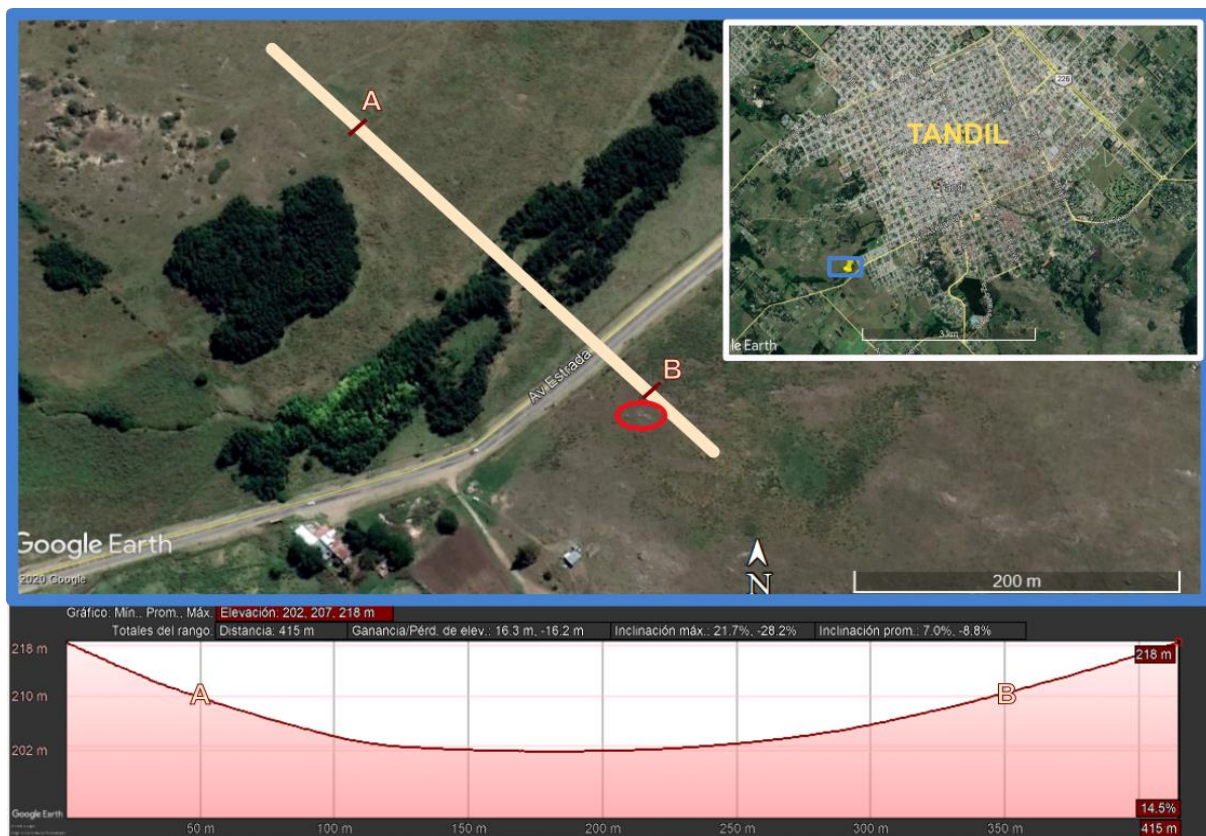


Figura 31.- Ubicación de la futura presa Arroyo Blanco. La línea A-B corresponde al posible eje de presa de cota 210m, que se observa en el perfil de elevación abajo. En rojo se señala el material rocoso aflorante, único hallado a la altura de la cota mencionada.

Los relevamientos fueron realizados únicamente sobre la margen derecha del eje designado, puesto que en la margen izquierda tal como puede observarse en la Figura 31, no se hallaron afloramientos sitios a la altura de la cota de coronamiento definida en los trabajos preliminares (210m). Los afloramientos visitados son señalados los señalados en color rojo.

Así, la parametrización del macizo rocoso se realizó en el sitio donde se encuentra el mojón derecho del posible eje de presa tal como se muestra en la Figura 32.



Figura 32.- macizo rocoso aflorante en el margen derecho del proyecto. Abajo en amarillo, destaca el mojón derecho, fijado cuando se realizaron los estudios preliminares para indicar el eje de la futura presa.

La información litológica de las rocas del Basamento en el sitio se ha extraído del trabajo de Giaconi et al, 2014 “Información preliminar de la fundación de la presa A° Blanco”, donde se define que las rocas dominantes en el área de fundación son cristalinas, de grano fino, de color gris oscuro, lajosas y tenaces. Se infiere que corresponde a milonitas de protolito posiblemente granitoide que han sido deformadas en profundidad durante fases orogénicas muy antiguas.

El material rocoso aflorante (Figura 33) se halla conformando bloques angostos con una altitud superior a dos metros que se observan en parte inalterados a débilmente alterados (grado A2), evidenciado por la presencia de patinas de alteración, líquenes y eventualmente espejos de fricción en la superficie de los mismo. Dichos bloques están separados por discontinuidades subverticales a vertical, entre las que se reconocen remanentes de rocas altamente meteorizadas-alteradas, dado que en su mayoría han sido erosionadas. Estos rasgos se corresponden con los definidos para otros sectores, como un bandeamiento o presencia de “fajas” de inclinación vertical a subvertical con un alto grado de alteración en contacto neto con franjas paralelas de macizo débilmente alterado. En este sentido, se observa que la intensidad de la alteración dentro de cada bloque es homogénea en los diferentes grados de intensidad de cizallamiento reconocidos, siendo el contacto entre los bloques neto, no habiendo progresión entre unos y otros.



*Figura 33.- Macizo rocoso donde se reconoce la incidencia de la alteración-meteorización de manera diferencial y los bloques de matriz rocosa limitados por discontinuidades subverticales. Hacia la base del afloramiento puede observarse el material cizallado y altamente meteorizado.*

Entre los afloramientos analizados, se ha reconocido una amplia zona de cizalla superficial, en donde el material rocoso, que se halla mayormente cubierto por vegetación, se observa completamente meteorizado llegando al grado de alteración A4. Se puede observar parte de dicha superficie en la base del afloramiento de la Figura 33.

A partir de la información antecedente se conoce que dicho material también se presenta sobre la margen izquierda, aguas debajo del eje definido, en las áreas topográficas cóncavas que han sido sometidas a explotación como canteras de lajas. Si bien no se cuenta con información de sondeos, no se descarta que estas rocas se encuentren en profundidad.

Respecto al grado de resistencia uniaxial, las rocas poseen en general alta resistencia, dado que al golpe de martillo el macizo rocoso no se fractura, produce sonido metálico y poco rebote. Esta característica no se mantiene en todas las dimensiones de los bloques, sino que disminuyen según la dirección o cara del bloque que analice, por lo que se puede establecer que presenta una resistencia diferencial.

En relación a la estructura del macizo rocoso en este sector, se reconoce los bloques de matriz rocosa se extienden en dirección aproximada Este-Oeste, presentando el sistema de discontinuidades que los limitan, azimuts N110° a N90°. Así, se define que la dirección general de cizalla en el sitio es N110°, al igual que lo establecido en los demás sectores. Esto se corresponde con la información de los estudios antecedentes de la presa, donde se menciona que domina una estructura de macizo que responde fundamentalmente a la preeminencia de una amplia zona regional de fajas ultramilonitizadas de rumbo general este-oeste.

Tal como muestra la Figura 34, acompañan a dichas estructuras, otras de rumbo Noreste-Suroeste, cuyos azimuts son N15° hasta N40° y cuyas inclinaciones son verticales a subverticales y en menor medida oblicuas (50°). A su vez se identifican a partir de las medidas realizadas, un set de diaclasas de inclinación subhorizontal, con valores desde los 3° hasta los 18° excepcionalmente, de rumbo Noreste-Suroeste (N45°) o Noroeste-Sureste (N30°O).

El rumbo general del arroyo en el área es N30°E, lo que respondería a la existencia erosiva de una franja de rocas milonitizadas y alteradas correspondientes al Dominio Estructural B (de rumbo NE-SO) predominante en el sector (Giaconi, 2014).

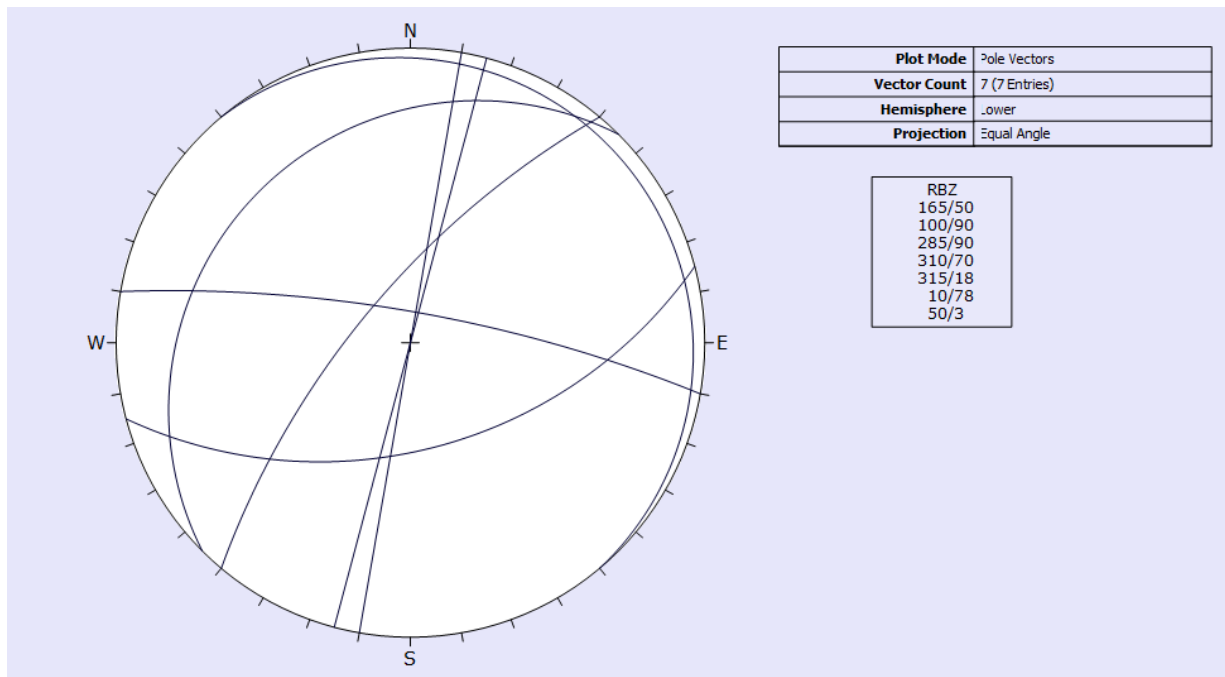


Figura 34.- Diagrama estereográfico de las estructuras medidas en las inmediaciones del proyecto presa Arroyo Blanco.

