

**EVALUACIÓN GEOTECNICA DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DEL CANAL
DE PANAMÁ Y LA UNIDAD FUNCIONAL DE NAVEGABILIDAD (UFN) DEL
RÍO MAGDALENA EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE
BARRANCABERMEJA Y PUERTO SALGAR**

**TOMAS ESTEBAN PINZON VERGEL
EDWIN JAVIER RODRIGUEZ CASTIBLANCO
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2020

**EVALUACIÓN GEOTECNICA DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DEL CANAL
DE PANAMÁ Y LA UNIDAD FUNCIONAL DE NAVEGABILIDAD (UFN) DEL
RÍO MAGDALENA EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE
BARRANCABERMEJA Y PUERTO SALGAR**

**TOMAS ESTEBAN PINZON VERGEL Código 506160
EDWIN JAVIER RODRIGUEZ CASTIBLANCO Código 506094**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2020



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de aceptación:

Firma del docente evaluador

Bogotá, 17 de noviembre de 2020

Periodo de ejecución del proyecto: 2020-3

Programa académico: Ingeniería Civil.

Estudiantes: Tomas Esteban Pinzón Vergel **Código:** 505160

Edwin Javier Rodríguez Castiblanco **Código** 506094

Director del trabajo de Grado: Juan Carlos Ruge Cárdenas

Alternativa: Visita Técnica Internacional

TITULO

EVALUACIÓN GEOTECNICA DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DEL CANAL DE PANAMÁ Y LA UNIDAD FUNCIONAL DE NAVEGABILIDAD (UFN) DEL RÍO MAGDALENA EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE BARRANCABERMEJA Y PUERTO SALGAR

ALTERNATIVA

Visita técnica Internacional

LINEA DE INVESTIGACIÓN

Visita técnica Internacional.

RAE

TITULO: EVALUACIÓN GEOTECNICA DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DEL CANAL DE PANAMÁ Y LA UNIDAD FUNCIONAL DE NAVEGABILIDAD (UFN) DEL RÍO MAGDALENA EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE BARRANCABERMEJA Y PUERTO SALGAR

AUTORES: PINZON VERGEL TOMÁS ESTEBAN
RODRIGUEZ CASTIBLANCO EDWIN JAVIER

MODALIDAD: VISITA TECNICA INTERNACIONAL

PÁGINAS: 102 **TABLAS:** 28 **ILUSTRACIONES:** 22 **FOTOGRAFIAS:** 4

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN
2. ANTECEDENTES.
3. JUSTIFICACION
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA
5. MARCO TEORICO
6. MARCO CONCEPTUAL
7. METODOLOGIA
8. Delimitaciones
9. CONTENIDO
10. CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS EN EL CANAL DE PANAMA
11. ANALISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL TRAMO III Y IV DEL RIO MAGDALENA.
12. ANALISIS COMPARATIVO
13. CONCLUSIONES
14. RECOMEDACIONES
15. BIBLIOGRAFIA
16. ANEXOS.

PALABRAS CLAVE: Límites de Atterberg, Índice de Plasticidad, Consolidación directa, Límite líquido, Cuenca, Límite plástico.

DESCRIPCIÓN Esta monografía está orientada a comparar dos importantes sistemas hidrográficos a nivel geotécnico: El Canal de Panamá y el Tramo III y IV del río Magdalena con el fin de saber a través de parámetros específicos si las obras diseñadas en el paso interoceánico pueden ser implementadas en el afluente colombiano con el fin de regular el caudal en función de un tiempo específico.

METODOLOGÍA Se maneja un enfoque teórico práctico a través de dos premisas donde la primera está orientada a la información recolectada durante la visita técnica al Canal de Panamá en el mes de diciembre del año 2019 seguida de una fuerte investigación acerca del tramo III y IV del río Magdalena, apoyados en sistemas de información geográfica para la caracterización de los suelos y en el sistema Internacional correspondiente.

CONCLUSIONES La proporción de suelos arcillosos en el Canal de Panamá respecto al tramo III y IV del río Magdalena es mayor; es decir los estratos que conforman el sistema hidrográfico del paso Interoceánico presenta condiciones más desfavorables las cuales se manejaron con proporciones de Cal y de cenizas volcánicas; por lo tanto, la creación de esclusas y obras similares pueden implementarse en el río Magdalena bajo estudios de prefactibilidad y factibilidad técnica

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 14 |
| 3. JUSTIFICACION..... | 18 |
| 4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA..... | 20 |
| 5. MARCO TEORICO | 21 |
| 6. MARCO CONCEPTUAL..... | 28 |
| 7. METODOLOGIA | 39 |
| 8. Delimitaciones..... | 41 |
| 9. CONTENIDO..... | 42 |
| 10. CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS EN EL CANAL DE PANAMA | 43 |
| 11. ANALISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL TRAMO III Y IV DEL RIO MAGDALENA. | 64 |
| 12. ANALISIS COMPARATIVO..... | 88 |
| 13. CONCLUSIONES..... | 93 |
| 14. RECOMEDACIONES | 94 |
| 15. BIBLIOGRAFIA | 95 |
| 16. ANEXOS..... | 101 |

LISTA DE TABLAS

Página

| | |
|---|-------|
| Tabla 1. Clasificación de los materiales de acuerdo al tamaño | 31 |
| Tabla 2. Clasificación de los materiales de acuerdo a su composición | 32 |
| Tabla 3. Clasificación según la Unidad de clasificación de los suelos..... | 33-34 |
| Tabla 4. Conformación de las subcuencas en el canal de Panamá | 50 |
| Tabla 5. Distribución del área de la cuenca | 52 |
| Tabla 6. Clasificación de los suelos de acuerdo al sistema UCS..... | 54 |
| Tabla 7. Distribución de los suelos según la UCS..... | 55 |
| Tabla 8. Límites de Atterberg en los suelos finos del canal de Panamá..... | 57 |
| Tabla 9. Clasificación del límite líquido según la norma británica (BS 1377:1990)..... | 60 |
| Tabla 10. Valores del ensayo del Proctor modificado en el canal de Panamá | 61 |
| Tabla 11. Ensayo de corte directo en el canal de Panamá | 62 |
| Tabla 12. Valores de ensayo del CBR para el canal de Panamá | 63 |
| Tabla 13. Valores típicos del CBR | 66 |
| Tabla 14. Distribución de la cuenca por departamentos | 70 |
| Tabla 15. Distribución de los suelos en el departamento de Antioquía..... | 72-73 |

| | |
|---|-------|
| Tabla 16. Distribución de los suelos en el departamento de Bolívar..... | 74 |
| Tabla 17. Distribución de los suelos en el departamento de Boyacá..... | 74-75 |
| Tabla 18. Distribución de los suelos en el departamento de Caldas..... | 75 |
| Tabla 19. Distribución de los suelos en el departamento de Cundinamarca | 76-77 |
| Tabla 20. Distribución de los suelos en el departamento de Santander..... | 77-78 |
| Tabla 21. Clasificación de los suelos de acuerdo al UCS..... | 81 |
| Tabla 22. Clasificación de los suelos de acuerdo al porcentaje de arcilla | 82 |
| Tabla 23. Recopilación de los límites de Atterberg del tramo III y IV del rio Magdalena | 83-84 |
| Tabla 24. Ensayo de Proctor modificado en el río magdalena | 86 |
| Tabla 25. Ensayo de corte directo en el tramo III y IV del rio Magdalena | 87 |
| Tabla 26. Ensayo del CBR para el tramo III y IV del río Magdalena | 88 |
| Tabla 27. Comparación de los límites de Atterberg entre el canal de Panamá y el tramo III y IV del río Magdalena..... | 92 |
| Tabla 28. Comparación del corte directo entre el canal de Panamá y el tramo III y IV del río Magdalena..... | 94 |

| LISTA DE ILUSTRACIONES | PÁGINA |
|--|---------------|
| Ilustración 1. Localización río Misisipi | 18 |
| Ilustración 2. Río Rhin..... | 19 |
| Ilustración 3. Mapa del río Magdalena | 24 |
| Ilustración 4. Cuenca del río Magdalena | 25 |
| Ilustración 5. Clasificación general de los suelos | 26 |
| Ilustración 6. Límites de Atterberg | 35 |
| Ilustración 7. Carta de Casagrande | 36 |
| Ilustración 8. Curva de compactación por Proctor modificado | 38 |
| Ilustración 9. Localización canal de Panamá | 46 |
| Ilustración 10. Localización y conformación cuenca canal de Panamá..... | 47 |
| Ilustración 11. Delimitación zona de interés..... | 48 |
| Ilustración 12. Sistema hidrográfico total | 50 |
| Ilustración 13. Cuenca Panamá Atlántico | 50 |
| Ilustración 14. Cuenca Panamá Pacífico..... | 51 |
| Ilustración 15. Clasificación suelos de acuerdo a la Dirección Nacional de reforma Agraria | 52 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 16. Clasificación de los suelos de acuerdo a la Unidad de clasificación de suelos | 54 |
| Ilustración 17. Curva de Proctor modificado | 64 |
| Ilustración 18. Localización Tramo III y IV Unidad de Navegabilidad Funcional del rio magdalena..... | 67 |
| Ilustración 19. Delimitación de la zona de Estudio | 68 |
| Ilustración 20. Clasificación general de los suelos..... | 70 |
| Ilustración 21. Clasificación de los suelos según la UCS | 79 |
| Ilustración 22. Curva de compactación para el tramo III y IV del rio magdalena | 88 |

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios geotécnicos determinan las condiciones necesarias de los subsuelos con el fin de conocer las limitaciones y los factores de aprovechamiento de cara a la ejecución de un proyecto considerando la seguridad y el periodo de vida útil¹. Dichos estudios se realizan a través de sondeos y perforaciones que permiten conocer la composición, extensión, espesor y profundidad de los estratos en función de las cargas y alturas a transmitir.²

De este modo, el canal de Panamá desde su inauguración en 1913 ha sido una de las obras civiles más importantes en la era contemporánea, sin embargo, durante el proceso de excavación para la ampliación del canal se encontraron estructuras basálticas con un alto contenido de arcilla en su desecamiento; lo cual representaba un riesgo en el desarrollo de la obra por la variación del tamaño de los finos en función de la humedad³.

