



INTITUTO SUPERIOR MINERO
METALURGICO DE MOA

Dr. Antonio Núñez Jiménez

Facultad Geología- Minas



Empresa Nacional
de Investigaciones Aplicadas
Ministerio de la
Construcción.

Tesis presentada

en opción al Título de Académico de

Master en Geología

mención

Geotecnia e Hidrogeología

Título: Evaluación geotécnica del empleo de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, como terreno base de cimentaciones.

Autor: Ing. Leonel Rodríguez González.

Tutor: Msc. José Alejandro Carmenate Fernández.

Moa, 2016

“Año 58 de la Revolución”

DEDICATORIA

A mi madre, mi padre, mi hermano y familia en general, por permitirme alcanzar, gracias a todo su amor, sacrificio y apoyo, uno de mis sueños más deseados.

A mí querida esposa, por todo su amor, comprensión y ayuda, especialmente en los momentos en que más la necesitaba.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS todo poderoso, por darme la fuerza, la voluntad y la constancia suficiente para sobreponerme a las innumerables dificultades enfrentadas y conseguir realizar esta tesis...

A toda mi familia, especialmente a mis padres, hermanos, primos y tíos por todo su cariño y ayuda...

A mí querida esposa por toda su paciencia, asistencia y comprensión...

A todos mis amigos y compañeros de trabajo del Equipo de Investigaciones para la Construcción ENIA Ciego de Ávila, por su colaboración, consejos y aportes, en especial a: Tomás Fernández Yañez, Yuri Cruz Méndez, Yuniel Chaviano y Eider del Rio Saud....

A mi tutor Msc. José Alejandro Carmenate Fernández por su amistad y acertados consejos en la realización de este trabajo.....

Finalmente a todos aquellos que en su momento y de diferentes maneras, han contribuido a mi formación como master en ciencias y a llevar a cabo esta investigación.

*Cuando las cosas vayan mal como a veces pasa,
Cuando el camino parezca cuesta arriba,
Cuando tus recuerdos mengüen y tus deudas suban,
Y al querer sonreír solo suspiras.
Cuando tus preocupaciones te tengan agobiado,
Descansa si te urge, pero no te rindas.*

*Así que no te rindas, aunque el paso sea lento,
El triunfo puede estar a la vuelta de la esquina,
El triunfo es el fracaso al revés.
Por eso, decídete a luchar, sin duda,
Porque en verdad,
Cuando todo empeora, el que es valiente,
No se rinde, ¡Lucha!*

Pablo Neruda.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal, evaluar las propiedades y el comportamiento geotécnico de las rocas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, para valorar su capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones.

Para su realización se efectuó una recopilación y revisión de toda la información disponible sobre los estudios relacionados con el tema de esta investigación, sobre la geología del territorio objeto de análisis y sobre la presencia de las rocas de la Formación Jaimanitas en este. Posteriormente se realizaron varias actividades y trabajos de campo complementarios, para la verificación de la información recopilada y la obtención de otros datos de interés. Una vez ejecutadas estas acciones se procesó toda la información alcanzada, elaborando una serie de tablas y mapas temáticos que se usaron junto a otras informaciones, para el razonamiento de los resultados de esta investigación.

A partir de la información procesada se identifican y caracterizan los principales fenómenos físicos y geológicos que afectan la capacidad de empleo de las rocas tratadas como base de cimentaciones. Se describen los estratos ingeniero geológicos que constituyen a la formación estudiada, considerando la evaluación de sus propiedades geotécnicas. Se determina el caso característico de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), para las rocas de esta formación. Por último, atendiendo al comportamiento de los parámetros ingenieros geológicos de dichas rocas, se valora su capacidad de empleo como terreno base para el emplazamiento de distintas variantes de cimentación.

SUMMARY

The present work has as main objective, to evaluate the properties and the behavior geotechnical of the rocks of the Formation Jaimanitas in Key Guillermo, to value its employment capacity as land base of foundations.

For their realization it was made a summary and revision of all the available information on the studies related with the topic of this investigation, on the geology of the territory analysis object and on the presence of the rocks of the Formation Jaimanitas in this. Later on they were carried out several activities and complementary fieldworks, for the verification of the gathered information and the obtaining of other data of interest. Once executed these actions all the reached information was processed, elaborating a series of charts and thematic maps that were used next to other informations, for the reasoning of the results of this investigation.

Starting from the processed information they are identified and they characterize the physical and geologic main phenomena that affect the capacity of employment of the rocks tried as base of foundations. The geologic strata engineer are described that constitute to the studied formation, considering the evaluation of their properties geotechnical. The characteristic case of calculation is determined from the gross pressure of resistant break to the stability of the base of a foundation (q_{br}), for the rocks of this formation. Lastly, assisting to the behavior of the parameters geologic engineers of this rocks, their employment capacity is valued as land it bases for the location of different foundation variants.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1. DETERMINACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLOGICA DE CAYO GUILLERMO.....	5
Introducción al capítulo.....	5
1.1. Análisis sobre el desarrollo de las investigaciones ingenieras geológicas y geotécnicas.....	5
1.2. La evaluación geotécnica del terreno para la realización de diseños geotécnicos de cimentaciones.....	9
1.3. Evaluación del grado de estudio geológico e ingeniero geológico de la Formación Jaimanitas.....	14
1.4. Criterios sobre la evaluación estadística de los datos.....	16
1.5. Situación geográfica de Cayo Guillermo.....	17
1.6. Condiciones climáticas.....	17
1.7. Fauna.....	19
1.8. Flora.....	20
1.9. Criterios de interés oceanográfico.....	21
1.10. Características geológicas generales.....	22
1.11. Tectónica.....	29
1.12. Geomorfología.....	31
1.13. Hidrogeología.....	34
1.14. Conclusiones parciales.....	36
CAPITULO 2. METODOLOGÍA Y VOLUMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS PARA LA INVESTIGACIÓN.....	38
Introducción al capítulo.....	38
2.1. Etapa de recopilación y revisión de la información existente.....	38
2.2. Etapa de ejecución de trabajos complementarios.....	41
2.3. Etapa de procesamiento de la información obtenida.....	45
2.4. Etapa de interpretación de los resultados.....	55
2.5. Conclusiones parciales.....	58
CAPITULO 3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL EMPLEO DE LA FORMACIÓN JAIMANITAS EN CAYO GUILLERMO, COMO BASE DE CIMENTACIONES.....	60
Introducción al capítulo.....	60
3.1. Identificación y caracterización de los fenómenos físicos y geológicos que afectan a las rocas de la Formación Jaimanitas, como terreno base de cimentaciones.....	60
3.2. Descripción de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo a partir de la evaluación de sus propiedades geotécnicas.....	71
3.3. Determinación del caso característico de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (qbr), para rocas de la Formación Jaimanitas.....	78
3.4. Valoración del empleo de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones en Cayo Guillermo.....	81
3.5. Conclusiones parciales.....	92
CONCLUSIONES.....	94
RECOMENDACIONES.....	95
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

En el marco del desarrollo vertiginoso que experimenta actualmente el polo turístico de "Jardines del Rey", situado al Norte de la central provincia de Ciego de Ávila, en el territorio de Cayo Guillermo se viene efectuando y se prevé continuar desarrollando un amplio proceso inversionista encaminado a incrementar considerablemente las capacidades y ofertas hoteleras y extrahoteleras disponibles. Con el fin de garantizar la estabilidad y seguridad de cada una de las edificaciones emplazadas, se han realizado independientemente varias investigaciones ingeniero geológicas para determinar y esclarecer las propiedades y el comportamiento geotécnico de los diferentes terrenos donde se ubican tales construcciones, constituyendo el aspecto más crítico de las mismas, la determinación del estrato ingeniero geológico que pueda ser utilizado como terreno base de cimentaciones.

En un sentido amplio Cayo Guillermo constituye una pequeña isla de aproximadamente 13.28 km² de extensión, con una edad geológica joven correspondiente específicamente al cuaternario. El mismo se halla constituido superficialmente por varios conjuntos litológicos, con características y comportamientos ingeniero geológicos diferentes. Dichos conjuntos litológicos se encuentran representados básicamente por los sedimentos correspondientes a los Depósitos Marinos del Holoceno (**Q₄m**) ya los Depósitos Palustres (**Q₄p**) de la misma época geológica. Igualmente se reconoce la existencia de las biocalcarenitas oolíticas-pseudoolíticas y calizas biodetríticas de la Formación Cayo Guillermo (**Q₃cgu**), las calcarenitas débilmente litificadas de la Formación Los Pinos (**Q₄lpi**) y las calizas y calcarenitas de la Formación Jaimanitas (**Q₃js**).

Debido a sus condiciones de yacencia y amplia extensión, en la mayor parte de las investigaciones ingenieras geológicas efectuadas en el territorio se caracteriza y evalúa el comportamiento de las rocas de la Formación Jaimanitas (**Q₃js**), siendo las mismas según los resultados de los estudios efectuados, las que mejor comportamiento geotécnico muestran y las que usualmente son utilizadas y aprovechadas como terreno base de cimentaciones. A pesar del nivel de estudio existente, los trabajos efectuados se han enfocado en dar respuesta a las situaciones problemáticas particulares para las cuales han sido solicitados y hasta el momento no se han estudiado tales rocas con un enfoque integrador que permita alcanzar una evaluación general del comportamiento geotécnico de dichas rocas como un único elemento o tipo ingeniero geológico en toda su extensión, de modo tal que se pueda establecer un criterio regional que permita valorar sus potencialidades como terreno base de cimentaciones, para la construcción de las venideras edificaciones que se proyectan ejecutar en dicho territorio.



A partir de la recopilación de todos los datos referentes a las propiedades físicas y mecánicas de las rocas mencionadas, obtenidos mediante la realización de descripciones de campo, pruebas geotécnicas in situ y ensayos de laboratorio ejecutados en investigaciones ingenieras geológicas previas y el ulterior tratamiento estadístico de esa información, en el presente trabajo se profundiza en el estudio del comportamiento de cada una de las propiedades tratadas y se efectúa una evaluación de las mismas. Una vez realizada la caracterización y evaluación general de las principales propiedades geotécnicas de las rocas de la Formación Jaimanitas (Q_{3js}), se valora su capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones para la construcción de las futuras edificaciones que se prevén emplazar en el territorio analizado, a fin de optimizar las nuevas investigaciones ingeniero geológicas que se efectúen y establecer un criterio de medida que le permita a las diferentes entidades relacionadas con el proceso inversionista, tomar decisiones acerca de la factibilidad constructiva y modo de cimentar dichas obras.

Como **antecedente del problema científico** a resolver en este trabajo, se examinó el hecho de que *en las investigaciones ingenieras geológicas que se han ejecutado hasta la actualidad en Cayo Guillermo, se han caracterizado y evaluado en su mayoría, el comportamiento de las rocas de la Formación Jaimanitas (Q_{3js}) puntualmente. Dichos trabajos han sido orientados a dar respuesta a las situaciones problemáticas particulares para los cuales han sido solicitados, enmarcando su alcance a pequeñas áreas en función de la complejidad y extensión de las obras ingenieras proyectadas. De esta manera no se ha podido establecer una evaluación general del comportamiento geotécnico de dichas rocas en todo el territorio tratado, que incluya la identificación y caracterización de los principales fenómenos físicos y geológicos que la afectan y deterioran su capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones.*

Atendiendo a la situación existente, se reconoce que el **problema científico** al cual debe responder este trabajo, lo constituye: *la necesidad de realizar una evaluación de las propiedades y el comportamiento geotécnico de las rocas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, que permita valorar su capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones.*

Para ello se define como **objeto de esta investigación**: *la evaluación geotécnica de las propiedades y el comportamiento de las rocas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo.* Constituye el **campo de acción de la investigación**: *las propiedades y comportamiento geotécnico de las rocas.*

La novedad científica que presenta este trabajo está dada en el hecho de que por primera vez, a partir de todo el volumen de información ingeniera geológica existente sobre la formación



geológica mencionada, se realiza un estudio de la misma con un enfoque integrador que permita alcanzar una evaluación general de su comportamiento geotécnico como un único elemento o tipo ingeniero geológico en toda su extensión, de manera que se pueda valorar su capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones en el territorio.

A partir de lo expuesto hasta el momento se establece que el **objetivo general** de la investigación es: *evaluar las propiedades y el comportamiento geotécnico de las rocas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, para valorar su capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones.*

Para su realización se determinan los **objetivos específicos** relacionados a continuación:

- *Caracterizar los principales fenómenos físicos y geológicos que afectan a las rocas objeto de evaluación.*
- *Evaluar las propiedades físicas y mecánicas que caracterizan el comportamiento geotécnico de las rocas tratadas.*
- *Valorar la capacidad de empleo de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo como terreno base de cimentaciones.*

Teniendo en cuenta los aspectos metodológicos definitivos, se establece como **hipótesis de investigación** el planteamiento siguiente: *si se realiza una correcta evaluación de las propiedades y el comportamiento geotécnico de las rocas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, entonces se podrá valorar satisfactoriamente su capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones.*

A partir del diseño metodológico establecido para el desarrollo de este estudio, se considera que los **resultados que se pueden esperar** del mismo, se resumen en los aspectos que se muestran a continuación:

- *Análisis estadístico de las propiedades que caracterizan el comportamiento geotécnico de las rocas tratadas y evaluación de su comportamiento geotécnico en todo el territorio de Cayo Guillermo.*
- *Identificación y caracterización de los principales fenómenos físicos y geológicos que afectan y deterioran la capacidad de empleo de la roca tratada, como terreno base de cimentaciones en el territorio.*
- *Obtención de un mapa ingeniero geológico de Cayo Guillermo.*



- *Evaluación geotécnica del empleo de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, como terreno base de cimentaciones de las futuras edificaciones a emplazar.*
- *Elaboración de un plano de conveniencia constructiva del uso de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, como terreno base de cimentaciones.*



CAPITULO 1. DETERMINACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLOGICA DE CAYO GUILLERMO

Introducción al capítulo

El conocimiento del estado actual de los criterios teóricos existentes sobre las evaluaciones geotécnicas de los distintos tipos de terrenos, especialmente los constituidos por rocas, es de vital importancia para valorar adecuadamente el nivel de su aprovechamiento como bases de cimentaciones para la construcción de obras civiles, de ahí que en esta investigación se le preste particular interés al reconocimiento de los mismos. De manera semejante por la relevancia que posee, en el presente capítulo se realiza una caracterización de las particularidades geográficas y geológicas generales que distinguen a Cayo Guillermo, como territorio objeto de estudio. Para la ejecución de dichas acciones, se efectuó una profunda revisión bibliográfica de toda la documentación disponible, relacionada con los temas mencionados, tomando en consideración su actualidad y nivel de aplicación. Dentro de la información revisada se le dedicó especial interés, a los informes técnicos resultantes de la ejecución de las investigaciones ingeniero geológicas efectuadas por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en el territorio, identificando todos los datos relacionados con la caracterización de las rocas de la Formación Jaimanitas y los sectores que esta constituye.

1.1. Análisis sobre el desarrollo de las investigaciones ingenieras geológicas y geotécnicas

La corteza terrestre constituye el espacio de soporte natural donde el hombre, a lo largo de su historia, ha desarrollado y realizado las diferentes obras ingenieras y edificaciones que han marcado su evolución como civilización y contribuido a su progreso. Debido a la heterogeneidad de su constitución y estructura, además de la variedad de procesos geológicos que sobre la misma actúan, se hace necesario estudiar geológicamente los terrenos donde se situarán las diferentes construcciones, independientemente de sus dimensiones y complejidad.

En un sentido amplio según la bibliografía consultada, la ingeniería geológica es en su mayor parte la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas de la ingeniería (González de Vallejo, 2002), originados como consecuencia de la interacción de las obras constructivas desarrolladas por el hombre y el medio geológico donde el mismo decide emplazarlas. El fin de la ingeniería geológica según el mismo autor citado, es asegurar que los factores geológicos condicionantes de las obras de ingeniería sean tomados en cuenta he interpretados adecuadamente, con el objetivo de que sea asegurada la estabilidad y durabilidad de las edificaciones erigidas.

“El desarrollo que alcanzaron otras ciencias afines, como la mecánica del suelo y mecánica de rocas, configuraron los principios de la moderna geotecnia, dentro de la cual la ingeniería geológica representa la visión más geológica a la solución de los problemas constructivos. En la geotecnia se integran las técnicas de ingeniería del terreno aplicadas a las cimentaciones, refuerzo, sostenimiento, mejora y excavación del terreno y las citadas disciplinas de la mecánica del suelo, mecánica de rocas e ingeniería geológica” (González de Vallejo, 2002).

Desde los albores de la humanidad, el hombre ha aprendido paulatinamente a partir de numerosas experiencias prácticas, a enfrentarse a los diferentes problemas de ingeniería que se le han presentado en la construcción de las distintas obras que ha creado para satisfacer sus necesidades cada vez más crecientes. Los constructores de las antiguas civilizaciones como la babilónica, la egipcia o las correspondientes a los pueblos que habitaban en América en tiempos precolombinos, han dejado numerosos ejemplos que muestran la habilidad que tuvieron para tratar con los problemas relacionados con el terreno donde emplazaron sus emblemáticas edificaciones, muchas de las cuales aún se conservan en buen estado. A medida que la humanidad continuó desarrollándose, muchos de estos conocimientos fueron perfeccionándose, sin embargo, desde el siglo XVIII la necesidad de mejores construcciones obligó a los científicos e ingenieros a estudiar los problemas del terreno y tratar de analizarlos como cualquier otro problema estructural.

Según Sowers y Sowers (1972), “algunos eminentes investigadores como Coulomb y Rankine, bien conocidos en el campo de la física y la mecánica aplicada, prestaron atención a la mecánica de las masas de tierra. El tremendo incremento en el tamaño de las estructuras que se produjo al iniciarse el siglo XX y la necesidad de hacer su construcción más económica, obligó a muchos ingenieros destacados a revisar los trabajos de los primeros investigadores y a desarrollar métodos nuevos y más realistas de análisis de las masas de suelos ” y rocas.

De acuerdo a González de Vallejo (2002), “la ingeniería geológica surge con el desarrollo de las grandes obras públicas y el crecimiento urbano, diferenciándose como especialidad de la geología a mediados del siglo XX. La rotura de algunas presas por causas geológicas y sus graves consecuencias, incluyendo la pérdida de cientos de vidas humanas, como la presa de San Francisco (California, 1928), la de Vajont (Italia, 1963) y la de Malpasset (Francia, 1959), los deslizamientos durante la construcción del Canal de Panamá en las primeras décadas del siglo, o las roturas de taludes en los ferrocarriles suecos en 1912, fueron algunos hitos que marcaron la necesidad de llevar a cabo estudios geológicos aplicados a la ingeniería”.



A lo largo de todo este tiempo y hasta la actualidad, gradualmente un creciente número de profesionales de diversas nacionalidades han dedicado sus vidas y carreras a profundizar y perfeccionar los diferentes métodos de investigación ingeniero geológica y de evaluación geotécnica de las parcelas constructivas, integrando y haciendo cada vez mayor uso de los conocimientos teóricos y prácticos de la mecánica de suelos y la mecánica de rocas para la solución de los problemas de la ingeniería, a la hora de cimentar una obra o mejorar o reforzar el terreno donde la misma se emplazara. Varios y destacados títulos de libros han surgido tras estos esfuerzos, dentro de los cuales se pueden mencionar entre tantos otros a "Ingeniería Geológica" del Luis I González de Vallejo, "Fundamentos de Ingeniería Geotecnia" de Braja M. Dase "Ingeniería de Cimentaciones" de Manuel Delgado Vargas.

Desde hace ya varios años se ha convertido en práctica común, la realización de investigaciones ingenieras geológicas para la evaluación geotécnica de los terrenos donde se planifica realizar la edificación de grandes y pequeños proyectos, estando por lo regular convencidas de su necesidad e importancia, todas las entidades vinculadas al proceso constructivo de las mismas. Paralelamente, en un esfuerzo por sistematizar la realización de estudios de esta naturaleza y por instituir legalmente la obligatoriedad de su ejecución, en varios países o en organizaciones internacionales donde algunos de estos se asocian, se han confeccionado e implementado varias normativas técnicas que regulan y establecen los criterios a seguir y el volumen mínimo de trabajos a ejecutar para la realización de una investigación ingeniera geológica dada, en función de la etapa de proyecto en la cual se encuentra la obra para la cual se realiza, su características estructurales y dimensiones, además del grado de complejidad geológica del terreno donde la misma se decide ubicar.

En Cuba la Oficina Nacional de Normalización, organismo nacional de normalización de la república, tiene implantada desde la década de 80 del pasado siglo, una serie de normas técnicas de obligatorio cumplimiento, que regulan y establecen los métodos de ejecución de las investigaciones ingenieras geológicas en función de los tipos característicos de obras ingenieras que se proyectan ejecutar. Estos documentos técnicos usualmente se hayan elaborados en conjunto por la Comisión de Calidad del Frente de Proyectos, el Comité Técnico de Normalización de Geotecnia y el Comité Técnico de Normalización de Construcción de Edificaciones, los cuales reúnen expertos de todas las entidades e instituciones vinculadas con el proceso investigativo aplicado a las construcciones. En la tabla que a continuación se expone se relacionan las normas vigentes que regulan los métodos de investigaciones citados.

Tabla 1.1. Normas técnicas relacionadas con los métodos de investigaciones ingeniero geológicas.

No	Código	Título de la norma
1	NC 53-82:1983	Elaboración de proyectos de construcción. Estructuras de hormigón. Cimientos aislados rectangulares. Método de cálculo y diseño.
2	NC 51-24: 1984	Investigaciones ingeniero geológicas. Mapas ingeniero geológicos. Procedimiento para su elaboración.
3	NC 53-134: 1984	Elaboración de proyectos de construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de la investigaciones ingeniero geológicas para túneles y metropolitanos.
4	NC 54-269: 1984	Materiales y productos de la construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de las investigaciones ingeniero geológicas en edificaciones.
5	NC 53-151: 1985	Elaboración de proyectos de construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de las investigaciones ingeniero geológicas de las presas de materiales locales.
6	NC 53-153: 1985	Elaboración de proyectos de construcción. Empuje de suelos. Procedimientos de cálculo.
7	NC 53-177: 1988	Proyectos de construcción. Lagunas de estabilización. Investigaciones ingeniero geológicas.
8	NC 53-184: 1988	Proyectos de construcción. Canales magistrales. Procedimiento para la ejecución de las etapas de investigaciones ingeniero geológicas.
9	NC 53-187: 1989	Proyectos de construcción. Micropresas de materiales locales. Investigaciones ingeniero geológicas.
10	NC 46:1999	Construcciones simorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción.
11	NC 722:2009	Edificaciones y obras civiles. Investigaciones ingenieras aplicadas. Requisitos de alcance y contenido de la documentación técnica.
12	NC-XX.2014	Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales(actualmente en fase de revisión y publicación).

Aunque en la mayor parte de las normas anteriormente relacionadas, se establecen los criterios técnicos a seguir para poder efectuar una correcta caracterización ingeniero geológica de los



terrenos a estudiar, se considera que según los objetivos de esta investigación y las particularidades de las obras que comúnmente se han construido y se planean edificar en Cayo Guillermo, el documento que más se vincula y asocia con los métodos de trabajo empleados para la realización de este estudio y los resultados que en él se desean alcanzar, lo constituye la norma NC 54-269: 1984 (Materiales y productos de la construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de las investigaciones ingeniero geológicas en edificaciones). De manera semejante, dada la novedad y vigencia de los criterios técnicos que en ella aparecen, en correspondencia con las consideraciones y requerimientos establecidos en las normativas internacionales, se le prestará especial atención a los aspectos contenidos en la NC-XX.2014 (Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales), en el presente en fase de revisión y publicación).

Paralelamente a toda la documentación citada, la Oficina Nacional de Normalización tiene además instaurada numerosas normas técnicas que regulan la ejecución de los diferentes tipos de trabajos de campo, ensayos de laboratorio y pruebas geotécnicas in situ al terreno, que se pueden efectuar durante la realización de las distintas investigaciones ingeniero geológicas. En la tabla 1.2 que más adelante se expone se citan algunos de los títulos de estos documentos, los cuales evidencian el extenso volumen de escritos técnicos y requerimientos establecidos en la bibliografía existe, que orientan y regulan la realización de trabajos de esta naturaleza.

1.2. La evaluación geotécnica del terreno para la realización de diseños geotécnicos de cimentaciones

De acuerdo a José María Rodríguez Ortiz (1984), "habitualmente el problema geotécnico consiste en proyectar la cimentación de un edificio de la forma más funcional y económica, teniendo en cuenta la naturaleza del terreno, de forma que se consiga una seguridad suficiente y unas deformaciones o asentamientos compatibles con las tolerancias de la estructura". En la práctica de la labor ingeniera, resulta muy difícil elegir el terreno de construcción de una obra, donde el mismo reúna las mejores características geotécnicas para la cimentación de la edificación tratada, siendo lo más común trabajar sobre parcelas donde se manifiestan problemas geotécnicos de diversa magnitud. La totalidad de los especialistas en el tema coinciden en que aunque en algunos casos la resolución geotécnica de un proyecto de cimentación resulte trivial, en la mayoría de las obras la solución de esta etapa, da lugar a un proceso relativamente complejo en el que deben de integrarse numerosos factores y análisis para llegar a una correcta solución, que satisfaga los criterios establecidos para asegurar la estabilidad, durabilidad de la edificación, sin descuidar el aspecto económico.

Tabla 1.2. Algunas normas técnicas relacionadas con los trabajos de campo, ensayos de laboratorio y pruebas geotécnicas in situ al terreno, que se pueden efectuar en las investigaciones ingeniero geológicas.

No	Código	Título de la norma
1	NC 327: 2004	Geotecnia. Perforación de calas ingeniero geológicas.
2	NC 54-288: 1984	Materiales y productos de la construcción. Procedimiento para la realización de las pruebas de aforo para la determinación de los parámetros hidrogeológicos.
3	NC 8: 1998	Geotecnia. Determinación del módulo de elasticidad (Modulo de Young) y coeficiente de Poisson en rocas y semirrocas.
4	NC 9: 1998	Geotecnia. Método de ensayo para la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo in situ en suelos y rocas.
5	NC 11: 1998	Geotecnia. Método de ensayo de carga sobre placa en suelo.
6	NC 19:2000	Geotecnia. Determinación del Peso Específico de los Suelos (y Rocas).
7	NC 62:2000	Geotecnia. Determinación de la resistencia a la compresión axial en especímenes de roca.
8	NC 67:2000	Geotecnia. Determinación del contenido de humedad de los suelos y rocas en el laboratorio.
9	NC 59: 2000	Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos.

Atendiendo a los criterios recogidos en la NC-XX.2014 el diseño geotécnico de una cimentación se realizará por el Método de Estados Límites utilizando los diagramas de presiones de contacto correspondientes a las condiciones específicas de diseño. Al cálculo del área de la base de una cimentación superficial se le aplica un sistema de coeficientes de seguridad, que ha sido determinado con la aplicación de la teoría de seguridad. El método de los Estados Límites aplicado al cálculo de las cimentaciones se fundamenta en la obtención de un diseño donde las cargas y las tensiones a las que está sometido el suelo o la roca que se utilizará como base de los cimientos, así como las deformaciones y desplazamientos que ellas originan en los grupos litológicos que constituyen estas bases, estén cerca de los límites permisibles y nunca lo sobrepasen. El cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}) se realiza esencialmente a partir de la determinación de los parámetros de comportamiento geomecánico del suelo o de la roca sobre el cual se construirá la obra tratada, estos parámetros son obtenidos a partir de las investigaciones ingeniero geológicas que se hayan ejecutado.



En sentido general se considera que las bases de los cimientos de una obra deben ser diseñadas sobre la base de:

1. Los resultados de las investigaciones ingeniero-geológicas, hidrológicas y condiciones climatológicas de la zona de construcción.
2. La experiencia que se posea en condiciones ingeniero geológicas análogas.
3. Las características de la edificación, su estructura, las cargas que actúan sobre los cimientos.
4. Las condiciones locales de la zona de construcción.
5. Las características tenso deformaciones de la base de cimentación, que en función del tipo litológico que la constituya (suelo o roca) y el estado tensional actuante, determinarán el método de cálculo de las deformaciones a emplear.
6. La comparación técnico-económica de las variantes posibles de las soluciones de diseño (en función de la yacencia del estrato que servirá como base, las cargas actuantes y características de la estructura), teniendo en cuenta la necesidad de tomar la óptima, que asegure la utilización más completa de las características de resistencia y deformación de los suelos o rocas, valorando las soluciones sobre la base de los gastos de inversiones.

En toda la bibliografía consultada es aceptado el criterio de que las particularidades geotécnicas que caracterizan a las distintas parcelas constructivas, son determinantes para dictaminar las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las bases de cimentación de cualquier obra. Precisamente según este razonamiento, el documento citado anteriormente clasifica las condiciones de trabajo de las base de cimentaciones en:

“Condiciones Favorables: No existen manifestaciones cársicas, empantanamientos o deslizamientos. La estructura geológica, geomorfológica y topográfica son simples: el conjunto de los elementos litológicos (suelos, rocas y semirocas) son homogéneos. Los suelos aluviales y deluviales están distribuidos de forma homogénea, existiendo poca variabilidad en los valores de sus propiedades físicos mecánicas. Las arcillas son duras o muy duras, las gravas y arenas son compactas. Las aguas subterráneas no influyen sobre las cimentaciones. Grado Sísmico ≤ 4 ”.

“Condiciones Normales: No existen manifestaciones de empantanamiento o deslizamiento, el desarrollo cársico está muy limitado en extensión y profundidad, las oquedades o grietas están rellenas y sus dimensiones son muy pequeñas. Existen diferentes elementos litológicos (suelos, rocas y semi-rocas), su correlación es simple y sus características físico-mecánicas son similares. Las estructuras geológicas y geomorfológicas son simples aunque existen pliegues pocos desarrollados. Los suelos aluviales, eluviales y



deluviales tienen una estratificación y distribución bien definidas y este es prácticamente horizontal (buzamiento pequeño) existiendo poca variabilidad de sus propiedades físico mecánicas. Las arcillas son duras o firmes, las gravas y arenas son compactas a medias. Las aguas subterráneas tienen poca influencia sobre las cimentaciones. Grado sísmico > 4 y < 7 ".

"Condiciones Desfavorables: Existen manifestaciones de empantanamiento y carso, éste está desarrollado en extensión y profundidad, las oquedades y grietas están abiertas y sus dimensiones son apreciables. Existen diferentes elementos litológicos (suelos, rocas y semirocas) su correlación no es simple, su grado de alteración, agrietamiento es muy variable y sus propiedades físico mecánicas son diferentes. Las estructuras geológicas y geomorfológicas son complejas, existiendo fuertes plegamientos, fallas y topografía abrupta. Los suelos aluviales, deluviales y eluviales tienen una estratigrafía y distribución errática con características físico mecánicas muy variables. Existen suelos colapsables, expansivos y tubificables. Las arcillas son blandas a muy blandas, las arenas sueltas a muy sueltas. Las aguas subterráneas tienen gran influencia sobre las cimentaciones. Grado Sísmico ≥ 7 ".

Para el caso específico de terrenos constituidos por rocas, la NC-XX.2014 (Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales) en correspondencia con los criterios establecidos internacionalmente en otras normas, establece que para efectuar el dimensionamiento de las bases de cimentaciones se debe de contar con los resultados de investigaciones ingeniera geológicas donde se haya efectuado un correcto estudio del macizo rocoso en su conjunto. En tales estudios se establece que sean esclarecidos los aspectos siguientes:

1. Estructura geológica (plegamientos, fallas).
2. Estudio del agrietamiento o discontinuidades del macizo rocoso (rumbo y buzamiento de las diaclasa o juntas, su espaciamiento, espesor, tipo de relleno, planos de foliación, grietas).
3. Extensión y características de las zonas de alteración e intemperización de la roca.
4. Comportamiento de la roca frente al agua.
5. Características hidrogeológicas del macizo.
6. Propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso.
7. Esta investigación tendrá mayor o menor rigor atendiendo a las características e importancia de la obra de que se trate.