Las discontinuidades son frecuentes y dividen al afloramiento en 6 bloques cuya morfología es en general angosta y supera los dos metros de altitud. Las mediciones realizadas se muestran en la tabla adjunta (Tabla 13), donde se muestra que, a excepción del primer bloque identificado, ninguno supera los 60cm de longitud.

| Bloque | Dimensión (cm) |
|--------|----------------|
| 1      | 180            |
| 2      | 40             |
| 3      | 60             |
| 4      | 60             |
| 5      | 65             |
| 6      | 35             |

Tabla 13.- bloques de matriz rocosa identificados en el margen derecho del Arroyo Blanco y la longitud de los mismos.

Asimismo, las discontinuidades se distribuyen en cuatro familias o sets, cuyos espaciados son definidos mediante el índice  $J_v$ , que se muestran en la Tabla 14.

Las diaclasas correspondientes a la familia 3 (de rumbo NW-SE) son las más abundantes en este sector, de modo que el macizo rocoso posee un mayor grado de fracturación en dirección perpendicular al desarrollo de las mismas, pudiendo tomar valores de RQD cercanos a 0%. En las direcciones restantes el RQD alcanza buenos valores, que se mantendría o incluso mejoraría en profundidad, otorgando al macizo rocoso un bajo grado de fracturamiento.

| Familia         | Cantidad de discontinuidades | Longitud total (m) | $J_v$ |
|-----------------|------------------------------|--------------------|-------|
| 1 NE-SW         | 7                            | 4,65               | 1,5   |
| 2 NW-SE         | 4                            | 4,65               | 0,86  |
| 3 NW-SE         | 30                           | 2,20               | 13,6  |
| 4 subhorizontal | 11                           | 0,80               | 13,75 |

Tabla 14.- Sistemas de discontinuidades identificadas en la margen derecha del Arroyo Blanco.

Las discontinuidades son persistentes (a excepción de las correspondientes a la familia 4) y se encuentran cerradas u otras levemente abiertas (1mm), sin evidencia de relleno y escasamente rugosas. Presentan patina de alteración o espejo de fricción en algunos casos. No se identifica presencia de agua superficial.

### 3.3 Conclusiones de las características geotécnicas detectadas

- a. En base a la caracterización de los afloramientos existentes se detectaron a simple vista, según el alcance de la meteorización/alteración del macizo rocoso y dado el nivel de prefactibilidad del estudio, tres tipos de macizos rocosos diferentes:

1: Macizo rocoso alterado ubicado entre discontinuidades. La alteración se produjo a expensas de las zonas fracturadas de inclinación vertical a subvertical, que han dejado importante material intersticial de zona fracturada. Corresponde a las franjas o bandas de material rocoso alterado de espesor variable, paralelas a las bandas de roca no alterada, constituyendo los mencionados macizos bandeados o de meteorización diferencial.

2: Representado por una variante de la anterior, pero de mayores dimensiones. Corresponde a la alteración producida en zonas de cizallamiento (arenización) y/o de intenso fracturamiento superficial. Roca alterada de manera intensa, mínimo tipo A4 (completamente alterada) en los niveles superficiales del macizo reconocida en superficie sobre el eje presa y aguas arriba y aguas abajo del mismo en margen derecha en las áreas topográficas cóncavas (un ejemplo de ello es el sector entre los afloramientos del margen derecho) que han sido sometidas a explotación como canteras de arena.

3: Roca masiva con bajo grado de alteración o no alterada (fresca). En términos generales las rocas objeto de fundación, son rocas frescas o débilmente alteradas, A1 o A1-A2, observándose en general una leve decoloración del macizo en las paredes de los planos de discontinuidad. Localmente se presentan núcleos de roca, observables todos en los afloramientos.

b. Se reconocen cuatro familias de discontinuidades a nivel superficial (Figura 35). Tres de ellas poseen inclinación mayormente subvertical y la restante inclinación subhorizontal. La situación estructural queda resumida según tres orientaciones constituyendo los dominios estructurales definidos por Teruggi y Kilmurray, de orientación Este-Oeste; B, de orientación Noreste-Suroeste y C, de orientación Noroeste-Sureste, donde la estructura general regional respondería a la existencia de una amplia zona regional de fajas ultramilonizadas de rumbo Este-Oeste.

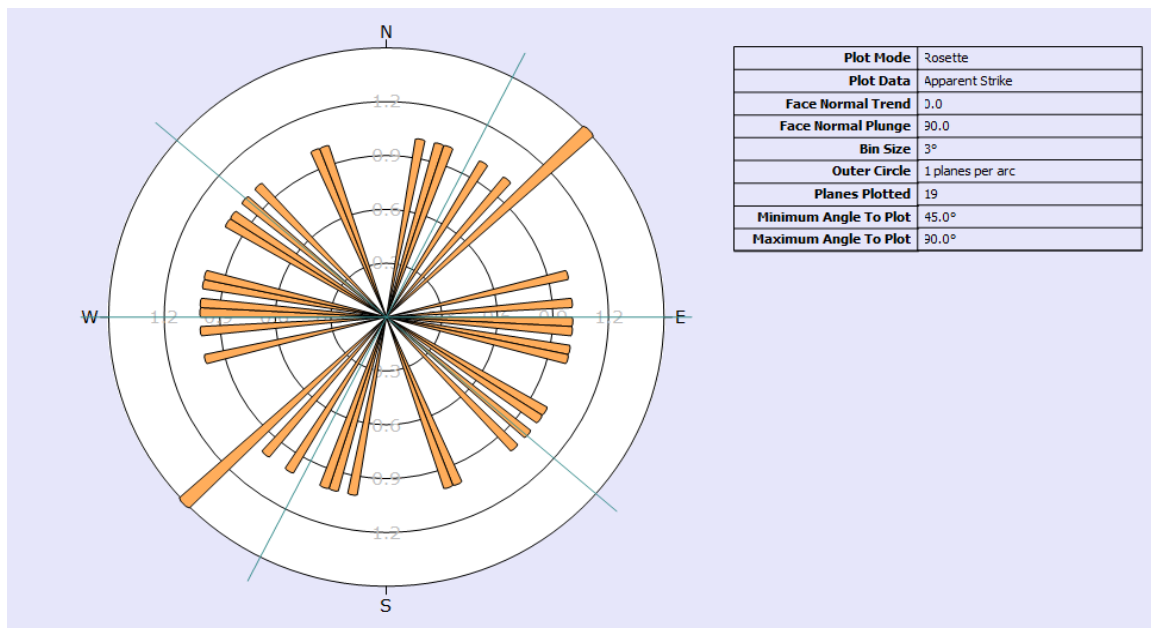


Figura 35.- diagrama de rosas de todas las discontinuidades medidas en el área de las presas.

#### 4. Clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos

Los sistemas de clasificación de macizos rocosos son utilizados principalmente para categorizar cuantitativa la calidad de un macizo rocoso, evaluando determinados parámetros geomecánicos, como son la resistencia y comportamiento de la roca; familias de discontinuidades existentes, espaciado de los planos, caracteres geomecánicos de las discontinuidades tales como continuidad, rugosidad, separación, resistencia, meteorización y relleno; presencia de agua; tensiones in situ, naturales o inducidas; alteraciones producidas en el macizo rocoso.

En líneas generales, cada sistema se aplica para distintos tipos de macizos rocosos, según su uso en las obras de ingeniería y tiene diferentes consideraciones en sus parámetros de análisis, producto de la heterogeneidad de cada macizo rocoso.

de las clasificaciones geomecánicas muy utilizadas es la clasificación NGI (Norwegian Geological Institute) cuyos autores son Barton, Lien y Lunde, 1974, también conocida internacionalmente como clasificación Q, a partir de la información de numerosos túneles. Posteriormente fue revisada estando en vigencia en la actualidad la formulación del índice Q realizada por Barton en el año 2000.

La clasificación RMR de Bieniavski (1989), se emplea para macizos con el fin de utilizarlos tanto para fundación de obras superficiales como subterráneas.

La clasificación Q, de Barton, Lien y Lunde, se utiliza principalmente para macizos rocosos cuya función sea constituir sistemas de sostenimientos para túneles y cavernas.

La clasificación GSI (Geological Strength Index) desarrollada por Hoek en 1994 se utiliza para clasificar macizos débiles (de baja resistencia y alta deformabilidad) con un RMR menos a 20, dado que este se desarrolló con el propósito de escalar la resistencia del macizo rocoso, de acuerdo al criterio de Hoek-Brown. Por ello, a diferencia de las clasificaciones RMR y Q, este método solo considera los parámetros de blocosidad (definida mediante variables asociadas al grado de fracturamiento y/o espaciamiento de las estructuras del macizo rocoso) y condición de las discontinuidades, ignorando el parámetro de la resistencia de los bloques de roca, respecto al estado tensional in situ o inducido, ya que la resistencia de la roca es parte de la información del criterio de Hoek-Brown. Asimismo, esos métodos fueron desarrollados suponiendo que el macizo rocoso se encuentra fracturado o interceptado por discontinuidades que definen bloques, que no conforman un conjunto masivo.

A continuación, se exponen y desarrollan las clasificaciones de macizos rocosos de uso actual (RMR, Q y GSI) en las tareas metodológicas geológico-geotécnicas que se utilizan en el marco conceptual de las obras de Ingeniería.