De acuerdo a lo anterior, en el tramo comprendido entre Puerto Salgar y Barrancabermeja el cual se busca adecuar para que embarcaciones con mayor calado ingresen al centro de Colombia; se manejan características similares y estudios preliminares por entidades como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC y la corporación Autónoma Regional CAR, indican alto contenido de finos en la subcuenca correspondiente, lo que puede afectar en

¹ MDAS, Braja. Fundamento de ingeniería de Cimentaciones, ed.7. Cengage learning.. Madrid España. 776P

² DELGADILLO SANTANDER Alejandro y MORENO BARRIOS Ade (2005). Ensayo de límites. 28P.

³ PANAMA CANAL AUTHORITY, Julio 2009, "Geological and Geotechnical Investigations for the Boriquem DAM 1E and PC-14. Panamá City,

ciertas proporciones las obras hidráulicas que se construyan para lograr la navegabilidad en este importante tramo⁴

En conclusión, de lo anteriormente expuesto, se ilustra en la siguiente monografía características geotécnicas similares a del canal de Panamá con el tramo III y IV del río Magdalena a partir de resultados de campo a la luz de los estudios de prefactibilidad y factibilidad técnica para considerar si a la luz de la teoría, obras similares a las diseñadas en el Canal de Panamá pueden implementarse en la vertiente colombiana.

⁴ CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE ANTIOQUÍA. Diagnóstico y localización tramo III y IV rio magdalena. Bogotá D.C. 2017. 366P.

2. ANTECEDENTES.

El Centro Nacional de Modelación CNM fundado en el año 2016 es la entidad responsable de elaborar modelos estadísticos con medias móviles y a partir de esta información, construir mapas de inundación con escalas diferentes con el objetivo de pronosticar comportamientos hidrológicos a partir de hidrogramas para tomar mejores decisiones en cuanto a diseño de obras hidráulicas y de este modo, sirve de apoyo a las corporaciones autónomas regionales CAR a la orientación de ejercicios de simulación en escenarios con importantes factores de riesgo . Entre varios modelos importantes, se han diseñado los correspondientes al Bajo Magdalena desde Aguachica hasta Bocas de Ceniza y los del sector correspondiente a Puerto Salgar y Barrancabermeja.

Por otro lado, las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR) son entes corporativos de carácter público, integrados por las entidades territoriales, encargados de administrar -dentro del área de su jurisdicción- el medio ambiente y los recursos naturales renovables, y velar por el desarrollo sostenible del país. Por esto, la Oficina Asesora de Planeación, con el fin de contribuir al diseño y mejoramiento del proceso de planificación y seguimiento ha elaborado una serie de instrumentos para uso y aplicación en dichas entidades gubernamentales.

La Planificación Ambiental Regional debe entenderse como un proceso dinámico orientado al desarrollo sostenible el cual es acorde a las características y dinámicas biofísicas, económicas, sociales y culturales⁵

Por otra parte, el Instituto geográfico Agustín Codazzi IGAC desde su fundación en el año 1935 es la entidad encargada en Colombia; entre otras funciones; de sintetizar estudios de suelos realizados por entidades regionales en terreno y a través de modelo digitales de elevación MDT; los cuales tienen como finalidad brindar información sobre las propiedades mecánicas y geológicas de los diferentes terrenos encontrados en el territorio Nacional⁶ como los usados en la ampliación del canal del dique precisamente en el río Magdalena en el año 2013⁷

Teniendo en cuenta lo anterior, estas entidades han proporcionado información importante para la factibilidad de los proyectos que se resume en el fortalecimiento del comercio a nivel nacional gracias al mejoramiento de la navegabilidad de las embarcaciones y para ello; ha sido importante la recopilación de información de obras civiles que fueron realizadas y establecer, entre otros aspectos, las comparaciones geotécnicas pertinentes con el fin de implementar o descartar procesos trazados en el marco de referencia. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentarán algunos ejemplos de canales realizados los cuales tenían alto

⁵ RUBIO RIVAS Pedro y AREVALO ARIAS Juan M. Clasificación del suelo por capacidad de uso. En: Estudio General de Suelos y Zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Bogotá. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2001. P.388.

⁶ MALDONADO A., Zuemmy C. (s.f.). Clasificación del río Sonora tramo Mazocahui-presa. Rodríguez A, Capítulo 5. Capacidad de asimilación. [Tesis]. Disponible en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5404/Capitulo5.pdf>

⁷ IAH (1995). Hydrogeological Maps: A Guideline and Standard Legend, Preparado con la colaboración de miembros de IAH/IAHS/IHP con financiamiento de Unesco.

contenido de arcilla en los estratos del subsuelo y en los cuales se hizo una intervención geotécnica importante

Río Misisipi

Ilustración 1. Localización Río Misisipi



Fuente. Google Earth

El río Misisipi es uno de los más importantes de Estados Unidos y el segundo más largo de Norteamérica después del río Misuri los cuales juntos conforman uno de los sistemas fluviales más grandes del mundo. En 1927 se generó la inundación más destructiva de la historia por causa del desborde de este gran afluente, por lo que se construyó un sistema de diques que generan sedimentación para controlar su cauce⁸. Sin embargo, en ciertos tramos se encontraron alto contenido de finos, especialmente de arcillas, dónde se podía ver comprometida la estabilidad de la estructura ante un aumento de la carga hidráulica generada por el cambio abrupto del caudal, con lo que se adecuaron obras de cimentación para

⁸ PEREZ ORTIZ, Miguel. Consideraciones ríos de Norteamérica. New York. 1994. Ed. Cengage Learning. 345p.

contrarrestar este inconveniente, así como el empleo de componentes químicos que evitan la expansión de las arcillas como cal o compuestos de ceniza volante⁹

Río Rhin

Ilustración 2. Río Rhin



Fuente. Google Earth

Es uno de los ríos más importantes de Europa. Nace en el este de Suiza, y fluye durante unos 1320 kilómetros en la mayoría de su recorrido en dirección noroeste, bordeando Austria, Liechtenstein, Francia, Alemania y los Países Bajos, hasta su desembocadura en el Mar del Norte. En la desembocadura, la escasa altitud del delta del Rhin y las frecuentes tormentas en el mar del Norte, han provocado periódicamente un ascenso de varios metros del nivel del mar, causando graves inundaciones en extensas superficies de los Países Bajos. Tras la catastrófica crecida de 1953, que inundó 2.000 kilómetros cuadrados y causó 2.000 muertos, se inició la construcción de un sistema de diques que permitiera la entrada de las mareas, pero que impidiera la entrada de aguas hacia el continente durante las fuertes tormentas. La

⁹ OECD (2001). Environmental Indicators. Towards Sustainable Development Libro Blanco. Evaluación de la calidad de agua (Libro Blanco de España, cap. 3, numeral 3.1) La calidad de las aguas. España

obra, denominada Plan Delta, se completó con éxito en 1986, sin embargo, en el estudio geotécnico se encontraron arcillas expansivas en algunos sectores del tramo crítico en dónde se construyeron pilotes Caisson hasta la base de suelo firme, además de constante monitoreo del comportamiento del suelo.

3. JUSTIFICACION

La Universidad Católica de Colombia brinda como opción de grado una Visita Técnica Internacional a Panamá, dónde se da la oportunidad de conocer directamente una de las obras civiles más importantes de la era contemporánea.

Dicha visita y razón de esta monografía la cual se realizó en la Ciudad de Panamá desde el 29 de noviembre hasta el 06 de diciembre del 2019, de visitar diferentes sitios académicos, turísticos y técnicos, entre ellos el canal de Panamá, donde se pudo evidenciar el sistema de operación, además observar las esclusas, que levantan las naves a una altura máxima de 26 metros (85.2 pies) que coincide con el nivel del lago Gatún y luego descienden al quedar nuevamente al nivel del mar.

Dicha visita busca realizar una comparación del impacto de las arcillas expansivas del sistema constructivo del canal de panamá y la unidad funcional de navegación (UFN) del río magdalena en el tramo comprendido entre Barrancabermeja y puerto salgar (tramos 3 y 4) ya que ambos proyectos buscan mantener la operación de los canales con el fin de mejorar las condiciones de funcionamiento del afluente.

OBJETIVOS

3.1. General

Realizar una comparación geotécnica entre el canal de Panamá y el tramo III y IV del río Magdalena a partir de parámetros establecidos según las características físicas y químicas de los estratos de las arcillas expansivas.

3.2. Específicos

1. Determinar los tipos de suelo existentes en las dos zonas de interés a través de información generada usando los sistemas de información geográfica y compilación de datos de entidades gubernamentales.
2. Evaluar las características de los tipos de suelo según lo indicado por ensayos preexistentes in-situ.
3. Comparar cualidades del subsuelo de acuerdo a la normatividad vigente de cada nación.
4. Establecer la viabilidad de las comparaciones generadas para tomarlas de referencia en una posible adecuación en el tramo III y IV del río Magdalena.

4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El tramo III y IV del río Magdalena ubicado entre los municipios de Puerto Salgar y Barrancabermeja en la región media del afluente presenta constantes variaciones en su caudal en función de las precipitaciones. Por razón de lo anterior, se plantea realizar dragas y diques para controlar el caudal de la red hídrica, sin embargo, en varios sectores del tramo en mención se han encontrado suelos expansivos que podrían afectar el comportamiento de la estructura. La visita técnica al canal de Panamá en el 2019 permitió recolectar información importante que podría compararse con el eventual desarrollo de obras en el sistema hídrico. Teniendo en cuenta lo anterior; a través de la siguiente monografía se busca responder las siguientes preguntas ¿Es posible implementar el sistema constructivo del canal de Panamá en la unidad funcional de navegabilidad (UFN) del río Magdalena en el tramo comprendido entre Barrancabermeja y Puerto Salgar controlando el comportamiento de los suelos expansivos durante la vida útil del proyecto? ¿Cómo puede utilizarse esta comparación para la toma de decisiones en futuros proyectos de mayor complejidad y en condiciones diferentes? (Ivan, 2015).¹⁰

¹⁰ El artículo tomado hace parte de una serie de ocho artículos contratados para presentar en los foros regionales "¿Para dónde va el río Magdalena? Riesgos sociales, ambientales y económicos del proyecto de navegabilidad". [citado 14 abril, 2015] Disponible en Internet: <URL: <file:///C:/Users/ASUS/Desktop/TRABAJO%20DE%20GRADO/Navegabilidad%20Rio%20Magdalena.pdf>

5. MARCO TEORICO

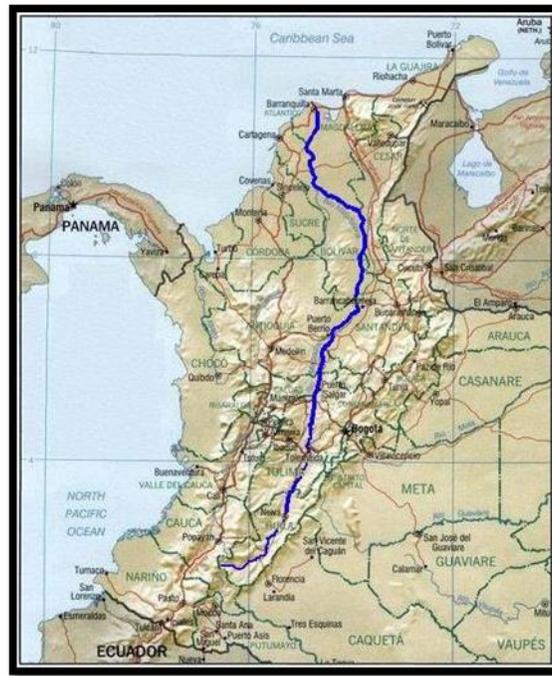
Información general del río magdalena.