Según José María Rodríguez Ortiz (1984), "la roca constituye en general un excelente terreno de cimentación, pero puede dar lugar a problemas de excavación y no todos los tipos de rocas presentan características igualmente favorables. Para edificios normales casi todas las rocas aseguran una presión de



trabajo suficiente ($\geq 3 \text{ kg/cm}^2$), pero para edificios altos o fuertes cargas concentradas se requiere un análisis de resistencia y deformabilidad en la mayor parte de las rocas”.

Atendiendo a los criterios establecidos en la propuesta de norma ya mencionada, las rocas o macizos rocosos que servirán como terrenos base de cimentaciones pueden ser clasificados sobre la base del comportamiento de distintos parámetros, dentro de los que destacan los siguientes:

1. Origen geológico.
2. Resistencia compresión simple (σ_c).
3. Espaciamiento promedio de sus discontinuidades.
4. Grado de intemperización.
5. Ablandamiento frente al agua.
6. Índice de calidad del macizo rocoso (R.Q.D.).
7. Clasificación geomecánica del macizo rocoso (R.M.R.).
8. Naturaleza y orientación de las discontinuidades.

Precisamente atendiendo comportamiento de estos parámetros, los cuales a groso modo caracterizan el comportamiento geomecánico del macizo rocoso examinado, se establecieron tres casos típicos de modo de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), los cuales se mencionan a continuación:

1. Caso 1. Macizo rocoso constituido por roca homogénea sana no fisurada. En este caso es muy frecuente que la roca sea más resistente y menos deformables que el hormigón, como es el caso de rocas con una resistencia alta a muy alta.
2. Caso 2. Roca homogénea poco fisurada a muy poco fisurada con aberturas de sus discontinuidades menor de 0.5 cm (o menor de 2.5 cm si están rellenas con suelo o roca triturada) y el ancho de la base de la cimentación es mayor de 0.30 m. En el caso de rocas sedimentarias o foliadas la estratificación debe ser horizontal o muy próximo a esto. En el caso de existir juntas verticales abiertas con un espesor superior al indicado anteriormente se deben rellenar con mortero u hormigón.
3. Caso 3. Roca de muy baja resistencia, de fisurada a muy fisurada, con discontinuidades al azar, muy alterada y fragmentada. En este caso se considera que el macizo rocoso se comporta como una masa granular y se determina q_{br}^* igual que en el caso de suelos. La determinación de los parámetros de resistencia a cortante se realizará mediante ensayos “in situ”.



1.3. Evaluación del grado de estudio geológico e ingeniero geológico de la Formación Jaimanitas

Los estudios sobre la estratigrafía y el desarrollo geológico de los depósitos cuaternarios en Cuba, han alcanzado un elevado nivel durante los trabajos realizados en los últimos años. Según Peñalver Hernández (1997) "muchos han sido los artículos científicos que se han escrito y que abarcan no solamente la estratigrafía cuaternaria, sino también los cambios climáticos ocurridos durante en el período, el desarrollo de la fauna de mamíferos, moluscos, equinodermos, etc. ".

Dentro de las formaciones desarrolladas durante este período geológico, la Formación Jaimanitas (**Q_{3js}**) sobresale por haber sido objeto de números estudios, atendiendo principalmente a su gran extensión y asequibles condiciones de yacencia. Esta formación desarrollada durante el Pleistoceno Superior, cuyo nombre original proviene del pueblo de Jaimanitas perteneciente a la provincia La Habana, "forma una faja discontinua que ciñe la costa cubana y gran parte de las islas adyacentes", según los datos ofrecidos en el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 2013). De acuerdo a la información ofrecida en este mismo documento el autor de la Formación Jaimanitas es J. Brödermann, quien la describió e identifico en 1940. No obstante en 1901 se registra la publicación de un informe sobre un reconocimiento geológico de Cuba, realizado por los geólogos norteamericanos Hayes, Vaughan y Spencer, donde se hace referencia a algunos depósitos cuaternarios del territorio, entre ellos, la caliza litoral que circunvala a la mayor parte del país, con abundante contenido faunístico de especies actuales de corales que evidentemente corresponde a la Formación Jaimanitas de J. Brödermann. A partir de los trabajos originalmente efectuados por el autor de esta formación, la misma ha sido reescrita por numerosos y destacados geólogos dentro de los que se relacionan: P. J. Bermúdez en 1950, P. J. Bermúdez y R. Hoffstetter en 1959, C. Ducloz en 1963, P. Brönnimann y D. Rigassi en 1963, A. de la Torre en 1966, F. Nemeč y otros en 1967, E. V. Shanzer y otros en 1975 y en 1976, I. P. Kartashov y otros en 1981, G. L. Franco en 1976, además de L. L. Peñalver y otros 1981 y finalmente J. F. de Albear y M. Iturralde en 1985.

Atendiendo precisamente a su particular distribución geográfica, la misma constituye indistintamente numerosos terrenos, mayormente costeros, donde se desarrollan frágiles ecosistemas, llamativos paisajes y lugares de interés turístico, además de ocupar sectores de desarrollo económico en el país, debido a lo cual los conjuntos litológicos que la conforman han sido objeto de análisis de variadas investigaciones con perfil ambiental, geomorfológico e ingeniero geológico entre otros. Debido a lo anterior existe por todo el país, una gran cantidad de datos sobre las particularidades estructurales, geomorfológicas, petrológicas y geotécnicas de esta formación.



En la provincia de Ciego de Ávila, esta formación se encuentra aflorando en pequeñas pociones hacia el extremo norte del territorio insular de la isla grande y constituyendo en su mayor parte los cayos que conforman el archipiélago Jardines del Rey. A raíz del paulatino desarrollo que ha venido experimentando precisamente el polo turístico situado al Norte de la provincia de Ciego de Ávila, los terrenos constituidos por esta formación geológica han sido continuamente investigados por la dependencia territorial de la ENIA, con el fin de evaluar geotécnicamente las particularidades ingenieras geológicas de los mismos, para poder efectuar la construcción de las edificaciones, obras marítimas y de transporte ejecutadas hasta la actualidad.

De acuerdo a la información registrada en el archivo del Equipo de Investigaciones para la Construcción de la ENIA en Ciego de Ávila, específicamente en el territorio correspondiente a Cayo Guillermo, se han efectuado alrededor de 32 investigaciones ingeniero geológicas para diferentes etapas de proyecto para la caracterización geotécnica de las distintas parcelas constructivas designadas y la búsqueda de zonas de préstamo para la extracción de materiales que pudiesen ser utilizados como relleno técnico, en la construcción precisamente de algunas de las obras investigadas. Del total de obras citadas: 1 correspondió a una instalación marítima, 2 pertenecen a obras de la infraestructura vial, particularmente a 2 variantes de puentes emplazados sobre un canal marítimo, además de lo anterior se efectuaron 2 estudios de búsqueda de zonas de préstamo y 1 investigación de una laguna de residuales. Las restantes investigaciones realizadas correspondieron a edificaciones y obras industriales (26), destacando 7 grandes hoteles y un grupo de generación eléctrica.

En casi la totalidad de las investigaciones ejecutadas, se estudiaron y analizaron las rocas tratadas, esclareciéndose de las mismas, sus particularidades físicas, sus propiedades mecánicas y se caracterizó el macizo rocoso que las mismas conformaban. De manera semejante en buena parte de los estudios efectuados, se realizaron ensayos de campo para la determinación de los parámetros y particularidades hidrogeológicas de las rocas, llevándose a cabo paralelamente trabajos de exploración geofísica, principalmente asociados al uso de métodos eléctricos, que permitieron identificar los conjuntos litológicos existentes. Gracias a la ejecución de las actividades citadas y a la realización de otras asociadas a las labores de investigación ingeniero geológica, se pudieron caracterizar correctamente cada uno de los terrenos de trabajo tratados, permitiendo de esta manera reunir una base informativa de datos que permita realizar, una correcta evaluación del comportamiento geotécnico de las rocas de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones.



1.4. Criterios sobre la evaluación estadística de los datos

El examen y valoración del comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de un determinado tipo de roca o suelo, necesita del empleo de técnicas de análisis estadístico para la evaluación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio o pruebas de campo efectuadas, debido a la heterogeneidad de valores que se pueden obtener de un mismo parámetro en una misma roca. A partir del análisis estadístico del comportamiento de una propiedad o parámetro determinado de una roca, se puede subdividir a la misma en distintos estratos en función del problema abordado, definiendo además sus valores de cálculo para el diseño geotécnico de cimentaciones o la solución de cualquier otra situación geotécnica.

Comúnmente las propiedades de las rocas o suelos que son sometidas mayormente a tratamiento estadístico, son aquellas que fueron obtenidas directamente a partir de la realización de ensayos de laboratorio o por la realización de pruebas de campo in situ, que integralmente definen en sí las características físicas y mecánicas del elemento ingeniero geológico tratado. El comportamiento de otras propiedades pueden ser tratadas estadísticamente, siempre y cuando exista un número suficiente de observaciones del fenómeno estudiado que garantice la representatividad de su manifestación en el macizo rocoso examinado.

Los estadígrafos determinados usualmente para una variable dada, son los de tendencia central y los de dispersión, destacando dentro de estos la media aritmética, la varianza la desviación estándar, el coeficiente de variación, la curtosis y la asimetría. Igualmente pueden ser utilizados para examinar estadísticamente el comportamiento de una propiedad dada la determinación del intervalo de confianza de la media, la comprobación de la normalidad de la muestra, la desviación media absoluta muestral, el error cuadrático medio de la amplitud, el error cuadrático del exceso sobre la curtosis entre otros. Los criterios utilizados deberán permitir comprobar la normalidad de las distribuciones, la homogeneidad individual y general de los elementos y el rechazo de valores dudosos que existan en dependencia de la naturaleza de la variable o propiedad tratada (León González, Miguel; 1977).

El criterio fundamental para valorar la normalidad de la distribución una variable se basa en la comparación del exceso sobre la curtosis (E) y la asimetría (A) de la distribución normal con respecto a aquella que se está examinando. De esta manera se tiene que en la distribución normal E y A toman valores de 0 y se alejan de este valor cuando la curtosis es poco esbelta o muy esbelta y la simetría es unilateral. En el artículo "Tratamiento estadístico de las propiedades físico mecánicas de los suelos y rocas", Miguel León González ofrece los pasos a seguir para el tratamiento estadístico de las propiedades de los suelos y rocas y comprobar su comportamiento y

división en elementos en un área determinada. Dentro de los aspectos a considerar se encuentran los relacionados a continuación:

1. Identificar y realizar una división en estratos de los tipos de suelos y rocas existentes
2. Hallar la cantidad mínima de determinaciones de una propiedad que se deben tener para establecer los valores de norma y diseño.
3. Determinar para cada propiedad dada las magnitudes de media, valores extremos, desviación estándar, varianza, simetría y curtosis.
4. Comprobar que tipo de distribución siguen las observaciones de cada propiedad tratada.
5. Determinar los valores dudosos de cada propiedad.
6. Analizar los valores rechazados e investigar los motivos en función de la naturaleza de la variable examinada (ensayos o pruebas defectuosos, posibilidad de pertenecer a otro estrato o elemento ingeniero geológico.
7. Valorar la uniformidad individual del estrato para cada propiedad y la homogeneidad general del mismo y en caso de no ser homogéneo, analizar una nueva división de estratos.
8. Analizar la posibilidad de unión de elementos geológicos contiguos.
9. Determinar los valores de norma y diseño de cada propiedad.

1.5. Situación geográfica de Cayo Guillermo

Cayo Guillermo forma parte desde el punto de vista político administrativo a la central provincia de Ciego de Ávila, perteneciendo al municipio de Morón. El mismo se localiza hacia el extremo Noroeste de los límites de la provincia mencionada, formando parte del subarchipiélago Sabana-Camagüey, que se extiende a su vez por toda la parte centro-septentrional de la Isla de Cuba, con una dirección sublatitudinal paralela a esta y a una distancia aproximada de 38 Km de la misma. Dicho cayo se sitúa aproximadamente entre los 22°34' y los 22°35' de latitud Norte y entre los 78°38' y 78°42' de longitud Oeste y el mismo posee aproximadamente 13.28 km² de extensión. Limita al Norte con el Canal Viejo de las Bahamas, al Este con Cayo Coco, al Sur con Cayo Botella y Cayo Guincho y al Oeste con Cayo Guillermito y Cayo Hijos de Guillermo (ver anexo 1 y figura 1.1).

1.6. Condiciones climáticas

Al igual que en todo el país de acuerdo a la clasificación de Koopen, el clima es propio de zonas tropicales húmedas, pero con una marcada influencia marítima. Según los criterios del Centro Provincial de Meteorología del CITMA en Ciego de Ávila, esta zona también se encuentra bajo la influencia casi permanente del anticiclón del Atlántico Norte (Azores - Bermudas), el cual rige en

gran parte del año el estado del tiempo en el área del Caribe. La presencia predominante de la circulación de los vientos alisios y su acción reguladora desde el punto de vista térmico, debido al gran aporte de calor, genera la existencia de un clima suave y verdaderamente agradable, matizado por la presencia de algunos frentes fríos durante la temporada invernal y el paso de algunas ondas tropicales en el verano.

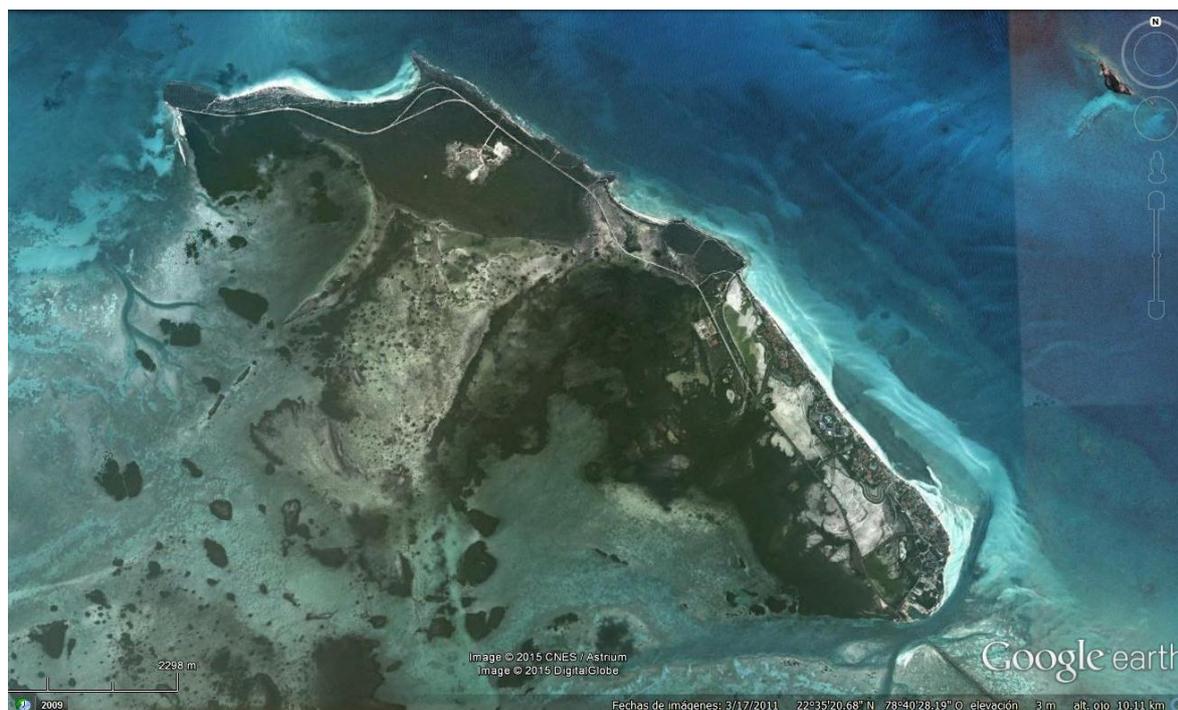


Figura 1.1. Foto satelital de Cayo Guillermo.

El régimen térmico se considera estable y moderado, estableciéndose según las variaciones anuales de la temperatura dos períodos bien definidos: uno de registros máximos, cuyos valores más elevados se alcanzan en el mes de Julio con un promedio de 28.40 °C y otro de temperaturas bajas, que alcanza sus valores mínimos en el mes Febrero con una media de 23.40 °C. De modo general la temperatura media es de 26.00⁰ C, valor muy similar a la media provincial. La temperatura mínima media anual es de 23.20 °C, aunque se han registrado valores mínimos absolutos de hasta 11.2°C y su temperatura máxima promedio anual es de 29.00°C.

La humedad atmosférica es relativamente alta durante casi todo el año. Los valores medios más altos de este elemento climatológico se encuentran entre 80% y 81 %, correspondiendo a los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre, mientras que los valores mínimos medios se alcanzan en Marzo y Abril, oscilando entre los 76% y 77%. La humedad relativa media anual es del 80 %.



Al igual que en el resto del país, las precipitaciones están enmarcadas también en dos periodos bien determinados, uno lluvioso y otro poco lluvioso. La temporada lluviosa se extiende de Mayo a Octubre, durante la cual cae aproximadamente el 80 % de la lluvia anual. La temporada poco lluviosa, se extiende de los meses de Noviembre a Abril y en ella ocurre aproximadamente el 20 % de la precipitación anual restante. El mes más lluvioso del año es Septiembre con un promedio mensual de 178.70 mm y el mes menos lluvioso es Diciembre con solo 39.00 mm de promedio mensual. La media anual supera ligeramente los 1 00.00mm.

Los vientos predominantes en el sector de trabajo son del 1^{er} cuadrante, con una velocidad promedio de 7.00 Km/h a 10.00 Km/h. Con la llegada de los frentes fríos durante la época invernal, los vientos pasan a ser generalmente del 2^{do} y 3^{er} cuadrantes, los mismos giran al 4^{to} o 1^{er} cuadrante luego del paso de estos frentes, con velocidades que oscilan entre 15.00 Km/h y 25.00 Km/h, con rachas de hasta 30 Km/h.

1.7. Fauna

Las condiciones naturales que tiene Cayo Guillermo permiten ubicarlo como un territorio privilegiado dentro del Subarchipiélago Sabana-Camagüey, independientemente de su pequeña extensión. El mismo posee una rica y variada fauna, fundamentalmente de aves dentro de los vertebrados y de insectos dentro de los invertebrados. No obstante a la presencia de varias formaciones vegetales en tan pequeña extensión territorial, este cayó reúne una fauna silvestre muy heterogénea con valores notables por su endemismo. El mismo geográficamente se encuentra situado en el corredor migratorio de aves en determinadas épocas del año. Cayo Guillermo posee varias lagunas interiores con diversidad de especies de fauna acuática, todo lo cual lo califica como un territorio importante para la biodiversidad.

La fauna acuática existente es muy importante por sus poblaciones de peces, crustáceos y moluscos de significativo valor económico y de interés turísticos para el desarrollo de variadas ofertas a los visitantes. Según los estudios realizados por el Centro de Investigación de Ecosistemas Costeros de Cayo Coco en Cayo Guillermo se han registrado 242 especies de las cuales 146 son vertebrados y 96 son invertebrados. Las 242 especies observadas pertenecen a 99 familias, de las cuales 45 corresponden a vertebrados y 54 a invertebrados. Teniendo en cuentas todos los trabajos ejecutados, se han inventariado en este cayó un total de 146 especies de vertebrados terrestres (60,33%), de los cuales 3 son anfibios, 16 reptiles, 120 aves y 7 mamíferos. En cuanto al endemismo están presentes en el área un total de 43 formas endémicas (17,76%), de las cuales 28 son especies y 15 subespecies. De los endémicos se destacan por su



distribución geográfica: la bayoya (*Leiocephalusstictigaster septentrionales*), la culebrina (*Ameivaauberiorlandoi*), la garrapata de los reptiles (*Amblyomaalbopictum*) y el caracol (*Opistosiphonturiguanoensisuriguanoensis*, los cuales se localizan en varios o pocos cayos del Subarchipiélago Sabana – Camagüey. En la relación de endémicos se incluyen dos géneros de aves (*Teretistrisy Xiphidiopicus*).

1.8. Flora

De acuerdo a estudios efectuados por especialistas del CITMA de la provincia, la flora que constituye a Cayo Guillermo está representada por 52 familias, 101 géneros y 128 especies, cuyas potencialidades de uso son amplias: 56 son medicinales, 12 comestibles, 26 melíferas, 22 ornamentales, 5 constituyen alimento para algunos animales, 17 son maderables y 12 tienen otros usos. De igual forma dentro de las especies reportadas se encuentran 5 tóxicas o venenosas entre las cuales se destacan *Metopiumtoxicum (L)*, *IvaCheirantifolia* y *Urechiteslutea* entre otros. Del total de especies presentes, 12 son endémicas para un 9.6 % de endemismo, y de ellas *Anthreanmyrtifolia* y *Heliotropiummyriophyllum* son consideradas como raras entre las categorías de conservación. También la especie *Heliotropiummyriophyllum* constituye un endémico de área restringida.

En el área se distinguen 5 formaciones vegetales bien diferenciadas estructuralmente, las cuales se describen a continuación:

1. Bosque de manglar. Esta formación se presenta con fisonomías diferentes, destacándose tres subtipos, uno de ellos con dominancia casi absoluta de *Rizophora mangle*, otro con presencia de manglar mixto y por último grandes extensiones con la presencia fundamentalmente de dos especies de mangle y abundancia de elementos halófitos.
2. Matorral xeromorfo costero y subcostero. Esta formación es la más representativa en el cayo después del manglar. La vegetación existente en esta formación presenta estructuras fisonómicas determinadas por la presencia de sustratos; en la zona que se desarrolla sobre el sustrato arenoso es característica la gran abundancia de *Coccothrinaxlitoralis*, mientras que en la zona con una superficie abrasivo carsificada, la presencia de esta especie se hace mucho menos frecuente dominando los elementos xeromórfico, cuyas especies que no sobrepasan los 5.00 metros de altura, con fisonomía achaparrada con una cobertura calculada entre el 85% y el 95%. Este tipo de vegetación se extiende por toda la zona central de dicho sector. Es característico de esta formación desde el punto de vista cuantitativo su composición florística que la hace ser la de mayor biodiversidad de todas las formaciones presentes. Las especies arbóreas más representativa del sector



- xeromórfos lo constituyen el júcaro (*Bucidaspinosa*), zalamera (*Sideroxylum celestrinum*), brasiletes (*Bourreria ovata* y *Caesalpinia bahamensis*), yana (*Conocarpus erecta*) y bijáguara (*Colubrina arborea*), es de destacar la presencia de cactus como *Pilosocereus millspaughii* (Britt) endémico reportado también para Coco y Guillermo, *Consolea millspaughii* (Britt) Berg, *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw y *Selenicereus grandiflorus* (L.) Britt.
3. Complejo de vegetación de costa arenosa. Esta formación se localiza en las arenas de las playas y dunas del norte de este cayo, ocupando una franja estrecha que varía en dependencia de la línea de costa. Está compuesta por algunos arbustos, plantas herbáceas y rastreras entre las que abundan *Tournefortia gnaphalodes* (incienso de costa), *Ipomea pes-caprae* (boniato de playa), *Canavalia maritima* (mate de costa), *Ambrosia hispida* (carquesa) entre las Poaceae de destacar la abundancia relativa de *Uniola paniculata* entre otras. En la parte de las dunas más altas se observan algunos ejemplares de *Coccoloba uvifera* achaparrados y con poco desarrollo.
 4. Complejo de vegetación de costa rocosa. Este tipo de vegetación está distribuida por varios sectores de la costa norte de este cayo, desarrollándose básicamente sobre la superficie rocosa que forman las distintas terrazas marinas que se localizan hacia la mitad occidental de la línea de costa señalada. La misma se haya ocupando las oquedades de las rocas, al estar directamente expuestas a la influencia marina y en dependencia del grosor y tipo del sustrato es de poca altura. Las especies que predominan en la misma son: *Sesuvium microphyllum*, *Rachicallis americana*, formando la primera línea, a continuación donde existe mayor protección y cobertura de suelo, aparecen, además de las mencionadas *Suriana maritima*, *Borreria arborea*, *Strumpfia maritima*, *Erithalis fruticosa* y *Casasia clusiifolia* entre otras.
 5. Vegetación secundaria. Esta formación vegetal se encuentra formada por elementos de *Casuarina equisetifolia* en varios sectores aislados del cayo, localizados mayormente sobre la franja costera. Existen otras plantas culturales introducidas, pero las mismas están asociadas a las áreas de jardinería de las instalaciones hoteleras y extrahoteleras existentes, cumpliendo una labor ornamental.

1.9. Criterios de interés oceanográfico

Las aguas próximas al litoral presentan un comportamiento de la temperatura y la salinidad similar al de las del mar abierto adyacente por el buen intercambio existente, lo estrecho de la plataforma insular y el reducido aporte de agua dulce. En la siguiente tabla se muestra el comportamiento anual de estas dos variables:

Tabla 1.3. Comportamiento medio mensual de la temperatura y la salinidad.

Aspectos evaluados.	Meses.												Media
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Temperatura (°C).	24.7	24.2	25.2	26.7	28.2	29.7	29.9	30.5	30.1	28.3	26.1	24.1	27.3
Salinidad (‰).	35.9	35.9	35.9	35.9	35.9	35.8	35.8	35.9	35.9	35.8	35.8	35.8	35.9

La marea en la región es semi diurna con una marcha diaria que se caracteriza por presentar dos pleamares y dos bajamares, siendo los tiempos de duración similares (≈ 6 horas) y con poca diferencia entre las alturas. La amplitud promedio fluctúa alrededor de los 40 cm con valores extremos entre los 27cm y 68 cm. La circulación de las aguas se encuentra regida por varios factores generadores de corrientes; fundamentalmente el viento, el oleaje y la marea, los que conjuntamente interaccionando con la morfología de la costa y el fondo determinan los patrones de movimientos del agua.

El patrón de circulación de las aguas en la región se encuentra regido por la ramificación de Corriente del Atlántico Norte que bordea el litoral nororiental de Cuba, prevaleciendo el rumbo Oeste con velocidades superiores al nudo. Las corrientes de marea y el viento, rigen la circulación en las aguas de la plataforma, de manera que se establece un movimiento paralelo a la línea costa en dos direcciones opuestas, Este-Oeste, durante el llenante y el vaciante respectivamente, con una resultante neta hacia el Oeste en respuesta a los vientos predominantes del primer cuadrante. Mientras que en las aguas menos profundas que bañan la costa, el movimiento es caótico con variaciones apreciables en períodos cortos de tiempo.

1.10. Características geológicas generales

Desde el punto de vista regional, el territorio cubano es considerado geológicamente en un sentido amplio, como un cinturón plegado y fallado, obducido y acresionado sobre el margen pasivo de Norteamérica, con el desarrollo de cuencas contemporáneas en el período comprendido entre el Cretácico Campaniano Superior y el Eoceno Superior, cubierto por una secuencia sedimentaria oligopleistocénica poco deformada (Jesús Blanco, 1996). En este contexto geológico, en la constitución de Cayo Guillermo, se reconocen unidades pertenecientes a los dos niveles estructurales principales en los que se divide el modelo geológico generalizado de Cuba (Iturralde-Vinent, 1997): Substrato Plegado y Neoautóctono.



El Substrato Plegado está constituido por distintos tipos de terrenos de naturaleza continental y oceánica, algunos de los cuales como bien se expresó anteriormente, se encuentran formando parte del área de investigación, pero en profundidad. Teniendo en cuenta que dichos elementos geológicos yacen, precisamente a decenas de metros de la superficie, el presente investigador considera que de acuerdo a las particularidades de este trabajo, no es significativo detallar en las características geológicas de tales componentes.

La naturaleza geológica de la cobertura superficial de Cayo Guillermo es relativamente sencilla, según las informaciones ofrecidas por el Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, 2000?) (ver anexo 2) y los datos obtenidos como consecuencia de la realización de esta investigación. La misma está compuesta por rocas y sedimentos correspondientes al Neotóctono Cubano, los cuales a su vez pertenecen a la Asociación Estructuro Formacional (AEF) de la Neoplataforma, datada del Eoceno Superior Tardío (P_2^3) al Reciente. Las secuencias propias de esta AEF se originaron básicamente (a diferencia de los elementos del Substrato Plegado) en el mismo lugar que hoy ocupa el territorio de Cuba, evolucionando en un régimen de desarrollo platafórmico.

Los conjuntos litológicos que constituyen la cobertura superficial del territorio analizado se formaron de modo más específico indistintamente durante el desarrollo del Pleistoceno Superior (Q_3) y el Holoceno (Q_4). Según los datos ofrecidos en el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 2013) el Pleistoceno Superior (Q_3) constituyó una etapa donde fue abundante el surgimiento y desarrollo de unidades litoestratigráficas. Al parecer, en esa época geológica comienza la deposición de las calizas arrecifales de la Formación Jaimanitas, correspondiente a una transgresión generalizada que cubrió las partes más bajas que circundan al entonces archipiélago cubano. Los conjuntos litológicos terrígenos equivalentes de esta unidad son las Formaciones Camacho (localizada en Cuba central, oriental y occidental), Cauto (limitada a Cuba oriental), Sigüanea (circunscrita a las costas oeste y norte de la Isla de la Juventud) y Jamaica (localizada en la cuenca de Guantánamo). Atendiendo a los estudios realizados, durante la regresión del Wisconsin sobre la Formación Jaimanitas se depositaron las calcarenitas laminares de estratificación cruzada de la Formación Playa Santa Fe. Estas calcarenitas constituyen dunas, localizadas a lo largo de la costa Norte de las provincias La Habana y Matanzas. En la superficie de algunos cayos del sub-archipiélago Sabana-Camagüey se localizan depósitos similares, denominados Formación Cayo Guillermo. Como probables testigos de pequeños ciclos transgresivos durante esta regresión, se encuentran los depósitos carbonáticos



de la Formación La Cabaña y los terrígenos carbonáticos de la Formación Salado, que cubren a la Formación Jaimanitas.

Teniendo en consideración las informaciones brindadas por el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 2013), es probable que los diferentes depósitos terrígenos y terrígeno-carbonáticos, mencionados con anterioridad, formen parte de un ciclo transgresivo único. De comprobarse esta hipótesis, se pudiera afirmar que durante la regresión de Wisconsin existieron, como mínimo, dos ciclos transgresivos. A todo lo largo del Cuaternario, y probablemente en parte del Plioceno, los depósitos eluvio- coluvio- proluviales (considerados en el léxico estratigráfico como depósitos innominados) formaron parte de la sedimentación terrígena. Tales depósitos se consideran innominados porque, aunque alcanzan una amplia difusión en todo el territorio del archipiélago cubano, incluyendo algunos de sus cayos, son muy diversos y heterogéneos, a la vez que presentan muy poca o ninguna litificación. Los depósitos del Holoceno que se acumularon cuando todo el territorio cubano estaba emergido, se hallan constituidos por sedimentos no consolidados de distintas granulometrías y composición. Esto corresponde a que los mismos se acumularon en diversos ambientes de sedimentación: lacustre, lacustre-costeros, estuarinos, de manglar, deltáicos, palustrelacustres, aluviales (de cauce y de terraza), deluvio-coluviales y proluviales, de playa, y litorales (con sus distintas variantes). Debido a su variabilidad litológica local, así como a la frecuente concurrencia de distintos ambientes, lo cual dificulta su individualización y correlación, se ha acordado considerarlos como secuencias innominadas, agrupándolos según sus ambientes respectivos. Durante el Holoceno Temprano tuvo lugar una pequeña transgresión (Flandriana) que se refleja en los depósitos litorales, acumulados por lo general a poca distancia de la línea costera actual, más allá del límite de los depósitos de tormentas actuales. De forma excepcional, se ha considerado al complejo de barras y dunas, formadas durante esta transgresión, como una unidad nominada (Formación Los Pinos), debido a su extensión, grado de litificación y a la clara definición de sus rasgos morfológicos.