#### 4.1 Rock Mass Rating (RMR)

La clasificación geomecánica RMR, desarrollada por Bieniawski, 1973, es una de las más usadas en el ámbito de la mecánica de rocas. Se basa en la sumatoria de valores asignados a una serie de factores o parámetros geomecánicos. El efecto conjunto de estos parámetros sobre el comportamiento del macizo rocoso, se expresa mediante el índice de calidad RMR (Tabla 15), que varía de 0 a 100 según cinco categorías que indican la calidad de la roca para su uso en obras de ingeniería civil. Asimismo, cada categoría de macizo rocoso tiene asociado un valor de ángulo de rozamiento y un valor de cohesión.

| Clase | Calidad   | Valoración RMR | Cohesión               | Ángulo de rozamiento |
|-------|-----------|----------------|------------------------|----------------------|
| I     | Muy Buena | 100-81         | > 4 kg/cm <sup>2</sup> | > 45°                |
| II    | Buena     | 80-61          | 3-4 kg/cm <sup>2</sup> | 35°-45°              |
| III   | Media     | 60-41          | 2-3 kg/cm <sup>2</sup> | 25°-35°              |
| IV    | Mala      | 40-21          | 1-2 kg/cm <sup>2</sup> | 15°-25°              |
| V     | Muy mala  | < 20           | < 1 kg/cm <sup>2</sup> | < 15°                |

Tabla 15.- Calidad de macizos rocosos según el índice RMR

La clasificación RMR tiene en cuenta seis parámetros geomecánicos, cuya valoración se asigna para cada uno a partir de las determinaciones realizadas en laboratorio y/o campo. Una vez finalizada la parametrización, y asignados los valores a cada factor según la tabla general (Tabla 18) o tablas específicas, se realiza la sumatoria que da como resultado el índice RMR. Los parámetros a determinar son:

1. **Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa:** se calcula a partir de la realización de una serie de ensayos, en campo o laboratorio, de la matriz rocosa (roca inalterada) para determinar su resistencia.
2. **R.Q.D:** Grado de fracturación del macizo rocoso: es una medida de recuperación del testigo obtenido en un barreno a diamante. Se basa en el porcentaje de testigo recuperado en el que la roca que se encuentra intacta.

$$RQD\% = \frac{(\text{longitud de fragmentos} \geq a 0.10 m)}{(\text{longitud total del testigo en m})} \cdot 100$$

Para su determinación en campo pueden usarse métodos indirectos como el Jv (discontinuidades volumétricas) teniendo en cuenta que, en el análisis de macizos rocosos se presentan bloques de rocas delimitados por sistemas tridimensionales de discontinuidades.

3. **Espaciado de las discontinuidades:** es una valoración de la separación entre las discontinuidades según la tabla general (tabla 18).
4. **Condiciones de las discontinuidades:** consiste en considerar una serie de parámetros, valorando cada uno según la siguiente tabla.

| Parámetro                                    | Valoración |                      |                        |                |                |
|----------------------------------------------|------------|----------------------|------------------------|----------------|----------------|
|                                              | < 1 m      | 1 – 3 m              | 3 – 10 m               | 10 – 20 m      | > 20 m         |
| Longitud de la discontinuidad (Persistencia) | 6          | 4                    | 2                      | 1              | 0              |
| Abertura                                     | Nada       | < 0,1 mm             | 0,1 – 1,0 mm           | 1 – 5 mm       | > 5 mm         |
|                                              | 6          | 5                    | 3                      | 1              | 0              |
| Rugosidad                                    | Muy rugosa | Rugosa               | Ligeramente rugosa     | Ondulada       | Suave          |
|                                              | 6          | 5                    | 3                      | 1              | 0              |
| Relleno                                      | Ninguno    | Relleno duro         | Relleno duro           | Relleno blando | Relleno blando |
|                                              |            | < 5 mm               | > 5 mm                 | < 5 mm         | > 5 mm         |
|                                              | 6          | 4                    | 2                      | 2              | 0              |
| Alteración                                   | Inalterado | Ligeramente alterado | Moderadamente alterado | Muy alterado   | Descompuesto   |
|                                              | 6          | 5                    | 3                      | 1              | 0              |

Tabla 16.- tabla RMR, para la valoración de las características de las discontinuidades.

5. **Presencia del Agua:** el agua tiene gran influencia sobre el comportamiento de un macizo rocoso, pudiendo generar gran inestabilidad, no solo por la presión hidrostática sino por las alteraciones que puede producir en las discontinuidades (disolución, deslizamientos, etc.). La descripción utilizada para este criterio es: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.

6. **Orientación de las discontinuidades:** refiere a la orientación de las discontinuidades principales respecto a la dirección del eje longitudinal de desarrollo de la obra, que puede aumentar el riesgo de deslizamientos o, por el contrario, disminuirlo. Se valora según la siguiente tabla.

| <i>Inclinación &gt;20°</i>                                            |                 |                                 |                 | <i>Inclinación &gt;20°</i>                                       |                 | <i>Inclinación ≤ 20°</i>                                      |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|
| Rumbo de las discontinuidades: <i>perpendicular</i> al eje de la obra |                 |                                 |                 | Rumbo de las discontinuidades: <i>paralelo</i> al eje de la obra |                 | Rumbo y buzamiento de las discontinuidades: <i>cualquiera</i> |
| Excavación con el buzamiento                                          |                 | Excavación contra el buzamiento |                 |                                                                  |                 |                                                               |
| Incl. 45° - 90°                                                       | Incl. 20° - 45° | Incl. 45° - 90°                 | Incl. 20° - 45° | Incl. 45° - 90°                                                  | Incl. 20° - 45° | Inclinación 0°-20°                                            |
| Muy favorable                                                         | Favorable       | Media o regular                 | Desfavorable    | Muy desfavorable                                                 | Media o regular | Desfavorable                                                  |

Tabla 17.- Tabla RMR, para valoración de la orientación de las discontinuidades.

**Clasificación RMR Geomecánica de Bieniawski 1989: Parámetros de clasificación**

| PARAMETRO                                                                     |                                                    | ESTIMACION Y ESCALA DE VALORES                                                 |                                                                 |                                                     |                                                       |                                                                                 |                                                              |       |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|------|
| 1                                                                             | Resistencia de la roca sana                        | Carga puntual MPa $\Rightarrow$                                                | > 10                                                            | 4 - 10                                              | 2 - 4                                                 | 1 - 2                                                                           | Únicamente Compresión Simple                                 |       |      |
|                                                                               |                                                    | Kg/cm $^2$ (aprox) $\Rightarrow$                                               | 100                                                             | 40 - 100                                            | 20 - 40                                               | 10 - 20                                                                         |                                                              |       |      |
|                                                                               | Compr. Simple MPa $\Rightarrow$                    | > 250                                                                          | 100 - 250                                                       | 50 - 100                                            | 25 - 50                                               | 5-25                                                                            | 1-5                                                          | < 1   |      |
|                                                                               |                                                    | Kg/cm $^2$ (aprox) $\Rightarrow$                                               | > 2 500                                                         | 1 000-2 500                                         | 500 - 1 000                                           | 250 - 500                                                                       | 50-150                                                       | 10-50 | < 10 |
|                                                                               | Valoración                                         |                                                                                | 15                                                              | 12                                                  | 7                                                     | 4                                                                               | 2                                                            | 1     | 0    |
| 2                                                                             | RQD %                                              |                                                                                | 90 - 100                                                        | 75 - 90                                             | 50 - 75                                               | 25 - 50                                                                         | < 25                                                         |       |      |
|                                                                               | Valoración                                         |                                                                                | 20                                                              | 17                                                  | 13                                                    | 8                                                                               | 3                                                            |       |      |
| 3                                                                             | Separación de discontinuidades                     |                                                                                | > 2 m                                                           | 0,6 - 2 m                                           | 0,2 - 0,6 m                                           | 0,06 - 0,2 m                                                                    | < 0,06 m                                                     |       |      |
|                                                                               | Valoración                                         |                                                                                | 20                                                              | 15                                                  | 10                                                    | 8                                                                               | 5                                                            |       |      |
| 4                                                                             | Estado de las discontinuidades (ver guía especial) |                                                                                | Muy rugosas. Discontinuas. Sin separaciones. Borde sano y duro. | Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Bordes duros. | Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Bordes blandos. | Espejo de falla o con relleno < 5 mm o aberturas 1 - 5 mm. Diaclasas continuas. | Relleno blando > 5 mm o abertura > 5 mm. Diaclasas Continuas |       |      |
|                                                                               |                                                    | Valoración                                                                     |                                                                 | 30                                                  | 25                                                    | 20                                                                              | 10                                                           | 0     |      |
| 5                                                                             | Presencia de agua                                  | Caudal por 10 m de túnel                                                       | Nulo                                                            | < 10 L/min                                          | 10 - 25 L/min                                         | 25 - 125 L/min                                                                  | > 125 L/min                                                  |       |      |
|                                                                               |                                                    | Relación entre la presión de agua y la mayor del terreno $\sigma_w / \sigma_1$ | 0                                                               | 0 - 0,1                                             | 0,1 - 0,2                                             | 0,2 - 0,5                                                                       | > 0,5                                                        |       |      |
|                                                                               | Estado general                                     | Seco                                                                           | Ligeramente Húmedo                                              | Húmedo                                              | Goteando                                              | Fluyendo                                                                        |                                                              |       |      |
|                                                                               | Valoración                                         |                                                                                | 15                                                              | 10                                                  | 7                                                     | 4                                                                               | 0                                                            |       |      |
| <b>Corrección por orientación de las discontinuidades (ver guía especial)</b> |                                                    |                                                                                |                                                                 |                                                     |                                                       |                                                                                 |                                                              |       |      |
| 6                                                                             | Dirección y Buzamiento                             |                                                                                | Muy favorable                                                   | Favorable                                           | Medio o regular                                       | Desfavorable                                                                    | Muy desfavorable                                             |       |      |
|                                                                               | Valoración para                                    | Túneles                                                                        | 0                                                               | - 2                                                 | - 5                                                   | - 10                                                                            | - 12                                                         |       |      |
|                                                                               |                                                    | Cimentación                                                                    | 0                                                               | - 2                                                 | - 7                                                   | - 15                                                                            | - 25                                                         |       |      |
|                                                                               |                                                    | Taludes                                                                        | 0                                                               | - 5                                                 | - 25                                                  | - 50                                                                            | - 60                                                         |       |      |

Tabla 18.-Cuadro general de los parámetros de clasificación RMR

**4.2 Geological Strenght Index (GSI)**

El índice de resistencia geológica GSI fue desarrollado por Hoek en 1984, para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR para evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown, siendo útil específicamente para macizos rocosos de mala calidad, con RMR menor a 20. Este índice de calidad geotécnica se determina en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos:

**RMS:** corresponde a la estructura del macizo rocoso, en términos de bloques y el grado de encastre.

**JC:** es la condición de las discontinuidades presentes en el macizo indicadas por la rugosidad y alteración de las mismas.