El río magdalena nace en departamento del Huila, dentro del Macizo Colombiano en la laguna de la magdalena correspondiente al páramo de las Papas con coordenadas geográficas 01° 55' 40" Norte y 76° 35' 08" Oeste a una altura de 3685 metros sobre el nivel del mar. De 1528 kilómetros que tiene el afluente; 886 son navegables desde el municipio de Honda en el departamento del Tolima hasta su desembocadura en bocas de Ceniza en el departamento de Atlántico donde vierte sus aguas en el mar Caribe. Su anchura mínima, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM es de 2.20 metros en el municipio de San Agustín, Huila y su anchura máxima alcanza los 1073 metros en el municipio de El Plato, Magdalena.

El afluente va en dirección Sur- Norte por el denominado *valle Interandino* el cual separa la cordillera central de la oriental. Entre los meses de Marzo a Mayo y de Septiembre a Noviembre hay un aumento del caudal del río debido a la temporada de lluvias que alimenta a los tributarios, sobre todo a los ubicados en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Antioquía y Santander, mientras que en la parte baja del afluente es más susceptible a menos precipitaciones provocando sequías; las cuales generan aparición de islas de arena donde se compromete la navegabilidad por varios meses y generando en algunos casos, pérdidas económicas a este importante sector.

En la siguiente gráfica se ilustra el recorrido geográfico del río Magdalena a lo largo del territorio colombiano por su brazo principal, alcanzando en el municipio de Calamar, Atlántico un caudal máximo de 7200 metros cúbicos por segundo en épocas de lluvia.¹¹

Ilustración 3. Mapa del Río Magdalena.



Fuente: Río Magdalena, navegación marítima y fluvial (1986-2008) en Google libros

La cuenca del río Magdalena abarca un 24 % de la superficie colombiana con un área de 257400 kilómetros cuadrados y abarcando 21 de los 32 departamentos; siendo la más grande del territorio nacional y una de las más grandes de Latinoamérica, teniendo el río Cauca como su aportante más importante¹². En la siguiente figura se ilustra la cuenca del sistema hidrográfico que abarca las tres cordilleras del país.

¹¹ORDOÑEZ, Jorge Iván. *El río Magdalena y su navegabilidad*. Bogotá D.C. 2015. Editorial Norma. 163p

¹²COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 3930 (25 de octubre de 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Bogotá D.C. 2010

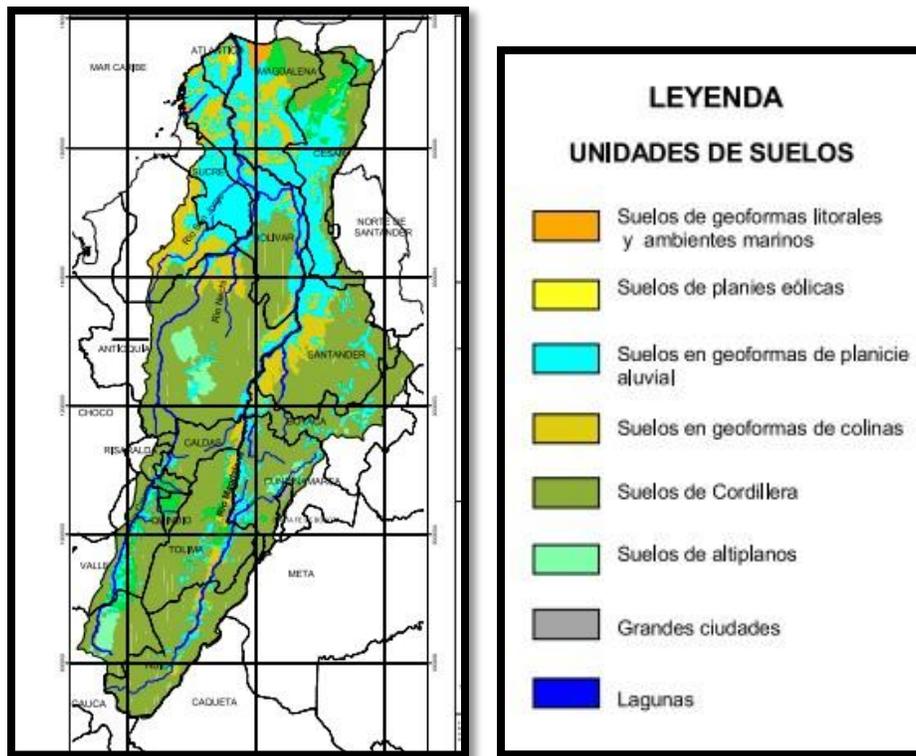
Ilustración 4. Cuenca del río magdalena



Fuente.riosdelplaneta.com (2017)

Según el estudio de cuencas del IDEAM realizado en el año 2008, el sistema hidrográfico cuenta con 7 unidades distintas; dada la recopilación del uso de suelo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2001). La siguiente figura ilustra la composición general de la cuenca con los tipos de cobertura.

Ilustración 5. Clasificación general de los suelos



Fuente. Instituto de Hidrología, Meteorología y de estudios ambientales IDEAM

De acuerdo a la información suministrada por los estudios de suelo en el sistema hidrográfico, los suelos en geformas tanto en colinas como en aluviones se caracterizan por tener estratos con alto contenido de arcillas y limos en su composición, lo cual indica su vulnerabilidad ante el eventual desarrollo de obras hidráulicas para el mantenimiento constante del caudal en el Magdalena medio como se mostrará en el cuerpo del presente documento.

La navegabilidad en el río magdalena.

Los ríos como vías de transporte desde la invención de los Barcos en la edad antigua han sido muy importantes para el desarrollo de la humanidad, los cuales se conectan a los océanos para acceder a regiones con topografía y orografía complicada como la colombiana; sobre todo antes de la invención de las vías ferroviarias y carreteras¹³.

Teniendo en cuenta lo anterior, para que dicho sistema funcione, según Máximo Villon (1983) debe tener un caudal seguro durante un período de tiempo específico; el cual se puede mantener de forma natural por los tributarios que tiene el sistema hídrico o por la creación de lagos artificiales que brinden el flujo de agua necesario para que las embarcaciones pueden navegar sin riesgo de quedar encolladas; entre otros factores; por el mal manejo de sedimentos¹⁴.

Basados en las preliminares, solo 886 de 1528 kilómetros del río magdalena son navegables según el IDEAM, considerando un escenario en dónde se presentan lluvias uniformemente alrededor del año, sin embargo, en los últimos 10 años, los periodos de sequía se han incrementado de 5 a 8 meses en promedio, lo que dificulta que las embarcaciones de menor calado se transporten en la mayor parte del año¹⁵.

¹³ UNAM (2009). Contaminantes emergentes en el agua. Revista Digital, Vol.10 (8). Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art54/int54.htm>

¹⁴ VILLON BEJAR Máximo (1988). Hidrología. Instituto tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola. Cartago Costa Rica. 435P.

¹⁵ ORDOÑEZ, Jorge Iván. *El río Magdalena y su navegabilidad*. Bogotá D.C. 2015. Editorial Norma. 163p

Canal de Panamá

Es un paso de interconexión marítima entre el océano pacífico y el mar Caribe ubicado en el Istmo de Panamá que fue inaugurado en 1914 el cual surgió por la necesidad de reducir los tiempos de transporte principalmente entre los Estados Unidos y China. Según estudios amparados por la Universidad de Florida; desde el año de 1940 con la modernización de la flota marina, los 21 metros de ancho del canal y las cinco esclusas no fueron suficientes para las nuevas embarcaciones, las cuales tenían que recorrer 8000 kilómetros en el golfo de Chile, lo que generaba un problema similar a lo que se presentaba en el siglo XIX. Por ello se planteó desde ese entonces la ampliación como una alternativa, sin embargo, desde el año de 1997 se adelantaron formalmente estudios de prefactibilidad y factibilidad técnica para la ejecución de tan importante proyecto que fue ejecutado entre el 2006 y el 2016¹⁶.

Desde aquel entonces, el Canal aumentó la capacidad para atender la creciente demanda del comercio marítimo por utilizar buques de mayores dimensiones, con lo que la ruta por Panamá proporciona importantes economías de escala. La Ampliación del Canal de Panamá añadió un tercer carril para el tránsito de buques de mayor tamaño, con la construcción de un complejo de esclusas en el Atlántico y otro en el Pacífico. Las nuevas esclusas son 70 pies más anchas y 18 pies más profundas que las actuales, pero utilizan menos agua gracias a las tinajas de reutilización de agua que reciclan el 60% del agua utilizada¹⁷.

¹⁶ ARBUCK, E. y LUTGENS, F.K. (2005). "Ciencias de La Tierra: Una Introducción a La Geología Física". Editor Pearson Prentice Hall (Martín-Romo): Madrid-España, octava Edición. Arosemena, D (1997). Historia documental del Canal de Panamá. Panamá: Editorial Mariano Arosemena del Instituto de Cultura.

¹⁷ SOTELO NAVALPOTRO J.A., SOTELO PÉREZ, M., GARCIA QUIROGA, F. y SOTELO PEREZ, I. (2017). "Riscaldamento globale e impronta hídrica in Spagna". Bollettino Della Società Geografica italiana, serie XIII, vol. X, pp. 257-269

Lago Gatun

Fue construido entre 1907 y 1913 y durante más de 50 años fue el lago artificial más grande del mundo. Tiene una superficie de 425 Kilómetros cuadrados y alberga 5.2 kilómetros cúbicos de agua, aunque su construcción se realizó principalmente para la represa de Gatún sobre el río Chagres; este cuerpo de agua es el responsable de abastecer a las esclusas de Gatún y Miraflores para el tránsito de los barcos en el canal de Panamá, ya que cada tránsito demanda unos 202.000 metros cúbicos de agua. Bajo este importante cuerpo de agua reposa restos de más de 20 pueblos los cuales fueron trasladados a otras partes del país.