En sentido general los horizontes litológicos presentes en el territorio objeto de evaluación, se constituyeron durante el tercer ciclo sedimentario o estadio de transformación paleogeográfica del Neoactóctono Cubano, datado del Plioceno al Reciente, el cual comenzó con un predominio de rocas carbonatadas, reflejando un proceso general de transgresión marina que culminó súbitamente con una regresión, ocurriendo progresivamente la reducción de la profundidad de las aguas y extensión o emersión del territorio en el Holoceno.

De modo más específico se pudo determinar que la mayor parte de Cayo Guillermo se halla formada, tanto en profundidad como en superficie, por las secuencias de rocas carbonatadas



correspondientes a la Formación Jaimanitas (Q_3js). Las rocas pertenecientes a esta formación constituyen el basamento rocoso del territorio analizado, comprobándose su existencia según los registros de las investigaciones ingeniero geológicas realizadas hasta los 30.00 m de profundidad (tanto en perforaciones como en observaciones efectuadas por métodos de exploración geofísica). La Formación Jaimanita aflora hacia la porción central de Cayo Guillermo a modo de una extensa franja que ocupa buena parte de la mitad septentrional del mismo y su extremo occidental (ver anexo 2 y 18), constituyendo las llanuras interiores que se desarrollan hacia el interior del cayo y las costas acantiladas que se encuentran hacia el litoral Norte de este.

Hacia el margen de la Noroeste del territorio, las secuencias de rocas de la formación evaluada, se hallan cubiertas discordantemente por las biocalcarenitas oolíticas y pseudoolíticas, además de las calizas biodetríticas de la Formación Cayo Guillermo (Q_3cgu), la cual constituye la gran duna costera que se extiende hacia las inmediaciones de toda la línea de costa donde se desarrolla Playa Pilar. Esta gran duna costera alcanza cotas de hasta 15.00 m por encima del nivel medio del mar (n.m.m.) y se encuentra cubierta mayormente por una vegetación rastrera que ha contribuido a su fijación.

Hacia la mitad oriental de la costa Norte de Cayo Guillermo, las secuencias de rocas de la Formación Jaimanitas se encuentran a su vez cubiertas discordantemente por las calcarenitas oolíticas y biocalcarenitas débilmente litificadas de la Formación Los Pinos (Q_4lpi). Estas rocas afloran como una estrecha y alargada franja de barras y pequeñas dunas, que se extienden inmediatamente a continuación de la línea de playa existente, con un espesor que en ocasiones puede alcanzar hasta los 7.00 m. La misma refleja en su constitución el complejo de sedimentos marinos de la interfaz tierra-mar, existentes durante la transgresión Flandriana. En común que estas rocas se hallen cubiertas por arenas sueltas, que son originadas por el resultado de su propia disgregación bajo el efecto de los procesos de intemperismo.

Cada una de las formaciones geológicas mencionadas, se encuentran en menor o mayor medida en contacto con los depósitos de sedimentos innominados presentes en el terreno de trabajo, los cuales en su conjunto constituyen la mayor parte de la superficie como tal, del terreno analizado. De modo general hacia la costa Norte del cayo cada de uno de tales conjuntos litológicos se encuentran cubiertos por los Depósitos Marinos del Holoceno (Q_4m), los cuales conforman las extensas y bellas playas con las que cuenta Cayo Guillermo. Estos sedimentos presentan una pequeña y limitada difusión tanto superficial como en profundidad. Los mismos aparecen a modo de una delgada franja de detritos, casi continua, que se dispone de forma paralela a la línea de costa, serpenteando los contornos de la misma, con una anchura variable que oscila



aproximadamente entre los 10.00 m hasta los 60.00 m. Según el Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, 2000?) (ver anexo 2), tales sedimentos pueden estar formados por depósitos de arenas, guijarros de playa y bancos de tormenta, pudiendo alcanzar un espesor que oscila entre 1.00 m y 3.00 m.

Hacia toda la mitad meridional del territorio, cada una de las formaciones geológicas mencionadas, se encuentran cubiertas discordantemente por los sedimentos correspondientes a los Depósitos Palustres del Holoceno (**Q₄ p**). Estos depósitos se encuentran constituyendo los pantanos salobres bajos que se desarrollan hacia la porción del cayo señalada, además del fondo de las lagunas litorales e interiores salobres existentes. Independientemente de que poseen una extensa difusión superficial, en profundidad, según los resultados de investigaciones ingeniero geológicas efectuadas, pueden alcanzar espesores de hasta 4.00 m, alternando con la presencia de Depósitos Marinos del Holoceno (**Q₄ m**), con los cuales en ocasiones transicionan lateralmente, según los criterios de este investigador. Según el Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, 2000?), tales sedimentos pueden estar formados por residuos vegetales, limos carbonatados, arcillas salinizadas arenosas con restos carbonizados de troncos y raíces de mangles.

Seguidamente se ofrece una breve descripción de las formaciones geológicas antes referidas, según aparece en el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 2013).

➤ Formación Jaimanitas(**Q₃js**).

Autor (es).J. Brödermann, 1940.

Origen del nombre. Proviene del pueblo de Jaimanitas, provincia de La Habana.

Sinonimia. Agglomératcalcaire des cayes (A. Humbold, 1826a, b), Coastallimestone (parte) S.Taber, 1934), Creta gredosa, Calcáreo de (J.F.de Albear, 1967), Guanahacabibes, Calizas de la península de (A. Pszczólkowski, en: A. Pszczólkowskiet al., 1975), Gr. Jaimanitas (parte) (I.P. Kartashov et al., 1981), Jaimanitas Inferior, Formación (I.P.Kartashovet al., 1981), Mariano group (parte) (P.Brönnimann and D. Rigassi, 1963), Ramón formation (M.T.Kozary, 1957c), Sabinalformation (M.T.Kozary, 1956j), Seboruco formation (C. Schuchert, 1935), Yuraguano formation (M.T.Kozary, 1956e)

Distribución geográfica. Faja casi continua que bordea la costa cubana, gran parte de los cayos adyacentes y la Isla de la Juventud. Compone prácticamente todo el zócalo rocoso de la plataforma marina insular.

Litología. Calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con contenido



principalmente de conchas bien preservadas, corales de especies actuales y, ocasionalmente, biohermos. Los bolsones cársicos se encuentran en ocasiones rellenos por una fina mezcla carbonático-arcillosa-ferruginosa, de color rojo ladrillo. Pasan a biocalcarenitas, de granulometría y estratificación variables o masivas. En mayor o menor cantidad, contienen fragmentos de sedimentos terrígenos, que incluyen calizas preexistentes. Es frecuente encontrar variaciones litofaciales y biofaciales. En general, la cementación es variable y en su superficie presenta un casquete recristalizado de evaporita y caliche combinados, de 1.00 m a 2.00 m de espesor, por debajo del cual, en ocasiones, la roca aparece desintegrada, convertida en un material terroso. La coloración predominante es blancuzca, rosácea o amarillenta.

Relaciones estratigráficas. Yace discordantemente sobre las formaciones Güines, La Cruz, Río Maya, Vázquez, Vedado, Versailles, Turiguanó y las formaciones Júcaro y Río Jagüeyes (Gr. Nipe). Está cubierta discordantemente por las formaciones Cocodrilo, El Salado, La Cabaña, Los Pinos, Cayo Guillermo y Playa Santa Fe y los depósitos innominados del Holoceno en el territorio emergido y en la plataforma marina insular.

Correlación. Puede ser correlacionada con las formaciones Camacho, Jamaica y Cauto, de Cuba Oriental, y Siguanea, de Isla de la Juventud.

Edad. Pleistoceno Superior, parte baja (Sangamon).

Ambiente de sedimentación. En esta formación predominan las facies de playa, postarrecifal y arrecifal.

Ambiente tectónico. Neautóctono o Neoplatформа.

Espesor. Probablemente excede de los 10.00 m.

Observaciones. Su edad se determinó según datos radiométricos, criterios geomorfológicos y por su posición estratigráfica. La separación de dos miembros dentro de esta formación (Tortuguilla y Punta Monje), que aparece en trabajos anteriores, se desestima actualmente sobre la base de que esta formación presenta una gran variación facial, que no queda abarcada con la distinción de solo dos miembros. Por otra parte, sería poco práctico identificar todas las variaciones litofaciales existentes con una división en miembros ohipoestratotipos. Los depósitos débilmente consolidados, que yacen en la parte superior del corte y separados de su parte inferior por una superficie discordante visible, definidos como Jaimanitas Superior por I.P. Kartashov y sus colaboradores (1981), en la actualidad se consideran como parte de la Formación La Cabaña.

- Formación Cayo Guillermo (**Q₃cgu**).

Autor (es). M. Iturralde-Vinent, 1981.

Origen del nombre. Se deriva de Cayo Guillermo, en el archipiélago Sabana - Camagüey.

Distribución geográfica. Aflora en los cayos Guillermo, Contrabando, Coco e Hijo de Guillermo en el archipiélago Sabana-Camagüey.



Litología. Biocalcarenitas oolíticas y pseudoolíticas y calizas biodetríticas, con matriz micrítica, todas de granos finos a medios, con bioturbación, sin microfósiles reportados. Entre los biodetritos hay algas, miliolidos, soritiidae, equinodermos, entre otros. Se pueden distinguir hasta tres horizontes de laminación cruzada con inclinación de 0 - 30 grados al NE-SW y SE-NW. Estos horizontes se encuentran separados por superficies levemente alteradas (diastemas). Color gris-crema, con un casquete de meteorización gris oscuro.

Relaciones estratigráficas. Yace discordantemente sobre calizas de la Formación Jaimanitas, su techo es erosivo.

Correlación. Es correlacionable con las formaciones Playa de Santa Fe, La Cabaña, Sigüanea y El Salado.

Edad. Pleistoceno Superior, parte alta (Wisconsin).

Ambiente de sedimentación. El ambiente donde se depositó esta formación corresponde a dunas costeras, formadas en un clima tropical, con dos estaciones bien definidas: una seca, con movimiento de arenas y decrecimiento de las dunas y la otra húmeda, con proliferación de vegetación rastrera y fijación de la duna. Esto parece haber ocurrido en varios ciclos.

Ambiente tectónico. Neautóctono o Neoplateforma.

Espesor. 12.00 metros.

Observaciones. Su edad ha sido estimada sobre la base de su posición estratigráfica y su grado de litificación. En concordancia con las regulaciones de la versión cubana de la Guía Estratigráfica Internacional, el nombre original de esta unidad, "Guillermo", fue modificado, debido a que existe una unidad homónima invalidada (Formación Guillermo, de la provincia Camagüey), descrita por G. Pardo, en: P. Turín and Brönnimann, 1959 b. A pesar de que este nombre fue utilizado previamente, M. Iturralde-Vinent lo nombra en: E. Belmustakov et al., 1981, por lo que es un claro caso de homonimia.

➤ Formación Los Pinos (**Q₄lpi**).

Autor (es). M. Iturralde-Vinent, 1981.

Origen del nombre. Proviene de Playa Los Pinos, Cayo Sabinal, en el Archipiélago Sabana-Camagüey.

Distribución geográfica. En muchos cayos de los archipiélagos Sabana-Camagüey y Jardines de la Reina, y en costas acumulativas de la Isla de Cuba, lo que se observa en Santa María del Mar (La Habana), Varadero (Matanzas), Playa Ancón (Cienfuegos) y otros.

Litología. Calcarenitas oolíticas y biocalcarenitas, ambas de granos medios, bien redondeados y seleccionados, débilmente cementados. En ocasiones presenta laminación inclinada. Color blanco y crema. También suelen presentar conchas de microorganismos marinos y de moluscos terrestres.



Relaciones estratigráficas. Sobre yace discordantemente a la Formación Jaimanitas, separada por un paleosuelo. A veces está cubierta por arenas, que son el resultado de su propia desintegración bajo el efecto de los procesos de intemperismo. También se cubre, en partes, por depósitos turbosos y arenas actuales.

Edad. Holoceno (Flandriano).

Ambiente de sedimentación. Corresponde a un ambiente de costa baja acumulativa con barras y playas. Esto es, el complejo de sedimentos marinos de la interfaz tierra-mar, existente durante la transgresión flandriana, cuando el nivel del mar se elevó a 2.00 m o 3.00 m por encima del actual, según atestiguan los depósitos propiamente marinos aquí presentes.

Ambiente tectónico. Neoautóctono o Neoplateforma.

Espesor. Puede alcanzar hasta 7.00 m.

Observaciones. Su edad se estimó de acuerdo con su bajo grado de litificación, la poca alteración y su asociación con organismos recientes.

1.11. Tectónica

Atendiendo a los rasgos estructurales de la parte Norte-central del archipiélago cubano, el área de estudio se enmarca dentro de los límites de la Unidad Neotectónica Occidental (UNOc), situándose de modo más específico en el interior de esta, al Norte del Macrobloque Camagüey. La misma como el resto del territorio perteneciente a la UNOc, posee una definida tendencia a la continentalización, ya que las estructuras paleotectónicas existentes han perdido su independencia y las cuencas superpuestas cubren las secuencias pertenecientes a zonas diferentes por igual. Es decir, que se atravesó por un período de uniformidad estructural y un cubrimiento por unidades nuevas, relativamente poco activas e indiferenciadas; todo lo que confirma la existencia del tipo de desarrollo de plataforma moderna o neoplateforma de M. Iturralde (1977). En el desarrollo del neoautóctono cubano (nivel estructural donde ha evolucionado la neoplateforma), predominan los movimientos verticales de tipo oscilatorio que dieron lugar a un mosaico de bloques distintamente elevados (emergidos y sumergidos), que presentan muy pocas deformaciones tanto plicativas (pliegues y rizaduras) como disyuntivas (fallas y grietas). Con el surgimiento de esta estructura quedó redefinido el plano geológico compresivo anterior de arcos de islas volcánicas (desarrollados durante la evolución de substrato plegado), incluidas sus fallas, por lo que las nuevas rupturas poseen características (cinemáticas, dinámicas y morfológicas) propias, muy diferentes de las de etapas anteriores (Iturralde, 1992).

De acuerdo a las informaciones brindadas por el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 2013), la actividad tectónica del Cuaternario en el archipiélago cubano corresponde a la etapa orogénica tardía, más concretamente a la subetapa comprendida entre el



Plioceno y el Holoceno. Según el criterio de muchos investigadores, los movimientos tectónicos del Cuaternario en Cuba se analizan como una conjugación de movimientos de ascenso y descenso verticales. No obstante, las evidencias geólogo-geomorfológicas parecen confirmar lo planteado por otros estudiosos del tema, entre ellos, Kartashov et al (1981); Belousov y Orbera (1986), quienes afirman que la tendencia al levantamiento generalizado, iniciada al final del Mioceno, se mantuvo durante todo el Plioceno y continúa durante el Cuaternario. Lo anterior significa que, aunque los movimientos ascendentes fueron complejos y diferenciados y en algunos momentos disminuyeron, o llegaron a extinguirse, no hubo inversión en su dirección. En el tiempo analizado se acentúan los movimientos verticales diferenciados, que dividen al megabloque que conforma el archipiélago cubano en mesobloques, y éstos, a su vez, en bloques de diferentes órdenes, según la dimensión e intensidad de sus movimientos respectivamente. En esta etapa es característica la ocurrencia de las fallas normales, los deslizamientos gravitacionales locales y los desplazamientos laterales, y raramente se observan fallas inversas. Las fallas y las principales morfoestructuras deben su origen al ascenso desigual de los diferentes bloques.

En sentido general, en el territorio de Cayo Guillermo no se evidencio la existencia de grandes dislocaciones tectónicas plicativas o disyuntivas. Según los informes de los trabajos consultados y las labores de levantamiento ingeniero geológico ejecutadas para la realización de esta investigación, en el cayo los macizos rocosos presentes y en especial los constituidos por las rocas de la Formación Jaimanitas, si se encuentran afectados comúnmente por grietas y hacia algunos sectores, por algunas pequeñas fallas o micro fallas. Las grietas observadas son evidentemente endógenas, de origen tectónico, específicamente del tipo cortantes o de cizalla, las cuales se forman en condiciones de tensiones de las rocas y se disponen con cierta regularidad en relación con la dirección de los esfuerzos principales actuantes (forman ángulos de aproximadamente 30° con estos).

Atendiendo a su posición en el espacio, las grietas descubiertas son mayormente subverticales, aunque existen algunas verticales y en menor medida, horizontales e inclinadas. Las juntas detectadas se encuentran mayormente dispuestas de modo continuó, agrupándose en varias familias, que poseen un rumbo o extensión aproximadamente paralelo, constituyendo así distintos sistemas de grietas, cada una de las cuales posee características geométricas propias. A partir de la medición de los elementos de yacencia de las mismas, se determinó que el macizo rocoso que está constituido fundamentalmente por las rocas de la Formación Jaimanitas, se encuentra afectado en sentido amplio por 3 familias de grietas, más juntas aleatorias, observándose 2 familias principales o 2 direcciones predominantes de agrietamiento. La primera de estas familias se extiende con rumbo N de 50° a 60° E y la segunda con rumbo N de 20° a 30° E.



Según el grado de nitidez, las grietas observadas se encuentran mayormente cerradas, aunque se pueden encontrar también ligeramente abiertas con una separación entre sus bordes inferior a los 5.0 mm y en menor cuantía, rellenas por sedimentos y pequeñas partículas de roca disgregada. Atendiendo a la rugosidad y el estado o resistencia de las paredes de las grietas, las juntas registradas poseen fundamentalmente forma ondulada y rugosa, con bordes de roca tanto frescos como alterados, aunque también se localizaron algunas juntas planas y lisas entre las cuales se podía distinguir algunos espejos de fricción.

De acuerdo al espaciamiento observado entre las grietas de cada uno de los sistemas o familias identificadas, se determinó, que las juntas en sentido general se separan regularmente entre sí a una distancia que osciló entre los 1.05 m a 4.50 m, para una media de 2.62 m, clasificando según los criterios de González de Vallejo (2002), como un macizo rocoso con grietas muy separadas.

Un vez esclarecidos estos aspectos, se determinó que según la información que aparece en los esquemas del Mapa de Peligro Sísmico Regional y el Mapa de Zonación del Peligro Sísmico para la Norma Cubana Sismorresistente, ambos a escala 1: 1 000 000 (ver anexo 3), el sector de estudio se localiza en una zona donde los valores de aceleración horizontal efectiva oscilan de los **4% g** a **7% g**. La misma está clasificada como de riesgo sísmico muy bajo, es decir, existe sismicidad pero no se toman medidas sismorresistentes en las construcciones. Teniendo en cuenta todo lo anterior, se considera que el territorio objeto de evaluación presenta actualmente, un régimen tectónico y geodinámico relativamente tranquilo y estable.

1.12. Geomorfología

En un sentido amplio Cayo Guillermo expone un relieve joven propio de zonas costeras, originado en lo esencial, por la interacción de los procesos morfogenéticos. Dentro de estos se considera de modo especial, a los movimientos neotectónicos ascendentes o descendentes, a las variaciones del nivel del mar durante el Cuaternario, a la acción de un conjunto de procesos exógenos (desnudativo-acumulativos) de ciclo relativamente periódico que han sido favorecidos por la ubicación del archipiélago Jardines del Rey en la franja tropical septentrional, así como por la existencia predominante en el subsuelo de complejos litológicos carbonatados.

En correspondencia con lo anterior, se pudo determinar que en el territorio objeto de análisis se manifiesta la presencia de morfoestructuras correspondientes a los Complejos Naturales de Primer Orden que se relacionan a continuación:



1. Complejo Natural de Playas, Dunas Arenosas y Costas Acantiladas.
2. Complejo Natural de Lagunas Litorales e Interiores Salobres.
3. Complejo Natural de Llanuras Interiores sobre Rocas.
4. Complejo Natural de Pantanos Salobres Bajos.

Cada componente del complejo constituye un sub-complejo o complejo de segundo orden y posee ubicación y características específicas que lo definen.

El primer complejo mencionado, está representado por la existencia en sí, de morfoestructuras representativas de cada uno los sub-complejos que lo constituyen, ocupando de modo general, la totalidad de la costa Norte de Cayo Guillermo. El Sub-complejo Natural de Costas Acantiladas está representado por todas las terrazas marinas carbonatadas que constituyen a los acantilados que se extienden por buena parte de la costa Norte del cayo estudiado, fundamentalmente hacia su mitad occidental. A ellas se encuentran asociadas entre otras, la existencia de varios accidentes geográficos como Punta Rasa, Punta Caimán y Punta Playuelos. Hacia estos sectores se detectan variaciones relativamente apreciables de los niveles del terreno, registrando cotas que van desde los 0.50 m hasta los 9.50 m sobre el nivel medio del mar(n.m.m.). Es necesario señalar que en correspondencia con la constitución geológica del territorio, las terrazas marinas que constituyen a este sub-complejo natural, están formadas básicamente por roca caliza y roca calcarenita (ver anexo 18) pertenecientes a la Formación Jaimanitas (**Q_{3js}**). Tales rocas calcáreas aparecen por lo regular, intensamente afectadas por procesos cársicos superficiales, los cuales se han visto incrementados por la acción disolutiva del mar. De acuerdo con lo anterior hacia los sectores del terreno de estudio donde se manifiesta este sub-complejo natural, se puede observar la presencia de abundantes la pies agudos (diente de perro), oquedades de disolución (microcarso costero) y algunos bloques sueltos pequeños. En la zona de contacto del mar con los acantilados, se identifica la existencia de otros elementos morfológicos que caracterizan a este tipo de costa como son: el banco de oleaje, pequeños entrantes y salientes de la línea costera, solapas de erosión y bloques desplomados.

Por su parte el Sub-complejo Natural de Playas se presenta de modo intermitente por varios sectores de la costa Norte del cayo, mostrándose a modo de delgadas franjas, que se disponen de forma paralela a la línea de costa, serpenteando los contornos de la misma, con una anchura variable que oscila aproximadamente entre los 10.00 m hasta los 60.00 m. El mismo se encuentra alternando con las morfoestructuras del Sub-complejo Natural de Costas Acantiladas, aunque su presencia se hace más evidente hacia la mitad oriental del territorio. Este sub-complejo se desarrolla en la zona comprendida entre la bajamar y la plenamar, presentando evidentemente



cotas muy bajas, en él predomina la ocurrencia de los procesos abrasivos acumulativos provocados por el oleaje y la acción permanente de los vientos. Desde el punto de vista geológico el mismo se encuentra constituido por sedimentos pertenecientes a los Depósitos Marinos del Holoceno (**Q₄ m**).

Limitando al Sur con las playas, se encuentran las morfoestructuras características del Sub-complejo Natural de Dunas Arenosas, con las cuales comparten una estrecha relación geológica y espacial. Estas dunas arenosas presentan cotas variables de su cima, alcanzando desde 1.00 m o 2.00 m sobre el n.m.m., hasta 15.00 m sobre el n.m.m., en el caso de la duna colindante a Playa Pilar. Estas dunas o sucesiones de pequeñas dunas, aparecen también a modo de una estrecha y alargada franja de rocas débilmente cementadas y sedimentos sueltos, que se extienden inmediatamente a continuación de la línea de playa existente. Las morfoestructuras que constituyen este sub-complejo están integradas por rocas y sedimentos correspondientes a las formaciones geológicas Cayo Guillermo (**Q₃ cgu**) y Los Pinos (**Q₄ lpi**). Estas dunas han sido formadas en un clima tropical, con dos estaciones bien definidas: una seca, con movimiento de arenas y decrecimiento de las dunas y la otra húmeda, con proliferación de vegetación rastrera y fijación de la duna.

El Complejo Natural de Lagunas Litorales e Interiores Salobres, de modo general ocupa las zonas costeras bajas que existen hacia distintas porciones del litoral del cayo y hacia el interior del mismo. La mayor parte de estas lagunas se encuentran interconectadas entre sí, constituyendo sistemas de lagunas que se encuentran en constante intercambio hídrico. Las mismas se encuentran limitando indistintamente con morfoestructuras típicas de los demás complejos naturales mencionados. Según los trabajos de levantamiento ingeniero geológico efectuados para este trabajo y los resultados de investigaciones consultadas, tales lagunas poseen por lo regular una baja profundidad (hasta 0.80 m), estando ocupadas superficialmente durante la mayor parte del año por una capa de agua de espesor variable, aunque hacia la época de sequía el volumen de agua que estas contienen puede reducirse considerablemente, quedando al descubierto buena parte de los sedimentos que forman su fondo. La presencia de estas lagunas litorales e interiores salobres se hace más notable hacia la mitad oriental del cayo (ver anexo 18) y hacia su porción Sur, alcanzando extensiones significativas. El fondo de estas lagunas se encuentra ocupado mayormente por sedimentos correspondientes a los Depósitos Palustres (**Q₄ p**) y Depósitos Marinos del Holoceno (**Q₄ m**), aunque predominan mayoritariamente los primeros. En sentido general según el criterio de varios especialistas, se considera que el origen de estas lagunas se halle asociado a la existencia de fenómenos cárnicos hundidos en los cuales predomina la ocurrencia de procesos exógenos acumulativos. Estas lagunas constituyen las morfoestructuras



más significativas de la red hidrológica del territorio, la cual, aunque se encuentra ampliamente desarrollada por las bajas cotas que caracterizan la topografía del territorio, se haya limitada producto a la naturaleza soluble de los suelos y rocas que forman el terreno, que favorecen mayormente la infiltración de las aguas provenientes de las precipitaciones atmosféricas sobre su escurrimiento superficial.

El tercer complejo natural, se desarrolla hacia el interior del cayo, ocupando mayormente la porción central de la mitad occidental del territorio objeto de evaluación. Este complejo como su nombre lo indica, se relaciona con la existencia de una llanura interior sobre roca, la cual se puede encontrar formando parte de sectores relativamente bajos del terreno con cotas que oscilan entre los 0.50 m y 3.80 m sobre el n.m.m. Esta llanura se encuentra también limitando indistintamente con morfoestructuras típicas de los demás complejos naturales mencionados, transicionando de modo peculiar con estas. De modo general, dicha llanura se encuentra cubierta por una vegetación abundante, muy tupida y el relieve en ella es típico de llanuras abrasivas desnudativas, donde son cuantiosas y comunes las manifestaciones cársticas. Litológicamente como su nombre lo indica, este sub-complejo natural está constituido por la alternancia de roca caliza y roca calcarenita, cuyas secuencias en ocasiones se hallan intercaladas y en un sentido amplio forman parte de la Formación Jaimanitas (**Q_{3js}**).

El Complejo Natural de Pantanos Salobres Bajos, es el de mayor extensión en el Cayo Guillermo y el mismo se halla ocupando la mayor porción de la mitad Sur del territorio, manifestándose su existencia en las zonas bajas del humedal costero. Este complejo natural aparece en forma de llanuras, con cotas muy cercanas al nivel del mar o por debajo de este, pero de muy escasa profundidad. En el mismo se desarrolla un intenso proceso de deposición de material orgánico, determinándose en correspondencia con este proceso, que la mayor parte del área que ocupa este complejo, está constituida por acumulaciones de sedimentos correspondientes a los Depósitos Palustres (**Q_{4 p}**) del Holoceno y en menor medida y alternando con los primeros, por detritos propios de los Depósitos Marinos (**Q_{4 m}**) de la misma época geológica. En sentido general sobre estos pantanos salobres bajos se desarrolla una abundante y tupida vegetación de manglares, siendo los mismos más exuberantes en aquellos sectores donde se registran espesores de fangos orgánicos superiores a 1.00 m. Estos pantanos se hallan limitando al norte con morfoestructuras características de cada uno de los demás complejos naturales descritos.

1.13. Hidrogeología

En correspondencia con la constitución geológica de Cayo Guillermo, además de su ubicación y demás particularidades geográficas, la situación hidrogeológica que presenta este territorio se



considera como relativamente compleja. Al estar compuesto por sedimentos mayormente sueltos y por rocas carbonatadas de carácter soluble y relativamente permeable, que favorecen la infiltración de las aguas provenientes de las precipitaciones atmosféricas sobre su escurrimiento superficial, en Cayo Guillermo existe y se extiende un potente horizonte acuífero, que está compuesto mayormente por las rocas de la Formación Jaimanitas(Q_{3js}). El mismo constituye un acuífero libre y dada su vecindad con el mar, los niveles que este muestra coinciden prácticamente con los del mar, encontrándose influenciado directamente por las oscilaciones del nivel de este y evidentemente por su composición química, constituyendo además su principal fuente de alimentación. Atendiendo a los rasgos topográficos del cayo tratado, caracterizado por la existencia de cotas del terreno mayormente bajas, las aguas subterráneas presentes se encuentran en sentido general a escasa profundidad de la superficie natural del terreno, pudiéndole ocasional a las cimentaciones de las edificaciones emplazadas o por construir, afectaciones directas o indirectas a sus componentes. Según todo el volumen de perforaciones realizadas en el territorio, fundamentalmente aquellas ejecutadas por la ENIA durante las diferentes investigaciones ingeniero geológicas efectuadas, el horizonte acuífero presente posee un nivel medio, correspondiente tanto para periodo seco como para periodo húmedo, de 0.15 m sobre el nivel medio del mar. La dirección predominante del flujo de las aguas subterráneas tratadas, según las perforaciones consultadas es hacia el Sur, con valores de gradientes hidráulicos bajos que oscilan entre 0,0005263 y 0,000833. No obstante, hacia algunos sectores del territorio la dirección de las aguas subterráneas es hacia al Norte y en otros convergen hacia una zona central del cayo, para luego tomar la dirección predominante hacia el Sur (ver anexo 4).

De acuerdo a las características hidroquímicas que presentan las aguas existentes en el territorio analizado, se establece que las mismas deben considerarse agresivas al hormigón y al acero, pudiéndole ocasional a los mismos un efecto corrosivo severo. Según los resultados obtenidos a partir de la realización de varios ensayos químicos efectuados a muestras de estas aguas tomadas durante los trabajos de perforación llevados a cabo, las mismas poseen una mineralización media de 21 143.036 mg/l, clasificando de acuerdo a los criterios establecidos por O. A. Aliokin como aguas muy saladas.

Por último debe señalarse que el cayo bajo investigación presenta una red hidrológica ampliamente desarrollada, favorecida en buena medida por la existencia de cotas muy bajas en la mayor parte de su territorio y fundamentalmente hacia su porción Sur, estando ocupado por sistemas de pantanos salobres bajos y de lagunas litorales e interiores, que de modo general ocupan alrededor del 55 % o 65 % de su superficie. Buena parte de estos pantanos o lagunas se encuentran cubiertas por una capa de agua de espesor variable, durante la mayor parte del día.



Los niveles de agua en estos reservorios oscilan en dependencia de la acción de las mareas marinas, provocando en la mayoría de ellos una continua circulación del agua en su interior y la consiguiente formación de varios canales de flujo y reflujo de las aguas, donde se hacen más apreciables los procesos erosivos ocasionados por estos. Precisamente hacia la zona donde se desarrollan estos canales, es donde se detectan las mayores profundidades y por consiguiente los mayores espesores de aguas en estos pantanos salobres bajos y lagunas litorales e interiores. Independientemente de que buena parte de estos sectores, se hayan mayormente cubiertos por una capa de agua de espesor variable, se determinó que el volumen de agua que estos pueden contener y por tanto su área de extensión, se pueden ver notablemente incrementadas ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos de mediana y gran intensidad, además de la acción de penetraciones del mar.