La evaluación del índice GSI se hace por comparación del caso de interés in situ con los casos de las condiciones típicas que se muestran en la figura 11. Se basa en estimaciones cualitativas y en modelos simples que no coinciden totalmente con las condiciones reales. El índice GSI se define en un rango y no como un valor específico. En la práctica es usual definir un rango de unos 15 puntos.

Este índice varía de 0 a 100 y define cinco clases de macizo rocoso, de distinta precisión en su cálculo, tal como se observa en la Tabla 19.

| Índice GSI          | Calidad del macizo rocoso | Precisión            |
|---------------------|---------------------------|----------------------|
| $80 \leq GSI < 100$ | Muy buena                 | $\Delta GSI = \pm 5$ |
| $60 \leq GSI < 80$  | Buena                     | $\Delta GSI = \pm 5$ |
| $40 \leq GSI < 60$  | Regular                   | $\Delta GSI = \pm 5$ |
| $20 \leq GSI < 40$  | Mala                      | $\Delta GSI = \pm 6$ |
| $0 \leq GSI < 20$   | Muy mala                  | $\Delta GSI = \pm 8$ |

*Tabla 19.- Calidad de macizo rocoso según el índice GSI y la precisión en el valor obtenido.*

La determinación GSI no es aplicable en aquellos casos que el comportamiento del macizo rocoso presenta un claro control estructural.

El gráfico con el que consiguen los valores del GSI (Figura 36) ha sido extendido para adaptarse a la mayor variedad de macizos rocosos, incluyendo rocas de muy baja calidad, por lo cual, para macizos heterogéneos estratificados se utiliza la gráfica de la Figura 37 adaptada de Marinós y Hoek (2000).

| <b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS</b><br>(Marinos & Hoek (2000))<br>Estime el valor típico de <i>GSI</i> considerando el tipo de roca, la estructura del macizo rocoso, y la condición de las discontinuidades.<br>NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar $33 \leq GSI \leq 37$ es más realista que considerar $GSI = 35$ . <u>Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural.</u> Si hay estructuras desfavorablemente orientadas, ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso.<br>En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse "desplazando hacia la derecha" el rango estimado para <i>GSI</i> .<br>La presión del agua no se considera al evaluar el rango de <i>GSI</i> , ya que la misma se incorpora posteriormente en los análisis geotécnicos, los que se desarrollan considerando esfuerzos efectivos. |                                                                                                                                                                                          | CONDICION DE LAS ESTRUCTURAS                                |                                                                     |                                                                       |                                                                                          |                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| ESTRUCTURA DEL MACIZO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                          | MUY BUENA<br>Muy rugosas, cajas frescas o no intemperizadas | BUENA<br>Rugosas, cajas ligeramente intemperizadas y algo oxidadas. | REGULAR<br>Lisas, cajas moderadamente intemperizadas y algo alteradas | MALA<br>Pulidas, cajas meteorizadas, con pátinas o con rellenos y/o fragmentos angulosos | MUY MALA<br>Pulidas, cajas muy meteorizadas, con pátinas o con rellenos de arcilla blanca |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                          | DISMINUYE LA CALIDAD →                                      |                                                                     |                                                                       |                                                                                          |                                                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>INTACTA o MASIVA</b><br>Probetas de roca intacta. Macizos masivos o con pocas y muy espaciadas estructuras.                                                                           | 90                                                          |                                                                     |                                                                       | N/A                                                                                      | N/A                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>BLOCOSA</b><br>Macizos con 3 sets de estructuras, que definen bloques cúbicos, bien trabados entre sí.                                                                                | 80                                                          |                                                                     |                                                                       | 50                                                                                       | 40                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>MUY BLOCOSA</b><br>Macizos con 4 sets de estructuras, o más, que definen bloques angulosos y trabados, pero que están parcialmente perturbados.                                       | 70                                                          |                                                                     |                                                                       |                                                                                          | 30                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>BLOCOSA VETEADA</b><br>Macizos plegados y con bloques angulosos formados por la intersección de muchas estructuras. Los planos de estratificación y/o esquistosidad son persistentes. | 60                                                          |                                                                     |                                                                       |                                                                                          | 20                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>DESINTEGRADA</b><br>Macizo fuertemente fracturado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados, pobremente trabados.                                                            |                                                             |                                                                     |                                                                       |                                                                                          | 10                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>LAMINADA / CIZALLADA</b><br>Macizo con planos débiles (cizalle y/o esquistosidad), muy poco espaciados entre sí y que no definen bloques.                                             | N/A                                                         | N/A                                                                 |                                                                       |                                                                                          |                                                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | DISMINUYE TRABAZON ENTRE BLOQUES ↓                                                                                                                                                       |                                                             |                                                                     |                                                                       |                                                                                          |                                                                                           |

Figura 36.- Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos fracturados (Marinos y Hoek, 2000).








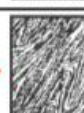
| INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA<br>MACIZOS ROCOSOS ESTRATIFICADOS HETEROGENEOS<br>(Marinos & Hoek (2000))                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | CONDICION ESTRUCTURAS<br>(PLANOS DE ESTRATIFICACION)             |                                                  |                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| En base a una descripción de la litología, la estructura del macizo y la condición de las estructuras (especialmente los planos de estratificación), seleccione una zona en la tabla. Ubique en esa zona la posición correspondiente a la condición de las estructuras y estime el valor medio de <i>GSI</i> . NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar $33 \leq GSI \leq 37$ es más realista que suponer $GSI = 35$ . Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural. Si hay estructuras desfavorablemente orientadas ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso. En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse "desplazando hacia la derecha" el rango estimado para <i>GSI</i> para condiciones regular, mala o muy mala de las estructuras. La presión del agua no se considera al evaluar el <i>GSI</i> (análisis en esfuerzos efectivos). |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | MUY BUENA<br>Muy rugosas, superficies frescas o no meteorizadas. | BUENA<br>Rugosas, superficies algo meteorizadas. | REGULAR<br>Lisas, superficies moderadamente meteorizadas y lateradas. | MALA<br>Muy lisas, ocasionalmente pulidas, con pátinas compactas o rellenos con fragmentos angulosos. | MUY MALA<br>Muy lisas y pulidas o de superficies muy meteorizadas, y con pátinas o rellenos de arcilla blanda. |
| COMPOSICION Y ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                  |                                                  |                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | A. Estratos gruesos de arenisca de mucha blocosidad. El efecto de posibles pátinas pelíticas en los planos de estratificación se ve minimizado por el confinamiento del macizo rocoso; sin embargo, en túneles poco profundos y/o taludes, estos planos de estratificación pueden generar inestabilidades controladas estructuralmente. | 70                                                               | A                                                |                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | B. Arenisca con lentos delgados de limolita.                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 60                                                               | B, C, D, E                                       |                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | C. Arenisca y limonita, en estratos de similar potencia.                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                  |                                                  |                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | D. Limolitas o esquistos limosos con estratos de arenisca.                                                                                                                                                                                                                                                                              | 50                                                               | F                                                |                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | E. Limolitas débiles o esquistos arcillosos con estratos de arenisca.                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                  |                                                  |                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | F. Esquistos limosos o arcillosos, deformados tectónicamente, muy plegados y Cizallados, con estratos de arenisca deformados y quebrados, definiendo una estructura casi caótica.                                                                                                                                                       | 40                                                               |                                                  |                                                                       |                                                                                                       | 10                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | G. Esquistos limosos o arcillosos no perturbados, con o sin intercalaciones de estratos delgados de arenisca.                                                                                                                                                                                                                           | N/A                                                              | N/A                                              | G                                                                     |                                                                                                       |                                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | H. Esquistos limosos o arcillosos, deformados tectónicamente, con una estructura caótica y bolsones de arcilla. Estratos delgados de arenisca quebrados en pequeños bloques de roca.                                                                                                                                                    |                                                                  |                                                  | H                                                                     |                                                                                                       |                                                                                                                |

Figura 37.- Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos heterogéneos y estratificados (Marinos y Hoek, 2000).

### 4.3 NGI (Índice Q)

La clasificación Q, desarrollada en 1974 por Barton, Lunde y Lien a partir de la información de numerosos túneles, es una de las clasificaciones geomecánicas más utilizadas en los macizos rocosos junto con la clasificación RMR de Bieniawski. No obstante, el RMR normalmente se usa más como índice geomecánico para la evaluación de las propiedades de los macizos rocosos superficiales mientras que el índice Q se emplea mayoritariamente en la evaluación del sostenimiento de túneles mediante bulones, cerchas, hormigón proyectado, etc.

Esta clasificación geomecánica permite estimar parámetros geotécnicos del macizo rocoso y diseñar sostenimientos para túneles y otras excavaciones subterráneas basándose en la evaluación numérica de seis factores que definen el índice Q. Este índice viene dado por la siguiente expresión.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Donde cada coeficiente corresponde a una estimación de:

**(RQD/Jn):** Tamaño de los bloques que conforman el macizo rocoso.

**(Jr/Ja):** la resistencia al corte entre los bloques.

**(Jw/SRF):** influencia del estado tensional.

Los parámetros que determinan los coeficientes son:

**1. RQD:** Como se explicó anteriormente, se trata de un índice para medir la calidad de un macizo rocoso a partir de testigos de sondeo.

**2. Jn (Join Set Number):** Es el índice de diaclasado. Coeficiente asociado al número de sets de diaclasas presentes en el macizo. indica el grado de fracturación del macizo rocoso.

**3. Jr (Joint Roughness Number):** Es el índice de rugosidad de las discontinuidades. contempla la rugosidad, relleno y persistencia de las discontinuidades.

**4. Ja (Join Alteration Number):** Es el índice de alteración de las discontinuidades. Asociado a la condición o grado de alteración de las estructuras del macizo rocoso.

**5. Jw (Join Water Reduction Factor):** Es el Factor de reducción por la presencia de agua. Se trata de un coeficiente que minora el índice Q en función de la entrada de agua a la excavación.

**6. SRF (Stress Reduction Factor):** es un factor que evalúa la influencia del estado tensional sobre el macizo rocoso. El valor fluctúa entre 0,5 (concentraciones importantes de esfuerzos en roca competente) y 400 (potencial ocurrencia de estallidos de roca).