Según estudios de prefactibilidad realizados por el Instituto de investigación Agropecuaria de Panamá IDIAP¹⁸, el 55% de los estratos dentro del lago Gatún son arcillosos y limos arcillosos los cuales tienen una menor capacidad portante y una expansividad mayor; por lo tanto tuvieron que ser intervenidos de forma química con concentraciones de Cal y restos vulcanizados para controlar el último inconveniente mencionado, sin embargo el monitoreo constante del comportamiento de los suelos por entidades como el IDIAP es muy importante para la operación normal del canal¹⁹.

¹⁸ RODRIGUEZ, B. (2010). Los tratados Torrijos-Carter y el pacto de Neutralidad del Canal de Panamá. El Libertador. <https://www.ellibrepensador.com/2010/03/25/lostratados-torrijos-%E2%80%93carter-y-el-pacto-de-neutralidad-del-canal-de-panama/>

¹⁹ INSTITUTO DE INVESTIFGACIÓN AGROPECUARIA DE PANAMÁ. Por lo cual se dictan disposiciones sobre e manejo de sedimentos en el canal de Panamá. 1963. Ciudad de Panamá. 345P.

6. MARCO CONCEPTUAL

Las arcillas en conjunto son denominadas por Terzagui (1927) por un tipo de suelo. Entre varios parámetros que existen para determinar el tipo de superficie está el *sistema de unidad de clasificación de suelos SUCS* dónde se aplica conceptos de tamaño y textura de acuerdo a la granulometría del material realizada a través de tamices en laboratorio²⁰.

Las siguientes tablas ilustra la denominación de los materiales de acuerdo al tamaño de la partícula y a su debida distribución en un estrato de suelo

Tabla 1. Clasificación de los materiales de acuerdo al tamaño

| Símbolo | Definición | Tamiz |
|----------------|-------------------|--------------------------|
| G | Grava | Retiene tamiz número 4 |
| S | Arena | Retiene tamiz número 200 |
| C | Arcilla | Queda en el fondo |
| M | Limo | Queda en el fondo |
| O | Orgánica | Queda en el fondo |

Fuente. Mecanica%20de%20Suelos%20I%20ESLAGE%20(28_29_30).pdf

²⁰ BELEÑO, Samuel Álvarez. Listos los diseños de las esclusas y compuertas para el Canal del Dique. EL UNIVERSAL. [En línea] 06 de 05 de 2017. <http://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/listos-los-disenos-de-las-esclusas-ycompuertas-para-el-canal-del-dique-252463>.

Tabla 2. Clasificación de los materiales de acuerdo a su composición.

| Símbolo | Definición |
|----------------|--|
| P | Pobremente gradados (tamaño de partículas uniformes) |
| W | Bien gradados (tamaño de partículas diversos) |
| H | Alta plasticidad (limos, arcillas y materia orgánica) |
| L | Baja plasticidad (limos y arcillas y materia orgánica) |

Fuente. lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia_1_parte_II.pdf

Teniendo en cuenta la información descrita en las tablas 1 y 2; el SUCS se describe a partir de la textura del material y la uniformidad de su composición si es *suelo grueso* (grava y arena) o su plasticidad si es *suelo fino* (arcilla, limo o materia orgánica)²¹. La siguiente tabla ilustra las clasificaciones usadas para los tipos de suelo en función de las variables descritas anteriormente.

²¹ CANAL PANAMÁ Elementos geométricos de la sección de un canal, [en línea]:[citado 26 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/libre/seccion.html> <http://micanaldepanama.com/ampliacion/>>

Tabla 3. Clasificación según la Unidad de Clasificación de los Suelos UCS

| Divisiones Principales | | | Símbolo del grupo | Nombre del grupo |
|--|--|--|--------------------------|--|
| Suelos granulares gruesos | Grava | grava limpia menos del 5% pasa el tamiz n°200 | GW | grava bien graduada, grava fina a gruesa |
| el 50% o más se retuvo en el tamiz n°200 (0.075 mm) | < 50% de la fracción gruesa que pasa el tamiz n°4 (4.75 mm) | | GP | grava pobrementemente graduada |
| | | grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200 | GM | grava limosa |
| | | | GC | grava arcillosa |
| | Arena | Arena limpia menos del 5% pasa el tamiz n°200 | SW | Arena fina a gruesa. |
| | ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz n°4 | | SP | Arena pobrementemente graduada |
| | | Arena con más de 12% de finos | SM | Arena limosa |
| | | | SC | Arena arcillosa |

| | | | | |
|--|-------------------------|------------------------------|-----------|---|
| | | pasantes del tamiz n° 200 | | |
| Suelos de grano fino | Limos y arcillas | inorgánico | ML | limo |
| más del 50% de la muestra pasa el tamiz No.200 (0.075 mm) | límite líquido < 50 | | CL | arcilla |
| | | orgánico | OL | Limo orgánico, arcilla orgánica |
| | Limos y arcillas | inorgánico | MH | limo de alta plasticidad, limo elástico |
| | límite líquido ≥ 50 | | CH | Arcilla de alta plasticidad |
| | | orgánico | OH | Arcilla orgánica, Limo orgánico |
| Suelos altamente orgánicos | | | Pt | Turbas |

Fuente. <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-6-clasificacion-de-suelos/>

Teniendo en cuenta la tabla anteriormente mostrada, es importante mencionar que los suelos se pueden clasificar en conjunto de suelos gruesos y de suelos finos siempre y cuando el contenido de los últimos se encuentre entre el 5% y el 12% del total del material.

Conociendo la clasificación de los suelos, uno de ellos son los que se componen de arcilla. Según Terzagui (1927) son partículas de las rocas sedimentarias las cuales tienen un diámetro inferior a 75 micras (0.075 milímetros); constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, los cuales previenen principalmente de la descomposición de feldespato y que a través del arrastre son depositados en mares y ríos que posteriormente se sedimentan para formar capas o estratos por procesos de compactación que tardan millones de años.²² Es importante mencionar que para considerar un suelo arcilloso más del 50% debe estar constituido por dicho material y que su composición restante puede constituirse en grava, arena y limo o una mezcla entre los materiales y además; estos suelos finos se caracterizan porque su comportamiento varía en función de la humedad, es decir, si contienen más agua son más maleables y por lo tanto, la resistencia al corte es menor pero si su contenido de agua es bajo pueden resistir mayores cargas ya que ha perdido maleabilidad²³

De acuerdo a lo expuesto con antelación; según Lambe y Whitman (1988); entiéndase el contenido de *humedad* como la relación que existe entre el peso del agua y el peso del

²² ETESA, unimos a Panamá con energía, sitio [en línea]: [citado 20 agosto, 2017]. Disponible en Internet: 1 Informe Final de la Región Occidental de la Cuenca del Canal, [en línea]: [citado 20 agosto, 2017]. Disponible en Internet:

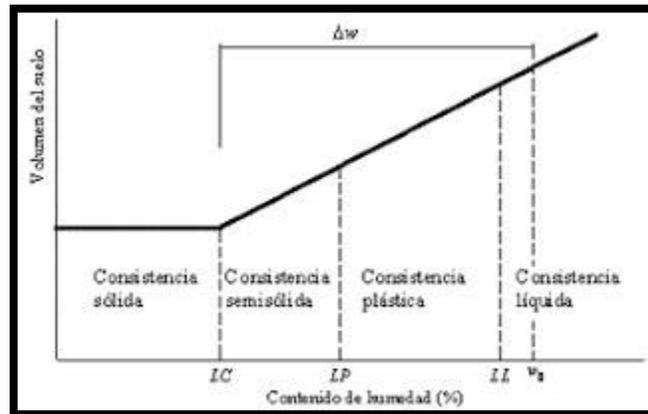
²³ Slides at the Panama Canal by Mayor General George W. Goethals, U.S. Army Governor of the Panama Canal, Wahington. Governor printing office. 1916

sólido²⁴. Este parámetro se mide en porcentaje y la relación mínima de humedad de un suelo arcilloso para poder realizar un estudio adecuado es del 20%, el cual es el valor dónde el suelo fino pasa de una contextura solida a semisólida.

Para conocer dicha contextura Terzagui (1927) definió en los *Límites de Atterberg* al suelo fino en cuatro estados: Estado sólido, estado semisólido, estado plástico y estado líquido²⁵.

En la siguiente ilustración se muestra el comportamiento de las arcillas en función de la humedad y la descripción de sus respectivos estados.

Ilustración 6. Límites de Atterberg



Fuente. apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/11

Como se puede observar, entre más agua contenga este tipo de suelos, el volumen va a ser mayor, pero su resistencia va a ser inversamente proporcional. Teniendo en cuenta lo anterior, los límites Braja M. Das los define como la cantidad de agua que necesita el suelo

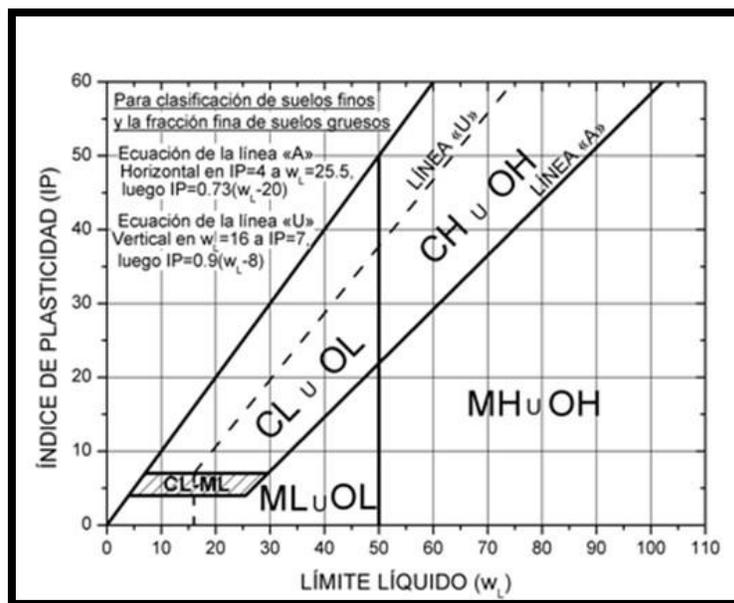
²⁴ UNESCO World Heritage center. Dike canal. Disponible en Internet: <http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5756/>

²⁵ Alberto Aleman Zubieta Backhoe Dredger - Ship Technology. (n.d.). from <https://www.ship-technology.com/projects/alberto-aleman-zubieta-backhoe-dredger/>

arcilloso para cambiar de estado o consistencia y la clasifica como *límite de contracción* que es la zona dónde se pasa de consistencia sólida a semisólida, *límite plástico* como el valor de la humedad en dónde la arcilla pasa de ser semisólida a plástica y el *límite líquido* dónde las partículas pierden todo rastro de solidez²⁶

Para realizar la clasificación de forma precisa, en 1932 Arthur Casagrande estudio la relación existente entre el *índice de plasticidad* y el límite líquido de diversos materiales naturales y el resultado de dichos análisis fue la denominada *Carta de Casagrande* que se muestra a continuación.