1.14. Conclusiones parciales

A partir del análisis de los temas tratados en este capítulo, se arriba a las conclusiones siguientes:

1. Los terrenos constituidos por rocas son los más idóneos a ser empleados como bases de cimentaciones de una edificación, estableciéndose que existen 3 casos típicos del modo de cálculo de la presión bruta de resistente a la estabilidad de la base de una cimentación, en función del comportamiento y estado del macizo rocoso sobre el cual esta se situará.
2. El examen y valoración del comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de un determinado tipo de roca o suelo, necesita del empleo de técnicas de análisis estadístico para la evaluación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio o pruebas de campo efectuadas, debido a la heterogeneidad de valores que se pueden obtener de un mismo parámetro en una misma roca.
3. Las secuencias de rocas carbonatadas de la Formación Jaimanitas (Q_3js), constituyen el basamento rocoso de Cayo Guillermo y se extienden superficialmente por buena parte del mismo.
4. El territorio objeto de evaluación, se halla situado en un área que sísmicamente se encuentra clasificada como de riesgo sísmico muy bajo, es decir, existe sismicidad pero no se toman medidas sismorresistentes en las construcciones, no evidenciándose además la existencia de grandes dislocaciones tectónicas plicativas o disyuntivas.
5. Cayo Guillermo expone un relieve joven propio de zonas costeras y en él se manifiestan morfoestructuras pertenecientes a diferentes complejos naturales, predominando las cotas bajas del terreno, fundamentalmente hacia la mitad Sur del territorio.
6. En Cayo Guillermo existe y se extiende un potente horizonte acuífero, que está compuesto mayormente por las rocas de la Formación Jaimanitas (Q_3js), el mismo constituye un



acuífero libre y los niveles que este presenta al igual que su composición química, están directamente influenciados por el agua de mar que lo rodea.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA Y VOLUMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS PARA LA INVESTIGACIÓN

Introducción al capítulo

Para la realización de esta investigación, se siguieron los criterios metodológicos generales que regulan la ejecución de cualquier investigación ingeniero geológica dada, teniendo en cuenta las particularidades de las actividades o el complejo de métodos de estudio a emplear que la definen, según el alcance de la misma y el problema científico al cual le debe dar respuesta. Precisamente este capítulo tiene como objetivo fundamental, describir y exponer la metodología de trabajo seguida y el volumen de actividades ejecutadas para llevar a cabo la evaluación geotécnica del empleo de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, como terreno base de cimentaciones. Para alcanzar el objetivo general propuesto, este estudio consto de cuatro etapas de trabajo principales. En la primera de ellas se efectuó una recopilación y revisión de toda la información disponible sobre la línea de investigación relacionada con el tema de este trabajo científico, sobre la geología del territorio de estudio y en especial sobre las características y particularidades que distinguen la presencia de las rocas de la Formación Jaimanitas en este. Posteriormente se realizaron una serie de actividades y trabajos de campo complementarios, para la verificación de parte de la información recopilada y la obtención de otros datos de interés. Una vez ejecutadas estas acciones se procesó toda la información alcanzada, de modo tal que a partir de su interpretación se pudieron determinar las principales propiedades físicas y mecánicas de las rocas tratadas, para la evaluación de su comportamiento geotécnico y la valoración de su empleo como terreno base de cimentaciones. En la figura 2.1 se representa de modo gráfico la metodología de investigación establecida, en correspondencia con las etapas de trabajo mencionadas.

2.1. Etapa de recopilación y revisión de la información existente

En esta fase de la investigación se realizó una recopilación y revisión bibliográfica de toda información disponible al alcance de este investigador, relacionada con el tema de este trabajo científico y con el esclarecimiento de las características geográficas y geológicas generales del territorio objeto de análisis y en especial de la formación geológica evaluada. Para ello se emplearon varias horas de búsqueda bibliográfica en el Centro de Información del ISMM de Moa, se revisó la más usada y actual documentación con que cuenta el sistema de archivos y el banco de información técnica de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas del Ministerio de la Construcción de Cuba, además de acceder a la indagación de datos mediante el empleo de la Internet.

Para la realización de esta actividad, se tuvo precaución con la actualidad, rigor científico, vigencia y aplicabilidad de toda la documentación consultada. En el caso específico de la evaluación de la información vinculada con la metodología de trabajo seguida en el desarrollo de investigaciones ingenieras geológicas relacionadas con el tema tratado en este trabajo científico, existentes en la bibliografía disponible o vinculadas con experiencias de trabajo llevadas a cabo en Cuba u otras partes del mundo, se le dedicó particular atención a los diferentes criterios establecidos en toda la serie de normas técnicas empleadas para su ejecución. Dentro de la base normativa revisada, naturalmente se tuvo mayormente en cuenta a los documentos de este tipo, de obligatorio cumplimiento instaurados por la Oficina Nacional de Normalización de Cuba, organismo nacional de normalización de la república.

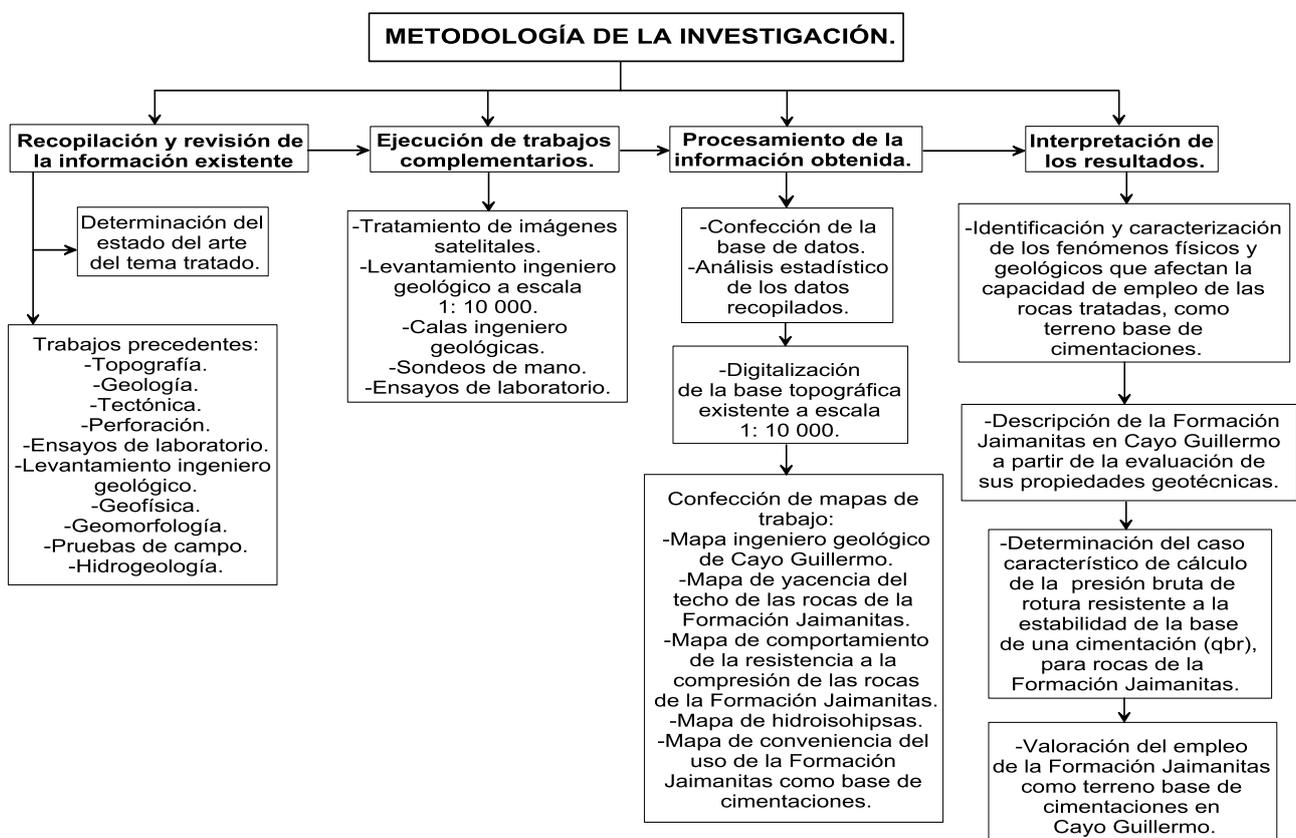


Figura 2.1. Flujograma donde se muestra la metodología de trabajo seguida para la realización de la investigación.

Gracias al acceso a las imágenes que ofrece Google Earth, se pudieron obtener las fotos satelitales que abarcan toda el área de Cayo Guillermo y se pudieron adquirir aquellas que con mayor nitidez, por sectores o cuadrantes del territorio mencionado, reflejan y permiten reconocer los rasgos físicos que distinguen la geografía y geología del mismo. Paralelamente, se recolectaron todas las Hojas Cartográficas (4483-I-a-5, 4483-I-a-6, 4483-I-c-2 y 4483-I-c-3) pertenecientes al "Esquema de los Límites Políticos Administrativos y Alturas Dominantes",



documento elaborado por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía en 1991, donde aparece la base topográfica de Cayo Guillermo a escala 1:10 000. Este mapa fue confeccionado a partir de la realización de un levantamiento estereotopográfico en el año 1991, empleando fotografías aéreas del año 1990.

Independientemente de toda la información geológica disponible sobre Cayo Guillermo en la bibliografía especializada existente, con vistas a detallar en las características geológicas generales e ingeniero geológicas particulares del territorio y en especial de la Formación Jaimanitas en él, se le dedico particular atención a todos los datos e informaciones recogidas en los informes correspondientes a las investigaciones ingeniero geológicas efectuadas en el mismo, por el Equipo de Investigaciones para la Construcción de la ENIA en Ciego de Ávila. Para ello se revisaron 32 informes ejecutados para diferentes etapas de proyecto, para la caracterización geotécnica de las distintas parcelas constructivas designadas y la búsqueda de zonas de préstamos para la extracción de materiales que pudiesen ser utilizados como relleno técnico, en la construcción precisamente de algunas de las obras investigadas. Del total de obras citadas: 1 correspondió a una instalación marítima, 2 pertenecen a obras de la infraestructura vial, particularmente a 2 variantes de puentes emplazados sobre un canal marítimo, además de lo anterior se efectuaron 2 estudios de búsqueda de zonas de préstamo y 1 investigación de una laguna de residuales. Las restantes investigaciones realizadas correspondieron a edificaciones y obras industriales (26), destacando 7 grandes hoteles y un grupo de generación eléctrica. A partir de la recopilación de todo el cúmulo de información existente, se pudo confeccionar una base de datos acerca de las rocas de la formación evaluada, conociendo detalles de su yacencia en las calas de investigación o sondeos de mano (476) donde se detectó su presencia, obteniendo los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados a los núcleos o testigos de las mismas (291), además de la determinación del comportamiento de este conjunto litológico ante la realización de diferentes pruebas de campo (20), para el esclarecimiento de algunos de sus principales parámetros físicos y mecánicos in situ, entre otras actividades.

En sentido general, gracias a todo el volumen de documentos analizados, se pudo obtener una información veraz y confiable, que permite evaluar el comportamiento de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, esclareciendo datos sobre sus características geológicas, tectónicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, principales fenómenos físicos y geológicos que la afectan, entre otros aspectos, que son de gran importancia para alcanzar los objetivos trazados en este estudio y darle así a respuesta a la problemática científica abordada.



2.2. Etapa de ejecución de trabajos complementarios

Una vez recopilado y revisado todo el volumen de información obtenido en la primera etapa de trabajo de esta investigación, se hizo necesaria la realización de una serie de actividades y trabajos de campo complementarios, para la verificación de parte de la misma y la obtención de otros datos de interés. Estos trabajos de campo se ejecutaron básicamente, hacia aquellos sectores dentro de los límites de Cayo Guillermo, donde existía un menor nivel de estudio, tratando de obtener la mayor cantidad de información posible acerca de la presencia, características y condiciones de yacencia de la Formación Jaimanitas en los mismos.

Para lograr los objetivos trazados, inicialmente se realizó el tratamiento digital de las fotos satelitales descargadas desde internet, sobre el territorio bajo análisis, específicamente aquellas obtenidas en el sitio de Google Earth. Estas acciones se efectuaron mediante el empleo del software Corel Draw 11, utilizando fundamentalmente las imágenes que con mayor nivel de nitidez, en 3 sectores o cuadrantes del territorio tratado, muestran y posibilitan identificar los principales rasgos físicos que distinguen a la geografía (principales accidentes geográficos, cambios en los tipos vegetación y su densidad) y geología del mismo (reconocimiento de principales morfoestructuras, extensión de litologías y contacto entre estas), en función de la intensidad y variedad de tonalidades del espectro de colores de cada foto tomada. Cada imagen descargada fue primeramente reajustada en cuanto a sus dimensiones y posteriormente fue sujeta un proceso de aplicación de efectos de ajustes de sus propiedades, aprovechando el conjunto de herramientas de trabajo que ofrece el software mencionado. En sentido general las 3 imágenes tratadas, fueron sometidas fundamentalmente a efectos de ajustes de autoecualización y tratamiento de gamma a valores de 1.93. Una vez realizados estos efectos de ajustes, las mismas fueron sometidas a efectos de transformación de inversión de colores. Los resultados de las acciones descritas se muestran en el anexo 10 de este documento. Gracias a la ejecución de esta actividad se pudo obtener un nivel de información determinado, dentro del cual resulto más relevante, la definición y reconocimiento de los contactos litológicos de las rocas de la Formación Jaimanitas, con las demás formaciones o conjuntos litológicos identificados en el territorio, principalmente hacia aquellos sectores de este con condiciones de acceso muy difíciles y donde no se habían realizado investigaciones previas.

Una vez revisada y examinada la información obtenida a partir del tratamiento de imágenes mencionado, se efectuó un levantamiento ingeniero geológico de la mayor parte del territorio objeto de estudio, fundamentalmente hacia su franja Norte y central. Precisamente hacia ese sector es donde se localiza toda la infraestructura constructiva ejecutada y se planea continuar emplazando las distintas edificaciones planificadas. Lamentablemente hacia la mayor parte de la



mitad Sur de Cayo Guillermo, no se pudieron realizar estas labores de levantamiento, debido fundamentalmente a que el mismo se encuentra ocupado como bien ya se mencionó, por el Complejo Natural de Pantanos Salabres Bajos, donde existe una vegetación mayormente de manglar muy tupida y prácticamente inaccesible, además de encontrarse en su mayor parte cubierto por una capa de agua de espesor variable. Esta actividad fue ejecutada sobre la base topográfica existe del área de estudio a escala 1:10 000, debido al alcance de la investigación y las dimensiones del territorio objeto de análisis. La misma consistió en la localización, medición y documentación detallada de la mayor parte de los fenómenos físicos geológicos que se observaron en el terreno de estudio y las áreas de afloramiento o condiciones de yacencia de las rocas de la formación sujeta a evaluación. Paralelamente, estos trabajos permitieron esclarecer de un modo más profundo, las particulares geomorfológicas que definen al territorio de interés. Para ello, teniendo en cuenta la simplicidad y homogeneidad de las condiciones geológicas existentes, se efectuaron 10 trayectorias de reconocimiento (marcha ruta), en donde se documentaron 470 puntos de interés (diferentes puntos por trayectoria, según su longitud), distanciados unos de otro como promedio a 100 m.

Paralelamente a la ejecución de las labores descritas, se ejecutó la perforación de 10 calas ingeniero geológicas, con el fin de obtener un registro del corte geológico del terreno de estudio, detallando principalmente en las particularidades de las rocas de la Formación Jaimanitas y garantizando además el muestreo de las mismas para la ulterior realización de ensayos físicos y mecánicos. Para ello se empleó una máquina ELI 290 de fabricación italiana, con la cual se obtuvieron un total de 60.00 m lineales de materiales perforados. Siguiendo la línea de deseo establecida, estos laboreos de investigación se trataron de efectuar en sectores con menor nivel de estudio, que posibilitaran el acceso y trabajo del equipamiento de perforación empleado. Para la ejecución de esta actividad, se siguieron las metodologías y criterios establecidos en la documentación técnica vigente y la Norma Cubana implantada "NC 327-2004. Geotecnia. Perforación de calas ingeniero geológicas".

Atendiendo a la finalidad de esta investigación, se determinó que todo el espesor de materiales a explorar, fuera perforado a través del método de rotación con selección de testigos. Para ello en función de las condiciones ingeniero geológicas existentes en cada sector en particular a examinar, se confeccionaron dos proyectos generales de perforación de calas ingeniero geológicas a ejecutar, los cuales se muestran en el anexo 11 de este documento. El primero de estos diseños se concibió para aquellas calas que se realizarían en sectores del territorio donde superficialmente afloraran materiales de relleno y/o suelos naturales, que de acuerdo a su naturaleza de constituir elementos sueltos y no consolidados, se hacía necesario que las calas se



encamisaran en todo el espesor explorado de estos, para evitar la ocurrencia de derrumbes. Según las particularidades generales de los sectores del territorio donde se planificó realizar calas, siguiendo este primer diseño de perforación, se previó que el espesor máximo de materiales que deberían ser encamisados, estuviese por el orden de los 5.00 m, situación esta que se comprobó durante la ejecución de las mismas. Siguiendo el diseño establecido, en cada una de estas calas primeramente se realizó el encamisado de todo el espesor de sedimentos y materiales sueltos que se presentaba (el cual osciló entre 0.83 m (CT-10) y 4.96 m (CT-1)) y llegar al techo del horizonte de rocas de la Formación Jaimanitas (entre las cotas de 3.70m (CT-8) a -4.40 m (CT-1) sobre el nivel medio del mar (n.m.m.)). Una vez realizado el encamisado de cada cala hasta su nivel específico, se procedió a la perforación de todos los elementos litológicos existentes hasta la profundidad de 6.00 m a explorar planificada, fuesen sedimentos sueltos o roca, mediante el empleo de la barrena muestreadora NX (portatestigo de simple tubo) de diámetro 108 mm en sondeos de 1.00 m de longitud cada uno.

El segundo proyecto de perforación de calas ingeniero geológicas, se concibió para la exploración de sectores donde afloraran y se desarrollaran en profundidad las rocas de la formación estudiada. Siguiendo el diseño correspondiente, en cada una de estas calas los sondeos se iniciaron y continuaron realizando a través de la utilización de la barrena muestreadora NX (portatestigo de simple tubo) de diámetro 127 mm, hasta los 6.00 m planificados.

En sentido general cada sondeo ejecutado se efectuó con régimen apropiado de velocidad, presión y lavado, de modo tal que se garantizó el mayor por ciento posible de recuperación del material explorado en cada caso (por encima del 80 %). De igual manera los mismos permitieron efectuar una descripción detallada de las muestras de suelo y los testigos de roca obtenidos, con el fin de esclarecer sus particularidades litológicas y en el caso de la roca, estimar la calidad del macizo rocoso según el RQD. En el anexo 12 se presentan las columnas litológicas logradas, las cuales muestran todas las incidencias del proceso de perforación llevado a cabo (potencia de los estratos, descripción litológica, RQD, grado de alteración de los materiales, entre otros).

A medida que fueron efectuadas las distintas calas proyectadas, se tomaron las muestras necesarias de los conjuntos litológicos existentes, según la línea de deseo del investigador, para satisfacer el volumen de ensayos necesarios que permitiría evaluar correctamente el tipo y propiedades de los estratos rocosos detectados y comparar estos resultados con los obtenidos en la base de datos recolectada con los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados en las investigaciones previas consultadas. En las calas realizadas, se muestrearon 12 núcleos de rocas, según el pronóstico de las condiciones geológicas existentes. Las muestras que se tomaron

fueron debidamente etiquetadas, embaladas y transportadas según la "NC 14: 1998. Geotecnia. Método de conservación y transportación de muestras de suelos y rocas".

A partir de las difíciles condiciones de acceso que posee buena parte de Cayo Guillermo, fundamentalmente hacia la mitad Sur del mismo, además de los distintos requerimientos establecidos por el CITMA, para el cuidado y preservación del medio ambiente en un territorio con un ecosistema tan particular como el tratado, se hizo necesaria la realización de 20 sondeos de mano, con el fin de investigar y evaluar fundamentalmente la profundidad de yacencia de las rocas de la Formación Jaimanitas, precisamente hacia aquellos sectores que presentaban un menor nivel de estudio. De los 20 sondeos de mano realizados, 15 se ejecutaron hacia las márgenes de la costa Sur de este cayó, ocupando buena parte de esta, situándose los mismos con un espaciamiento promedio entre ellos de 850 m, ver anexo 15 (ubicación de IIG consultadas y trabajos de campo realizados). La realización de estas actividades hacia esa franja del territorio, se pudo llevar a cabo, gracias a la ayuda conjunta de la Marina Marlin de Cayo Guillermo y el Grupo Extra Hotelero PALMARES de la provincia, que facilitaron el uso de una embarcación para poder acceder vía marítima a los puntos de ejecución de estos sondeos de mano.

En sentido general para la realización de los mismos se empleó una barrena de mano con muestreador PM de diámetro 40 mm. Tales sondeos de mano se llevaron a cabo hasta profundidades variables que oscilaron entre los 0.59 m (SMT-20) y los 5.36 m (SMT-7) con respecto a la superficie natural del terreno donde se emplazó cada uno de ellos, para una profundidad media de 3.58 m. Como resultado de la ejecución de estas acciones, se perforaron 71.60 m lineales de sedimentos arenosos sueltos y se detectó el techo de las rocas de la formación evaluada en cada uno de los laboreos efectuados. En el anexo 13 se presentan las columnas litológicas logradas, las cuales muestran las incidencias del proceso de perforación manual llevado a cabo (potencia de los estratos y descripción litológica, etc.).

Por último es necesario señalar, que a los núcleos de rocas obtenidos a través del proceso de perforación descrito, se le realizaron ensayos de carácter físico y mecánico. La ejecución de estas acciones, estuvieron bajo la responsabilidad del Grupo de Laboratorio del Equipo de Investigación ENIA de Ciego de Ávila. Como parte de los trabajos llevados a cabo, se efectuaron 12 ensayos físicos de Peso Específico de las Rocas y 12 ensayos mecánicos de Resistencia a la Compresión Axial Saturada de las Rocas, los cuales llevan consigo a su vez, la determinación de las densidad húmedas, secas y saturadas de dichos núcleos, además de la determinación de la absorción de estos. Para la ejecución de cada tipo de ensayo solicitado, se siguieron las metodologías y

criterios establecidos en los procedimientos vigentes y las Normas Cubanas implantadas, estas últimas se relacionan a continuación:

- ✓ NC 19:2000 Geotecnia. Determinación del Peso Específico de los Suelos (y Rocas).
- ✓ NC 64:2000 Geotecnia. Método para la preparación de especímenes de núcleos de roca y la determinación de las tolerancias de medida y forma.
- ✓ NC 62:2000 Geotecnia. Determinación de la resistencia a la compresión axial en especímenes de roca.

Los datos generales que muestran los resultados de estos ensayos, para los elementos litológicos analizados, se hallan plasmados en el anexo 16 de este documento.

2.3. Etapa de procesamiento de la información obtenida

A partir de la recopilación de todo el volumen de datos disponibles acerca del comportamiento geológico e ingeniero geológico de la Formación Jaimanitas en el territorio analizado y la realización de los trabajos de campo complementarios programados, se procedió a la confección de una serie de tablas, donde se sintetizó toda la información obtenida, en función de la actividad técnica específica ejecutada, de la cual se derivó el resultado tratado (perforación, ensayos de laboratorio, pruebas de campo, datos de la realización de trabajos de estudio geofísicos, entre otros). Una vez organizado todo el volumen de datos recolectados, se pasó a su procesamiento y análisis, en función de conocer y evaluar el comportamiento de cada parámetro o propiedad de la formación geológica investigada, del cual se tuvo registro y conocimiento.

Dentro de los datos procesados, se le prestó especial interés, debido a la confiabilidad y veracidad de los mismos, a las informaciones que aparecían en los 32 informes de investigaciones ingeniero geológicas realizadas en el territorio, donde se caracterizaban las rocas objeto de análisis (ver anexo 5). Gracias a ello, se obtuvieron datos esenciales acerca de la profundidad de yacencia de dichas rocas, espesor explorado de las mismas y RQD medio logrado de la ejecución de 476 calas ingenieras geológicas, donde fue registrada su presencia (ver anexo 6). Del análisis de esas perforaciones se alcanzó también información acerca de la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas existentes en el territorio y de su nivel medio con respecto al nivel medio del mar (n.m.m.). Igualmente de los testigos de roca estudiados en esas investigaciones previas, se recolectaron y evaluaron los resultados de 291 ensayos de laboratorio (ver anexo 7). Del total de ensayos llevados a cabo, 190 corresponden a la determinación de la resistencia a la compresión axial saturada (σ_{csat}) de los núcleos rocosos muestreados y 108 a la resistencia a la compresión

axial seca (σ_{csec}) de estos, además de ellos se recolectaron 244 resultados de ensayos de densidad humedad (γ_f), 191 de densidad seca (γ_d) y 77 de densidad saturada (γ_{sat}). Paralelamente a los testigos de roca estudiados se les realizaron 138 ensayos de peso específico (γ_s), 175 de determinación de la absorción (Abs) y 52 ensayos de humedad (h).

De manera semejante se obtuvieron y procesaron los resultados de 20 pruebas de campo efectuadas (ver anexo 8), para el esclarecimiento de algunos de sus principales parámetros físicos y mecánicos in situ, sobresaliendo la ejecución de 4 ensayos de presiometría, para la determinación de la resistencia a la compresión axial de la roca y de su módulo de deformación. Igualmente se adquirieron los resultados de 16 pruebas hidrogeológicas, para el conocimiento del coeficiente de infiltración de las rocas.

Por último, se recolectaron y procesaron los resultados de los trabajos de geofísica efectuados en 7 investigaciones ingeniero geológicas llevadas a cabo (ver anexo 9). De las 7 campañas geofísicas ejecutadas, en 1 se aplicaron métodos de exploración sísmicos para el conocimiento de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el medio y en las restantes se utilizaron métodos eléctricos para la determinación de los valores de resistividad eléctrica aparente de las rocas analizadas. Con los métodos de estudio geofísicos aplicados, se pudo reconocer además la presencia de fenómenos físicos geológicos significativos, principalmente carso, a partir de la detección de anomalías del campo físico medido en cada caso.

Una vez confeccionadas todas las tablas resúmenes de los datos recolectados, según las diferentes actividades llevadas a cabo y su ulterior procesamiento, se pasó a someter a los mismos a un análisis estadístico, haciendo mayor hincapié en la evaluación de los resultados de los diferentes ensayos de laboratorio ejecutados. Para realizar el tratamiento estadístico de las bases de datos confeccionadas, se siguieron los criterios teóricos establecidos para la realización de estas acciones y se empleó el conjunto de herramientas de análisis estadístico que posee el software Excel 2010, además de la utilización del programa computacional STATGRAPHICS Plus versión 5.1. Para ello inicialmente se contó el número de observaciones que reunía cada parámetro medido, se determinaron los valores mínimos y máximos de estos y se calculó el rango de la muestra para cada caso. Posteriormente se calculó y evaluó el comportamiento de los estadígrafos de tendencia central, principalmente de la media aritmética y la mediana, además de los estadígrafos de dispersión, fundamentalmente la varianza, la desviación típica y el coeficiente de variación. Paralelamente se esclareció el comportamiento de otros estadígrafos como la curtosis y el coeficiente de asimetría, además de determinar y comprobar que los datos recopilados presentan una distribución normal.



Durante el análisis estadístico de cada propiedad examinada, se realizó una evaluación de los valores extremos de estas o los supuestos valores atípicos, siempre teniendo en cuenta la naturaleza del parámetro estudiado en función del fenómeno geológico que él representa, además del rango de valores que el mismo puede tomar según la variedad de las condiciones geológicas imperantes en el medio donde se tomó la muestra, afectando a su vez el valor de esta, sin dejar de representar adecuadamente el mismo.

Para el caso específico del examen de los resultados de laboratorio obtenidos, a partir del análisis estadístico efectuado, se valoró la homogeneidad individual de cada elemento litológico que constituye a la formación estudiada (caliza y calcarenita), atendiendo a cada propiedad tratada. De forma análoga se evaluó la homogeneidad general de la formación para cada característica.

La digitalización de la base topográfica de Cayo Guillermo, a la escala de trabajo seleccionada 1:10 000, según el alcance de la presente investigación y las dimensiones del territorio objeto de estudio, se realizó mediante el empleo del software AutoCadMap 2010. Como base de trabajo inicial, se emplearon las Hojas Cartográficas: 4483-I-a-5, 4483-I-a-6, 4483-I-c-2 y 4483-I-c-3, pertenecientes al "Esquema de los Límites Políticos Administrativos y Alturas Dominantes", documento elaborado por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía en 1991, donde aparece la base topográfica del terreno de estudio a escala 1:10 000. Este mapa fue confeccionado a partir de la realización de un levantamiento estereotopográfico en el año 1991, empleando fotografías aéreas del año 1990. Cada una de las hojas cartográficas mencionadas fue escaneada con un alto nivel de detalle e importadas progresivamente al software de trabajo mencionado. Gracias al compendio de valiosas herramientas informáticas que posee el AutoCadMap 2010, se procedió a georeferenciar cada una de las imágenes escaneadas en una capa base de trabajo, quedando de esta manera todas las imágenes unidas en un solo y gran mapa topográfico, referenciado en su base planimetría, según el sistema de coordenadas Cuba Norte, del sistema coordenadas nacionales. Para el tratamiento de la base altimétrica de cada hoja topográfica escaneada, se procedió a la digitalización de cada curva de nivel representada en dichas hojas, mediante la construcción de un sistema de polilíneas. Estas polilíneas se iban dibujando, siguiendo rigurosamente el trazado de la curva de nivel que paulatinamente se iba representando y a la misma se le asignaba el valor de la cota que le correspondía. De manera semejante se trabajó con los puntos de elevación topográficos que dicho mapa destaca y la identificación de los principales accidentes y particularidades geográficas que se reconocieron en el mapa original. Como resultado final de las labores efectuadas, se obtuvo un mapa topográfico digital a escala 1:10 000 de Cayo Guillermo (ver anexo 17), que constituye una versión digital única y fiel del



mapa "Esquema de los Límites Políticos Administrativos y Alturas Dominantes" del territorio analizado, con el cual originalmente se trabajó.

Una vez llevadas a cabo las actividades descritas anteriormente, se procedió a la confección de los diferentes mapas de trabajo que se requerían elaborar, con vistas a cumplir el objetivo general propuesto en este trabajo científico.

A partir de los resultados alcanzados en el tratamiento digital de las imágenes satelitales descargadas desde el sitio Google Earth y teniendo en cuenta todo el volumen de información tomada durante la ejecución de las labores de levantamiento ingeniero geológico llevadas a cabo, sobre la base topográfica existente a escala 1:10 000, se confeccionó el mapa ingeniero geológico de Cayo Guillermo a la escala mencionada (ver anexo 18). Para la confección de este mapa fue de vital importancia además, la utilización de toda la información reflejada en el total de calas de investigación o demás laboreos de perforación efectuados en el territorio, en especial la referente a las 476 calas o sondeos de mano donde se detectó la presencia de las rocas de la Formación Jaimanitas. Igualmente para la elaboración del mapa señalado, se le prestó particular interés a la información recogida a partir de la realización de las 10 calas y los 20 sondeos llevados a cabo durante la etapa de ejecución de los trabajos complementarios requeridos para esta investigación. Para la confección de este mapa, se siguieron además los criterios técnicos vigentes, establecidos en la norma cubana "NC 51-24:1984. Investigaciones ingeniero geológicas. Mapas ingeniero geológicos. Procedimiento para su elaboración". Gracias a todo el volumen de acciones efectuadas, se elaboró un mapa ingeniero geológico del territorio analizado a la escala mencionada, donde se representan de forma confiable, todos los conjuntos litológicos cuya presencia fue reconocida en el terreno, según su naturaleza geológica y la ubicación de los principales fenómenos físicos geológicos existentes, o las zonas de afectación de estos.