El índice Q varía entre 0,001 y 1000, valor según el cual se le asigna una calidad al macizo rocoso en estudio (Tabla 21).

| Valor del índice Q   | Calidad de la roca          | Precisión                     |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| $0,00 \leq Q < 0,01$ | Roca excepcionalmente mala  | $\Delta Q \approx \pm 0.0005$ |
| $0,01 \leq Q < 0,1$  | Roca extremadamente mala    | $\Delta Q \approx \pm 0.005$  |
| $0,1 \leq Q < 1$     | Roca muy mala               | $\Delta Q \approx \pm 0.01$   |
| $1 \leq Q < 4$       | Roca mala                   | $\Delta Q \approx \pm 0.3$    |
| $4 \leq Q < 10$      | Roca media                  | $\Delta Q \approx \pm 1.5$    |
| $10 \leq Q < 40$     | Roca buena                  | $\Delta Q \approx \pm 3$      |
| $40 \leq Q < 100$    | Roca muy buena              | $\Delta Q \approx \pm 8$      |
| $100 \leq Q < 400$   | Roca extremadamente buena   | $\Delta Q \approx \pm 40$     |
| $400 \leq Q < 1.000$ | Roca excepcionalmente buena | $\Delta Q \approx \pm 100$    |

Tabla 20.- Calidad de macizo rocoso según índice Q.

## 5. Zonificación de macizos rocosos

Analizadas las características litológicas, el grado y modo de la alteración y las características estructurales del macizo, se procede a la determinación de zonas con diferentes características litoestructurales de acuerdo a los estudios realizados en los afloramientos.

Cabe destacar que, dado el nivel de prefactibilidad establecido, se ha realizado únicamente una caracterización superficial de los macizos y no se cuenta con información que permita conocer el comportamiento en profundidad de los mismos. Por ello, el concepto de zonificación litoestructural no sería pertinente respecto a la metodología para la que se emplean las zonas litoestructurales, siendo que la aplicación de las mismas se basa fundamentalmente en una metodología de auscultación geotécnica donde se dispone de información de subsuelo, a partir de la realización de trincheras, calicatas, perforaciones, excavaciones, entre otras, que proyecto que se encuentra en nivel de prefactibilidad no posee.

Así, se caracteriza al macizo rocoso en grupos o zonas de comportamiento litoestructural superficial similar a los fines de determinar sus características geomecánicas e hidráulicas. Las zonas se han definido según cada afloramiento de macizo rocoso en las áreas de implantación de las dos presas existentes y la proyectada.

En el caso de los afloramientos adyacentes al Dique del Fuerte, se ha optado por discriminarlos en zonas diferentes, dado que las características descritas en el campo son notoriamente distintas para cada margen, a diferencia de lo observado en las márgenes de las restantes obras.

Se han identificado las siguientes zonas:

- Zona 1: Rocas con grado de alteración A4 o superior. Corresponde a la alternancia de rocas alteradas que se ubican entre discontinuidades y las zonas de cizalla o intenso fracturamiento. Se reconocen en las márgenes de la presa Ramal H y la futura presa Arroyo Blanco.
- Zona 2: Roca masiva, fresca a poco alterada, exceptuando las fallas localizadas, de la presa Ramal H.
- Zona 3: Responde a las rocas frescas (inalteradas), con alta densidad de diaclasas rugosas presentes en la margen izquierda del Dique del Fuerte.
- Zona 4: Rocas poco alteradas, con menor grado de fracturación. Corresponde a los afloramientos de macizo rocoso de la margen derecha del Dique del Fuerte.

-Zona 5: Bloques de rocas subverticales, poco alteradas en la margen derecha del Arroyo Blanco.

## 6. Determinación de las clases de macizo rocoso

Zonificado el macizo, el objetivo de clasificar geotécnicamente las zonas definidas es el de facilitar, en un proyecto de ingeniería, al proyectista datos cuantitativos que son requeridos para la solución de los problemas de ingeniería.

En este caso se adoptó la Clasificación Geomecánica RMR (Bieniawski, 1989), dado que las restantes clasificaciones tienen su base metodológica dirigida a la construcción de túneles, siendo que algunas se aplican en macizos profundos (clasificación Q de Barton).

La clasificación RMR se realiza sobre la masa rocosa fracturada en niveles superficiales mediante parámetros medibles que pueden ser determinados en los afloramientos de campo.

Los parámetros utilizados en la clasificación (apartado 4.1) proveen los datos de entrada para clasificar cada zona y el valor obtenido con la sumatoria de estos, se ajusta con respecto a la orientación de las discontinuidades, determinando así la clase de macizo rocoso RMR.

Finalmente, cada una de las clases determinan los respectivos parámetros geotécnicos de salida: cohesión  $C$  y ángulo de rozamiento interno  $\phi$ .

### 6.1 Parámetros geotécnicos de entrada y clasificación

Se expone a continuación en cuadros sintéticos el desarrollo de los parámetros de entrada y la clasificación de macizos rocosos según la zonificación. La valoración de los parámetros geotécnicos se ha apoyado en los estudios realizados en la fundación de la presa Ramal H.

**Zona 1:** estas rocas poseen signos de descomposición textural, con separación de las discontinuidades que varía entre 0,06 m. -0,2 m. y a menos de 0,06 m, brechosa dando como resultado RQD de valores muy bajos a valores 0 (muchas veces difícil de cuantificar, debido al grado de fracturación). El grado de fracturamiento presenta orientación desfavorable dado que las discontinuidades en general poseen una disposición subparalela o diagonal al eje unos  $30^\circ$  al norte con planos de inclinación de alto ángulo y/o a  $45^\circ$  mayormente hacia aguas abajo. Si bien el estado de estas rocas en general no permite aplicar las clasificaciones, dado el grado de alteración que tienen, con objeto de clasificar las mejores condiciones del macizo dentro de esta, se obtienen los siguientes parámetros:

| <b>Zona n° 1</b>                               |                                                                                                         |                   |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Parámetro</b>                               | <b>Valor</b>                                                                                            | <b>Puntuación</b> |
| Resistencia de la matriz rocosa (MPa)          | 50-25                                                                                                   | 4                 |
| R.Q.D                                          | <25 %                                                                                                   | 3                 |
| Espaciamiento entre diaclasas (m)              | 0,06-0,2                                                                                                | 8                 |
| Naturaleza de las diaclasas                    | Longitud: 10-20m<br>Abertura: 0,1-1mm<br>Rugosidad: ondulada<br>Relleno: duro<br>Alt. Paredes: muy alt. | 12                |
| Presencia de agua subterránea                  | seco                                                                                                    | 15                |
| Ajuste por orientación de las discontinuidades | desfavorable                                                                                            | -15               |
|                                                | <b>RMR</b>                                                                                              | <b>27</b>         |

Según el valor RMR=27, la zona geotécnica 1 se encuentra dentro de la clase IV de la clasificación geomecánica RMR, cuya calidad de roca es mala.

**Zona 2:** roca fresca a decolorada, poco alterada, masiva, con bloques que varían entre 60cm y 2metros, con diaclasas continuas, poco rugosas, sin relleno y sin alteración, que le confieren un grado de fracturamiento bajo (R.Q.D de valores altos). La orientación de las discontinuidades respecto del eje es en general desfavorable, cuyas razones se mencionan en la zona 1.

| <b>Zona n° 2</b>                      |                                                                                                                                |                   |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Parámetro</b>                      | <b>Valor</b>                                                                                                                   | <b>Puntuación</b> |
| Resistencia de la matriz rocosa (MPa) | 100-250                                                                                                                        | 12                |
| R.Q.D                                 | 90-100%                                                                                                                        | 20                |
| Espaciamiento entre diaclasas (m)     | 0,6-2                                                                                                                          | 15                |
| Naturaleza de las diaclasas           | Longitud: 3-10<br>Abertura: cerradas<br>Rugosidad: ligeramente rugosas<br>Relleno: nulo a duro<br>Alt. Paredes: lig. alteradas | 20                |
| Presencia de agua subterránea         | seco                                                                                                                           | 15                |

|                                                |               |           |
|------------------------------------------------|---------------|-----------|
| Ajuste por orientación de las discontinuidades | desfavorables | -15       |
|                                                | <b>RMR</b>    | <b>67</b> |

Según el valor RMR=67, la zona geotécnica 2 se encuentra dentro de la clase II de la clasificación geomecánica RMR, cuya calidad de roca es buena.

**Zona 3:** roca fresca, inalterada, irregular, extremadamente dura con diaclasas discontinuas, muy rugosas, muy cerradas, sin relleno ni alteración y muy juntas. Posee grado medio de fracturamiento (R.Q.D= 61% aproximado) y la orientación de las discontinuidades respecto del eje es desfavorable.

| <b>Zona n° 3</b>                               |                                                                                                       |                   |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Parámetro</b>                               | <b>Valor</b>                                                                                          | <b>Puntuación</b> |
| Resistencia de la matriz rocosa (MPa)          | >250                                                                                                  | 15                |
| R.Q. D                                         | 50-75%                                                                                                | 13                |
| Espaciamiento entre diaclasas (m)              | 0,2-0,6                                                                                               | 10                |
| Naturaleza de las diaclasas                    | Longitud:<1m<br>Abertura: nada<br>Rugosidad: muy rugosas<br>Relleno: nulo<br>Alt. Paredes: inalterado | 30                |
| Presencia de agua subterránea                  | seco                                                                                                  | 15                |
| Ajuste por orientación de las discontinuidades | desfavorable                                                                                          | -15               |
|                                                | <b>RMR</b>                                                                                            | <b>68</b>         |

Según el valor RMR=68, la zona geotécnica 3 se encuentra dentro de la clase II de la clasificación geomecánica RMR, cuya calidad de roca es buena. En este caso, se reconoce que predomina el estado de la roca y de las discontinuidades al grado de fracturamiento.