Ilustración 7. Carta de Casagrande



Fuente. <https://pdfslide.net/documents/carta-de-plasticidad-casagrande.html>

²⁶ Ministerio de Ambiente desarrollo sostenible. (2017). RESOLUCION No. 1595 DE 2017. Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/b2-RESOL 1595.pdf>

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, aquellos materiales que están debajo de la “línea a” se consideran que son limos mientras que aquellos que están sobre esa recta se consideran arcillas formalmente, si dicho material tiene un límite líquido mayor al 50% es de alta plasticidad los cuales tienen una mayor resistencia a la deformación por cargas impuestas; y si es menor es de baja plasticidad que son los más vulnerables debido a que su capacidad de respuesta es menor²⁷

Clasificando los suelos finos en función de la humedad es necesario establecer un marco de referencia para poder realizar las comparaciones correspondientes. En la presente monografía se usará la *cuenca*; la cual Máximo Villon la define como un sistema y una unidad geográfica e hidrológica, formada por un río principal y todos sus territorios asociados entre el origen del río y un punto seleccionado de acuerdo a las necesidades del estudio que se vayan a realizar²⁸. Dentro del estudio de dichos sistemas hidrográficos se tienen dos importantes clasificaciones de acuerdo al tamaño. Las *cuenca grandes* que son aquellas que tienen un área menor a 250 kilómetros cuadrados y que se caracterizan por tener grandes pendientes y estar en proceso de formación y las cuencas pequeñas que tienen un área mayor a 250 kilómetros cuadrados y que tienen un comportamiento más estable en cuanto al establecimiento de sedimentos²⁹

²⁷ ROOVERS, M. (1989). The removal, treatment and use of sediment from reservoirs international water power & dam construction

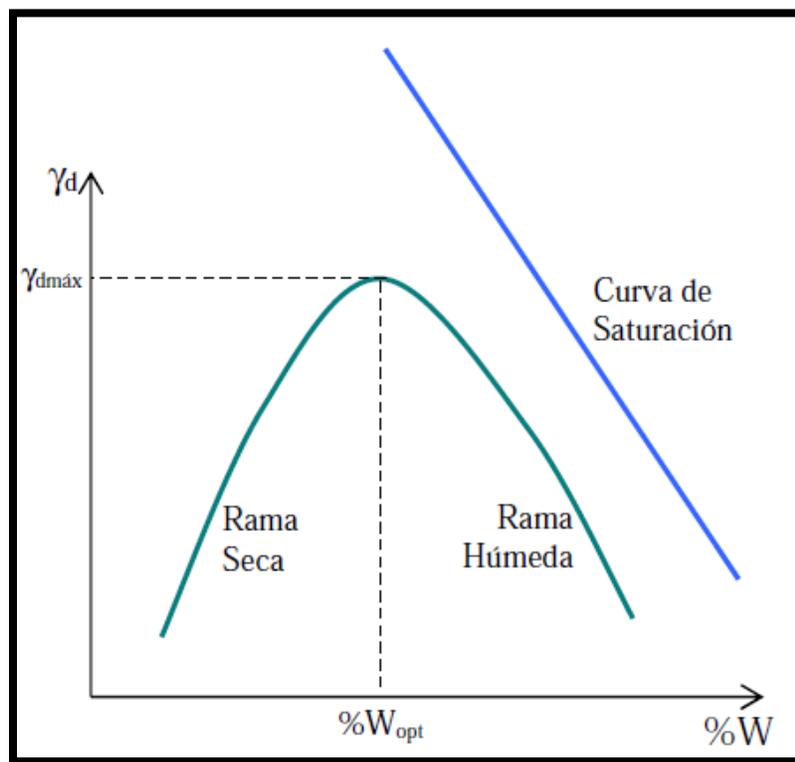
²⁸ GONZALES DE MATAUCO Asteca Isbisartes (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Universidad del País vasco. P 311-329

²⁹ MONSERRAT Jordi (1986). Forma de una cuenca de drenaje, análisis de las variables morfométricas que nos la definen. P 41-68.

Para determinar la resistencia del suelo, es importante conocer la compactación y para ello se amplía el ensayo de Proctor modificado el cual evalúa la relación entre densidad seca máxima y humedad de compactación; es decir, que cantidad de agua es necesaria para que las partículas del suelo estén más unidas para resistir mayores cargas³⁰

La siguiente grafica ilustra la relación entre densidad seca y humedad.

Ilustración 8. Curva de compactación por Proctor modificado



Fuente. <https://www.libreriaingeniero.com/2017/09/ensayo-de-compactacion.html>

³⁰SUAREZ BADILLO, Eulalio – RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Tomo I. Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tercera edición. 1992. Pag 149-152.

El valor de la densidad seca y la humedad óptima, permite determinar dos valores muy importantes para conocer la resistencia del suelo y esto se logra según Lambe y Whitman a través de dos ensayos el de Corte *directo* y el del *Servicio de registro de California CBR*. El primer ensayo permite contemplar la resistencia al corte del suelo una vez fue drenado por la aplicación de cargas o antes de la aplicación de las mismas, lo que Tupia clasifica en *suelos normalmente consolidados* y *suelos preconsolidados*.³¹ Los resultados obtenidos en este ensayo pueden expresarse en función de las deformaciones verticales o del cambio de las densidades del material seleccionado.

Por otra parte, el ensayo del CBR permite comparar al suelo en mención a un material no sensible a los cambios de humedad, en dónde se varía la *energía de compactación* que es la que se genera por el número de golpes con el martillo de laboratorio. Se mide dicha energía a 12, 26 y 55 golpes a partir de una penetración de 0.1 y 0.2 pulgadas a una presión universal de 1000 y 1500 libras por pulgada cuadrada (PSI). El valor de CBR se denota en porcentaje y sirve para evaluar la resistencia de un material a partir de los valores obtenidos en el Proctor modificado³²

³¹ TUPIA, Carlos y ALVA, Jorge, EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DEL TERRENO POR MEDIO DE UN EQUIPO DE PENETRACIÓN DINAMICA. XI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, nov. 2001.

³² BOWLES, Joseph E. 1980. Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia. Editorial Mc GRAW-HILL LATINOAMERICA, Pag 80-86

Conociendo características tan importantes de los suelos, si las condiciones del terreno permiten la construcción de obras hidráulicas tomando como referencia el canal de Panamá, es necesario contemplar obras de dragado y drenajes para regular el caudal del río Magdalena volviéndolo navegable durante todo el período de tiempo que se considere pertinente. Las *dragas* según López Cualla, son máquinas instaladas en las embarcaciones para extraer material particulado del fondo del río o del mar y de este modo poder aumentar la profundidad para que barcos con mayor calado puedan navegar sobre el cuerpo de agua correspondiente³³, mientras que los *drenajes* Según Ven Te Chow (1991), es el sistema de tuberías, sumideros o trampas, con sus conexiones, el cual tiene como objeto desalojar el agua de una zona específica, con el fin de evitar inundaciones en las áreas contiguas.

³³ MALDONADO A., Zuemmy C. (s.f.). Clasificación del río Sonora tramo Mazocahui-presa. Rodríguez A, Capítulo 5. Capacidad de asimilación. [Tesis]. Disponible en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5404/Capitulo5.pdf>

7. METODOLOGIA

1. Se recolectará información preliminar tanto del canal de Panamá como del tramo correspondiente al río Magdalena en el valle interandino dada por entidades gubernamentales y por estudios previos.
2. Se realizará la visita técnica al canal de Panamá, buscando información de ingenieros especializados que participaron en la ampliación del sistema y a través de búsqueda bibliográfica especializada en la biblioteca propia del canal apoyado en registro fotográfico y las conferencias impartidas por profesionales especialistas
3. Se recolectará información de las características del canal; profundidad, caudal, ancho, materiales utilizados en la estructura y en especial la composición de los suelos a través de sistemas de información geográfica.
4. Se hará un estudio para determinar las condiciones de cada proyecto como lo son sedimentación, ubicación, características del suelo y del lugar para así a través de matrices comparativas; establecer si es viable desarrollarlo el tramo III y IV del río Magdalena según el porcentaje de similitud entre ambos sistemas.
5. Se determinará el impacto ambiental que generan las obras realizadas en el canal de Panamá y a través de un estudio de cuencas, establecer si dicho comportamiento será semejante ante una eventual adaptación del proyecto del canal de Panamá a los tramos III y IV del río Magdalena en el marco del desarrollo sostenible³⁴.

³⁴ OECD (2001). Environmental Indicators. Towards Sustainable Development Libro Blanco. Evaluación de la calidad de agua (Libro Blanco de España, cap. 3, numeral 3.1) La calidad de las aguas. España.

6. Se valorará si las obras realizadas en el canal de Panamá son factibles para la evaluación de los posibles proyectos y su debida implementación en los tramos del río Magdalena.

8. Delimitaciones

Espacio

La monografía presentada en este documento se ejecutó a partir de la visita técnica al canal de Panamá entre el 29 de noviembre y el 6 de diciembre de 2019 ubicada en el Istmo del país centroamericano, de información consultada en la biblioteca principal del canal y de la Universidad de Florida; asimismo de levantamientos de suelos generados a través de sistemas de información geográfica con datos de las corporaciones autónomas regionales CAR.