De acuerdo al procesamiento y análisis de la información contenida en la tabla resumen de los laboreos de perforación ejecutados en investigaciones ingeniero geológicas realizadas previamente, donde se detectó la presencia de las rocas de la formación estudiada (ver anexo 6) en 476 calas o sondeos de mano, además de los resultados de las 10 calas y los 20 sondeos de mano practicados en la etapa de ejecución de los trabajos complementarios de este estudio, se pudo confeccionar una base de datos para la elaboración de un mapa de yacencia del techo de las rocas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo. Para la ejecución de este mapa de trabajo se utilizaron los programas de computación Golden Software Surfer 11 y AutoCadMap 2010. Mediante el empleo del Golden Software Surfer 11, la base de datos lograda fue inicialmente tratada en el Grid, utilizando como método de Gridding para la representación de la



cota del techo de las rocas evaluadas, un Kriging Linear tipo puntual, lo cual estuvo fundamentado por la naturaleza de la variable representada y debido a que fundamentalmente la red de estudio, de donde se tomaron los datos de la misma, posee un carácter completamente irregular. Una vez creado el archivo del Grid, se procedió a generar un mapa de contornos donde se representó, a intervalos adecuados, las isolíneas que muestran la cota del techo de las rocas de la formación examinada en el territorio mencionado. Este mapa de contornos fue exportado al ambiente de trabajo del AutoCadMap 2010 y superpuesto en este software, sobre la base del mapa topográfico de Cayo Guillermo a escala 1:10 000 previamente digitalizado, para su posterior edición y final obtención según el formato mostrado en el anexo 19, donde se ilustra.

Para la confección del mapa de comportamiento de la resistencia a la compresión simple de las rocas de la Formación Jaimanitas (ver anexo 20), se partió del procesamiento y análisis de la tabla resumen donde aparecen los resultados de ensayos de laboratorio practicados a 291 testigos de roca (ver anexo 7) obtenidos en las investigaciones ingeniero geológicas efectuadas previamente. Igualmente para la elaboración de este mapa, se tuvieron en cuenta los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia a la compresión axial saturada ejercidos a los 12 núcleos de roca (ver anexo 16), adquiridos durante la realización de la etapa de trabajos complementarios ya descrita.

Como bien ya se mencionó anteriormente, del total de ensayos recopilados inicialmente, 190 corresponden a la determinación de la resistencia a la compresión axial saturada de los núcleos rocosos muestreados y 108 a la resistencia a la compresión axial seca de estos, debido a lo cual como bien se puede apreciar en el anexo 7, existen algunos testigos de roca a los cuales se les practicaron ensayos de cada tipo, independientemente del elemento litológico que constituían a estos. Ante esta situación, para la representación del comportamiento de la resistencia a la compresión simple de las rocas tratadas, se decidió seleccionar el resultado correspondiente a la compresión axial saturada, debido a que la misma refleja la situación más desfavorable del comportamiento analizado de las rocas y el mismo constituye la variante de ensayo más realizada en correspondencia con las condiciones ingeniero geológicas existentes en el territorio estudiado, donde predominan un relieve bajo y la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas existentes es baja, estando precisamente en estado saturado la mayor porción de las rocas estudiadas. De manera semejante en el caso de la representación areal de los resultados, se constató que en el volumen de ensayos recopilados de los estudios consultados, existen numerosas calas donde independientemente de los elementos litológicos presentes en el perfil geológico, se tomaron varios núcleos de roca a diferentes profundidades y se ensayaron los mismos. Ante de esta situación, para la representación del comportamiento de la resistencia a la



compresión simple de las rocas tratadas, se decidió usar como valor a mapear, el resultante del cálculo de la media aritmética de cuantos ensayos fueron realizados en la misma cala, debido a que de esta manera se refleja de una manera más fehaciente el real comportamiento de la formación tratada, como un todo, sin la adopción de condicionantes al comportamiento evaluado.

Una vez procesada la base de datos general para la elaboración del mapa de comportamiento de la resistencia a la compresión simple de las rocas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, se procedió a su elaboración mediante el empleo también de los programas de computación Golden Software Surfer 11 y AutoCadMap 2010. A partir de la utilización del Golden Software Surfer 11, la base de datos lograda fue inicialmente tratada en el Grid, utilizando como método de Gridding para la representación de la resistencia a la compresión de las rocas evaluadas, un Kriging Linear tipo bloque, lo cual estuvo fundamentado por la naturaleza de la variable representada y debido a que principalmente la red de estudio, de donde se tomaron los datos de la misma, posee un carácter completamente irregular. Una vez creado el archivo del Grid, se procedió a generar un mapa de contornos donde se representó, a intervalos adecuados, las isolíneas que muestran la resistencia a la compresión simple de las rocas de la formación examinada en el territorio mencionado. Este mapa de contornos fue exportado al ambiente de trabajo del AutoCadMap 2010 y superpuesto en este software, sobre la base del mapa topográfico de Cayo Guillermo a escala 1:10 000 previamente digitalizado, para su posterior edición y final obtención según el formato mostrado en el anexo 20, donde se expone.

Para la elaboración del mapa de hidroisohipsas de las aguas subterráneas detectadas en el territorio, se tomó como base de datos para su elaboración, la información recopilada en el anexo 6 donde aparecen las mediciones sobre la profundidad de yacencia y nivel de las aguas descubiertas en las 476 calas o sondeos de mano ya mencionados. Igualmente se tuvieron en consideración, los resultados sobre las mediciones de la profundidad de yacencia y nivel de las aguas subterráneas tomadas de las 10 calas practicadas durante la etapa de ejecución de los trabajos complementarios de este trabajo científico (ver anexos 12 y 14). Para la ejecución de este mapa se utilizaron igualmente los programas de computación Golden Software Surfer 11 y AutoCadMap 2010. A partir del empleo del Golden Software Surfer 11, la base de datos obtenida fue inicialmente tratada en el Grid, utilizando como método de Gridding para la representación de los niveles de las aguas subterráneas descubiertas, un Kriging Linear tipo puntual, lo cual estuvo fundamentado por la naturaleza de la variable representada y debido a que fundamentalmente la red de estudio, de donde se tomaron los datos de la misma, posee un carácter completamente irregular. Una vez creado el archivo del Grid, se procedió a generar un mapa de contornos donde se representó, a intervalos seleccionados, las isolíneas que muestran los niveles de las aguas



subterráneas detectadas en Cayo Guillermo. Este mapa de contornos fue exportado al ambiente de trabajo del AutoCadMap 2010 y superpuesto en este software, sobre la base del mapa topográfico del territorio previamente digitalizado, para su posterior edición y final obtención según el formato mostrado en el anexo 4, donde se ilustra.

Teniendo en cuenta todo el volumen de información alcanzada sobre la Formación Jaimanitas en el territorio, se valoró la opción de confeccionar un mapa de conveniencia del uso de la misma, como terreno base de cimentaciones. Para ello resulto esencial la evaluación de todos los criterios teóricos establecidos que norman o rigen la utilización de terrenos conformados por rocas, para su empleo como base de cimentaciones de edificaciones y demás estructuras. Teniendo en cuenta los aspectos abordados acerca del tema en el epígrafe 1.3, perteneciente al capítulo 1 de este documento, se dedujo que como información básica de partida para la elaboración del mapa propuesto, además de tener conocimiento sobre las características topográficas del terreno a evaluar, se debe de poseer información acerca de: la profundidad de yacencia o nivel del techo de la roca que se utilizará como base de cimentación, valores de la resistencia a la compresión simple (σ_c) de las mismas y datos acerca de la profundidad de yacencia o nivel de las aguas subterráneas presentes en el medio. El comportamiento de cada uno de los parámetros mencionados, los cuales constituyen a su vez factores condicionantes para la valoración del uso de la formación tratada como base de cimentación, es conocido y su distribución areal se refleja en toda la extensión de Cayo Guillermo, en los mapas que aparecen en los anexos 17, 19, 20 y 4 ya confeccionados.

Según los criterios abordados en el epígrafe 1.2 ya referido, para la evaluación del uso de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones, es importante tener en cuenta además los aspectos que se mencionan a continuación:

8. Estructura geológica (plegamientos, fallas).
9. Estudio del agrietamiento o discontinuidades del macizo rocoso (rumbo y buzamiento de las diaclasa o juntas, su espaciamiento, espesor, tipo de relleno, planos de foliación, grietas).
10. Extensión y características de las zonas de alteración e intemperización de la roca.
11. Comportamiento de la roca frente al agua.
12. Características hidrogeológicas del macizo.

El comportamiento de los aspectos anteriormente relacionados, también es conocido y evaluado en este trabajo científico, como resultado de la realización de las actividades llevadas a cabo hasta el momento. La descripción y caracterización de estos aspectos es parte fundamental del

Leonel Rodríguez González



mismo, siendo tratados en la etapa de trabajo correspondiente a la interpretación de los resultados, que más adelante se comentará. Precisamente a partir de la caracterización de estos aspectos, se determinó que estos poseen características generales bien definidas y homogéneas que varían en un margen muy estrecho, debido a lo cual el mapeo de su distribución no es representativo, ni eficaz para diferenciar o condicionar el uso de la formación estudiada, como base de cimentaciones.

Debido a lo anterior para la confección del mapa deseado, se utilizaron los software Golden Software Surfer 11, AutoCadMap 2010 y ArcGIS versión 10.0. Para ello inicialmente, se realizó una zonificación del comportamiento de cada uno de los factores o parámetros mapeados en los anexos 17, 19, 20 y 4, a partir de la determinación de condicionantes que diferencian su grado de aprovechamiento para su empleo como base de cimentaciones. Los mapas de zonificación del comportamiento de cada uno de los factores o parámetros examinados, fueron exportados al ArcGIS versión 10.0 y gracias al compendio de herramientas que posee este programa computacional, se sometieron a operaciones entre mapas, donde se superpusieron y combinaron paulatinamente unos con otros, zonificando a su vez progresivamente los sectores del territorio, en los cuales coincidían las áreas de mejor comportamiento general determinado, para todos los parámetros evaluados. A partir de las acciones llevadas a cabo, se obtuvo el mapa de conveniencia propuesto.

De los parámetros evaluados, se considera que el que posee mayor grado de incidencia para la valoración del empleo de la Formación Jaimanitas como base de cimentaciones, lo constituye el análisis de la profundidad de yacencia precisamente de estas rocas, las cuales están representadas por el comportamiento de la cota de yacencia del techo de las mismas en el anexo 19. El comportamiento de este parámetro o factor, condiciona la selección como variante de cimentación, del empleo de una cimentación superficial o profunda (que trabajaría evidentemente apoyada en punta sobre las rocas analizadas), constituyendo el uso de una cimentación superficial el mejor resultado esperado.

Según los criterios de Delgado Vargas (1999), la clasificación de un tipo de cimentación a utilizar en superficial o profunda, aplicada a la práctica ingeniera puede resultar convencional, dado a que los criterios de diferenciación entre superficial y profundo no pueden hacerse lo suficientemente precisos y generales como para que no se presenten casos ambiguos, debido a todo lo cual no sea factible definir una frontera estricta de delimitación. De acuerdo a González de Vallejo (2002), una cimentación superficial se define "como aquella cuyo plano o base de apoyo se sitúa a una profundidad igual o menor de 5 veces su anchura o dimensión mínima en planta". Por su parte Delgado



Vargas (1999), en cuanto a cimentaciones superficiales considera que: "a no ser que medien dificultades especiales para excavar, se considera como profundidad límite aquella que no exceda de 2 a 3 veces el ancho del cimientó".

Atendiendo a los criterios de estos y otros académicos consultados, el presente investigador considera que para las condiciones ingeniero geológicas de Cayo Guillermo, donde predomina un relieve bajo, donde la profundidad del nivel freático está mayormente influenciada por la presencia del mar y sus oscilaciones, donde además en aquellos sectores en los cuales no afloran las rocas de la formación tratada, estas se hallan regularmente cubiertas por sedimentos sueltos no consolidados con espesores variables; independientemente de la selección de las dimensiones del lado menor de un cimientó general dado, determinado en un prediseño geotécnico de cimentaciones, el límite para la demarcación del emplazamiento de cimentaciones superficiales estará dado por el hecho de que el techo de las rocas analizadas yazcan a la cota de -1.00 m sobre el n.m.m. o por encima de este valor. La adopción de la anterior condicionante, está dada sobre la base de que tecnológicamente hasta el día de hoy, los cimientos que se puedan ubicar a cotas de yacencia de la roca de la formación analizada, menores a -1.00 m sobre el n.m.m., debido a las condiciones ingeniero geológicas existentes, tendrían que ser construidos como cimientos profundos tipo pilotes, para evitar gastos excesivos en la construcción de tabla-estacados para el sostenimiento de las paredes de las excavaciones a realizar para su construcción, además del uso de sistemas de bombas de achiques para la evacuación de parte de los volúmenes de agua que se acumularía en tales excavaciones.

Con vistas a lograr una zonificación más efectiva y tecnológicamente real del factor cota de yacencia del techo de las rocas tratadas, para el fin previsto, se decidió sumar al criterio de medida adoptado, la selección del intervalo de cota de yacencia de las rocas menores al nivel de -1.00 m hasta -3.00 m con respecto al n.m.m., como zona para la construcción de cimentaciones semiprofundas, tipo pilotes cortos. De esta manera los sectores de la Formación Jaimanitas que yazcan a una cota comprendida entre los -3.00 m hasta los -5.00 m con respecto al n.m.m., serán clasificados como zonas para el emplazamiento de cimentaciones profundas. De manera semejante se consideró que aquellas porciones del cayo donde el techo de las rocas de la formación examinada se encuentren a cotas menores a los -5.00 m con respecto al n.m.m., serán catalogadas como zonas para el emplazamiento de cimentaciones muy profundas.

Para la evaluación de los valores de la resistencia a la compresión simple (σ_c) de las rocas de la formación tratada, como parámetro a tener en cuenta a la hora de valorar su capacidad de empleo como base de cimentaciones, se tuvieron en consideración las distintas clasificaciones existentes



en la bibliografía sobre el comportamiento del mismo. De las tantas clasificaciones revisadas, se tomó como básica de trabajo, la establecida en el "Manual Instructivo sobre Parámetros y Correlaciones Requeridos para el Diseño de Obras Compatibilizadas", elaborado por el Departamento Técnico Nacional de la ENIA en 1991, la cual agrupa aspectos generales de las clasificaciones más utilizadas, en función de los resultados obtenidos en el laboratorio y los criterios de identificación en el campo de estas rocas, actualizadas a las condiciones cubanas (ver anexos 21).

Según todos los resultados de laboratorio obtenidos, sobre el comportamiento de la resistencia a la compresión simple (σ_c) de las rocas objeto de estudio en la presente investigación y los criterios abordados en la clasificación básica de trabajo mencionada, para la zonificación del comportamiento de este factor, se adoptaron como intervalos condicionantes de su aprovechamiento, para la valoración de las rocas que él representa como base de cimentaciones, los siguientes:

1. Valores de σ_c entre 5.00 kg/cm² y 12.50 kg/cm², roca muy débil.
2. Valores de σ_c entre 12.50 kg/cm² y 50.00 kg/cm², roca débil.
3. Valores de σ_c entre 50.00 kg/cm² y 125.00 kg/cm², roca moderadamente débil.
4. Valores de σ_c entre 125.00 kg/cm² y 500.00 kg/cm², roca moderadamente fuerte.

Según los intervalos establecidos, se considera que los sectores del terreno que atendiendo al parámetro analizado, ofrecerán mejores condiciones para ser utilizados como base de cimentaciones, serán los que posean valores de σ_c entre 125.00 kg/cm² y 500.00 kg/cm², correspondiendo a rocas moderadamente fuertes.

Por último para la evaluación de la profundidad de yacencia o nivel de las aguas subterráneas presentes en el medio, como parámetro a tener en cuenta a la hora de valorar la capacidad del empleo de la Formación Jaimanitas como base de cimentaciones, se tuvo en cuenta la compleja situación hidrogeológica existente en el territorio, abordada en el epígrafe 1.13 del capítulo 1 de este documento. Partiendo del hecho de que precisamente las rocas de esta formación geológica, son las que constituyen mayormente el potente horizonte acuífero existente en el cayo y dado su nivel de influencia por el mar que lo rodea, a partir del comportamiento del nivel medio de las aguas descubiertas representado en el anexo 4, se estableció como límite para la demarcación de la zona favorable para el uso de las rocas tratadas como base de cimentaciones, la cota 0.15 m sobre el n.m.m. De esta manera todos los sectores del terreno donde las rocas de la Formación



Jaimanitas yazcan por debajo de la cota 0.15 m sobre el n.m.m., estarán comprendidos en una zona desfavorable para el uso de las mismas para la finalidad evaluada.

2.4. Etapa de interpretación de los resultados

Gracias a todo el volumen de información obtenida acerca de la formación estudiada, además de los datos alcanzados sobre las características generales de Cayo Guillermo y a su ulterior procesamiento, se pudo proceder a su interpretación, con vistas a dar respuesta al objetivo general propuesto para este trabajo.

Para ello inicialmente se realizó un análisis para la identificación y caracterización de los fenómenos físicos y geológicos que afectan la capacidad de empleo de las rocas tratadas como base de cimentaciones. Este análisis partió del esclarecimiento de las condiciones geológicas generales existentes y del reconocimiento de las posibles estructuras geológicas presentes (plegamientos y fallas), en correspondencia con el ambiente geológico en el cual se ha desarrollado el territorio analizado. Paralelamente se efectuó una caracterización general y una descripción del agrietamiento o discontinuidades que afectan el macizo rocoso que conforman las rocas de la formación evaluada, en función de sus principales particularidades (tipo de grieta, espaciamiento entre estas, espesor, tipo de relleno, plano de fracturación), teniendo en cuenta las distintas clasificaciones existentes para su reconocimiento y evaluación.

De manera semejante se determinó el grado de afectación y extensión de las zonas de alteración e intemperización de las rocas, en el perfil geológico del territorio, describiendo sus principales características e identificando las particularidades que la distinguen en sentido general. En correspondencia con los criterios de identificación en el campo del grado de alteración de las rocas, se clasificó la misma siguiendo los aspectos establecidos al respecto en el anexo 23. La clasificación que se muestra en el anexo referido, sobre el grado de alteración de las rocas, aparece en el "Manual Instructivo sobre Parámetros y Correlaciones Requeridos para el Diseño de Obras Compatibilizadas", elaborado por el Departamento Técnico Nacional de la ENIA en 1991. Para la determinación cuantitativa del grado de intemperización de las rocas evaluadas, se calculó el coeficiente de intemperización, K_{bc} , el cual se define según lo establecido al respecto en la NC-XX.2014 (Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales), actualmente en proceso de aprobación y publicación, de la forma siguiente:

$$K_{bc} = \frac{\text{Peso volumétrico de la roca intemperizada}}{\text{Peso volumétrico de la roca no intemperizada}}$$



A partir de la interpretación de los datos obtenidos, se determinó que el principal fenómeno físico geológico que afecta la capacidad de empleo de la formación evaluada como base de cimentaciones, lo constituye el carso. Debido a lo anterior se procedió a caracterizar este fenómeno atendiendo a los criterios que recoge la NC-XX.2014 en su apéndice C, donde sugiere un grupo de aspectos a tener en cuenta a la hora de efectuar un proyecto de cimentación en un terreno cársico. Dentro de los aspectos esclarecidos, según el documento técnico mencionado, se destacan los siguientes:

1. Tipos y formas predominantes de las manifestaciones cársicas.
2. Distribución espacial de las oquedades en el área de la obra.
3. Dimensiones promedio (sección transversal) de las oquedades y sus direcciones predominantes.
4. Si las oquedades o grietas están rellenas y las características del material relleno.
5. Interrelación de las manifestaciones cársicas con las aguas subterráneas.

La segunda fase de interpretación de los resultados obtenidos, consistió en efectuar una descripción detallada de los principales elementos litológicos (caliza y calcarenita) constituyentes de la Formación Jaimanitas y del macizo rocoso que esta compone como un todo, sobre la base de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas que caracterizan el comportamiento geotécnico de estas rocas, las cuales tributan a la valoración de su empleo como terreno base de cimentaciones. Para ello se efectuó una descripción detallada de todas las características geológicas y físicas que distinguieron a los principales elementos litológicos de esta formación, haciendo hincapié en propiedades fundamentales como su color, estructura, textura, contenido de fósiles, inclusión de lentes de otros elementos litológicos, espesor medio explorado, distribución espacial, entre otros, de acuerdo a los criterios establecidos en la base normativa existente, fundamentalmente según lo exigido en la NC 54-269: 1984 (Materiales y productos de la construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de las investigaciones ingeniero geológicas en edificaciones).

De manera semejante, se le prestó especial importancia a la evaluación del comportamiento geotécnico de las propiedades físicas y mecánicas, obtenidas de dichas rocas a partir de los diferentes ensayos de laboratorio realizados, sobre la base de los criterios establecidos en las clasificaciones existentes. Cabe recordar que las tablas resúmenes donde aparecen los diferentes resultados de laboratorio obtenidos del ensayo de estas rocas, se muestran en los anexos 7 y 16 de este documento. La evaluación de cada propiedad física y mecánica abordada, se efectuó



teniendo en cuenta el análisis estadístico llevado a cabo, el cual incluyó un examen de los valores extremos de estas o los supuestos valores atípicos, siempre teniendo en cuenta la naturaleza del parámetro estudiado en función del fenómeno geológico que él representa, además del rango de valores que el mismo puede tomar según la variedad de las condiciones geológicas imperantes en el medio donde se tomó la muestra, afectando su valor, sin dejar de representar adecuadamente el mismo.

Paralelamente se evaluó y clasifico el comportamiento del RQD medio de tales rocas, se determinó el comportamiento en las mismas de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y los valores característicos de la resistividad aparente de la corriente eléctrica inducida. Igualmente se esclarecieron las características hidrogeológicas de las rocas tratadas, a partir de la evaluación del comportamiento del coeficiente de infiltración medido de las mismas y se obtuvo conocimiento del comportamiento de estas rocas frente al agua, mediante el cálculo del coeficiente de ablandamiento (K_{pz}), el cual se define según lo establecido al respecto en la NC-XX.2014, de la forma siguiente:

$$K_{pz} = \frac{\text{Re sistencia a compresión simple de la roca en estado de saturación}}{\text{Re sistencia a compresión simple de la roca con su humedad natura}}$$

Por último se efectuó una estimación del comportamiento de otros parámetros físicos mecánicos relevantes de los elementos litológicos tratados y se realizó una clasificación geomecánica del macizo rocoso que conforman cada uno de los mismos, según los criterios de Bieniawski (1973, 1989), mediante la determinación de índice RMR "Rock Mass Rating".

A partir de la evaluación y comprensión de las principales propiedades geotécnicas de cada elemento litológico que constituye a la formación estudiada, se determinaron y esclarecieron las características que distinguen como tal, el comportamiento ingeniero geológico general de la Formación Jaimanitas como un todo.

Teniendo en cuenta todas las actividades realizadas hasta el momento, se procedió a determinar el caso característico de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), precisamente para el empleo de las rocas de la formación tratada como base de la misma. Según los criterios establecidos al respecto en la NC-XX.2014, para el dimensionamiento geotécnico de la base de los cimientos apoyados sobre terrenos constituidos por rocas, la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}) se calculará, atendiendo a las propiedades ingeniero geológicas de dichas rocas, siguiendo 3



casos típicos establecidos, los cuales se mencionan en el epígrafe 1.2 del capítulo 1 de este documento.

A partir de la selección del caso típico a utilizar, se realizó el cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), siguiendo la metodología de trabajo establecida para ese caso, en la propuesta de norma citada.

Sobre la base de todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo, se pudo proceder a la valoración del empleo de la Formación Jaimanitas en el territorio de estudio, como base de cimentaciones para las futuras edificaciones que se proyectan ejecutar en este. A partir del análisis del mapa de conveniencia del uso de las rocas tratadas como base de cimentaciones, se evaluaron las diferentes condiciones y escenarios de uso que posee esta formación para su empleo en los fines previstos, según las diferentes situaciones ingeniero geológicas imperantes en Cayo Guillermo, reconociendo las áreas que según su grado de aprovechamiento, poseen mejores condiciones para utilización. Paralelamente para cada área evaluada, se establecieron y esclarecieron las condiciones de trabajo a que estarían sujetas las bases de cimentación a emplear, según los criterios recopilados en la NC-XX.2014. A partir de la evaluación de las diferentes condiciones que posee esta formación, se realizó una valoración general de su empleo como base de cimentaciones, definiéndose además el régimen general de trabajo a que estarían sujetas dichas bases.

2.5. Conclusiones parciales

A partir del análisis de los temas tratados en este capítulo, se arriba a las conclusiones siguientes:

1. Independientemente de la información geológica general existente sobre Cayo Guillermo, la principal fuente de datos sobre las características geológicas generales e ingeniero geológicas particulares de ese territorio y en especial de la Formación Jaimanitas en él, se obtuvo a partir del análisis de los informes correspondientes a 32 investigaciones ingeniera geológicas llevadas a cabo por la ENIA de la provincia, en ese cayo.
2. Hacia la franja Norte y central de Cayo Guillermo, es donde se han ejecutado casi la totalidad de los estudios realizados por ENIA del territorio, de acuerdo a las particularidades geográficas del cayo y las características y finalidad de las edificaciones construidas o planificadas hasta la actualidad.
3. La mayor parte de la mitad Sur de Cayo Guillermo se encuentra escasamente estudiada.
4. Los trabajos complementarios ejecutados durante la realización de esta investigación, estuvieron encaminados a obtener la mayor cantidad de información sobre la Formación



Jaimanitas, en aquellas porciones del territorio analizado donde existía un nivel de estudio escaso o insuficiente.

5. El análisis estadístico de cada propiedad física y mecánica examinada, comprendió la realización de una evaluación de los valores extremos de estas o los supuestos valores atípicos, siempre teniendo en cuenta la naturaleza del parámetro estudiado en función del fenómeno geológico que él representa, además del rango de valores que el mismo puede tomar según la variedad de las condiciones geológicas imperantes en el medio donde se tomó la muestra, afectando a su vez el valor de esta, sin dejar de representar adecuadamente el mismo.
6. Para la confección del mapa de conveniencia del uso de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones, independientemente de que existan otros aspectos a considerar para la valoración de un terreno conformado por roca para el fin previsto, se tuvo en cuenta básicamente la información obtenida sobre: las características topográficas del terreno a evaluar, la profundidad de yacencia o nivel del techo de las rocas estudiadas, valores de la resistencia a la compresión simple (σ_c) de las mismas y datos acerca de la profundidad de yacencia o nivel de las aguas subterráneas presentes en el medio.
7. A partir del análisis del mapa de conveniencia del uso de las rocas tratadas como base de cimentaciones, se evalúan las diferentes condiciones y escenarios de uso que posee esta formación para su empleo en los fines previstos, según las diferentes situaciones ingeniero geológicas imperantes en Cayo Guillermo, reconociendo las áreas que según su grado de aprovechamiento, poseen mejores condiciones para su utilización.



CAPITULO 3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL EMPLEO DE LA FORMACIÓN JAIMANITAS EN CAYO GUILLERMO, COMO BASE DE CIMENTACIONES

Introducción al capítulo

A partir de todo el volumen de información recopilada y procesada como resultado de las diferentes actividades llevadas a cabo durante la realización de esta investigación, en el presente capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos, que permiten evaluar la capacidad de empleo de la formación geológica estudiada, como terreno base de cimentaciones. Para ello inicialmente se identifican y caracterizan los principales fenómenos físicos y geológicos que afectan la capacidad de empleo de las rocas tratadas como base de cimentaciones. Posteriormente se describen las rocas de la Formación Jaimanitas en el territorio, teniendo en cuenta la evaluación de sus propiedades geotécnicas, atendiendo a los criterios teóricos establecidos en la bibliografía consultada. Paralelamente se determina el caso característico de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), para las rocas de esta formación, según sus características geotécnicas. Por último, considerando el comportamiento y distribución de los principales parámetros ingenieros geológicos de las rocas estudiadas y particularmente la información ilustrada en el mapa de conveniencia del uso de la Formación Jaimanitas como base de cimentaciones, se valora precisamente su capacidad de empleo para los fines previstos en Cayo Guillermo.

3.1. Identificación y caracterización de los fenómenos físicos y geológicos que afectan a las rocas de la Formación Jaimanitas, como terreno base de cimentaciones

En correspondencia con los criterios expuestos en los epígrafes 1.10 y 1.11 del capítulo 1 de este documento, se determinó que la naturaleza geológica de la cobertura superficial de Cayo Guillermo es relativamente sencilla. La misma está compuesta por rocas y sedimentos correspondientes al Neoaútctono Cubano, los cuales a su vez pertenecen a la Asociación Estructuro Formacional (AEF) de la Neoplataforma, datada del Eoceno Superior Tardío (P_2^3) al Reciente y según los rasgos estructurales de la parte Norte-central del archipiélago cubano, el área de estudio se enmarca dentro de los límites de la Unidad Neotectónica Occidental (UNOc), situándose de modo más específico en el interior de esta, al Norte del Macrobloque Camagüey. En el territorio de Cayo Guillermo no se evidenció la existencia de grandes dislocaciones tectónicas plicativas o disyuntivas. Los macizos rocosos presentes y en especial los constituidos por las rocas de la Formación Jaimanitas, si se encuentran afectados comúnmente por grietas y hacia algunos sectores, por algunas fallas pequeñas y microfallas, todo lo cual constituye una evidencia de que

el territorio objeto de evaluación, se ha desarrollado y presenta actualmente, un régimen tectónico y geodinámico relativamente tranquilo y estable.

Las grietas que afectan a las rocas de la Formación Jaimanitas, son evidentemente endógenas, de origen tectónico, específicamente del tipo cortantes o de cizalla, las cuales se forman en condiciones de tensiones de las rocas y se disponen con cierta regularidad en relación con la dirección de los esfuerzos principales actuantes (forman ángulos de aproximadamente 30° con estos). Atendiendo a su posición en el espacio, las grietas descubiertas son mayormente subverticales, aunque existen algunas verticales y en menor medida, horizontales e inclinadas. Las juntas detectadas se encuentran mayormente dispuestas de modo continuó, agrupándose en varias familias, que poseen un rumbo o extensión aproximadamente paralelo, constituyendo así distintos sistemas de grietas, cada una de las cuales posee características geométricas propias. A partir de la medición de los elementos de yacencia de las mismas, se realizó un análisis de la orientación de estas dislocaciones tectónicas mediante el empleo del software Dips V.5, obteniendo el Diagrama de Rosetas (figura 3.1) y el Diagrama Polar o de Contorno (figura 3.2) correspondientes. Atendiendo al análisis de los diagramas mencionados, se determinó que el macizo rocoso que está constituido por las rocas evaluadas, se encuentra afectado por 3 familias de grietas, más juntas aleatorias, observándose 2 familias principales o 2 direcciones predominantes de agrietamiento. La primera de estas familias se extiende con rumbo N de 50° a 60° E y el segundo con rumbo N de 20° a 30° E. En sentido general en cuanto a su orientación, las grietas observadas pueden clasificarse como que poseen condiciones medias a muy favorables a la estabilidad del macizo rocoso, en función de su uso para el emplazamiento de cimentaciones directamente apoyadas sobre las rocas.

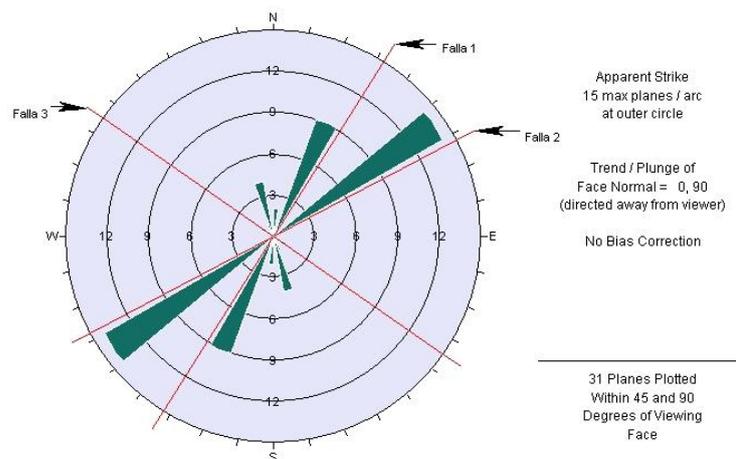


Figura 3.1. Diagrama de rosetas de las grietas medidas.