**Zona 4:** roca masiva, levemente alterada, extremadamente dura, con diaclasas lisas, cerradas, de continuidad media a baja (según el set), y espaciado medio y sin relleno. El grado de fracturación es bajo (R.Q.D = 79% aproximado) y la orientación de las discontinuidades es desfavorable respecto al eje de la presa.

| <b>Zona nº 4</b>                               |                                                                                                                   |                   |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Parámetro</b>                               | <b>Valor</b>                                                                                                      | <b>Puntuación</b> |
| Resistencia de la matriz rocosa (MPa)          | >250                                                                                                              | 15                |
| R.Q.D                                          | 75-90%                                                                                                            | 17                |
| Espaciamiento entre diaclasas (m)              | 0,6-2                                                                                                             | 10                |
| Naturaleza de las diaclasas                    | Longitud: < 1m<br>Abertura: < 0,1mm<br>Rugosidad: onduladas<br>Relleno: ninguno<br>Alt. Paredes: lig.<br>alterado | 23                |
| Presencia de agua subterránea                  | seco                                                                                                              | 15                |
| Ajuste por orientación de las discontinuidades | desfavorable                                                                                                      | -15               |
|                                                | <b>RMR</b>                                                                                                        | <b>65</b>         |

Según el valor RMR=65, la zona geotécnica 4 se encuentra dentro de la clase II de la clasificación geomecánica RMR, cuya calidad de roca es buena.

**Zona 5:** macizo ligeramente alterado, decolorado, duro, tabular en función del tamaño y forma de sus bloques que presentan dos dimensiones mayores, con discontinuidades cerradas, separadas, sin relleno, onduladas y de baja continuidad. Grado de fracturamiento expresado por el índice R.Q.D = 70 % según la mayoría de las direcciones, mientras que en una de ellas alcanza valores cercanos a 10%. La orientación de las discontinuidades respecto al eje es desfavorable.

| <b>Zona nº 5</b>                      |                                                                                                                   |                   |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Parámetro</b>                      | <b>Valor</b>                                                                                                      | <b>Puntuación</b> |
| Resistencia de la matriz rocosa (MPa) | 50-100                                                                                                            | 7                 |
| R.Q.D                                 | 50-75%                                                                                                            | 13                |
| Espaciamiento entre diaclasas (m)     | 0,6-2                                                                                                             | 15                |
| Naturaleza de las diaclasas           | Longitud: 1-3<br>Abertura: nada<br>Rugosidad: ondulada<br>Relleno: ninguno<br>Alt. Paredes:<br>moderadamente alt. | 25                |
| Presencia de agua subterránea         | seco                                                                                                              | 15                |

|                                                |              |           |
|------------------------------------------------|--------------|-----------|
| Ajuste por orientación de las discontinuidades | desfavorable | -15       |
|                                                | <b>RMR</b>   | <b>60</b> |

Según el valor RMR=60, la zona geotécnica 5 se encuentra dentro de la clase II de la clasificación geomecánica RMR, cuya calidad de roca es buena.

## 6.2 Parámetros geotécnicos de salida

ZONA GEOTECNICA 1:

Cohesión = 1 a 2 kgp/cm<sup>2</sup>

Ángulo de rozamiento interno = 15° a 25°

ZONAS GEOTECNICAS 2, 3, 4 y 5:

Cohesión = 3 a 4 kgp/cm<sup>2</sup>

Ángulo de rozamiento interno = 35° a 45°

## 6.3 Deformabilidad de los macizos rocosos

La deformación de un macizo rocoso se encuentra determinado por la relación que existe entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas y queda definida por su módulo de deformación, que relaciona la tensión o esfuerzo con la deformación correspondiente. La deformación de un macizo depende de la deformación tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades, siendo que la de estas últimas siempre es mayor que deformación de la matriz rocosa.

La evaluación del módulo de deformación en macizos rocosos mediante la utilización de correlaciones empíricas “representa un valor medio orientativo y en su aplicación debe ser considerado el carácter anisótropo de la deformabilidad de los macizos rocosos”.

A partir del índice de calidad de roca RQD (Deere, 1966) se han establecido correlaciones con el módulo de deformación del macizo propuestas por diferentes autores.

Bieniawski estableció una relación entre el módulo de deformación in situ del macizo rocoso E (GPa) y el índice RMR. Esta correlación es válida para macizos rocosos de buena calidad, es decir, valores de RMR mayores a 50-55. Así estableció que:

$$E = 2 RMR - 100 \text{ en GPa}$$

Para el caso de valores de RMR entre 10 y 50 (macizos rocosos débiles o blandos, de baja a muy baja calidad), Serafim y Pereira (1983) dedujeron una expresión de E, por la cual, si bien se obtienen valores demasiado altos, es particularmente válida para valores de E entre 1 y 10 GPa.

$$E = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)} \text{ en GPa.}$$

Así, a partir de los valores RMR obtenidos para cada zona, se calculó empíricamente, el módulo de deformación para cada una:

-Zona 1:

RMR=27

MD = 2,66 GPa (26.600 kg/cm<sup>2</sup>)

-Zona 2:

RMR=67

MD=34 GPa (340.000 kg/cm<sup>2</sup>)

-Zona 3:

RMR=68

MD=36 GPa (360.000 kg/cm<sup>2</sup>)

-Zona 4:

RMR=65

MD=30 GPa (300.000 kg/cm<sup>2</sup>)

-Zona 5:

RMR=60

MD=20 GPa (200.000 kg/cm<sup>2</sup>)

## 7. Conclusiones

Respecto al análisis de las características geotécnicas detectadas de los afloramientos adyacentes a las presas sitas en la Hoja Tandil 3760-VI, más precisamente ubicadas en la ciudad de Tandil, las rocas relevadas durante el presente trabajo fueron clasificadas en 5 zonas, las cuales fueron detectadas según las diferenciaciones determinadas primariamente en función de sus características litoestructurales a las cuales posteriormente se las caracterizó desde un enfoque geotécnico, es decir, se las caracterizó mecánica e hidráulicamente en función de su resistencia, su deformación y su permeabilidad.

La zona 1 comprende los bloques de rocas con signos de descomposición textural, cizallados, meteorizados (grado de alteración A4 o superior) y en algunos sectores completamente erosionados (Ver Figura 15 – página 46), con valores inferidos de RQD muy bajos a valores 0. Esta secuencia de bloques de roca de mala a muy mala condición geotécnica adyacentes con macizos en buena condición geomecánica en alternancia inmediata, constituyen los macizos bandeados y las zonas de cizalla o intenso fracturamiento que se observan en gran parte de las sierras en el área, pero más específicamente en las márgenes derecha de la presa Ramal H y de la futura presa Arroyo Blanco (Ver Figura 16 – página 45).

La zona 2 comprende las rocas masivas de los afloramientos de ambas márgenes de la presa Ramal H. Son rocas de buena condición geomecánica, frescas a decoloradas, poco alteradas, con bloques

delimitados por discontinuidades cuyas distancias varían entre 0,60 m y 2 metros, con diaclasas continuas, poco rugosas, sin relleno y sin alteración a decoloradas, que le confieren un grado de fracturamiento bajo (R.Q.D de valores altos). Esta secuencia de macizos constituye, junto con las rocas descriptas para la zona 1, los macizos bandeados mencionados.

La zona 3 reúne las rocas de la margen izquierda del Dique del Fuerte (Ver Figura 27 – página 55). Son rocas frescas, extremadamente duras y altamente diaclasadas. Las diaclasas se presentan discontinuas, muy rugosas, muy cerradas, sin relleno ni alteración y muy próximas, presentando un grado medio de fracturamiento tal que, en función del índice porcentual de R.Q.D., la calidad de roca dominante es regular (R.Q.D. < 75%).

La zona 4 corresponde a los afloramientos de macizo rocoso sitios en la margen derecha del Dique del Fuerte. Las rocas se observaron masivas, levemente alteradas y extremadamente duras, con diaclasas lisas, cerradas, de continuidad media a baja (según el set), y no presentan relleno, poseyendo en consecuencia buenas condiciones geomecánicas. El grado de fracturación es bajo y dado el espaciado entre las discontinuidades, se midieron valores de R.Q.D superiores a 75 % lo cual indica que la calidad de roca es buena.

La zona 5 integra rocas ligeramente alteradas, decoloradas, duras, con bloques tabulares limitados por discontinuidades cerradas, separadas, sin relleno, onduladas y de baja continuidad. En función del grado de fracturamiento, posee índices de R.Q.D = 70 % según la mayoría de las direcciones alcanzando en una de ellas valores del 100 %. Estas se observan en la margen derecha de la futura presa Arroyo Blanco.

En todos los casos, el grado de fracturamiento presenta orientación desfavorable respecto a la orientación de las obras, dado que las discontinuidades en general poseen una disposición subparalela o diagonal a los ejes de las presas, con planos de inclinación de alto ángulo y/o a 45 ° hacia aguas abajo.

A partir de la clasificación geotécnica de Bienawski (1989), aplicada a las cinco zonas definidas, fue posible estimar las características de resistencia, deformabilidad, y el comportamiento hidrogeológico de cada una de ellas.

Para el caso de la resistencia de los macizos rocosos, la misma *“es función de la resistencia de la matriz rocosa y de las discontinuidades (ambas extremadamente variables) y de las condiciones geoambientales a las que se encuentra sometido el macizo, como las tensiones naturales y las condiciones hidrogeológicas”*. (González de Vallejo et al, 2003)

Esto supone un obstáculo en la evaluación de la resistencia de los macizos rocosos ya que se debe tener en cuenta la presencia de “zonas tectonizadas, alteradas o de diferente composición litológica que originan zonas de debilidad y anisotropía con diferentes comportamientos y características resistentes”, como sucede en este análisis.

De este modo, se estimaron las resistencias estableciendo correlaciones entre las clases de calidad de roca según el índice RMR y los parámetros resistentes de salida C y  $\phi$  de macizo rocoso.

Asimismo, se realizaron correlaciones con los valores de los parámetros obtenidos de la clasificación, para aproximar las características deformacionales de los macizos.

Se presentan a grandes rasgos, dos macizos rocosos en zonas contrastantes como las que se han evaluado.

El macizo rocoso de la zona geotécnica 1 se ubica en la clase IV con valores RMR de 27, presentando características de calidad de roca mala a muy mala. Así las características de resistencia se definen por los parámetros de salida obtenidos, con valores de cohesión de 1 a 2 kgp/cm<sup>2</sup>, y ángulo de rozamiento interno bajo, de entre 15° a 25°.

En cuanto a la deformabilidad del macizo, se obtuvo un módulo de deformación genérico MD = 2,66 GPa (26.600 kg/cm<sup>2</sup>). En consecuencia, el macizo rocoso en el sector analizado presenta bajo valor portante y sujeto a alta deformación, siendo que la permeabilidad inferida es muy alta dada la existencia de bloques muy alterados, incluso altamente erosionados. Por ello se determina que el mismo debería ser excavado a los fines de la fundación de una presa.