Tiempo

El período de elaboración de la monografía comprende entre el 10 de diciembre de 2019 y el 29 de octubre de 2020, con un período de ejecución de 10 meses y 19 días, con retrasos en el desarrollo de las actividades de este documento debido a las restricciones impuestas por el COVID-19

9. CONTENIDO

Dentro de los lineamientos establecidos en el marco de la propuesta presentada en el 2019, se manejaron temas propios de las cuencas hidrográficas, límites de Atterberg, consolidación primaria y la carta de Casagrande; temas vistos en las asignaturas de Hidrología, mecánica de suelos y geotecnia respectivamente.

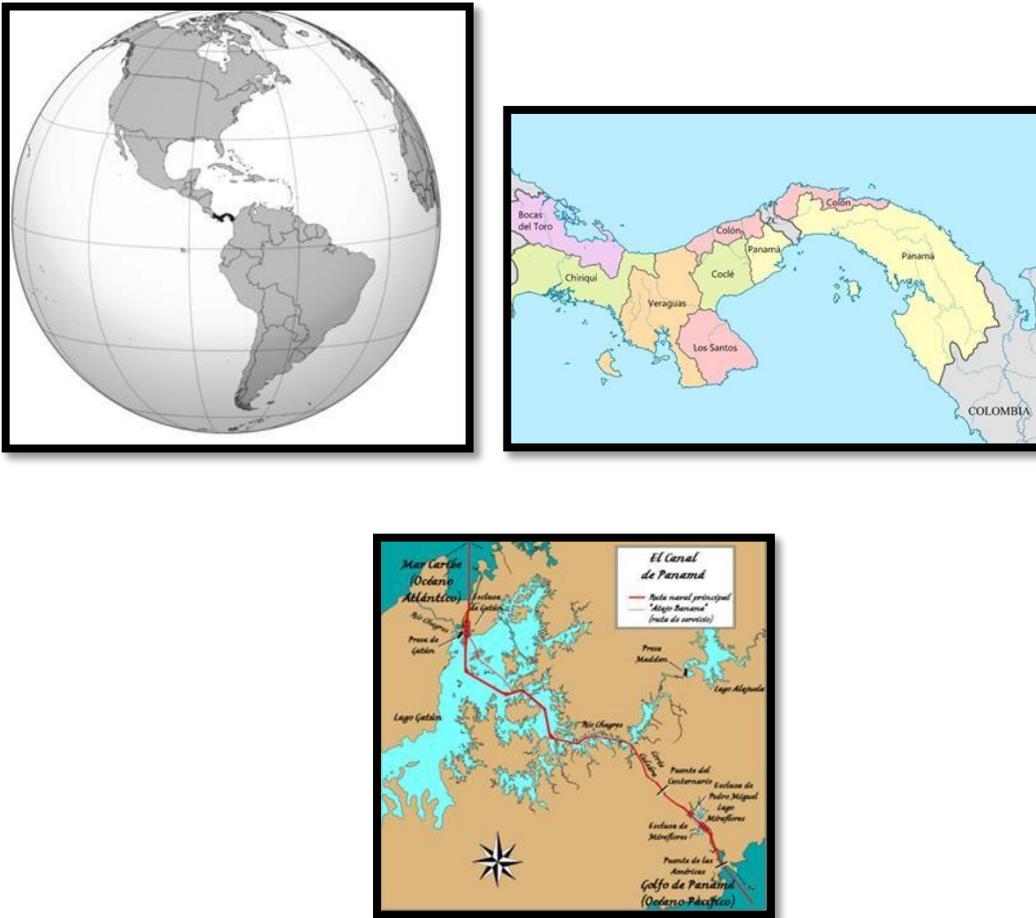
10. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS EN EL CANAL DE PANAMA

El estudio de suelos es una de las partes más importantes a la hora del diseño y la construcción de una obra de infraestructura. Conocer las características de los estratos permite evaluar condiciones que brinden seguridad a la futura edificación; entre esas propiedades esta la composición de las capas de suelos. Teniendo en cuenta lo anterior; se ilustrará a continuación las características tanto de la cuenca del canal de Panamá como del tramo III y IV del río Magdalena en Colombia.

10.1. Localización

El canal de Panamá abarca los distritos de Panamá, Ancón y Bilbao dentro de las provincias de Panamá y Colon. Su longitud es de 123 kilómetros y en la siguiente figura se ilustra su ubicación geográfica.

Ilustración 9. Localización Canal de Panamá



Fuente. www.canaldepanama.com

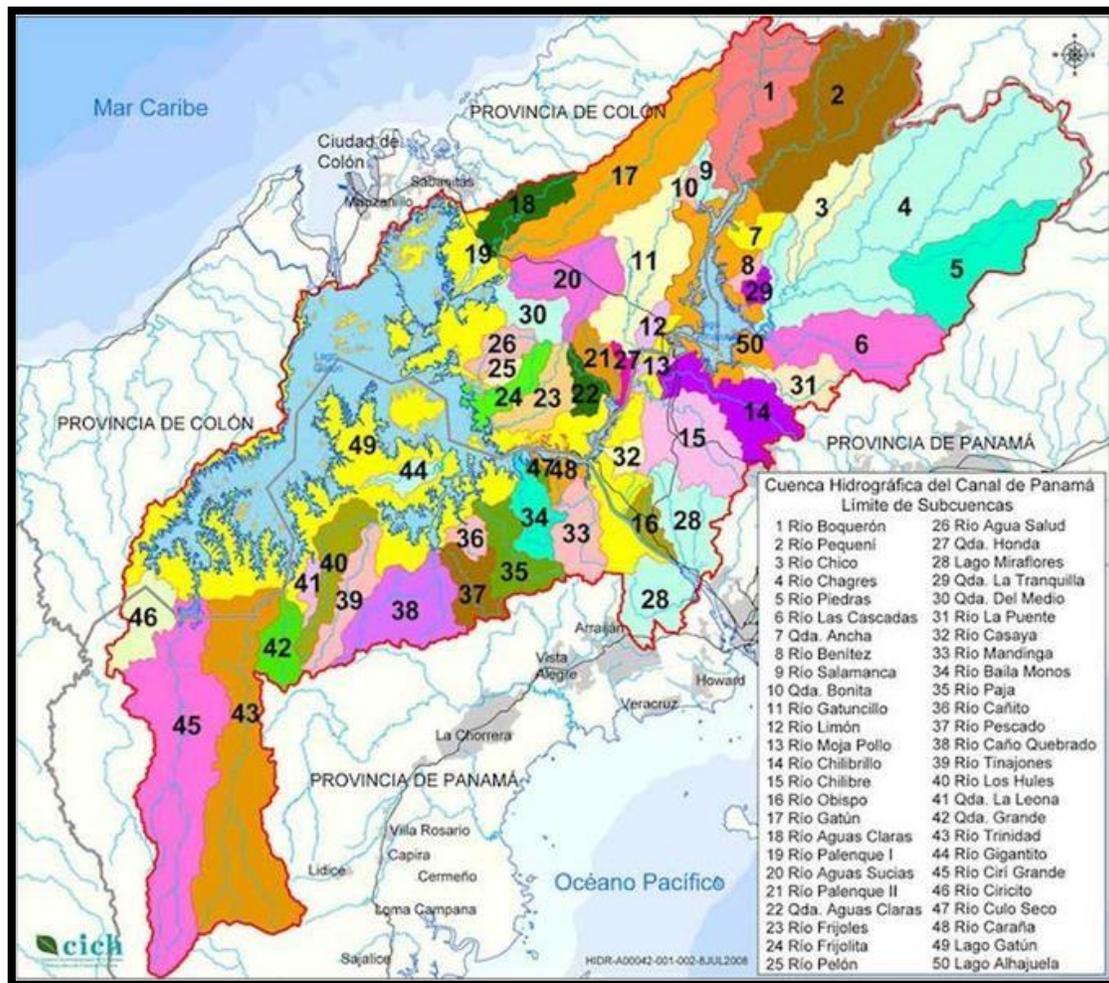
10.2. La cuenca del canal de Panamá

El canal de Panamá es la parte más importante de la cuenca de Panamá, la cual cuenta con una superficie de 2060.5 kilómetros cuadrados y según el IDIAP³⁵ se compone de 52

³⁵ LAS MULAS DEL CANAL DE PANAMÁ. Lacanga.com. [en línea]: [citado 20 septiembre, 2017]. Disponible en Internet:

subcuencas, siendo de este modo el sistema hidrográfico más grande del país centroamericano. A continuación, se ilustra su ubicación dentro del territorio nacional; asimismo las 52 subcuencas que conforman esta importante cuenca.

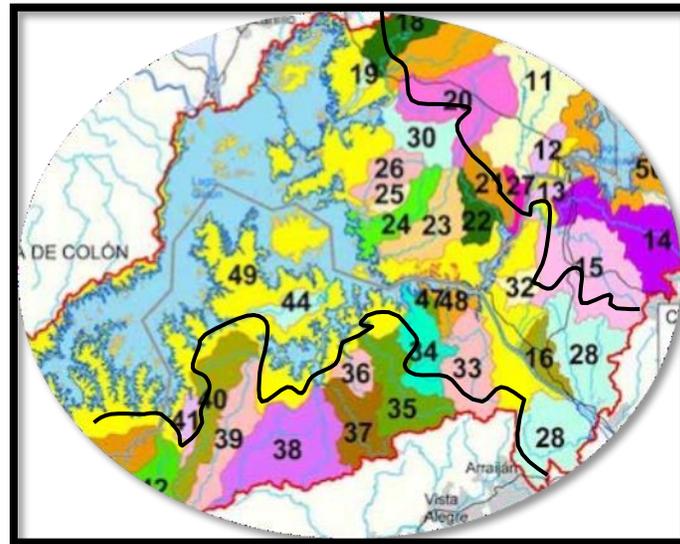
Ilustración10. Localización y conformación Cuenca del canal de Panamá



Fuente. IDIAP (2001)

Teniendo en cuenta la ilustración anterior; la siguiente figura ilustrará de forma más detallada la zona de interés, la cual comprende las subcuencas que están a menos de 10 kilómetros en línea recta de la zona donde transitan los barcos; la cual va a ser la base para el análisis comparativo que se desarrollará en el presente documento.

Ilustración 11. Delimitación zona de interés



Fuente. IDAP (2001)

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, dentro de esta clasificación se tendrán las siguientes subcuencas las cuales se mostrarán en la siguiente tabla.