Según el grado de nitidez, las grietas observadas se encuentran mayormente cerradas, aunque se pueden encontrar también ligeramente abiertas con una separación entre sus bordes inferior a los 5.00 mm (como promedio 3.00 mm) y en menor cuantía, rellenas por sedimentos y pequeñas partículas de roca disgregada. Atendiendo a la rugosidad y el estado o resistencia de las paredes de las grietas, las juntas registradas poseen fundamentalmente forma ondulada y rugosa, con bordes de roca tanto frescos como alterados, aunque también se localizaron algunas juntas planas y lisas entre las cuales se podía distinguir algunos espejos de fricción.

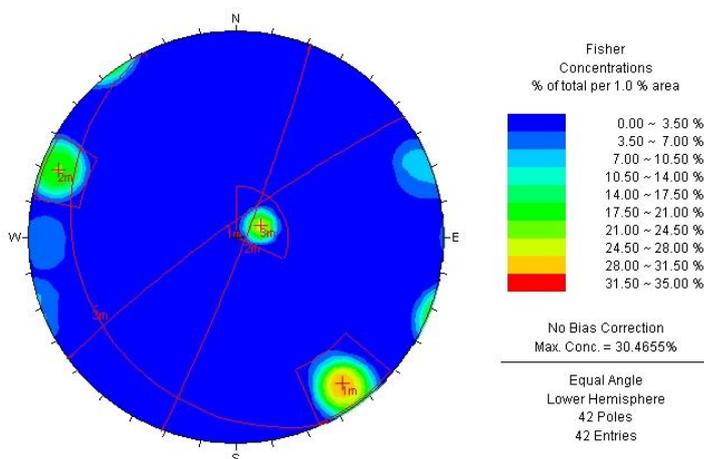


Figura 3.2. Diagrama de polo o de contorno de las grietas medidas.

De acuerdo al espaciamiento observado entre las grietas de cada uno de los sistemas o familias identificadas, se determinó que las juntas en sentido general, se separan regularmente entre sí a una distancia que osciló entre los 1.05 m a 4.50 m, para una media de 2.62 m, clasificando según los criterios de González de Vallejo (2002), como un macizo rocoso con grietas muy separadas. Al respecto, teniendo en cuenta los aspectos recogidos en la NC-XX.2014 (Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales) (ver tabla 3.1), actualmente en fase de revisión y publicación, un espaciamiento medio entre discontinuidades (d_g) de 2.62 m, o lo que es igual 262 cm, indica la existencia de un macizo rocoso muy poco fisurado con un espaciamiento entre juntas, catalogado como amplio.

Las fallas pequeñas y microfallas identificadas, son regularmente de carácter normal con un ángulo de buzamiento pronunciado (subverticales). Las mismas se localizaron mayormente hacia la mitad occidental del litoral Norte del cayo, donde aparecen las costas acantiladas que constituyen a los sistemas de terrazas marinas existentes, pertenecientes a diferentes etapas de ascenso de ese sector del territorio.



Tabla 3.1. Clasificación de los macizos rocosos en función del espaciamiento de sus discontinuidades (grietas o diaclasas), según la NC-XX.2014.

Espaciamiento de las Discontinuidades.	Fisuración	Espaciamiento promedio de las Discontinuidades (d_g) en cm.
Muy amplio	No fisurada	$d_g > 300$
Amplio	Muy poco fisurada	$100 < d_g \leq 300$
Moderado	Poco fisurada	$30 < d_g \leq 100$
Cerrado	Fisurada	$2.5 < d_g \leq 30$
muy cerrada	Muy fisurada	$d_g \leq 2.5$

En concordancia con los aspectos abordados hasta el momento, se deduce que en sentido general, las dislocaciones tectónicas disyuntivas que afectan al macizo rocoso formado por las rocas de la formación geológica evaluada y en especial el agrietamiento, no disminuyen ni comprometen significativamente la capacidad de empleo que posee esta, para su uso como terreno base de cimentaciones. No obstante se considera que el estudio de las discontinuidades del macizo rocoso, siempre será de vital importancia a la hora de evaluar, cualquier caso en particular de análisis de condiciones de cimentación que posea un sector del territorio analizado, para la construcción de una obra civil futura.

Paralelamente al esclarecimiento de las características de las dislocaciones tectónicas existentes en el territorio objeto de estudio, se evaluó el grado de afectación que poseen las rocas de la formación tratada, ante la ocurrencia de los procesos de intemperismo o meteorización que actúan sobre las mismas. A partir de la revisión y análisis de las columnas litológicas obtenidas durante la realización de las 32 investigaciones ingeniero geológicas llevadas a cabo por la ENIA, además de la ejecución de los trabajos complementarios concebidos en este estudio, dentro de los que destacó la realización de un levantamiento ingeniero geológico a escala 1:10 000 y la perforación de 10 nuevas calas; se considera que las rocas analizadas no se hallan muy afectadas por los procesos de meteorización actuantes, estando bien definidas y reconocidas las zonas de alteración e intemperización de las mismas, tanto superficialmente como en profundidad en el perfil geológico del territorio.

En correspondencia con la joven edad de las rocas analizadas, las cuales se formaron durante el Pleistoceno Superior parte baja y teniendo en cuenta su constitución y naturaleza, se determinó que las mismas se hallan frescas y no presentan signos visibles de alteración, en casi la totalidad

de los sectores de Cayo Guillermo donde estas afloran (ver anexo 18, mapa ingeniero geológico). Las muestras de roca obtenidas durante el levantamiento ingeniero geológico realizado y las calas complementarias realizadas, no se rompían fácilmente con el martillo del geólogo, originando un sonido agudo cuando eran golpeadas. Precisamente en correlación con los criterios de identificación en el campo del grado de alteración de las rocas (ver anexo 23), establecidos en el "Manual Instructivo sobre Parámetros y Correlaciones Requeridos para el Diseño de Obras Compatibilizadas", elaborado por el Departamento Técnico Nacional de la ENIA en 1991, se estableció que estas rocas poseen un grado de alteración del tipo I y se relacionan con una roca fresca. En profundidad, según el perfil geológico del terreno conocido mediante todo el volumen de calas ingeniero geológicas efectuadas por buena parte de la extensión del cayo, se observa que las rocas mantienen regularmente las características descritas y el grado de alteración señalado aproximadamente por encima de las cotas -1.00 m a 0.00 m indistintamente con respecto al nivel medio del mar (n.m.m.).

Por debajo indistintamente de las cotas -1.00 m a 0.00 m con respecto al n.m.m., ya las rocas examinadas se observan levemente descompuestas. Aunque los testigos de roca obtenidos mediante el proceso de perforación, siguen sin romperse fácilmente con el golpe del martillo del geólogo, produciendo igualmente un sonido agudo y vibrante, las muestras mantienen generalmente el color de la roca fresca pero con cierto nivel de decoloración hacia algunas partes y principalmente hacia las cercanías de la superficie de las juntas. De manera semejante se determinó que aunque se aprecia que estas rocas conservan buena parte de sus demás propiedades físicas, por sectores las mismas se observan menos compactas y consolidadas, disminuyendo relativamente su dureza, siendo esta situación particularmente más apreciable en los estratos de calcarenita. Según los criterios de identificación en el campo del grado de alteración de las rocas expuesto en el anexo 23, se establece que las rocas con estas características poseen un grado de alteración del tipo II y se relacionan con una roca ligeramente descompuesta. Superficialmente la detección de sectores del terreno donde afloran rocas con grado de alteración II es muy difícil y localizada, ya que como se comentó anteriormente abundan mayoritariamente las rocas con grado de alteración I. No obstante a lo expuesto, se observó que hacia algunas delgadas y limitadas franjas del área de contacto de las rocas de la Formación Jaimanitas con los Depósitos Palustres del Holoceno, hacia el Sur y en menor proporción hacia el centro de la zona de contacto entre ambos conjuntos litológicos, donde existen bajas cotas del terreno, se pueden observar las rocas ligeramente descompuestas.

En aras de determinar cuantitativamente el grado de intemperización de las rocas de la Formación Jaimanitas, en aquellos sectores o zonas dentro del perfil geológico donde se encuentran



afectadas por el proceso de meteorización y muestran un grado de alteración II, hallándose ligeramente descompuestas, se procedió al cálculo del coeficiente de intemperización, K_{bc} , el cual se define según lo establecido al respecto en la NC-XX.2014, de la forma siguiente:

$$K_{bc} = \frac{\text{Peso volumétrico de la roca intemperizada}}{\text{Peso volumétrico de la roca no intemperizada}}$$

Atendiendo a todo el volumen de ensayos recopilados y los realizados durante los trabajos complementarios concebidos durante la ejecución de esta investigación, se decidió utilizar para el cálculo del coeficiente de intemperización K_{bc} , la media del peso volumétrico de la roca correspondiente a su condición intemperizada y no intemperizada, obtenidos precisamente de los ensayos realizados durante la fase de trabajos complementarios de este trabajo. Según los datos calculados se obtuvo que:

$$K_{bc} = \frac{17.96 \text{ kN} / \text{m}^3}{18.42 \text{ kN} / \text{m}^3}$$

$$K_{bc} = 0.974$$

De acuerdo a lo establecido en la NC-XX.2014, un valor de K_{bc} de las rocas de 0.974, es indicativo de que las mismas presentan un grado de intemperización clasificado como de "Poco intemperado" (ver tabla 3.2). Lo anterior se encuentra en completa concordancia con la clasificación dada para la roca hacia esos sectores, según lo expresado en los criterios de identificación en el campo del grado de alteración de las rocas, relacionados en el anexo 23.

Tabla 3.2. Clasificación del grado de intemperización de las rocas o los macizos rocosos en función de los valores que toma el Coeficiente de Intemperización (K_{bc}), según la NC-XX.2014.

Grado de Intemperización	Valores del Coeficiente de Intemperización (K_{bc})
No intemperización (sana)	$K_{bc} = 1$
Poco intemperizada	$0.9 \leq K_{bc} < 1$
Intemperizada	$0.8 \leq K_{bc} < 0.9$
Muy intemperizada	$K_{bc} < 0.8$



Sobre la base de la evaluación del grado de afectación que poseen las rocas de la formación tratada, ante la ocurrencia de los procesos de intemperismo o meteorización que actúan sobre las mismas, se deduce que estos no atentan ni inciden sustancialmente en las propiedades que posee el macizo rocoso para su empleo como terreno base de cimentaciones. El análisis del grado de afectación de estos procesos, indica más bien un comportamiento general favorable del macizo rocoso en su valoración de uso para el fin definido, estando bien identificadas y esclarecidas las zonas de afectación del mismo. No obstante se considera que el accionar de los procesos de meteorización sobre las rocas de la formación evaluada, seguirán siendo continuos y progresivos en el tiempo, provocando lentamente la alteración y degradación de las propiedades físicas y mecánicas determinadas, debido a lo cual su estudio y seguimiento deberán llevarse a cabo sistemáticamente.

Como resultado de todas las actividades llevadas a cabo y la interpretación de los datos obtenidos, se determinó que el fenómeno físico geológico más abundante que afecta a las rocas de la Formación Jaimanitas, lo constituye el carso. Este fenómeno a su vez, representa la principal amenaza contra la estabilidad y seguridad de las bases de cimentaciones que se puedan colocar sobre las rocas tratadas o que emplazándose sobre otros materiales como un relleno técnico, las cargas que estas comuniquen al terreno, alcancen en su profundidad de disipación, dichas rocas.

Los procesos cárnicos que afectan a las rocas de la formación estudiada, están diseminados por todo el área de extensión de estas, haciéndose particularmente abundantes y cuantiosos en los sectores de Cayo Guillermo donde las mismas afloran (ver anexo 18, mapa ingeniero geológico del terreno), hallándose en continuo desarrollo. La amplia presencia de estos fenómenos cárnicos se encuentra relacionada con el dominio de un clima tropical, que favorecido por la ubicación de Cayo Guillermo en un sector donde se registran altos acumulados de precipitaciones, así como por la existencia predominante en el subsuelo de complejos litológicos carbonatados, propician su desarrollo.

Teniendo en cuenta todo el volumen de datos recopilados y obtenidos a partir de las perforaciones realizadas, las campañas de estudio geofísico llevadas a cabo y las labores de levantamiento ingeniero geológico desempeñadas, se pudo conocer que en sentido general los fenómenos cárnicos existentes son de carácter superficial, ya que estos se encuentran mayoritariamente desarrollados hasta una profundidad relativamente baja con respecto a la superficie natural del terreno donde afloran las rocas analizadas. Precisamente con respecto al nivel señalado, los diversos tipos de fenómenos cárnicos registrados poseen una profundidad máxima media de desarrollo de 0.55 m, siendo la máxima profundidad de extensión de los mismos de



aproximadamente 1.90 m, la cual está asociada con la existencia de sumideros o pequeños salones de micro cavernas, estas últimas muy escasas y singulares. Son muy pocos y limitados los fenómenos cársicos existentes a profundidades mayores a las señaladas, los cuales se pueden catalogar como semiprofundos y profundos. Los mismos han sido detectados mediante trabajos de exploración geofísica y de perforación, siendo por lo regular aislados y de dimensiones mayormente pequeñas, asociados al desarrollo en profundidad de oquedades cársicas irregulares de aproximadamente 0.35 m de diámetro o la existencia de cavidades cársicas irregulares de un diámetro máximo o amplitud no mayor a los 1.20 m.

En los sectores del territorio donde no afloran las rocas objeto de estudio, los fenómenos cársicos son escasos y limitados y se encuentran asociados con las formas y tipos de fenómenos semiprofundos o profundos descritos, siendo estos detectados igualmente gracias a la utilización de los métodos de exploración geofísica y los trabajos de perforación usualmente realizados en las investigaciones ingeniera geológicas ejecutadas.

Hacia las porciones del cayo donde afloran las rocas de la Formación Jaimanitas, como se comentó anteriormente, existe un amplio desarrollo de los fenómenos cársicos en varias de sus formas típicas. Precisamente algunas de estas formas típicas de carso, son más abundantes o características de sectores del territorio con rasgos topográficos y geomorfológicos definidos, donde por tanto se extienden algunos de los complejos o sub-complejos naturales identificados en el epígrafe 1.12 del capítulo 1 de este documento, que superficialmente están constituidos por estas rocas.

Hacia la franja central del territorio objeto de investigación, donde se extiende el Complejo Natural de Llanuras Interiores sobre Rocas, existe un predominio de la presencia de las depresiones cársicas, con los fondos rellenos de fragmentos de roca de la misma formación, mezclados con capa y materia vegetal. Estas depresiones tienen en planta forma comúnmente circular y en menor medida irregular, con un diámetro o extensión de la boca del fenómeno de hasta 3.00 m. Transversalmente poseen forma de cono o tronco de cono invertido, con diámetro evidentemente del fondo mucho menor que el de la boca, variando por lo regular entre los 0.50 m hasta los 2.20 m de diámetro. Estas depresiones son muy superficiales, poseyendo una profundidad máxima aparente de 0.60 m.

También hacia esta parte del terreno y asociado al complejo natural mencionado, son muy comunes la existencia de agrupaciones de oquedades cársicas verticales, con forma de la boca de cada oquedad mayormente circular y en menor medida irregular, que poseen un diámetro que



fluctúa entre los 0.08 m a 0.20 m y se concentran en un área con un diámetro igualmente variable, que oscila entre los 1.00 m a 5.00 m. Estas oquedades regularmente se ensanchan con la profundidad y se comunican entre sí, formando un sistema de oquedades que posee una profundidad aparente de hasta 0.65 m, pues el fondo está relleno de materia vegetal y fragmentos de roca del mismo origen que las rocas que afectan. Precisamente esta tipología de morfoestructura cársica es la que a juicio de este investigador, ofrece mayor peligro para la estabilidad de las bases de cimentaciones que se pueden emplazar en el territorio debido a sus características tan irregulares. Dentro de los tipos de fenómenos identificados hacia la zona descrita, además se encontró el desarrollo de lajas o bloques tabulares de roca sueltos o semidesprendidos de la matriz rocosa, al parecer provenientes de sectores con un mayor desarrollo de las oquedades cársicas descritas, comunicadas y entrelazadas entre sí. También y en menor proporción, se reconoce la existencia de microsumideros con forma en planta circular e igualmente irregular, con un diámetro de la boca que osciló comúnmente entre los 0,25 m a 0,40 m, los cuales alcanzan una profundidad aparente que osciló entre los 0.70 m a 1.30 m, cuyo fondo usualmente se estrechaba con la profundidad, adoptando forma de embudo y también se encuentran cubiertos de capa y materia vegetal, además de fragmentos de rocas carbonatadas.

Las restantes zonas del cayo donde afloran las rocas de la formación estudiada (ver anexo 18, mapa ingeniero geológico), se encuentran asociadas a las áreas de desarrollo del Sub-complejo Natural de Costas Acantiladas, el cual está representado por todas las terrazas marinas carbonatadas que constituyen a los acantilados que se extienden por buena parte de la costa Norte de Cayo Guillermo, básicamente hacia su mitad occidental. Hacia esa franja del territorio estudiado, es donde se concentran la mayor cantidad y diversidad de fenómenos cársicos observados.

Dentro de los tipos de fenómenos más abundantes se encuentra el lapies agudo, el cual se hace más común hacia las cercanías de la línea de costa. De manera semejante son numerosas las oquedades cársicas verticales aisladas o zonas de agrupación de estas. Las mismas mantienen la forma de la boca mayormente circular y en menor medida irregular, presentando un diámetro o amplitud que fluctúa entre los 0.05 m a 0.20 m. Cuando aparecen a modo de agrupaciones, estas oquedades se aglutinan en un área con un diámetro igualmente variable, que oscila entre los 1.00 m a 6.00 m. Estas oquedades como las ya descritas, regularmente se ensanchan con la profundidad, mostrando aspecto acampanado y se comunican entre sí, formando sistemas de oquedades que poseen una profundidad aparente de hasta 0.75 m. El fondo de las mismas por lo regular también está relleno de capa y materia vegetal, además de fragmentos de roca de la misma formación.



Son muy cuantiosos también los microsumideros y sumideros, los cuales en ocasiones también se agrupan y concentran en áreas relativamente pequeñas donde usualmente se comunican entre sí en profundidad, a través de oquedades horizontales secundarias. Los microsumideros por su parte mantienen en planta una forma circular o irregular, con un diámetro o amplitud de la boca que osciló entre los 0,25 m a 0,40 m. Los mismos alcanzan una profundidad aparente que varía entre los 0.70 m a 1.30 m y su fondo usualmente también se encuentra cubierto de capa y materia vegetal, además de fragmentos de roca. Las paredes de los mismos hacia el fondo se van estrechando, mostrando una forma típica de embudo, aunque en ocasiones por el contrario estas se ensanchan y adoptan una forma acampanada.

Los sumideros por su parte, todos se observan con un aspecto irregular de la boca del fenómeno visto en planta, con una amplitud variable de va de 0.30 m a 0.50 m de ancho por 0.80 m a 1.15 m de largo. A este tipo de fenómeno es que corresponden las mayores profundidades de desarrollo del carso superficial registrado, alcanzando profundidades aparentes que oscilaron entre los 0.80 m a 1.90 m. De manera semejante a los demás fenómenos cársicos observados, estos tienen el fondo igualmente cubierto por capa vegetal, fragmentos de corteza, hojas y raíces de plantas, además de secciones de rocas de diferente granulometría. Aunque normalmente las paredes de estos en profundidad van estrechándose, adoptando la característica forma de embudo mencionada, los mismos de manera semejante a algunos microsumideros, se ensanchan y adoptan forma acampanada (ver figura 3.3). Hacia algunos escasos puntos de las áreas de extensión del sub-complejo natural mencionado, estos sumideros (los que mayor profundidad alcanzan), intersectan pequeños salones de microcavernas existentes o durante su desarrollo los procesos de disolución de las rocas favorecieron la formación de estructuras de este tipo en profundidad, siendo la amplitud del fondo visiblemente mayor a la del sumidero como tal que se observa en la superficie (ver figura 3.4).

Dentro de la zona caracterizada se manifiesta también la presencia pero en menor medida, de algunas depresiones cársicas. Las mismas igualmente poseen los fondos rellenos de fragmentos de roca de la misma formación, mezclados con capa y materia vegetal. Estas depresiones tienen en planta forma mayormente circular y en menor medida irregular, con un diámetro o extensión de la boca del fenómeno de hasta 2.00 m. Transversalmente mantienen aspecto de cono o tronco de cono invertido, con un diámetro evidentemente del fondo mucho menor que el de la boca, variando por lo regular entre los 0.50 m hasta los 1.30 m de diámetro. Estas depresiones son muy superficiales, poseyendo una profundidad máxima aparente de 0.60 m.



Figura 3.3. Sumidero cuyas paredes se ensanchan con la profundidad, mostrando forma acampanada, el fondo está cubierto por capa y materia vegetal además de fragmentos de roca.



Figura 3.4. Sumidero que se ensancha con la profundidad e intercepta o da lugar a la formación de una microcaverna, nótese que el fondo de la misma también se halla cubierto por capa y materia vegetal además de fragmentos de roca.

Por último se desea señalar que entre los tipos de fenómenos identificados, además se encontró en menor cuantía, el desarrollo de lajas o bloques tabulares de roca sueltos o semidesprendidos



de la matriz rocosa, los cuales a grandes rasgos comparten las mismas características generales que los observados en las otras zonas del cayo ya descritas.

Se considera importante destacar que atendiendo a la naturaleza superficial de la mayoría de los estructuras cársticas descubiertas, además de las características topográficas y geomorfológicas de Cayo Guillermo, la mayor parte de estos fenómenos no poseen una interacción directa con las aguas subterráneas existentes, encontrándose por lo regular en la zona de aereación del perfil hidrogeológico del territorio. Solamente aquellas manifestaciones cársticas semiprofundas o profundas, que se sitúan principalmente hacia las porciones del territorio donde no afloran las rocas objeto de estudio o que se hallan en la zona de desarrollo del Complejo Natural de Llanuras Interiores sobre Rocas, mantienen una interacción directa con las aguas subterráneas existentes.

Como bien se expresó inicialmente, la abundante y extendida presencia de las distintas manifestaciones cársticas en el territorio, hacen que precisamente sea el carso el mayor y fundamental fenómeno físico geológico que compromete y degrada las potencialidades que posee la Formación Jaimanitas para su empleo como terreno base de cimentaciones, constituyendo su principal reto geotécnico. El estudio de sus manifestaciones y características ha sido y continuará siendo de vital importancia a la hora de contemplar cualquier solución de cimentación dada de una obra y de ejecutar como tal ese proyecto de cimentación. En varias ocasiones en correspondencia con la importancia económica de la obra y según sus características estructurales, los proyectos de ejecución de los sistemas de cimentaciones han necesitado de la implementación de varias de las soluciones ingenieras disponibles, para garantizar la estabilidad y seguridad de las edificaciones. Precisamente los investigadores ingeniero geológicos deben tener especial cuidado con el estudio y caracterización del carso en Cayo Guillermo, para poder seleccionar del diapasón de medidas ingenieras existentes para tratar con este problema geotécnico, las más adecuada y económicamente eficaz, que se adapte a las particularidades estructurales de las edificaciones que se desean construir en el futuro.

3.2. Descripción de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo a partir de la evaluación de sus propiedades geotécnicas

Sobre la base de todo el cúmulo de información recopilada y obtenida de la formación objeto de estudio, se pudieron identificar los principales elementos litológicos (caliza y calcarenita) constituyentes de la misma en el territorio analizado. A partir de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas fundamentales que caracterizan el comportamiento geotécnico de estas rocas y el macizo geológico que las mismas constituyen, las cuales tributan a la valoración de su empleo como terreno base de cimentaciones, seguidamente se efectúa una descripción general de estos



elementos litológicos, los cuales a su vez constituyen estratos ingeniero geológicos bien definidos y diferenciados. Teniendo en cuenta lo anterior, se establece que a partir de la superficie natural del terreno donde afloran las rocas de la Formación Jaimanitas o partir de la cota de yacencia del techo de las mismas, hasta el nivel de -13.17 m con respecto al n.m.m. (valor correspondiente a la máxima profundidad de perforación alcanzada en las investigaciones ingeniero geológicas realizadas), se presentan los estratos ingeniero geológicos que se describen a continuación, según su orden general de aparición con respecto a los niveles mencionados:

Estrato ingeniero geológico 1. Roca caliza órgano-detrítica de color blanco crema, que adquiere tonalidades rosadas y amarillosas hacia algunas porciones del macizo rocoso. Presenta de modo general estructura masiva y textura microcristalina o detrítica hacia algunos sectores. Posee aspecto compacto y en sentido amplio se observa con un nivel de humedad bajo, aunque por debajo de la cota 0.15 m con respecto al n.m.m. se encuentra en estado saturado. Contiene varias vetas de color carmelita claro y gris, correspondientes a sectores más cristalizados y de mayor dureza. Presenta además abundantes restos fósiles de corales y moluscos, dentro de los que destacan los bivalvos, muchos de los cuales muestran un buen estado de conservación.

Como bien se comentó anteriormente, se encuentra en casi toda su área de extensión afectada por fenómenos cárnicos superficiales (son abundantes hacia la parte alta del estrato), dentro de los que sobresalen las oquedades cárnicas con forma circular e irregular de diámetro no mayor a los 0.20 m, muchas de las cuales se observan rellenas de capa y materia vegetal. Esta roca se encuentra afectada por fenómenos de agrietamiento, siendo las grietas comúnmente cerradas, con forma predominantemente ondulada y rugosa, con bordes de roca mayormente frescos, mostrando un espaciamiento (d_g) que fluctúa entre los 1.05 m a 4.50 m, para una media de 2.62 m. Esta caliza no exhibe vestigios de que haya sido afectada por procesos de meteorización intensos, debido a lo cual posee en la mayor parte de su extensión grado de alteración I y se relaciona con una roca fresca, según los criterios del anexo 23.

Los resultados de los ensayos de laboratorio recopilados de las 32 investigaciones ingeniero geológicas consultadas, concuerdan y muestran valores muy semejantes con los resultados de los ensayos obtenidos, mediante la realización de las actividades de laboratorio llevadas a cabo durante la etapa de trabajos complementarios de este estudio (ver anexos 7 y 16). Atendiendo al análisis estadístico general de todos los resultados de ensayos, los valores medios de los diferentes parámetros físicos y mecánicos que caracterizan a esta capa son: Resistencia a la Compresión Axial Saturada ($\sigma_{c \text{ sat}}$) 67.20 kg/cm², Resistencia a la Compresión Axial Seca ($\sigma_{c \text{ sec}}$) 78.38 kg/cm², Densidad Humedad (γ_f) 19.24kN/m³, Densidad seca (γ_d) 18.02kN/m³, Densidad saturada (γ_{sat}) 20.82kN/m³, Peso Específico (γ_s) 2.72g/cm³, Absorción 6.22 % y Humedad 3.80 %. Según los valores medios de la resistencia a la compresión axial de esta roca, tanto seca como



saturada, la misma clasifica como una roca moderadamente débil, siguiendo la clasificación expuesta en el anexo 21. Es necesario señalar que en correspondencia con la evaluación estadística efectuada, todos los resultados de laboratorio alcanzados caracterizan y representan de manera correcta el comportamiento de cada propiedad física y mecánica tratada de esta roca caliza, independientemente de la alta variabilidad registrada en los valores de los estadígrafos de dispersión calculados a partir de las observaciones de algunas de estas propiedades. Los resultados de laboratorio obtenidos, reflejan en sus valores la naturaleza del parámetro o fenómeno estudiado, teniendo en cuenta la variedad de condiciones físicas imperantes sobre el medio en el cual se desarrolla la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, atendiendo al lugar específico donde se tomó cada muestra.

Precisamente teniendo en cuenta los resultados de laboratorio efectuados, se calculó el coeficiente de ablandamiento (K_{pz}) de esta roca caliza según lo establecido al respecto en la NC-XX.2014 (Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales), en el presente en fase de revisión y publicación. Sobre la base del cálculo efectuado, se determinó que esta roca posee un K_{pz} medio igual a 0.86, lo cual indica que la misma posee un comportamiento favorable frente al agua.

A partir de los resultados de las diferentes pruebas hidrogeológicas de campo llevadas a cabo, se determinó que esta roca posee un Coeficiente de Infiltración (K_f) medio de 1.25 m/día, valor este que es característico de una roca permeable perteneciente al Grupo III, según los criterios que sobre la permeabilidad de la roca emitió De Miguel Fernández en 1999.

Atendiendo a los datos obtenidos en las diferentes campañas de estudio geofísicos llevados a cabo en las investigaciones ya realizadas por la ENIA, en las cuales se aplicaron diferentes variantes de métodos de exploración eléctricos, se determinó que esta roca caliza posee valores de resistividad eléctrica aparente que oscilan en un rango que va desde los 100.00 Ohm. m a los 1550.00 Ohm.m, entre los cuales evidentemente se asocian diferentes anomalías. No obstante, predominan mayormente valores de la resistividad eléctrica aparente característicos para esta roca, que fluctúan entre los 200.00 Ohm.m a 400.00 Ohm.m.

Según los distintos trabajos de perforación ejecutados donde se reportó su presencia, se documentó que la misma muestra un porcentaje de recuperación elevado (por lo regular superior al 90 %), obteniéndose en forma de discos, fragmentos y testigos, estos últimos con una longitud que varió entre los 0.10 m y los 0.35 m. De acuerdo a lo anterior, el índice de calidad de esta roca RQD osciló entre el 39 % y el 92 %, teniendo un valor medio del 52 %, lo cual la categoriza como una roca de calidad media, atendiendo a los criterios ofrecidos en la tabla 3.3.

Teniendo en consideración los parámetros compilados en la clasificación geomecánica de Bieniawski (1973, 1989), mediante la determinación del índice RMR "Rock Mass Rating", se determinó que el macizo rocoso que está constituido por esta caliza, pertenece a la Clase II con

una puntuación de 63 y se establece que el mismo es de Calidad Buena. Sobre la base de la clasificación geomecánica establecida y atendiendo a las propiedades de la roca caliza y el macizo rocoso que esta conforma, se realizó una estimación de algunas propiedades y parámetros mecánicos de los mismos, que no habían sido esclarecidos en los trabajos realizados hasta el momento. Gracias a las acciones realizadas se estableció que esta roca caliza posee aproximadamente una Cohesión (c) de 120.00 kg/cm^2 , un Ángulo de Fricción Interno (ϕ) de 39° , un Módulo de Elasticidad o Módulo de Young (E) de $4.10 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ y un Coeficiente de Poisson (ν) de 0.27. Igualmente se determinó que el macizo rocoso que esta constituye, posee un Módulo de Deformación General (E_o) de 26.00GPa.

Esta roca aflora en buena parte de los sectores de Cayo Guillermo donde se observa superficialmente la Formación Jaimanitas (ver anexo 18, mapa ingeniero geológico). Su presencia también se registra en un porcentaje elevado de las calas realizadas en el territorio, incluso hacia aquellas porciones del mismo donde no aflora la formación estudiada, lo cual evidencia su amplio nivel de extensión tanto superficial como en profundidad. Aunque la misma puede aparecer indistintamente con un espesor estudiado que oscila desde los 0.20 m a los 6.00 m, registrándose o bien hacia la parte superior del corte litológico obtenido o extendiéndose en todo su espesor explorado; cuando se examinan las columnas litológicas obtenidas en todas las perforaciones realizadas (ver anexos 6, 12 y 14), se evidencia que la misma se dispone regularmente hacia la parte superior del perfil litológico de la Formación Jaimanitas en particular, cubriendo usualmente al estrato de roca calcarenita que forma igualmente al conjunto litológico estudiado. Es por ello que en sentido general se deduce que la roca caliza descrita, posee un menor nivel de extensión y desarrollo dentro de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo que la roca calcarenita, presentando un espesor explorado medio de 1.20 m. Según los datos obtenidos, la misma también puede encontrarse, en limitadas porciones del territorio, extendiéndose hacia la parte baja del perfil geológico explorado y también intercalándose a modo de pequeños lentes o estratos, con la roca calcarenita del estrato ingeniero geológico 2.

Tabla 3.3. Clasificación de rocas o macizos rocosos en función del índice de RQD.