El macizo rocoso de las zonas geotécnicas 2, 3, 4 y 5, posee buenas características geotécnicas al objeto de su utilización como roca de fundación. Así se han determinado valores RMR entre 60 y 68, perteneciendo todas a la Clase II, lo cual indica una calidad geotécnica de roca buena. Así, en cuanto a la resistencia estimada, presentan un valor de cohesión = 3 a 4 kgp/cm<sup>2</sup> y un ángulo de rozamiento interno = 35° a 45°.

Para cada zona se obtuvieron valores de módulo de deformación genérica (MD), resultando MD = 34 GPa (340.000 kg/cm<sup>2</sup>) para la zona 2, MD = 36 GPa (360.000 kg/cm<sup>2</sup>) para la zona 3, MD = 30 GPa (300.000 kg/cm<sup>2</sup>) para la zona 4 y MD = 20 GPa (200.000 kg/cm<sup>2</sup>) para la zona 5.

Las discontinuidades presentes en las rocas descritas se encuentran representadas por la presencia de más de tres familias de discontinuidades, al menos superficialmente. El rumbo general de las discontinuidades responde a las direcciones de los tres dominios tectónicos descritos por Teruggi et al., a saber, E-W, NE-SO y NO-SE, siendo que las inclinaciones dominantes de estas discontinuidades son mayores a 45° llegando en gran medida a subverticales.

Superficialmente existe un cuarto juego horizontal a subhorizontal de discontinuidades. Las mismas desaparecen rápidamente en profundidad según datos recabados de los testigos de rocas obtenidos de perforaciones oportunamente realizadas en el sector de la presa Ramal H (Giaconi, 2009). La presencia de estas discontinuidades subhorizontales determinan un elemento de desestabilización mecánica por la facilidad de desplazamiento del macizo a través de dichos planos ante esfuerzos críticos. Esta situación de inestabilidad mecánica deberá ser remediada mediante la adopción de anclajes e inyecciones cementíceas o, debido a su ubicación superficial, deberá ser excavada a los fines de fijar una superficie de apoyo de obras de ingeniería en planos sitios a mayor profundidad por debajo de la zona de pertenencia de estas discontinuidades subhorizontales producidas por un estado tensional de relajamiento del macizo rocoso.

En general, se puede concluir que las rocas parametrizadas en el presente estudio y nominadas como zonas 2 a 5, poseen una capacidad portante media a alta siendo que la excavación de los taludes se deberá realizar mediante voladuras pudiéndose adoptar altas pendientes en los taludes de dichas excavaciones, dadas las inclinaciones de alto ángulo de las discontinuidades descriptas.

Distinto es el caso del macizo rocoso descrito como zona 1. En él la roca presenta baja resistencia y alta deformación por lo que, amén de la permeabilidad inferida que pudiera poseer, dichas rocas deberán ser excavadas en el caso de poder ser objeto de fundaciones. Dada la baja resistencia de las rocas en el sector, la excavación de las mismas se podrá realizar con medios mecánicos.

Ex profeso ha quedado para la finalización de estas conclusiones la cuestión de la determinación del comportamiento hidráulico. Si bien la aplicación de la clasificación geomecánica RMR (Bieniavski, 1989) determina una calificación numérica relativa en su quinto parámetro (Presencia de agua superficial), en la fase de prefactibilidad como la desarrollada en el presente trabajo, la carencia de ejecución de estudios básicos directos (perforaciones, calicatas, trincheras, ensayos in situ) inhibe la determinación cuantitativa del mismo, cuestión que deberá ser efectivamente atendida en las fases de factibilidad y de proyecto ejecutivo.

Conceptualmente y en relación al comportamiento hidrogeológico de los macizos rocosos, la permeabilidad de los mismos y la presión intersticial de agua que circula por las discontinuidades, son los dos parámetros más importantes a tener en cuenta. Los valores de las presiones ejercidas dentro del macizo pueden variar la velocidad dependiendo de la facilidad de circulación de agua en las discontinuidades.

La determinación de las características permeables del macizo rocoso se torna compleja debido a la anisotropía que implica la variabilidad existente en zonas próximas dentro del mismo macizo rocoso, lo cual ratifica geotécnicamente el carácter conceptual de comportamiento discontinuo, anisótropo y

heterogéneo que poseen los macizos rocosos. Dicho comportamiento se encuentra muy bien representado en el macizo de la zona geotécnica 1 dado por la existencia de una matriz rocosa de dispares características resistentes y por la presencia de hasta cuatro familias de discontinuidades, todo lo cual determina la aleatoria presencia de zonas meteorizadas, alteradas a lo que debe agregarse la presencia de fallas cortantes localizadas según información antecedente (Giaconi, 2009), etc.

La permeabilidad de un macizo con matriz rocosa compacta, de baja o nula permeabilidad intrínseca, como es el caso de las zonas geotécnicas 2, 3, 4 y 5 se encuentra determinada por la intensidad de la fracturación, la interconexión de los distintos juegos o familias de discontinuidades y la permeabilidad intrínseca de las mismas dado por el grado de abertura, presencia y calidad del relleno, continuidad, etc.

Así, en un proyecto de ingeniería, se evalúa la permeabilidad in situ. Para ello se llevan a cabo ensayos de campo Lugeon. Los mismos constituyen ensayos hidráulicos normalizados internacionalmente por normas ASTM y homologados por el ISRM. En nuestro país se encuentran normalizados por normas IRAM. Estos ensayos se realizan en perforaciones geotécnicas en intervalos no mayores de cinco metros y en tramos dispuestos de manera consecutiva hasta el final de cada perforación. En estas pruebas de inyección se introducen en la formación ensayada, a presiones variables ascendentes y descendentes durante un tiempo de 10 minutos en cada intervalo de presión, volúmenes de agua que, interpretados, indican el comportamiento hidráulico del macizo rocoso en el sitio de ensayo proporcionando mediante fórmulas y relaciones simples (Houlsby, 1976) el valor de K (permeabilidad).

Dichos ensayos poseen carácter puntual debido al comportamiento discontinuo, anisótropo y heterogéneo ya mencionado de los macizos rocosos por lo que en su interpretación deben aunarse no sólo criterios hidráulicos, ensayo Lugeon mediante, sino también criterios geológicos y demás criterios geotécnicos para la dilucidación del comportamiento del macizo rocoso.

Por último, los estudios desarrollados en el presente trabajo trataron de demostrar que es posible avanzar, a nivel de prefactibilidad, en la caracterización, el estudio y la parametrización geotécnica de macizos rocosos a los fines de la hipotética fundación de presas con los elementos usuales y cotidianos de nuestro quehacer operativo. Así todo el presente trabajo se realizó, amén de las lecturas de la bibliografía y trabajos antecedentes, a través de una práctica de campo donde se aplicaron los conceptos fundamentales aprendidos a lo largo la carrera y donde los elementos utilizados fueron el martillo geológico, la brújula geológica, una lupa de bolsillo y una cinta métrica.

Los resultados y conclusiones así obtenidos demuestran taxativamente en la práctica la viabilidad de la metodología desarrollada para el presente nivel de prefactibilidad.

Finalmente, en base a las conclusiones expuestas, en el caso de la futura presa del Arroyo Blanco, será posible seguir desarrollando metodológicamente y en profundidad las fases posteriores (factibilidad y proyecto ejecutivo) de este hipotético proyecto adoptando los elementos devenientes, operativos y presupuestarios, para la consecución de dichos estadios: estudios y ensayos directos de campo y laboratorio de auscultación geotécnica y trabajos de gabinete con utilización de softwares específicos a los fines de determinar los parámetros geotécnicos de proyecto con toda precisión.

## 8. Bibliografía

Auge, M. P. 2003. *Regiones hidrogeológicas: República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza, Santa Fe*. CONICET. La Plata.

Barranquero, R.; Ruiz de Galarreta, A.; Varni, M. y Banda, R. *Evaluación preliminar de nitratos en la cuenca del arroyo Langueyú, partido de Tandil, Buenos Aires*. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea Salta, Argentina, 2011.

Barton, N., y Grimstad, E. 2000. *El sistema Q para la selección del Sosténimiento en el método noruego de Excavación de túneles*. López-Jimeno, M, 1-41.

Barton, N.; Lien, R, y Lunde, J. 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics. Springer Verlag, vol. 6 pp 189-236

Bieniavski, Z.T. 1973. *Engineering classification of jointed rock masses*. Transactions. South African Inst. Of Civil Engineers. vol. 15, n° 12, pp 335-344

Bieniavski, Z. T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons, Inc

Busso, A.A. y Amato, S.D. 2012. *Aspectos hidrogeológicos de la región periserrana de Tandilia* (Buenos Aires, Argentina). Boletín Geológico y Minero, 123 (1): 27-40

Cortelezzi, C.R. y Rabassa, J. 1976. *Contribución al conocimiento de la geología del área del Cerro Tandileufú, Tandil, Buenos Aires*. VI CONGR GEOL ARGENTINA 1975, SCI PUBL, 1, 475.

Dalla Salda, L. H. e Iñiguez Rodriguez, A. M. 1979. *La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires*. 7 Congreso Geológico Argentino, 1: 539-550, Neuquén.

Dalla Salda, L. (1981). Tandilia, un ejemplo de tectónica de transcurrancia en basamento. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 36(2), 204-207

Dalla Salda, L.; Franzese, J. y Posadas, V. 1992. The 1800 m. y. Mylonite anatetic granitoid association in Tandilia, Argentina. R. Mason (Ed.), *Basement Tectonics*, 7, 161-174, Kluwer Academic Publishers. Canadá.

Dalla Salda, L. H.; De Barrio, R. E.; Echeveste, H. y Fernández, R. 2005. *El basamento de las Sierras de Tandilia*. En de Barrio, R. E., Etcheverry, R., Caballé, M. F. y Llambías E. J. (eds.), *Geología y*

Recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires, Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Argentina. Pág. 32-50.

Dearman, W.R., Sergeev, E.M., & Shibakova, V.S. 1989. *Engineering geology of the Earth*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 40(1), 130-131.

Deere, D.U. y Miller, R.P. 1966. *Engineering classification and index properties for intact rock*. Illinois Univ At Urbana Dept Of Civil Engineering.