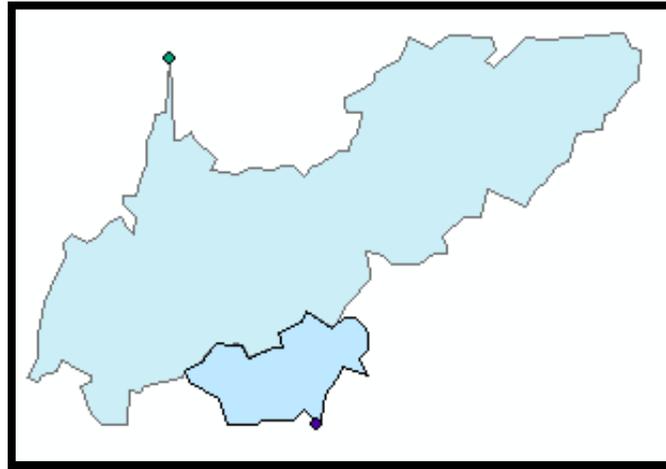
Tabla 4. Conformación de las subcuencas en el canal de Panamá.

| NÚMERO | SUBCUENCA |
|--------|-----------------------|
| 16 | Río Obispo |
| 22 | Quebrada Aguas Claras |
| 23 | Río Frijoles |
| 24 | Río Frijolita |
| 25 | Río Pelón |
| 26 | Río Agua Salud |
| 30 | Quebrada del Medio |
| 32 | Río Casaya |
| 33 | Río Mandinga |
| 34 | Río Baila Monos |
| 41 | Quebrada la leona |
| 44 | Río Gigantito |
| 47 | Río Culo seco |
| 48 | Río Caraña |
| 49 | Lago Gatún |
| 19 | Río Palenque I |

Fuente. Autores

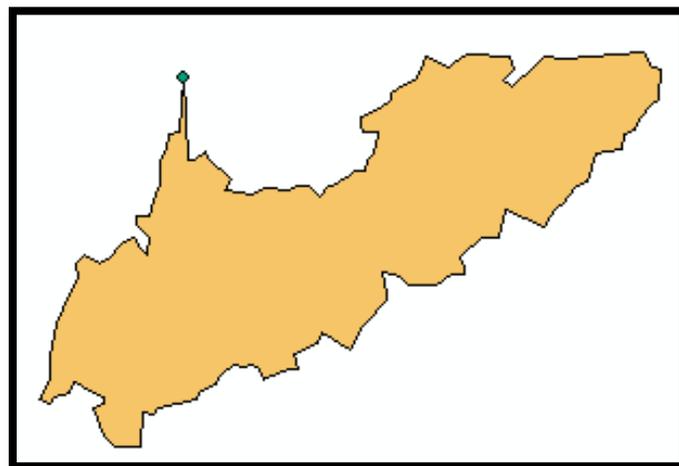
Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se ilustra a continuación la delimitación de la cuenca del canal de Panamá utilizando sistemas de información geográfica (ArcGIS 10.5). Cabe aclarar que el software clasifico la cuenca en dos importantes unidades según sus aportantes principales: La zona del Atlántico y la zona del pacifico.

Ilustración 12. Sistema Hidrográfico total



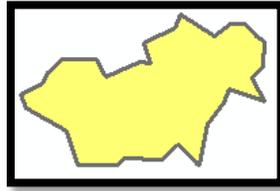
Fuente. Propia

Ilustración 13. Cuenca panamá Atlántico



Fuente. Propia

Ilustración 14. Cuenca Panamá Pacífico



Fuente. Propia

Para entender mejor el funcionamiento y la distribución del suelo del sistema hidrográfico, las dos subcuencas se analizarán como una sola a partir de lo establecido por Heres (1988).

En la siguiente tabla se ilustra el área de cada subcuenca de la zona de estudio, así como su debida proporción.

Tabla 5. Distribución del área de la cuenca

| <i>Subcuenca</i> | <i>Area km²</i> | <i>Porcentaje</i> |
|------------------|----------------------------|-------------------|
| Atlántico | 2422.98 | 89.35% |
| Pacífico | 288.71 | 10.65% |
| Total | 2711.69 | 100 |

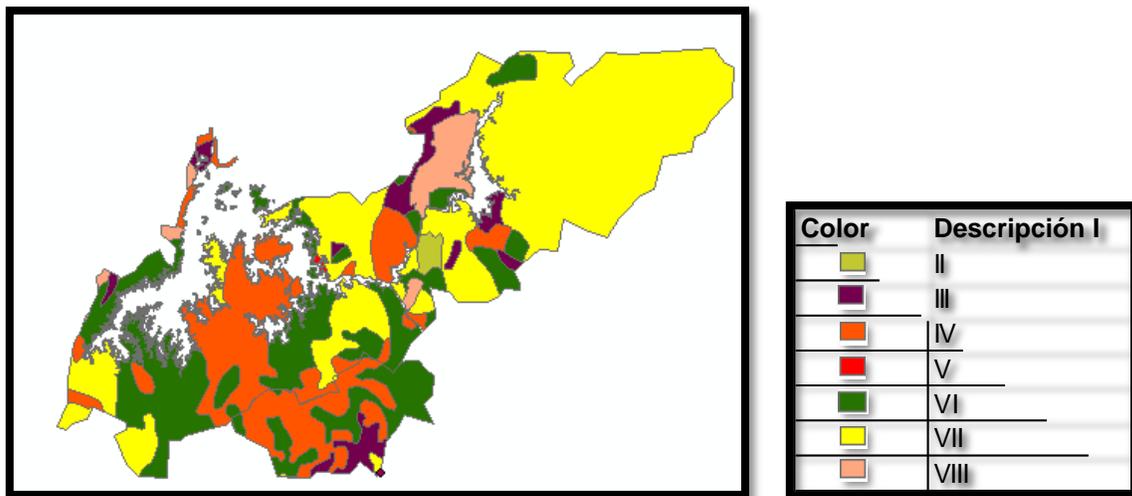
Fuente. Autores

Como se puede observar dentro de la zona de estudio el 89.35% del sistema hidrográfico está relacionado con el océano Atlántico mientras que solo el 10.65% se relaciona con el océano Pacífico, lo que indica que, en el aspecto del área, los afluentes que desembocan en el océano Atlántico tienen mayor incidencia en las consideraciones que se van a realizar a continuación.

10.3. Tipos de suelos

La siguiente ilustración se muestra la distribución de los suelos de acuerdo a la clasificación local de la Dirección Nacional de Reforma Agraria, catastro Rural de Tierras y aguas de Panamá en el año de 1968 y que fue adoptado a la zona de estudio utilizando el software de ArcGIS.

Ilustración 15. Clasificación suelos de acuerdo a la Dirección Nacional de reforma Agraria



Fuente. Autores

Como se puede observar en la anterior ilustración, la clasificación local de Panamá a diferencia de otros países, brinda una información más resumida y agrupa de forma general a los tipos de suelo de acuerdo a su textura. Para introducir el Sistema de unidad de clasificación de suelos se ilustra en la siguiente tabla su respectiva equivalencia.

Tabla 6. Clasificación de los suelos de acuerdo al sistema UCS

| Color | Descripción local | UCS |
|---|-------------------|-------|
|  | II | SW-SM |
|  | III | SW-SC |
|  | IV | SW-SC |
|  | V | CL |
|  | VI | CH |
|  | VII | CH-OH |
|  | VIII | OH |

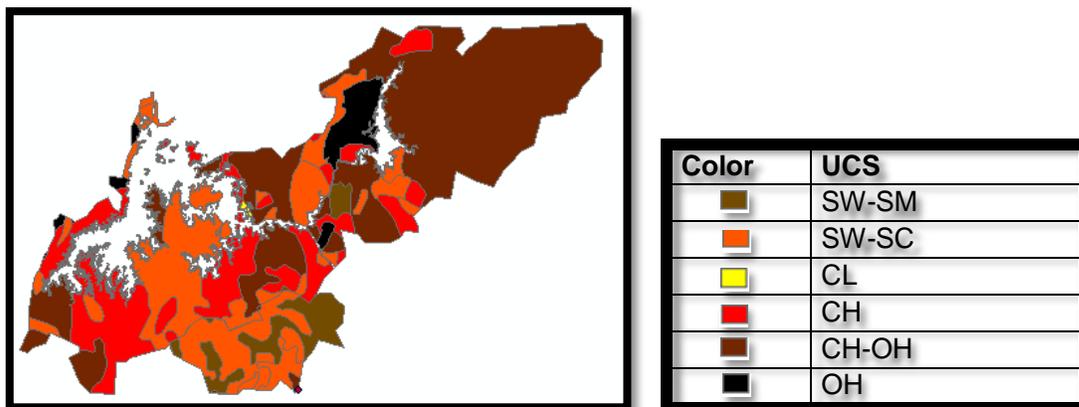
Fuente. Autores

La anterior clasificación de acuerdo al criterio del sistema de unidad de clasificación de suelos UCS muestra que el número de la descripción local dada por la entidad panameña es directamente proporcional a la cantidad de arcilla contenida en los estratos estudiados³⁶

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se ilustra en la siguiente figura la clasificación definitiva de la zona hidrográfica del canal de Panamá en función de la UCS.

³⁶ BELEÑO, Samuel Álvarez. Listos los diseños de las esclusas y compuertas para el Canal del Dique. EL UNIVERSAL. [En línea] <http://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/listos-los-disenos-de-las-esclusas-ycompuertas-para-el-canal-del-dique-252463>

Ilustración 16. Clasificación de los suelos de acuerdo a la Unidad de clasificación de suelos



Fuente. Autores

En la anterior figura se muestra 6 clasificaciones de suelos según la UCS de las cuales dos son arcillas dominantes y otros dos grupos tienen entre 5 y 12% de arcilla en su contenido. En la siguiente tabla se muestra de manera detallada la clasificación y las proporciones de cada suelo respecto al sistema hidrográfico principal del Canal de Panamá.

Tabla 7. Distribución de los suelos según la UCS

| | | |
|-------|---------|--------|
| SW-SM | 16.85 | 0.72% |
| SW-SC | 579.25 | 24.84% |
| CL | 2.02 | 0.09% |
| CH | 567.26 | 24.33% |
| CH-OH | 1072.01 | 45.98% |
| OH | 94.18 | 4.04% |
| | 2331.58 | |

Fuente. Autores

Como se puede observar en la anterior tabla, más del 50% del suelo en el sistema hidrográfico del canal de Panamá cuenta con arcilla o contenido de arcilla en su composición, y de aquel suelo más de la quinta parte tiene un porcentaje dominante del material fino, lo que indica

la importancia de considerar este tipo de material para la construcción de las esclusas y de la carga útil del lago Gatun para evitar deformaciones considerables que afectarán la operabilidad del canal de Panamá, consecuencia de un eventual descenso del nivel freático del cuerpo de agua dulce³⁷.