R.Q.D.			Descripción de la calidad de la roca.
90	<	RQD 100	Excelente
75	<	RQD 90	Buena
50	<	RQD 75	Regular
25	<	RQD 50	<i>Mala</i>
0	<	RQD 25	Muy mala



Estrato ingeniero geológico 2. Roca calcarenita de color blanco crema, que adquiere tonalidades grises, rosadas y amarillosas hacia algunas porciones del macizo rocoso. Presenta de modo general estructura masiva y textura detrítica psamítica. Ocasionalmente muestra estructura estratificada con estratificación laminar, hacia algunos sectores del territorio de estudio. En un sentido amplio, esta roca aparece con un nivel de humedad de bajo a medio, aunque por debajo de la cota 0.15 m con respecto al n.m.m., se encuentra en estado saturado. De manera semejante por encima de la cota señalada, esta roca se observa con un aspecto compacto y una dureza baja, pero por debajo de los 0.15 m con respecto al n.m.m., estas propiedades disminuyen ligeramente con la profundidad. Se encuentra formada por granos de arena calcárea de granulometría media a fina, unidos entre sí por un cemento basal de igual composición, aunque hacia porciones muy limitadas del macizo rocoso, las partículas de arena que la constituyen se hacen más gruesas, disminuyendo su nivel de compactación y consolidación.

Posee varias vetas delgadas de color carmelita claro, correspondientes a una calcita microcristalina de mayor dureza que la matriz rocosa que la rodea. Muestra también otras vetas de color carmelita blancuzco y gris, correspondientes a porciones con un mayor contenido de material limoso. Contiene además abundantes restos fósiles de corales y moluscos, dentro de los que destacan los bivalvos, mucho de los cuales se encuentran bien conservados.

Como se comentó anteriormente, se halla en casi toda su área de extensión afectada por fenómenos cárnicos superficiales (son abundantes hacia la parte alta del estrato), dentro de los cuales sobresalen las oquedades cárnicas con forma circular e irregular de diámetro no mayor a los 0.20 m, buena parte de las cuales se observan rellenas de capa y materia vegetal. Esta roca se encuentra afectada por fenómenos de agrietamiento, siendo las grietas comúnmente cerradas, con forma predominantemente ondulada y rugosa, con bordes de roca tanto frescos como alterados, mostrando igualmente un espaciamiento (d_g) que fluctúa entre los 1.05 m a 4.50 m, para una media de 2.62 m. Esta calcarenita no presenta vestigios de que haya sido sujeta a procesos de meteorización intensos, debido a lo cual comúnmente posee grado de alteración I y se relaciona con una roca fresca, por encima indistintamente de las cotas -1.00 m a 0.00 m con respecto al n.m.m., atendiendo a los criterios del anexo 23. Por debajo de los niveles mencionados, ya las rocas examinadas se observan levemente descompuestas, mostrando un grado de alteración del tipo II y relacionándose con una roca ligeramente descompuesta, la cual tiene un coeficiente de intemperización K_{bc} medio de 0.974.

Como se expresó anteriormente, los resultados de los ensayos de laboratorio recopilados de las 32 investigaciones ingeniero geológicas consultadas, concuerdan y muestran valores muy semejantes con los resultados de los ensayos obtenidos, mediante la realización de las actividades de laboratorio llevadas a cabo durante la etapa de trabajos complementarios de este estudio (ver anexos 7 y 16). Atendiendo al análisis estadístico general de todos los resultados de



ensayos, los valores medios de los diferentes parámetros físicos y mecánicos que caracterizan a esta capa son: Resistencia a la Compresión Axial Saturada ($\sigma_{c \text{ sat}}$) 35.85 kg/cm², Resistencia a la Compresión Axial Seca ($\sigma_{c \text{ sec}}$) 46.37 kg/cm², Densidad Humedad (γ_f) 17.26kN/m³, Densidad seca (γ_d) 15.85kN/m³, Densidad saturada (γ_{sat}) 19.35kN/m³, Peso Específico (γ_s) 2.71g/cm³, Absorción 8.81 % y Humedad 7.81 %. Según los valores medios de la resistencia a la compresión axial de esta roca, tanto seca como saturada, la misma clasifica como una roca débil, siguiendo la clasificación expuesta en el anexo 21. Se considera importante destacar, que en correspondencia con la evaluación estadística efectuada, todos los resultados de laboratorio alcanzados de esta roca calcarenita, caracterizan y representan de manera correcta el comportamiento de cada propiedad física y mecánica tratada de la misma, independientemente de la alta variabilidad registrada en los valores de los estadígrafos de dispersión calculados a partir de las observaciones de algunas de estas propiedades. Los resultados de laboratorio obtenidos, reflejan en sus valores la naturaleza del parámetro o fenómeno estudiado, teniendo en cuenta la variedad de condiciones físicas imperantes sobre el medio en el cual se desarrolla la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, atendiendo al lugar específico donde se tomó cada muestra en particular.

Teniendo en cuenta dichos resultados de laboratorio, se calculó el coeficiente de ablandamiento (K_{pz}) de esta roca calcarenita según lo establecido al respecto en la NC-XX.2014. A partir del cálculo efectuado, se conoció que esta roca posee un K_{pz} medio igual a 0.72, lo cual indica que la misma posee un comportamiento catalogado como de estabilidad media frente al agua.

Sobre la base de las diferentes pruebas hidrogeológicas de campo llevadas a cabo, se determinó que esta roca posee un Coeficiente de Infiltración (K_f) medio de 2.45 m/día, valor este que es característico de una roca permeable perteneciente al Grupo III, según los criterios que sobre la permeabilidad de la roca emitió De Miguel Fernández en 1999. De manera semejante se conoció, gracias a la realización de los ensayos de presiometría llevados a cabo durante la Investigación Ingeniera Geológica (IIG) Población Turística Punta Rasa (03-072A) en junio de 1998, que el macizo rocoso que conforma esta calcarenita posee un valor medio in situ de resistencia a la compresión simple (σ_c) de 6.167 MPa (61.67 kg/cm²) y un valor medio in situ del Módulo de Deformación General (E_o) de 618.45 MPa.

Según los datos obtenidos en las diferentes campañas de estudio geofísicos llevados a cabo en las investigaciones previas realizadas por la ENIA, en las cuales se aplicaron diferentes variantes de métodos de exploración eléctricos, se determinó que esta roca caliza posee valores de resistividad eléctrica aparente que oscilan en un rango que va desde los 3.00 Ohm.m a los 1600.00Ohm.m, entre los cuales evidentemente se relacionan la existencia de numerosas y variadas anomalías. No obstante, predominan mayormente valores de la resistividad eléctrica aparente característicos para esta roca, que fluctúan entre los 30.00 Ohm.m a 150.00 Ohm.m. Durante la ejecución de la IIG Hotel Villa Gregorio (03-062) en julio de 1996, donde se aplicaron



métodos de sísmicos de exploración geofísica, se obtuvo que esta roca calcarenita posee valores de velocidad de propagación de las ondas sísmicas que oscilaron entre los 3 000.00 m/s y 4 000.00 m/s, los cuales se catalogaron como característicos de la misma.

Atendiendo a los distintos trabajos de perforación ejecutados donde se reportó su presencia, se documentó que la misma muestra un porcentaje de recuperación elevado (por lo regular superior al 85 %), obteniéndose en forma de discos, fragmentos y testigos, estos últimos con una longitud que varió entre los 0.10 m y los 0.30 m. En correspondencia a lo anterior, el índice de calidad de esta roca RQD osciló entre el 19 % y el 83 %, teniendo un valor medio del 36 %, lo cual la categoriza como una roca de calidad mala, atendiendo a los criterios ofrecidos en la tabla 3.3.

De acuerdo a los parámetros compilados en la clasificación geomecánica de Bieniawski (1973, 1989), mediante la determinación del índice RMR "Rock Mass Rating", se determinó que el macizo rocoso que está constituido por esta calcarenita, pertenece a la Clase III con una puntuación de 55 y se establece que el mismo es de Calidad Media. Sobre la base de la clasificación geomecánica establecida y atendiendo a las propiedades de la roca calcarenita y el macizo rocoso que esta constituye, se realizó una estimación de algunas propiedades y parámetros mecánicos de los mismos, que no habían sido esclarecidos en las investigaciones realizadas anteriormente. Como consecuencia de las acciones efectuadas se estableció que esta roca calcarenita posee aproximadamente una Cohesión (c) de 65.00 kg/cm², un Ángulo de Fricción Interno (ϕ) de 32°, un Módulo de Elasticidad o Módulo de Young (E) de 2.00×10^5 kg/cm² y un Coeficiente de Poisson(ν) de 0.25.

Esta roca se encuentra ampliamente extendida por todo Cayo Guillermo, aflorando en más de la mitad de los sectores del territorio donde se observa superficialmente la Formación Jaimanitas (ver anexo 18, mapa ingeniero geológico). Atendiendo a todo el volumen de perforaciones realizadas, se determinó que la misma compone la mayor parte del basamento rocoso que conforma a este cayó, manifestándose su presencia en la mayoría de las calas ingeniero geológicas efectuadas, todo lo cual evidencia que esta calcarenita representa el estrato ingeniero geológico de la Formación Jaimanitas, con mayor nivel de extensión superficial y en profundidad en el territorio, considerándosele su principal constituyente. Al continuar examinando las columnas litológicas obtenidas en todas las perforaciones realizadas (ver anexos 6, 12 y 14), se observa que la misma se extiende o yace comúnmente, por debajo de un delgado estrato de rocas calizas, desarrollándose en profundidad hasta el máximo nivel de investigación alcanzado, o bien ocupando la totalidad del corte litológico explorado. Hacia los sectores del terreno de estudio donde abundan por el contrario las rocas del estrato ingeniero geológico 1, ocasional y limitadamente se puede hallar a esta roca calcarenita, alternándose con la caliza a modo de pequeños lentes o estratos delgados. Esta roca puede aparecer indistintamente con un espesor



estudiado que oscila desde los 0.90 m a los 14.20 m, presentando un espesor explorado medio de 4.26 m.

A partir de la evaluación y comprensión de las principales propiedades geotécnicas de cada estrato ingeniero geológico abordado, se pudo esclarecer el comportamiento ingeniero geológico general de la Formación Jaimanitas como un todo.

Al revisar y comparar las propiedades geotécnicas del estrato ingeniero geológico 1 con las del estrato ingeniero geológico 2, es evidente notar que las rocas calizas y el macizo rocoso que las mismas constituyen, poseen un mejor comportamiento geotécnico que las calcarenitas y el macizo rocoso que estas forman, presentando valores de algunas de sus propiedades físicas y mecánicas notablemente más favorables que las del otro estrato evaluado. Al tratar de homogenizar o promediar los valores de tales propiedades físicas y mecánicas entre los dos estratos examinados, para establecer un comportamiento general de la Formación Jaimanitas como un todo, se nota que se le estarían asignando cualidades y un comportamiento general más favorable a dicha formación que el que realmente ella presentará, principalmente hacia aquellas porciones del territorio donde predominan las rocas calcarenitas, con menores prestaciones o cualidades geotécnicas que la caliza, debido a lo cual se estaría incurriendo en un gravísimo error. Teniendo en cuenta precisamente el nivel de extensión de cada estrato descrito y partiendo del hecho de que las rocas calcarenitas representan el estrato ingeniero geológico de la Formación Jaimanitas, con mayor grado de extensión superficial y en profundidad en Cayo Guillermo, considerándosele su principal elemento litológico constituyente, se determina que el comportamiento ingeniero geológico general de esta formación quedará definido por las cualidades geotécnicas que caracterizan al estrato ingeniero geológico 2, atribuyéndosele y asignándosele sus propiedades físicas y mecánicas.

3.3. Determinación del caso característico de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), para rocas de la Formación Jaimanitas

Una vez descritas y evaluadas las principales propiedades físicas y mecánicas de los elementos litológicos constituyentes de la formación examinada, además de conocerse y quedar definido el comportamiento ingeniero geológico general de la misma, se puede precisar el caso característico de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), que corresponde para el empleo esta formación geológica como base de cimentaciones. Según los criterios establecidos al respecto en la NC-XX.2014 (Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales), actualmente en proceso de aprobación y



publicación, para el dimensionamiento geotécnico de la base de los cimientos superficiales apoyados sobre terrenos constituidos por rocas, la q_{br} se calculará atendiendo a las propiedades ingeniero geológicas de dichas rocas, siguiendo 3 casos típicos establecidos, los cuales se mencionan nuevamente a continuación:

4. Caso 1. Macizo rocoso constituido por roca homogénea sana no fisurada. En este caso es muy frecuente que la roca sea más resistente y menos deformables que el hormigón, como es el caso de rocas con una resistencia alta a muy alta.
5. Caso 2. Roca homogénea poco fisurada a muy poco fisurada con aberturas de sus discontinuidades menor de 0.5 cm (o menor de 2.5 cm si están rellenas con suelo o roca triturada) y el ancho de la base de la cimentación es mayor de 0.30 m. En el caso de rocas sedimentarias o foliadas la estratificación debe ser horizontal o muy próximo a esto. En el caso de existir juntas verticales abiertas con un espesor superior al indicado anteriormente se deben rellenar con mortero u hormigón.
6. Caso 3. Roca de muy baja resistencia, de fisurada a muy fisurada, con discontinuidades al azar, muy alterada y fragmentada. En este caso se considera que el macizo rocoso se comporta como una masa granular y se determina q_{br}^* igual que en el caso de suelos. La determinación de los parámetros de resistencia a cortante se realizará mediante ensayos “in situ”.

Teniendo en cuenta las características físicas y mecánicas de las rocas que componen a esta formación y los macizos rocosos que estas constituyen, se establece que el caso característico de cálculo de la q_{br} que le corresponde a las bases de cimentación que sobre la misma se deseen emplazar directamente, es el caso 2.

Una vez seleccionado el caso típico a emplear para el cálculo de la q_{br} , se procedió precisamente a su determinación, siguiendo la metodología de trabajo establecida en la propuesta de norma citada. De acuerdo al documento mencionado, el cálculo de la q_{br} para el caso típico 2 se realiza a través de la formula siguiente:

$$q_{br}^* = K_{sp} \cdot q_u^*$$

Donde:

$$q_u^* = \frac{q_u}{\gamma_{sq}} \quad \text{y} \quad K_{sp} = \frac{9 + 3 \cdot \left(\frac{dg}{b}\right)}{\sqrt[10]{1 + 300 \cdot \left(\frac{Eg}{dg}\right)}}$$



Siendo:

q_u^* - Resistencia a la compresión simple de cálculo.

\bar{q}_u - Valor medio de la resistencia a la compresión simple de los testigos ensayados de roca.

γ_{sq} - Coeficiente de minorización de q_u . Su máximo valor será igual a 1.50, el cual se adoptará cuando no se realice tratamiento estadístico de estimación del valor de q_u .

K_{sp} - Coeficiente de ajuste de la q_{br} , en función de las características del macizo rocoso y las dimensiones de la base de cimentación a diseñar.

d_g - Espaciamiento promedio de las discontinuidades.

E_g - Ancho promedio de las discontinuidades.

b - Lado menor del cimiento.

Atendiendo al comportamiento ingeniero geológico general que se definió que caracterizará a la formación tratada, se tomó como valor de cálculo de la \bar{q}_u , el correspondiente a la media de la resistencia a la compresión axial saturada ($\sigma_{c\ sat}$) de la roca calcarenita descrita, la cual ascendía a 35.85 kg/cm². Como valor de γ_{sq} a utilizar, se seleccionó el de 1.50. Según lo expuesto, q_u^* se calculó de la manera siguiente:

$$q_u^* = \frac{\bar{q}_u}{\gamma_{sq}}$$

$$q_u^* = \frac{35.85 \text{ kg / cm}^2}{1.50}$$

$$q_u^* = 23.90 \text{ kg/cm}^2$$

Para el cálculo del coeficiente K_{sp} , se seleccionó como valor de espaciamiento promedio de las discontinuidades (d_g), el determinado en el epígrafe 3.1 tanto para las calcarenitas como para las calizas de la Formación Jaimanitas, el cual ascendía a 2.62 m. Igualmente según los aspectos tratados en el epígrafe mencionado, se tomó como valor del ancho promedio de las discontinuidades (E_g) detectadas en el territorio, el de 0.003 m (3.00 mm). Por último se decidió determinar el coeficiente K_{sp} y por tanto el valor de la q_{br} de las bases de cimentaciones que se emplacen sobre esta formación, para el empleo de una supuesta cimentación superficial aislada de 1.00 m de largo por 1.00 m de ancho, quedando así definida las dimensiones del lado menor del cimiento supuesto, como de 1.00 m. Una vez esclarecidos estos aspectos se calculó el coeficiente K_{sp} según lo expresado, de la manera que se muestra a continuación:



$$K_{sp} = \frac{9 + 3 \cdot \left(\frac{dg}{b}\right)}{\sqrt[10]{1 + 300 \cdot \left(\frac{Eg}{dg}\right)}}$$

$$K_{sp} = \frac{9 + 3 \cdot \left(\frac{2.62 \text{ m}}{1.00 \text{ m}}\right)}{\sqrt[10]{1 + 300 \cdot \left(\frac{0.003 \text{ m}}{2.62 \text{ m}}\right)}}$$

$$K_{sp} = 16.37$$

Una vez calculado el coeficiente K_{sp} , se procedió a calcular la q_{br} , empleando la formula relacionada anteriormente para ello.

$$q_{br}^* = K_{sp} \cdot q_u^*$$

$$q_{br}^* = 16.37 \cdot 23.90 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_{br}^* = 391.24 \text{ kg/cm}^2$$

Atendiendo a todos los cálculos y deducciones realizadas hasta el momento, se obtiene que según el comportamiento ingeniero geológico general definido para la Formación Jaimanitas y las condiciones geotécnicas que presenta el macizo rocoso que esta constituye, la misma posee una presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}) de 391.24 kg/cm^2 , para la utilización de una supuesta cimentación superficial aislada con un lado menor (ancho) igual a 1.00 m, que se desee emplazar directamente sobre las rocas que la constituyen.

3.4. Valoración del empleo de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones en Cayo Guillermo

A partir de todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo científico, se lograron reunir un número suficiente de elementos y criterios geotécnicos, que permitieron valorar las capacidades de empleo que posee la Formación Jaimanitas en el territorio de estudio, como terreno base de cimentaciones para las futuras edificaciones que se proyectan ejecutar en este. Sobre la base del análisis y caracterización de los diferentes aspectos a tener en cuenta, para el correcto estudio del macizo rocoso de aquellos terrenos conformados por rocas que se deseen aprovechar para la colocación o emplazamiento directo de cimentaciones, los cuales se abordan



con más detalle en el epígrafe 1.2 del capítulo 1 de este documento, se confeccionó un mapa de conveniencia del uso de esta formación en el territorio, para su empleo en la finalidad mencionada (ver anexo 22). Para la confección de dicho mapa, se le prestó especial atención al comportamiento de los aspectos siguientes:

- a) Particularidades topográficas de Cayo Guillermo.
- b) Profundidad de yacencia del techo de las rocas de la Formación Jaimanitas.
- c) Valores de la resistencia a la compresión simple (σ_c) de las rocas de la Formación Jaimanitas.
- d) Nivel medio de las aguas subterráneas presentes en el territorio.

A partir de la zonificación del comportamiento de cada uno de los aspectos relacionados anteriormente, teniendo en cuenta la determinación de condicionantes que diferencian su grado de aprovechamiento para su empleo como base de cimentaciones, se identificaron y zonificaron a su vez progresivamente, los sectores del territorio donde coincidían las áreas de diferente comportamiento de estos aspectos o elementos. Gracias a ello se obtuvo el mapa mencionado, donde se identifican a través de una escala de colores, 6 zonas del territorio de Cayo Guillermo con un nivel de calidad que varía en sentido decreciente, desde uso excelente a uso muy desfavorable para su empleo como terreno base de cimentaciones, en función de sus características.

Del análisis del mapa de conveniencia referido (ver anexo 22), se obtiene que las zonas de extensión de la formación estudiada, que se evalúa que reúnen las mejores condiciones para su empleo como base de cimentaciones, se encuentran identificadas con un color verde oscuro y están catalogadas como de uso excelente, sobre la base de los aspectos o elementos geotécnicos valorados. Estos sectores tienen una pequeña extensión y son muy limitados, localizándose exclusivamente hacia la porción Oeste del cayo, donde existen condiciones topográficas del terreno óptimas para el emplazamiento de cualquier edificación, pues el relieve es relativamente homogéneo o regular y no se observan desniveles significativos o bruscos de la superficie. En estas áreas generalmente afloran las rocas de la formación examinada o la cota de yacencia del techo de estas, se encuentra por encima del nivel -1.00 m con respecto al n.m.m. (están a niveles más elevados en realidad), lo cual determina que son idóneas para la construcción de cimentaciones superficiales directamente apoyadas sobre tales rocas. El hecho de que en estas áreas, la solución de cimentación más eficaz de cualquier proyecto constructivo futuro, sea el uso de cimientos superficiales, es un factor muy positivo a tener en cuenta como resultado de cualquier investigación ingeniero geológica dada, pues el uso de una cimentación superficial es la



condición más favorable para la construcción de cualquier estructura determinada, debido a que facilita su ejecución general y es la opción más económica de cuantas variantes existan.

Otro elemento geotécnico decisivo que contribuye a que el terreno rocoso existente en estas pequeñas áreas, sea catalogado como de uso excelente para bases de cimentaciones, lo constituye el hecho de que las cotas de yacencia del techo de las rocas de la formación estudiada, están allí muy por encima del nivel medio de las aguas subterráneas existentes en el territorio, el cual asciende a 0.15 m con respecto al n.m.m., según las numerosas mediciones realizadas en las diferentes perforaciones ejecutadas. Gracias a ello las condiciones hidrogeológicas de estos sectores es clasificada como muy favorable, pues las rocas existentes no se hallan saturadas por encima del nivel referenciado, no encontrándose sus propiedades físicas y mecánicas afectadas por la influencia del agua, lo cual lógicamente contribuye a que tengan un mejor comportamiento geotécnico. La situación descrita hasta el momento propicia además, que las posibles cimentaciones superficiales que se pudieran colocar en el futuro sobre las rocas de estos sectores, no se encontrarían directamente influenciadas por las aguas subterráneas existentes, las cuales atendiendo a sus características químicas, son consideradas como muy agresivas al hormigón y al acero, pudiéndole ocasional a los mismos un efecto corrosivo severo.

Por último se desea señalar, que hacia los sectores del territorio coloreados con un verde oscuro, las rocas de la Formación Jaimanitas poseen valores de resistencia a la compresión simple (σ_c) por encima de los 50.00 kg/cm², que aunque clasifican como rocas moderadamente débiles según los criterios del anexo 21, muestran un comportamiento general más favorable con respecto a los demás valores de esta propiedad, que muestran dichas rocas.

Pese a que según el comportamiento de los aspectos o elementos geotécnicos evaluados, las zonas descritas hasta el momento presentan una capacidad de empleo como bases de cimentaciones catalogado como de uso excelente, al revisar los criterios expuestos en la NC-XX.2014 (Geotecnia. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales), referentes a las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las base de cimentaciones, las cuales se reflejan el epígrafe 1.2 del capítulo 1 de este documento, se determina precisamente que las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las bases de cimentaciones que allí se decidan emplazar, clasifican como desfavorables. Esta condición está dada únicamente, debido a la amplia extensión que presentan los fenómenos cársicos existentes, fundamentalmente en superficie y en menor medida en profundidad.



Las otras zonas del territorio que le siguen a las descritas, según las condiciones geotécnicas y el nivel de aprovechamiento que poseen para ser empleadas como bases de cimentaciones, son aquellas que están identificadas con un color verde claro, las cuales se clasifican como de uso muy favorable. Estas zonas a diferencia de las primeras, si poseen una gran extensión. Las mismas se localizan hacia el extremo Norte de la franja central de Cayo Guillermo y fundamentalmente hacia la mayor parte de la porción Oeste del territorio. En estas zonas como en las primeras descritas, también existen condiciones topográficas idóneas para el emplazamiento de cualquier edificación, pues el relieve es relativamente homogéneo o regular y no se observan desniveles significativos o bruscos de la superficie del terreno. En las mismas afloran mayormente las rocas de la formación examinada, o la cota de yacencia del techo de estas se encuentra por encima del nivel -1.00 m con respecto al n.m.m., lo cual determina que son aptas para la construcción de cimentaciones superficiales directamente apoyadas sobre las rocas estudiadas, situación está que mantiene el mismo significado de aprovechamiento práctico y económico tratado.

Al igual que en el caso anterior, un aspecto geotécnico determinante que contribuye a que estas áreas, sean catalogadas como de uso muy favorable para su empleo como bases de cimentaciones, lo constituye el hecho de que las cotas de yacencia del techo de las rocas de la Formación Jaimanitas, están allí también por encima del nivel medio de las aguas subterráneas existentes en el territorio (0.15 m con respecto al n.m.m.). Debido a lo anterior, las condiciones hidrogeológicas que presentan estas zonas están consideradas también como muy favorables, pues se mantienen los mismos aspectos positivos que su comportamiento sugiere, los cuales fueron detallados en la descripción de las zonas de uso excelente.

El aspecto geotécnico que diferencia estas nuevas áreas, catalogadas como de uso muy favorable con respecto a las ya descritas, radica en el análisis del comportamiento de los valores de resistencia a la compresión simple (σ_c) de las rocas tratadas. En las zonas identificadas con el color verde claro, las rocas existentes poseen generalmente, valores de la propiedad mencionada que oscilan entre los 12.50 kg/cm² y 50.00 kg/cm², clasificando como rocas débiles atendiendo a los criterios establecidos en el anexo 21. Debido a lo anterior en estas áreas, el comportamiento de este aspecto es más desfavorable que el que poseen las rocas existentes en las zonas de uso excelente para cimentaciones.

Aunque atendiendo al análisis de los elementos citados, las zonas de color verde claro están consideradas como de uso muy favorables para su aprovechamiento como terrenos bases de cimentaciones, según los razonamientos expuestos en la propuesta de norma citada hasta el



momento, las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las bases de cimentaciones que se puedan emplazar en estas áreas, clasifican como desfavorables. Esta condición también está dada únicamente, debido a la amplia extensión que presentan los fenómenos cársicos existentes, fundamentalmente en superficie y en menor medida en profundidad.

Al analizar el plano de conveniencia tratado (anexo 22), se observa que se halla delimitada una zona catalogada como de uso favorable para la utilización de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones, la cual está identificada con un color azul claro. Esta nueva área de clasificación del aprovechamiento de las rocas tratadas, muestra también un alto grado de extensión territorial, aunque menor que las zonas de uso muy favorable descritas anteriormente. La misma se extiende hacia la parte central del cayó, ocupando en ocasiones sectores aislados y pequeños, o desarrollándose hacia otros sectores más extensos que se alargan hasta la porción Oeste del territorio, donde se desarrollan en forma de franjas longitudinales hacia la costa Sur y en menor medida hacia la costa Norte.

En correspondencia con las condiciones topográficas generales del territorio estudiado, también existe un relieve muy favorable para el emplazamiento de cualquier edificación, pues la superficie del terreno es relativamente uniforme y no se detectan diferencias significativas o bruscas en sus cotas topográficas. En estas áreas las rocas de la formación evaluada se pueden encontrar aflorando en la superficie, o con una cota de yacencia del techo de estas por encima del nivel -1.00 m con respecto al n.m.m., lo cual determina que son aptas para la construcción de cimentaciones superficiales directamente apoyadas sobre las rocas estudiadas.

En las zonas identificadas con el color azul claro las rocas poseen generalmente también, valores de la resistencia a la compresión simple (σ_c) que oscilan entre los 12.50 kg/cm² y 50.00 kg/cm², clasificando como rocas débiles atendiendo a los criterios establecidos en el anexo 21. El aspecto geotécnico que diferencia a estas nuevas áreas con las anteriormente descritas, radica en el hecho de que las cotas de yacencia del techo de las rocas de la Formación Jaimanitas, se encuentran muy próximas al nivel medio de las aguas subterráneas existentes en el territorio (0.15 m con respecto al n.m.m.) o en mayor proporción por debajo de dicho nivel. Lógicamente las condiciones hidrogeológicas que presentan estas zonas, están consideradas como desventajosas con respecto a las condiciones existentes en las otras áreas descritas hasta el momento, debido a que las rocas presentes estarían parcialmente o totalmente saturadas, encontrándose sus propiedades físicas y mecánicas afectadas por la influencia del agua, lo cual contribuye a que tengan un menor comportamiento geotécnico. De manera semejante se deduce que las condiciones hidrogeológicas dominantes en estas zonas, implican que las posibles cimentaciones



superficiales que se pudieran emplazar allí en el futuro, se encontrarían directamente influenciadas por la acción de las aguas subterráneas existentes. Debido a lo anterior se deduce que para la construcción de cualquier cimentación que se desee situar en las mismas, se deberán emplear materiales de la construcción especiales de alta calidad, que garanticen que los componentes de estos elementos estructurales, no sufran afectaciones significativas por la acción químicamente agresiva de las aguas subterráneas existentes.

Pese a que según el comportamiento de los aspectos evaluados, la zona tratada presenta una capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones catalogada como de uso favorable, al examinar los criterios expuestos en la NC-XX.2014, actualmente en fase de revisión y publicación, se determina que las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las bases de cimentaciones que allí se decidan emplazar, clasifican como desfavorables. Esta situación está dada por la conjugación de 2 condiciones perjudiciales del medio geológico existente para la estabilidad de la base de una cimentación. La primera de ellas está fundamentada por la amplia difusión de los fenómenos cársicos en el territorio, principalmente en superficie y en menor medida en profundidad. La segunda condición perjudicial del medio geológico está dada, por la influencia directa que tendrán sobre las posibles bases de cimentaciones futuras, el agua subterránea existente.

Situándose regularmente al Sur de la zona de uso favorable, se encuentra las áreas de desarrollo de la formación tratada que clasifican como de uso poco favorable para su empleo en la finalidad evaluada, las cuales se hallan representadas con el color amarillo claro. Esta nueva zona, se extiende como una franja continúa por las inmediaciones de la porción central y Oeste de Cayo Guillermo. Topográficamente la misma se desarrolla en sectores del cayo ocupados fundamentalmente por el Complejo Natural de Pantanos Salobres Bajos y en limitadas partes por el Complejo Natural de Lagunas Litorales e Interiores Salobres y el Sub-complejo Natural de Playas. El rasgo característico del relieve donde se extiende esta zona de uso poco favorable, lo constituye el dominio de cotas bajas del terreno con valores muy cercanos al nivel del mar, donde buena parte de la superficie del mismo se encuentran cubierta por una delgada capa de aguay/o sedimentos sueltos no consolidados, muchos de ellos con abundante contenido de materia vegetal. Los elementos litológicos que componen la superficie de este sector del terreno, se hallan en un alto porcentaje de su volumen en estado saturado.

El aspecto fundamental que condiciona su evaluación como de uso poco favorable, está dado por el hecho de que las rocas de la formación tratada se encuentran regularmente con una cota de yacencia de su techo, que va desde los -1.00 m hasta -3.00 m con respecto al n.m.m. Debido a lo



anterior, en esta zona no se pueden emplear sistemas de cimientos superficiales como solución de cimentación de las futuras edificaciones que se puedan construir allí. Las condiciones de yacencia del techo de la formación examinada, hacen que esta zona sea factible solamente para el empleo de cimentaciones semiprofundas, tipo pilotes cortos, los cuales evidentemente trabajarían apoyados en punta directamente sobre las rocas de dicha formación. Esta variante de cimentación es desde el punto de vista tecnológico, relativamente compleja de ejecutar y presupone un ajuste de las características estructurales de las posibles edificaciones que se proyecten construir. Desde el punto de vista económico, el uso de cimientos semiprofundos tipos pilotes cortos, presupone un encarecimiento del proyecto constructivo de cualquier instalación a edificar.