Dalla Salda, L. H.; Spalletti, L.; Poiré, D.; De Barrio, R. E.; Echeveste, H. y Benialgo, A. 2006. *Tandilia. Temas de Geología Argentina I*. INSUGEO, Serie Correlación Geológica, 21: 17-45.

Fidalgo, F., De Francesco, F. y Colado, U.R. 1973. *Geología superficial en las hojas Castelli, J. M. Cobos*. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 27-3, Carlos Paz.

Fidalgo F.; De Francesco F. y Pascual, R. 1975. *Geología superficial de la llanura bonaerense*. Relatorio del VI Congreso Geológico Argentino. Pág. 103-108.

Fidalgo, F.; Riggi J. C.; Gentile R. O.; Correa H. A. y Porro N. 1991. *Los "Sedimentos Postpampeanos" continentales en el ámbito sur bonaerense*. Asociación Geológica Argentina, Revista, XLVI (3-4): 239-256.

Frenguelli, J. 1955. *Loess y limos pampeanos*. Univ. Nac. de la Plata, Facultad de Cs. Naturales y Museo, Serie Técnica y Didáctica N° 7. La Plata.

Fuentes, J. G. 1970. *Significado de las novedades petrológicas del Basamento Cristalino de Olavarría, Prov. de Buenos Aires, República Argentina*. Revista de la Asociación Geológica Argentina.

Fucks E. E. y Deschamps C. M. 2008. *Depósitos continentales cuaternarios en el noroeste de la provincia de Buenos Aires*. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (3): 326–343.

Giaconi, L. M. y Ruiz de Galarreta, V. A. 1995. *Plan de Ordenamiento hídrico, Faldeo Norte de Sierras de Tandilia*. Inédito.

Giaconi L. M. 2005. *Aspectos geoambientales de Tandil – vulnerabilidad del acuífero freático y sus implicancias ambientales*. Relatorio del XVII Congreso Geológico Argentino.

Giaconi L. M. 2009. *Presa de laminación de crecidas Ramal H, Tandil. Informe preliminar de Geología y geotecnia*. Inédito.

Giaconi, L. M.; Guichón, M.; Giordano, R. y Cumba, A. 2009. “*Criterios conceptuales del análisis geotécnico de macizos rocosos utilizados para la construcción de una presa de gravedad en hormigón en la cuenca del Ramal H (Tandil)*”. IV Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología – II Reunión del Cuaternario de América del Sur. La Plata. Págs. 536–544. ISBN 978-950-34-0597-0.

Giaconi L. M.; Calvetty Amboni, B.; Giaconi, M. N. 2012. “*Aspectos geológicos geotécnicos preliminares de la presa del A° Blanco. Tandil, (Prov. de Buenos Aires)*”. Resumen. 10° Simposio ASAGAI. Villa Carlos Paz (Córdoba). 2 págs.

Giaconi L. M., Calvetty Amboni, B. y Giaconi, M. N. 2014. *Aspectos geológicos y geotécnicos preliminares de la fundación de la presa del arroyo Blanco, Tandil*. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N° 32 pág. 31-52.

Gomez Samus M., Rico Y. y Bidegain J. C. 2014. *Estratigrafía y magnetoestratigrafía de la cobertura neógeno - cuaternaria del sector central de Tandilia*. Revista Ciencia y Tecnología de los Materiales, Nro 4.

González, N. 2005. *Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires*. XVI Congreso Geológico Argentino: Relatorio, Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires Universidad de La Plata. Asociación Geológica Argentina. Pág. 359–374.

González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C. 2003. *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson. ISBN 84-205-3104-9.

Hernández, M.A. 1975. *Efectos de la sobreexplotación de aguas subterráneas en el Gran Buenos Aires y alrededores, República Argentina*. In Actas II Congreso Iberoamericano de Geología Económica I (pp. 435-456).

Hoek, E. 1994. *Strength of rock and rock masses*. News Journal of International Society for Rock Mechanics , Volume 2 , Number 2; Page(s) 4 To 16

Houlsby, A.C. 1976. *Routine interpretation of the Lugeon water-test*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 9(4), 303-313.

- Iñiguez, M.; del Valle, A.; Poiré D.; Spalletti L. y Zalba P. 1989. *Cuenca Precámbrica /Paleozoica de la provincia de Buenos Aires*. En: Cuencas sedimentarias argentinas (G. Chebli y L. Spalletti Eds.) Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 6: 245-263.
- ISMR. 1981. *Rock caracterizacion. Testing and monitoring. ISRM suggested methods*. Brown, E. T. Ed. Commission on testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press.
- Kruse, E. y Laurensena, P. 2005. "Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento." Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. Editores: de Barrio R., Etcheverry R, Caballe M. y E. Llambías Cap. XIX: 313–326. La Plata. Argentina.
- LEMIT/MOP, S. g. d. 1975. *Mapa geológico de la provincia de Buenos Aires*. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires.
- Manassero, M.S. 2019. *Identificación y caracterización de ambientes hidrogeológicos en Tandil y alrededores (Hoja Tandil 3760- IV)*. Trabajo Final de Licenciatura. Univ. Nac. La Plata, Fac. Ciencias Naturales y Museo.
- Marinos, P. y Hoek, E. 2000. *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. In ISRM international symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Nágera, J. 1940. *Historia Física de la Provincia de Buenos Aires, 1. Tandilia*. Univ. Nac. La Plata, Fac. Human. Cienc. Educ., La Plata.
- Palmstrøm, A. 1975. *Characterization of degree of jointing and rock mass quality*. Intern. Report Ing. AB. Berdel, AS Oslo.
- Pereyra, F.X. 2018. *Geomorfología de la Provincia de Buenos Aires*. Serie Contribuciones técnicas, ordenamiento territorial N°9. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. SEGEMAR.
- Rabassa, J. 1973. *Geología superficial en la hoja " Sierras de Tandil", prov. de Buenos Aires*. In Anales LEMIT. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT).
- Ramírez Oyanguren, P. y Alejano Monge, L. R. 2004. *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Universidad Politécnica de Madrid.

Ramos, V. 1999. *Rasgos estructurales del territorio argentino. 1. Evolución tectónica de la Argentina*. En Geología Argentina (R. Caminos Ed.). Inst. Geol. y Rec. Min. SEGEMAR. Bs. As., An. 29 (4): 715-759.

Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R. 2005. *Geohidrología y evaluación de nitratos del Partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina*. IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Octubre 2005. UNCR. Río Cuarto, Córdoba. pp. 99-108.

Ruiz de Galarreta, A., Varni, M., Banda Noriega, R. y Barranquero, R. (2007). *Caracterización geohidrológica preliminar en la cuenca del arroyo Langueyú, Partido de Tandil, Buenos Aires*. V Congreso Argentino de Hidrogeología (Díaz, E.L., Tomás, J.R., Santi, M., D'Elía, M. y DallaCosta, O., Compiladores), Asociación Internacional de Hidrogeólogos. ISBN 978-987- 23936-3-2. pp. 119-128.

Ruiz de Galarreta, V. A., Banda Noriega, R. B., Najle, R., Rodríguez, C. I., Barranquero, R. S., Díaz, A. A. y Priano, M. E. 2013. *Análisis de la calidad del agua del arroyo Langueyú, Tandil, Buenos Aires*. Revista de Estudios Ambientales del Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales, Fac. de Ciencias Humanas, UNICEN. Vol 1 - N° 1.

Sala, J.M. y Cavalié, C.C. 1993. *Contribución al mapa geohidrológico de la provincia de Buenos Aires*.

Serafim, J. L. y Pereira, J.P. 1983. *Considerations of the geomechanical classification of Bienanwski*. Proc. Int. Sympo. On Eng. Geol. And Underground Construction. Lisbon. Balkema.

Silva Busso A.A. y Amato S. D. 2012. *Aspectos hidrogeológicos de la región periserrana de Tandilia (Buenos Aires, Argentina)*. Boletín Geológico y Minero, 123 (1): 27-40

Suarez Burgoa, L. O. 2013. *Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterráneas*. Facultad de Minas.

Tchilinguirian P.; Tello N.; Cavallaro S. y Fratalocci C. 2004. *Carta de Línea de Base Ambiental 3760-IV. Tandil, Provincia de Buenos Aires*. Boletín N.º 341. SEGEMAR, IGRM.

Teixeira, W., Pinese, J. P. P., Iacumin, M., Girardi, V. A. V., Piccirillo, E. M., Echeveste, H., ... & Heaman, L. M. 2002. *Calc-alkaline and tholeiitic dyke swarms of Tandilia, Rio de la Plata craton*,

*Argentina: U–Pb, Sm–Nd, and Rb–Sr 40Ar/39Ar data provide new clues for intraplate rifting shortly after the Trans-Amazonian orogeny.* Precambrian Research, 119(1-4), 329-353.

Teruggi, M. y Kilmurray, J. 1975. *Tandilia*. Relatorio. Geol. Pcia de Bs As. VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca.

Teruggi, M. E., y Kilmurray, J. O. 1980. *Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires*. Geología Regional Argentina, 2, 919-956.

Teruggi, M.E., Mauriño, V., Limousin, T., y Schauer, O. 1962. *Geología de la porción oriental de las Sierras de Tandil*. Primeras Jornadas Geológicas Argentinas, 2, 359-372.

Teruggi, M.E., Mauriño, V., Limousin, T., y Schauer, O. 1958. *Geología de las Sierras de Tandil*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 13(3), 185-204.

Teruggi, M.E., Kilmurray, J. O., & Dalla Salda, L. 1973. *Los dominios tectónicos de la región de Tandil*. In Anales Sociedad Científica Argentina (Vol. 295, No. 1-2, pp. 81-94).

Thornthwaite, C.W. y MATHER, J.R. 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Laboratory of Climatology, Publication núm. 10. Centertown, N. J

Tricart, J. 1973. *Geomorfología de la Pampa Deprimida: base para los estudios edafológicos y agronómicos* (No. 551.45 631.478212). Secretaría de Estado de Agricultura y Ganadería de la Nación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Vidal Romani, J.R. y Rowland Twidale, C. 2005. *Landforms and geology of granite terrains*. CRC P

Zetti, J.; Tonni, E.P. y Fidalgo, F. 1972. *Algunos rasgos de la geología superficial en las cabeceras del Arroyo del Azul (Provincia de Buenos Aires)*. Etnia, 15, 6-11.