Otro elemento significativo que contribuye a que el macizo rocoso existente en profundidad en esta zona, sea catalogado como de uso poco favorable para su empleo como bases de cimentaciones, lo constituye el hecho de que las rocas de la formación estudiada yacen allí por debajo del nivel medio de las aguas subterráneas existentes en el territorio, haciendo que las mismas se encuentren saturadas y posean un menor comportamiento geotécnico. Las condiciones hidrogeológicas dominantes en esta zona, implican naturalmente que las posibles cimentaciones semiprofundas que se pudieran construir en el futuro, se encontrarían directamente influenciadas por la acción de las aguas subterráneas existentes, debido a lo cual para su edificación se sugiere que se deberán emplear materiales de la construcción especiales de alta calidad, que garanticen que los componentes de estos elementos estructurales no sufran afectaciones significativas por la acción químicamente agresiva de las aguas subterráneas.

Finalmente se desea destacar, que hacia los sectores del territorio coloreados con un amarillo claro, las rocas existentes poseen generalmente también, valores de la resistencia a la compresión simple (σ_c) que oscilan entre los 12.50 kg/cm² y 50.00 kg/cm², clasificando como rocas débiles atendiendo a los criterios establecidos en el anexo 21.

Independientemente que de acuerdo a los aspectos evaluados, la zona recién descrita presenta una capacidad de empleo como terreno base de cimentaciones considerada como de uso poco favorable, al analizar los criterios expuestos en la NC-XX.2014, se determina también que las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las bases de cimentaciones examinadas, clasifican como desfavorables. Esta condición está dada fundamentalmente, por la influencia directa que tendrán sobre las bases de cimentaciones semiprofundas abordadas, el agua subterránea existente.



La zona de evaluación del uso de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones que posee mayor extensión territorial, lo constituye la identificada con el color anaranjado carmelitoso, la cual se halla considerada como de uso desfavorable para su utilización en la finalidad examinada. La misma se desarrolla hacia casi la totalidad de la porción Este del territorio y se alarga de forma continuada hacia la parte centro Sur del cayo. En sentido general esta nueva zona se localiza a su vez, al Sur de la zona catalogada como de uso poco favorable. Las áreas identificadas con el color anaranjado carmelitoso, topográficamente se distinguen también por desarrollarse mayormente en sectores del territorio donde predominan las cotas bajas de la superficie del relieve, con valores muy cercanos al nivel del mar, manteniendo muchas de las particularidades ya descritas para los sectores del territorio estudiado con estas características superficiales.

El aspecto geotécnico fundamental que como en el caso anterior, condiciona su evaluación como de uso desfavorable para su aprovechamiento como base de cimentaciones, está definido por el comportamiento de la cota de yacencia del techo de la formación analizada. La cota de yacencia del techo de las rocas se encuentran a niveles que fluctúan entre los -3.00 m hasta los -5.00 m con respecto al n.m.m., lo cual hace que las zonas de extensión del conjunto litológico estudiado que presentan estas particularidad, sean solamente factibles para el empleo de cimentaciones profundas, las cuales indudablemente trabajarían apoyadas en punta directamente sobre las rocas analizadas. Esta variante de cimentación es desde el punto de vista tecnológico, más compleja de ejecutar que las otras variantes de cimentación mencionadas anteriormente. Su aplicación como en el caso anterior, también presupone un ajuste de las características estructurales de las futuras edificaciones que se deseen construir en estas zonas del cayo. Desde el punto de vista económico, el uso de cimientos profundos, también implica un encarecimiento del proyecto constructivo de cualquier instalación a edificar, todo lo cual entorpecería su ejecución en general.

Al encontrarse el techo de las rocas de esta formación a niveles de yacencia que oscilan entre los -3.00 m a -5.00 m con respecto al n.m.m., obviamente las mismas se encuentran muy por debajo del nivel medio de las aguas subterráneas presentes en el territorio, haciendo que estas se encuentren saturadas y también posean un menor comportamiento geotécnico que el mostrado por las mismas rocas, en sectores donde estas no se encuentran en estado saturado. La existencia de condiciones hidrogeológicas tan adversas, implica que los cimientos profundos que se pudiesen emplazar en el futuro en esta zona, estarían sometidos a las mismas influencias negativas que dicha condición provoca sobre las cimentaciones, las cuales se describieron para el caso de las zonas de uso poco favorable anteriormente.



En la amplia extensión que abarca esta zona de uso desfavorable de la Formación Jaimanitas como terreno base de cimentaciones, las rocas existentes poseen diversos valores de resistencia a la compresión simple (σ_c) (ver anexo 20), registrando de hecho dentro de sus límites, los sectores con los mayores valores de la propiedad analizada de todo el territorio de estudio. Según lo expresado, en la zona identificada con color anaranjado carmelitoso las rocas alcanzan valores de resistencia a la compresión simple (σ_c) que van desde los 12.50 kg/cm² a los 50.00 kg/cm² y también adquieren valores que oscilan entre los 50.00 kg/cm² y 125.00 kg/cm², catalogándose como rocas débiles y moderadamente débiles respectivamente, atendiendo a los criterios expresados en el anexo 21. Hacia el extremo Este del cayo, hay una pequeña área donde dichas rocas muestran valores de la propiedad analizada que superan los 125.00 kg/cm², lo cual las identifica como rocas moderadamente fuertes, según la clasificación del anexo 21. Atendiendo a los diferentes valores que alcanza la resistencia a la compresión simple (σ_c) de las rocas objetos de estudio en esta zona, se decidió no tomar el comportamiento de esta propiedad o aspecto geotécnico como un criterio de medida para la zonificación e identificación de nuevas áreas de clasificación de esta formación para la finalidad analizada, debido a que para la construcción de cimentaciones, en condiciones topográficas, de yacencia de las rocas e hidrogeológicas tan desfavorables como las registradas, la existencia de diferentes valores de la resistencia a la compresión simple (σ_c) no marcan la diferencia en cuanto a la situación geotécnica desventajosa dominante.

Según los criterios expuestos en la NC-XX.2014, se establece también que las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las bases de cimentaciones que se pudieran emplazar en esta zona, clasifican como desfavorables. Esta condición está fundamentada básicamente, por la influencia directa que tendrán sobre las bases de cimentaciones profundas tratadas, el agua subterránea existente.

La zona restante de evaluación del empleo de la formación estudiada como terreno base de cimentaciones, está catalogada como de uso muy desfavorable y se identifica en el mapa de conveniencia elaborado, por un color anaranjado fuerte. Esta nueva zona posee una pequeña y limitada extensión, desarrollándose hacia el extremo Sur de la franja central de Cayo Guillermo. Topográficamente la misma se extiende en una porción del cayo, que se encuentra completamente ocupada por el Complejo Natural de Pantanos Salobres Bajos, donde es característico del relieve, la existencia de cotas bajas del terreno con valores muy cercanos al nivel del mar. Buena parte de la superficie de esta zona se encuentran cubierta por una delgada capa de aguay/o sedimentos sueltos no consolidados con abundante contenido de materia



vegetal. La mayor parte de los elementos litológicos que componen la superficie de este sector del terreno, se hallan en estado saturado.

Al igual que en los últimos dos casos explicados, el aspecto geotécnico fundamental que condiciona la evaluación de esta zona, como de uso muy desfavorable para su aprovechamiento como base de cimentaciones, está definido por el comportamiento de la cota de yacencia del techo de la formación analizada. La cota de yacencia del techo de las rocas se encuentra a niveles inferiores a los -5.00 m con respecto al n.m.m., lo cual implica que esta área sea solamente factible para el empleo de cimentaciones consideradas como muy profundas, con respecto a los demás niveles de yacencia del techo de la formación valorada en el territorio. Estas cimentaciones trabajarían también apoyadas en punta directamente sobre las rocas analizadas. La utilización de esta variante de cimentación implica condiciones más desventajosas desde el punto de vista de su ejecución tecnológica que las demás variantes tratadas hasta el momento. Económicamente también constituye una opción menos factible o recomendable, todo lo cual contribuiría a dificultar el proyecto de construcción general de cualquier edificación que se planeara situar en esta área.

Debido a los niveles de yacencia que presenta el techo de las rocas estudiadas, es evidente deducir que se mantienen las mismas condiciones hidrogeológicas negativas hasta ahora descritas para el emplazamiento de cualquier tipo de cimentación, hallándose estas igualmente sujetas a la acción directa de las aguas químicamente agresivas existentes en el medio. Según el comportamiento de la resistencia a la compresión simple (σ_c) de las rocas estudiadas, hacia la zona identificada con un color anaranjado fuerte, las mismas poseen valores de dicha propiedad mecánica que oscilan mayormente entre los 12.50 kg/cm² y 50.00 kg/cm², clasificando como rocas débiles atendiendo a los criterios establecidos en el anexo 21.

Al revisar los criterios expuestos en la NC-XX.2014, se establece también que las condiciones de trabajo a que estarán sujetas las bases de cimentaciones que se pudieran emplazar en esta zona, clasifican como desfavorables. Esta condición está fundamentada principalmente, por la influencia directa que tendrán sobre las bases de cimentaciones muy profundas mencionadas, el agua subterránea existente en el medio geológico estudiado.

Sobre la base de todos los resultados obtenidos en esta investigación y la evaluación de las diferentes condiciones y escenarios de uso que posee la Formación Jaimanitas para su utilización terreno base de cimentaciones, se considera que toda el área de extensión de este conjunto litológico en Cayo Guillermo, tanto en los sectores en los que aflora como en aquellos en los



cuales se desarrolla en profundidad, posee características que permiten su aprovechamiento como terreno base de diferentes variantes de cimentación, tanto superficiales, como semiprofundas, profundas y muy profundas.

Como es lógico pensar, en aquellas zonas del territorio donde estas rocas afloran o la cota de yacencia del techo de estas se encuentra a escasa profundidad, es decir por encima del nivel -1.00 m con respecto al n.m.m., es donde el conjunto litológico evaluado reúne los mejores ambientes de cimentación disponibles, pues se cataloga de uso favorable a uso excelente las condiciones que esta posee para la construcción de cimentaciones superficiales. Como bien se ha expresado con anterioridad, el uso de una cimentación superficial implica la situación geotécnica más favorable para la construcción de cualquier estructura determinada, debido a que facilita su ejecución general y es la opción más económica de cuantas variantes existan.

Hacia aquellas zonas del cayo, donde estas rocas se desarrollan a una profundidad gradualmente creciente, es decir por encima de los -1.00 m y hasta valores inferiores a los -5.00 m con respecto al n.m.m., la Formación Jaimanitas agrupa los ambientes de cimentación disponibles más comprometidos geotécnicamente, pues las condiciones que esta posee son catalogadas como de uso poco favorable a uso muy desfavorable, las cuales son aprovechables para la construcción de cimentaciones semiprofundas, profundas y muy profundas gradualmente. En correspondencia con los criterios señalados hasta el momento, el uso de cimentaciones semiprofundas, profundas y muy profundas, implica la adopción creciente de mayores dificultades tecnológicas y económicas para la realización de cualquier proyecto constructivo futuro, todo lo cual entorpecería su ejecución.

En sentido general, atendiendo a las características ingeniero geológicas de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, al comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas que la identifican, a los valores característicos calculados de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}) que ella posee y el reconocimiento de los distintos fenómenos geológicos que se encuentran afectándola con una intensidad definida, se considera que este conjunto litológico posee condiciones geotécnicas aceptables para su empleo como terreno base de diferentes variantes de cimentación. No obstante atendiendo a la amplia difusión principalmente superficial que poseen los fenómenos cársicos que la afectan y la acción directa que las aguas subterráneas existentes pueden provocarles a las bases de los cimientos y a los cimientos que sobre estas rocas se emplacen en aquellas zonas de su extensión, situadas por debajo de los 0.15 m con respecto al n.m.m., se considera atendiendo a los criterios establecidos



en la NC-XX.2014, que las bases de cimentación tratadas estará sujetas a condiciones de trabajo desfavorables.

3.5. Conclusiones parciales.

Sobre la base del análisis de todos los temas abordados en este capítulo, se definen las conclusiones siguientes:

1. Cayo Guillermo se ha desarrollado y presenta actualmente, un régimen tectónico y geodinámico relativamente tranquilo y estable, debido a lo cual en su territorio no se reconoce la existencia de estructuras geológicas (plegamientos y fallas) significativas que comprometan la estabilidad y seguridad de las bases de cimentaciones que se puedan emplazar sobre sus componentes litológicos.
2. Los macizos rocosos conformados por la Formación Jaimanitas, se encuentran afectados por 3 familias de grietas más juntas aleatorias, observándose 2 familias principales o 2 direcciones predominantes de agrietamiento. Las mismas en cuanto a su orientación, clasifican como que poseen condiciones medias a muy favorables a la estabilidad del macizo rocoso, en función de su uso para el emplazamiento de cimentaciones directamente apoyadas sobre las rocas que lo constituyen.
3. El espaciamiento medio (d_g) entre las grietas que afectan a la Formación Jaimanitas es de 2.62 m, lo cual indica la existencia de un macizo rocoso muy poco fisurado con un espaciamiento entre juntas, catalogado como amplio.
4. Las dislocaciones tectónicas disyuntivas que afectan al macizo rocoso formado por las rocas de la formación geológica evaluada y en especial el agrietamiento, no disminuyen ni comprometen significativamente la capacidad de empleo que posee esta, para su uso como terreno base de cimentaciones.
5. Las rocas de la Formación Jaimanitas se hallan frescas y no presentan signos visibles de alteración, presentando un grado de alteración del tipo I, en casi la totalidad de los sectores de Cayo Guillermo donde estas afloran. Por debajo indistintamente de las cotas - 1.00 m a 0.00 m con respecto al n.m.m., estas rocas se observan levemente alteradas, poseen un grado de alteración del tipo II y se relacionan con una roca ligeramente descompuesta.
6. Sobre la base de la evaluación del grado de afectación que poseen las rocas de la formación estudiada ante la ocurrencia de los procesos de intemperismo o meteorización que actúan sobre las mismas, se deduce que estos no atentan ni inciden sustancialmente en las propiedades que posee el macizo rocoso para su empleo como terreno base de cimentaciones.



7. Los procesos cársicos que afectan a las rocas de la formación evaluada, son mayormente de carácter superficial y están diseminados por toda el área de extensión de estas, haciéndose particularmente abundantes y cuantiosos en los sectores de Cayo Guillermo donde las mismas afloran.
8. El fenómeno físico geológico más abundante que afecta a las rocas de la Formación Jaimanitas, lo constituye el carso. Este fenómeno a su vez, representa la principal amenaza contra la estabilidad y seguridad de las bases de cimentaciones que se puedan colocar sobre las rocas tratadas.
9. La Formación Jaimanitas se encuentra compuesta básicamente por dos estratos ingeniero geológicos bien definidos y diferenciados. Las rocas calizas del estrato ingeniero geológico 1 se desarrollan principalmente hacia la parte superior del perfil litológico de la formación estudiada en particular, cubriendo usualmente a la roca calcarenita del estrato ingeniero geológico 2, la cual representa el estrato de la Formación Jaimanitas con mayor nivel de extensión superficial y en profundidad en el territorio, considerándosele su principal constituyente.
10. Atendiendo a las condiciones geotécnicas que reúne la formación tratada, se establece que el caso característico de cálculo de la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de una cimentación (q_{br}), que le corresponde a las bases de cimentación que sobre la misma se deseen emplazar directamente es el caso 2; siendo la q_{br} de 391.24 kg/cm^2 , para la utilización de una supuesta cimentación superficial aislada con un lado menor (ancho) igual a 1.00 m.
11. En toda el área de extensión de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo se delimitaron 6 zonas con un nivel de calidad que vario en sentido decreciente, desde uso excelente a uso desfavorable para su empleo como terreno base de cimentaciones; las cuales implican en ese orden, la adopción creciente de mayores dificultades tecnológicas y económicas para la realización de cualquier proyecto constructivo futuro.



CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados alcanzados mediante la realización de esta investigación, se definen las conclusiones siguientes:

1. Los principales fenómenos físicos y geológicos que se encuentran afectando en diferente medida a las rocas de la Formación Jaimanitas y a su vez pueden comprometerlas potencialidades que esta posee como terreno base de cimentaciones, son en orden decreciente según su grado de incidencia y abundancia: el carso, el agrietamiento y la meteorización o intemperismo.
2. Las propiedades físicas y mecánicas que caracterizan el comportamiento geotécnico de las rocas calizas del estrato ingeniero geológico 1 de la Formación Jaimanitas, se evalúan como buenas o favorables y las correspondientes a las rocas calcarenitas del estrato ingeniero geológico 2, se consideran como medianamente favorables, siendo estas últimas por su extensión las que definen las cualidades geotécnicas generales de la formación tratada.
3. Se valora que toda el área de extensión de la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, tanto en los sectores en los que aflora como en aquellos en los cuales se desarrolla en profundidad, posee condiciones geotécnicas aceptables para su empleo como terreno base de diferentes variantes de cimentación, tanto superficiales, como semiprofundas, profundas y muy profundas.



RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados alcanzados en este estudio, se emiten las recomendaciones siguientes:

1. Las investigaciones ingeniero geológicas que se continúen realizando en Cayo Guillermo para la construcción de las obras civiles proyectadas, deberán mantener un estudio detallado de las discontinuidades del macizo rocoso conformado por las rocas de la Formación Jaimanitas existentes en el sector que le corresponda evaluar, a fin de esclarecer de manera particular su grado de incidencia sobre las condiciones de cimentación de la futura obra, si son aprovechadas como bases de cimentaciones dichas rocas.
2. El estudio y seguimiento de los procesos de meteorización sobre las rocas de la formación evaluada, deberá llevarse a cabo sistemáticamente, debido a que el accionar de dichos procesos sobre tales rocas, se considera que seguirá siendo continuo y progresivo en el tiempo.
3. Los investigadores ingeniero geológicos deben tener especial cuidado con el estudio y caracterización del carso en Cayo Guillermo, para poder seleccionar del diapasón de medidas ingenieras existentes para tratar con este problema geotécnico, las más adecuada y económicamente eficaz, que se adapte a las particularidades estructurales de las edificaciones que se desean construir en el futuro.
4. Profundizar en el conocimiento y esclarecimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los principales elementos litológicos que constituyen a la Formación Jaimanitas en Cayo Guillermo, así como la distribución espacial que estos poseen en el territorio, a fin de lograr una mejor caracterización de su comportamiento geotécnico y ampliar los criterios de evaluación como terreno base de diferentes variantes de cimentación.
5. Lograr un mejor nivel de estudio y conocimiento de las rocas de la formación tratada, hacia aquellos sectores del territorio analizado en los cuales no se han realizado hasta el momento investigaciones ingeniero geológicas.
6. A partir de todo el volumen de datos e informaciones existentes en el territorio de la formación geológica estudiada y los restantes conjuntos litológicos existentes, se recomienda que a través del empleo de los diferentes softwares existentes, se realice una adecuada gestión de dichos datos para que mediante la confección de un sistema de



información geográfico, se pueda lograr un mejor aprovechamiento y comprensión de la información acumulada y que se continúe obteniendo, con el objetivo de facilitar las futuras investigaciones que se realicen.

7. Se le recomienda a las entidades inversionistas y constructoras responsables de las futuras edificaciones que se deseen construir en Cayo Guillermo, que deberán tener especial cuidado con la calidad de los materiales que se decidan emplear para la construcción en general de las obras que se emplacen en las zonas catalogadas como de uso favorable hasta de uso muy desfavorable como base de cimentaciones de la Formación Jaimanitas, con vistas a que sus componentes no sufran afectaciones significativas por la acción directa del agua subterránea existente y se extienda de esta forma, la estabilidad y durabilidad de la obra.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFONSO, J. R. Estadística en las Ciencias Geológicas, Tomo II. Vol. tomo II. La Habana: [s.n.], 1980. 25 p.
- ARANIBAL, A. y SALINAS, L.M. Ejecución de estudios geotécnicos. Geotecnia Vol.7 (2), La Habana, 2004. pp. 22-25.
- ARISTIDES, A. y GUARDIOLA, R. Contribución a La Práctica del análisis variográfico y de la estimación por Kriging, Revista Minería y Geología, 1999, pp. 83-92.
- BRAJA, M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. [s.n.], 2001.
- CANADIAN FOUNDATION. Engineering Manual. 1985.
- CUBA. AGENCIA DE ESTUDIOS MEDIO AMBIENTALES. Estudio geográfico integral Cayo Paredón Grande. Ciego de Ávila, 2010.
- CUBA. EMPRESA NACIONAL DE INVESTIGACIONES APLICADAS. Informe Ingeniero Geológico ampliación del grupo electrógeno Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2006.
- --- Informe Ingeniero Geológico ampliación del grupo electrógeno Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2006.
- --- Informe Ingeniero Geológico base de apoyo UEB Emprestrur. Ciego de Ávila, 2012.
- --- Informe Ingeniero Geológico cantera Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2011.
- --- Informe Ingeniero Geológico centro de reproducción de Delfines. Ciego de Ávila, 2011.
- --- Informe Ingeniero Geológico centro operativo OBEI. Ciego de Ávila, 1998.
- --- Informe Ingeniero Geológico ETECSA. Edificio C.T. Ciego de Ávila, 1999.
- --- Informe Ingeniero Geológico Hotel Pilar I 1ra variante. Ciego de Ávila, 1999.
- --- Informe Ingeniero Geológico Hotel Pilar I 1ra variante. Ciego de Ávila, 1999.
- --- Informe Ingeniero Geológico Hotel Pilar II 2da variante. Ciego de Ávila, 2001
- --- Informe Ingeniero Geológico Hotel Pilar II 3ra variante. Ciego de Ávila, 2013.
- --- Informe Ingeniero Geológico Hotel Pilar II 3ra variante. Ciego de Ávila, 2013.
- --- Informe Ingeniero Geológico Hotel Villa Cojímar. Ciego de Ávila, 1993.
- --- Informe Ingeniero Geológico Hotel Villa Gregorio. Ciego de Ávila, 1996.
- ---Informe Ingeniero Geológico Hotel Villa Vigía. Ciego de Ávila, 1995.
- --- Informe Ingeniero Geológico laguna de estabilización Unidad Cojímar. Ciego de Ávila, 1993.
- --- Informe Ingeniero Geológico materiales de la construcción Punta Lechuza. Ciego de Ávila, 1995.
- --- Informe Ingeniero Geológico náutica Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 1998.
- --- Informe Ingeniero Geológico parcela H1 (P1) preliminar. Ciego de Ávila, 2011.
- --- Informe Ingeniero Geológico parcela H2 (P2) preliminar. Ciego de Ávila, 2011.
- --- Informe Ingeniero Geológico parcela Hotelera Unidad Punta Alegre. Ciego de Ávila, 2012.



- --- Informe Ingeniero Geológico preliminar inversión funicular Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2014.
- --- Informe Ingeniero Geológico puente sobre la Canal de Guillermo. Ciego de Ávila, 1991.
- --- Informe Ingeniero Geológico puente sobre la Canal de Guillermo 2da Variante. Ciego de Ávila, 1991.
- --- Informe Ingeniero Geológico punto de basificación naval MININT Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2009.
- --- Informe Ingeniero Geológico punto de radiotécnica del MININT Punta Hueca, Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2009.
- --- Informe Ingeniero Geológico punto náutico del Hotel Meliá Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2009.
- --- Informe Ingeniero Geológico punto náutico del Hotel Sol Club Cayo Guillermo. Ciego de Ávila, 2009.
- --- Informe Ingeniero Geológico punto náutico y Mini Club del Hotel Iberostar Daiquirí. Ciego de Ávila, 2009.
- --- Informe Ingeniero Geológico punto náutico y Mini Club Villa Cojímar. Ciego de Ávila, 2009.
- --- Manual Instructivo sobre parámetros y correlaciones requeridos para el diseño de obras compatibilizadas. Departamento Técnico Nacional de la ENIA, 1991.
- CUBA. IGP. Léxico Estratigráfico de Cuba. La Habana, 2013.
- --- Mapa Geológico de Cuba 1: 100 000. La Habana: IGP, 2000?
- --- Mapa Tectónico de Cuba 1: 500 000. La Habana: IGP, 1985.
- CUBA. INSTITUTO CUBANO DE GEODESIA Y CARTOGRAFÍA. Esquema de los límites políticos administrativos y alturas dominantes. Cayo Guillermo 1:10 000. 1991.
- --- Mapa de la República de Cuba 1:100 000. 1985.
- --- Mapa de la República de Cuba 1:25 000. 1985.
- CUBA. INTITUTO DE PLANIFICACIÓN FÍSICA. Actualización del plan de ordenamiento territorial de Cayo Paredón Grande. Ciego de Ávila, 2007.
- DELGADO VARGAS, M. Ingeniería de cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico, 1999.
- FURRUZOLA, K. y NÚÑEZ, G. Estudios sobre la Geología de Cuba. La Habana, 1997. 67p.
- GONZÁLES DE VALLEJO, L.I.; Ferrer, M., Ortuño; L., Oteo, C. Ingeniería Geológica. Pearson Education, Madrid, 2002. 715 p.
- GONZÁLEZ, W. Análisis y clasificación geotécnica de la Formación Guevara. Tesis en opción al grado académico de Máster en Ingeniería Civil. CUJAE, La Habana, 2012.



- GORSHKOV, G.; A. YUKUSHOVA. Geología General, Editorial Mir, Moscú, 1970.
- GUTIÉRREZ, R. y BARRIETOS, A. Las Unidades Litoestratigráficas carsificadas de Cuba Occidental. La Habana, [s.n.] 2001.
- HERNÁNDEZ, BIANCA. Análisis y clasificación geotécnica de la Formación Villarroja. Tesis en opción al grado académico de Máster en Ingeniería Civil. CUJAE, La Habana, 2012.
- ITURRALDE-VINENT, M. A. y otros. Contribución a la Geología de la provincia de La Habana y Ciudad de la Habana. Editorial Científico Técnica. Cuba. 1982.
- --- "Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba". Contribución Especial No. 1, I.G.P.C. Project 364, Miami, USA, 1996. 265 p.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A. Geotecnia y Cimientos Mecánica de Suelos y Roca. España, 1976.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A.; JUSTO ALPAÑÉS, J.L. y SERRANO, A.A Geotecnia y cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas. Madrid: Editorial Rueda.1980.1188 p.
- LEÓN GONZÁLEZ, M. Tratamiento estadístico de las propiedades físico-mecánicas de los suelos. Revista Ciencias Técnicas, serie Ingeniería Estructural, CUJAE. La Habana, 1978. pp.21- 34.
- LÓPEZ JIMERO, C. Ingeniería del Terreno. Edición Enero/2000 <http://www.geotecnia2000.com/public/publicfrm.htm>.(16/09/07)
- MENDIETA, H.J. y SUÁREZ, L.O. Relación entre la resistencia a compresión Uniaxial (Ucs) y parámetros índice de rocas intactas sedimentarias, Geotecnia, Vol.7 (3), La Habana, 2004. pp. 43-48.
- NC 327: 2004. Perforación de calas Ingeniero Geológicas. Vig. Desde 2004.
- NC 46:1999. Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y construcción. Vig. Desde 1999. 12p.
- NC 497-2007. Descripción bibliográfica. Vig. Desde 2007.
- NC 51-24:1984. Investigaciones Ingeniero Geológicas. Mapas Ingeniero Geológicas. Procedimiento para su elaboración. Vig. Desde 1984.
- NC 53-134:1984. Elaboración de proyectos de construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de las Investigaciones Ingeniero-Geológicas Para Túneles Y Metropolitanos. Vig. Desde 1984.
- NC 53-151:1985. Elaboración de proyectos de construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de las Investigaciones Ingeniero Geológicas de las presas de materiales locales. Vig. Desde 1985.
- NC 53-153:1985. Elaboración de proyectos de construcción. Empuje de Suelos. Procedimientos de cálculo. Vig. Desde 1985.



- NC 53-177:1988. Proyectos de construcción. Lagunas de estabilización. Investigaciones Ingeniero Geológicas. Vig. Desde 1988.
- NC 53-184:1988. Proyectos de construcción. Canales Magistrales. Procedimiento para la ejecución de las etapas de Investigaciones Ingeniero Geológicas. Vig. Desde 1988. 15p.
- NC 53-187:1989. Proyectos de construcción. Micropresas de materiales locales. Investigaciones Ingeniero Geológicas. Vig. Desde 1989.
- NC 53-82:1983. Elaboración de proyectos de construcción. Estructuras de hormigón. Cimientos aislados rectangulares. Método de cálculo y diseño. Vig. Desde 1983.
- NC 54-145:86. Materiales y productos de la construcción. Suelos y rocas. Procedimientos para la ejecución del vertimiento en calicatas. (Método no Estabilizado). Vig. Desde 1986.11p.
- NC 54-252:83. Materiales y productos de la construcción. Determinación de la resistencia a reflexión de las rocas. Vig. Desde 1983.
- NC 54-258:83. Materiales y productos de la construcción. Rocas. Determinación de la densidad. Métodos de ensayo. Vig. Desde 1983.
- NC 54-265:84. Materiales y productos de la construcción. Pilotes. Método de ensayo. Vig. Desde 1984.
- NC 54-269:1984. Materiales y productos de la construcción. Procedimiento para la ejecución de las etapas de las Investigaciones Ingeniero Geológicas en edificaciones. Vig. Desde 1984.
- NC 54-276:84. Materiales y productos de la construcción. Roca. Determinación de la resistencia al cortante. Vig. Desde 1984.
- NC 54-354:86. Materiales y productos de la construcción. Rocas. Determinación del coeficiente de permeabilidad. Vig. Desde 1986.
- NC 54-368:87. Materiales y productos de la construcción. Rocas. Determinación de la resistencia en Punzonamiento. Vig. Desde 1984.
- NC 59/2000. Geotecnia. Clasificación Geotécnica de los suelos. Vig. Desde 2000. 17 p.
- NC 62:2000. Determinación de la resistencia a la Compresión Axial En especímenes de roca. Vig. Desde 2000.
- NC 67:2000. Determinación del contenido de humedad de los suelos y rocas en el laboratorio. Vig. Desde 2000.
- NC 722:2009. Edificaciones y obras civiles. Investigaciones Ingenieras Aplicadas. Requisitos de alcance y contenido de la documentación técnica. Vig. Desde 2009.
- NC 8:1998. Determinación del módulo de elasticidad (Modulo de Young) y coeficiente de Poisson en rocas y semirrocas. Vig. Desde 1998.



- NC 9:1998. Método de ensayo para la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo in situ en suelos y rocas. Vig. Desde 1998.
- NC XX/2014. Propuesta de norma para diseño geotécnico de cimentaciones superficiales. Vig. En fase de revisión y publicación. 73p.
- REM. Libro de Excel con Cálculos Geotécnicos Programados.
- RODRÍGUEZ, O. y GÓMEZ, J. Método de regionalización de variables: Kringing. 1988. pp. 7-10.
- ROJAS, J.C. Factores que Influyen en la Determinación del límite líquido y límite plástico, Geotecnia, Vol.6 (2), La Habana, 2003. pp. 28-31.
- ROJAS, J.C. y SALINAS, L.M. Bearing Pressure and Settlement for Lean Clay in Saturated and Unsaturated Conditions, Geotecnia, Edición Especial, 2006. pp. 86-94.
- SALINAS, L.M. y SUÁREZ, L.O. Estabilización de taludes por medio de muros de tablestacas y enrejado vegetado, Geotecnia, Edición Especial, 2006. pp. 70-79.
- SERRA, J y GESTA, J.M. Curso aplicado de cimentaciones. COAM edn, 1989.
- SOWERS, G. Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. 1972.
- SUÁREZ, L.O y SALINAS, L.M. Proyecto de análisis de amenazas por deslizamientos en el Área Piloto de Achachicala (La Paz) y Thola Pujro (Cochabamba), Geotecnia, Edición Especial, 2006.pp.51-59.
- ---Uso de los sistemas de información geográficas en la geotecnia, Geotecnia, Edición Especial, 2006. pp. 183-199.
- ZUBIETA, M., SUÁREZ, L.O y SALINAS, L.M. Estabilización de taludes por medio de una cortina de pilotes, Geotecnia, Edición Especial, 2006. pp. 60-69.