Para comprobar esta premisa, se mostrará los estudios recolectados de los suelos finos en ríos55 sectores del Canal de Panamá dentro de la zona de estudio correspondiente.

10.4. Límites de Atterberg

A través de perforaciones y de sondeos; para la ampliación del canal de Panamá se tomaron 20 muestras en sitios diferente para conocer mejor las características de las arcillas durante su proceso constructivo. La siguiente tabla ilustra los valores obtenidos por estudios que están compilados en el banco de datos de la Universidad de Florida.

³⁷ SCIENTIFIC AMERICAN, INC. Culebra cut the problem of the slides (November 09, 1912)

Tabla 8. Límites de Atterberg en los suelos finos del Canal de Panamá

| Límite líquido en % | Límite plástico en % | Índice de plasticidad |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 55.23 | 24.56 | 30.67 |
| 58.34 | 24.57 | 33.77 |
| 58.35 | 23.56 | 34.79 |
| 56.78 | 25.67 | 31.11 |
| 55.46 | 22.14 | 33.32 |
| 54.35 | 25.87 | 28.48 |
| 53.32 | 23.45 | 29.87 |
| 56.78 | 24.56 | 32.22 |
| 52.34 | 23.45 | 28.89 |
| 55.67 | 25.67 | 30.00 |
| 53.76 | 22.43 | 31.33 |
| 53.45 | 25.67 | 27.78 |
| 52.34 | 23.45 | 28.89 |
| 56.78 | 25.67 | 31.11 |
| 53.45 | 23.41 | 30.04 |
| 53.54 | 23.45 | 30.09 |
| 55.53 | 22.34 | 33.19 |
| 53.53 | 25.64 | 27.89 |
| 56.74 | 23.45 | 33.29 |
| 53.46 | 24.34 | 29.12 |

Fuente. Universidad de Florida.

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores del límite líquido están entre 50% y 60% y el límite plástico oscila entre el 20% y el 30%. Estos valores tienen concordancia con lo mencionado en informes de laboratorio realizados por el departamento de suelos de la Universidad Nacional de Colombia³⁸ para el caso de arcillas con alta plasticidad o estratos que tienen en su composición entre un 5% y un 12% del material fino.

Dicho lo anterior, el índice de plasticidad calculado como la diferencia del límite líquido y el límite plástico arrojó valores entre el 25% y el 35%. A través de promedio aritmético se pudo determinar que el índice de plasticidad obtenido en la cuenca hidrográfica del canal de Panamá es de **30.90%**, el límite líquido promedio es de **55.06%** y el límite plástico promedio es de **24.16%**.

Teniendo en cuenta los anteriores valores, se confirmará si el suelo es de alta plasticidad según la carta de Casagrande.

10.4.1. Clasificación según la carta de Casagrande

Según Casagrande (1863) si el límite líquido en un suelo fino es mayor al 50% es de alta plasticidad, por lo tanto, al obtener un valor de 55.06% se concluye que el suelo fino es altamente plástico.³⁹

³⁸ UNESCO World Heritage center. Dike canal [en línea]: Disponible en Internet: <http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5756/>>

³⁹ PROYECTO CHECUA CONTRA EROSIÓN - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. (1997), from <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-540739>

Por otra parte, la línea A indica el valor límite donde si es mayor al índice de plasticidad se considera limo y si es menor es una arcilla. Teniendo en cuenta lo anterior, el valor de la línea A se muestra a continuación.

$$IPA = 0.73(LP - LL)$$

$$IPA = 0.73(55.06 - 24.16)$$

$$IPA = 22.55$$

Como este valor es menor al límite plástico, se confirma que este suelo es dominado por una arcilla de alta plasticidad CH.

10.4.2. Índice de liquidez

Según Skempton (1934) es el parámetro utilizado para medir a escala el contenido de humedad natural en una muestra de suelo., respecto a los límites plástico y líquido, el cual se calcula a partir de la siguiente relación.

$$IL = \frac{Wn - LP}{IP}$$

Ecuación (2). Índice de liquidez (Skempton, 1934)

Según estudios preliminares realizados por la Universidad de Florida en el 2005, se encontró un valor de humedad natural del suelo (Wn) del 52.34% en la cuenca del canal de panamá. Teniendo en cuenta lo anterior, el valor del índice de liquidez se muestra a continuación.

$$IL = \frac{52.34 - 24.16}{30.90}$$

$$IL = 0.91$$

La norma británica (BS 1377:1990) y la norma vietnamita (TCVN 4197:1995) consideran la siguiente clasificación de índice de liquidez mostrada en la tabla.

Tabla 9. Clasificación del límite líquido según la norma británica (BS 1377:1990)

| ÍNDICE DE LIQUIDEZ | COMPORTAMIENTO DEL SUELO |
|--------------------|---|
| <0.0 | Demostrará fractura rígida al ser sometido al corte, porque el contenido natural de humedad W_n es menor al LP. |
| 0-1 | Como un plástico. Rango que comprenden la mayoría de las arcillas |
| >1.0 | Suelo en estado viscoso donde la humedad es mayor al límite líquido |

Fuente. Britishstandars.edu.co

Como se muestra en la anterior tabla un valor que se encuentra entre 0 y 1 tiene el comportamiento típico de una arcilla, sin embargo según Heres(1988) si un valor de límite líquido se acerca a 1 el suelo tiene más potencial expansivo en función de la cantidad de agua que contenga el mismo⁴⁰, lo que indica que presenta una variación de su volumen abrupta según el contenido del preciado líquido ya que el valor del índice de liquidez es de 0.91. Según el mismo autor la resistencia al corte de este suelo no drenado al ser un valor tan cercano a uno es de aproximadamente 7.5 Kilopascales, lo cual lo vuelve muy vulnerable

⁴⁰ Roy Adolfo Ahumada Marco Ameglio S Rafael E Bárcenas P Guillermo O Chapman, R. A., Nicolás Corcione Ricardo De la Espriella Toral Norberto Delgado D Eduardo A Quirós B Alfredo Ramírez, J. R., & José Sosa A Jorge L Quijano Administrador Manuel E Benítez Subadministrador, J. A. (n.d.). Febrero 2013-No.58.

ante cargas solicitadas sin que el suelo se trate adecuadamente con cimentaciones profundas, las cuales en Panamá alcanzan los 30 metros de longitud con pilotes en punta y, además, el mejoramiento del suelo a través de compuestos como Cal y cenizas volcánicas para controlar la expansión de los estratos arcillosos.

10.5. Proctor modificado

Para determinar el grado de compactación del suelo, se evaluaron datos suministrado de las corporaciones autónomas regionales de los departamentos dónde está ubicada la cuenca se obtuvieron los siguientes datos de humedad optima y densidad seca máxima.

Tabla 10. Valores del ensayo de Proctor modificado en el canal de Panamá

| MUESTRA | HUMEDAD OPTIMA (%) | DENSIDAD MÁXIMA(g/CM3) |
|-----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | 9.4 | 2.04 |
| 2 | 9.35 | 2.07 |
| 3 | 9.42 | 2.03 |
| Promedio | 9.39 | 2.05 |

Fuente. Universidad de Florida

Según la tabla anterior, el promedio de la humedad optima es de 9.39 % y la densidad seca máxima es de $2.05 \frac{g}{cm^3}$

10.6. Ensayo de corte directo

Una vez determinada la humedad óptima con el ensayo de Proctor modificado, se realizaron 15 ensayos de corte directo con dicha humedad, la cual fue de 9,30%, en total estos ensayos suman 45 especímenes de acuerdo a la carga aplicada que iba desde 0.5, 1.0 y 2.0 Kg/cm².

Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 11. Ensayo de corte directo en el Canal de Panamá

| Ensayo | Humedad (%) | Densidad Húmeda (gr/cm ³) | Φ | Densidad seca (gr/cm ³) |
|--------------------|-------------|--|--------------|--|
| 1 | 8.75 | 1.93 | 34.5 | 1.75 |
| 2 | 8.78 | 1.91 | 35.6 | 1.71 |
| 3 | 8.67 | 1.95 | 33.4 | 1.7 |
| 4 | 8.65 | 1.98 | 33.3 | 1.72 |
| 5 | 9.01 | 1.96 | 35.6 | 1.68 |
| 6 | 8.78 | 1.99 | 35.7 | 1.65 |
| 7 | 8.65 | 1.96 | 36.7 | 1.68 |
| 8 | 8.87 | 1.99 | 36.5 | 1.64 |
| 9 | 8.95 | 2.01 | 33.2 | 1.65 |
| 10 | 8.67 | 2.00 | 33.4 | 1.66 |
| 11 | 9.03 | 1.98 | 33.8 | 1.63 |
| 12 | 8.05 | 1.97 | 34 | 1.65 |
| 13 | 8.65 | 1.89 | 33.2 | 1.63 |
| 14 | 8.76 | 1.98 | 33.5 | 1.61 |
| 15 | 8.72 | 2.01 | 33.9 | 1.64 |
| Promedio | 8.73 | 1.97 | 34.42 | 1.67 |
| D. Estándar | 0.23 | 0.04 | 1.25 | 0.04 |
| C variación | 2.62 | 1.79 | 3.64 | 2.34 |

Fuente. Universidad de Florida.

Como se puede observar en la anterior tabla, los coeficientes de variación oscilan entre 1.79% y 3.64%, lo cual indica un comportamiento normal en el flujo de datos ya que Pascal (1676) plantea que para que los datos sean confiables deben estar entre un rango de 0% al 16%.

10.7. Ensayo del CBR

Determinada la humedad óptima como un 9.39% y la densidad seca máxima de 2.05 gr/cm³ del ensayo de Proctor modificado, se procedió a realizar 15 ensayos de C.B.R, que en total suman 45 especímenes los cuales están distribuidos entre 56, 25, 12 golpes por capa. A continuación, los resultados:

Tabla 12. Valores del ensayo de CBR para el Canal de Panamá

| Muestra | Humedad (%) | CBR (%) | Y 56 golpes (g/cm ³) | Y 25 golpes (g/cm ³) | Y 12 golpes(g/cm ³) |
|---------------------|-------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8.75 | 11.21 | 1.99 | 1.95 | 1.82 |
| 2 | 8.78 | 11.34 | 1.94 | 1.9 | 1.81 |
| 3 | 8.67 | 11.33 | 2.01 | 1.95 | 1.86 |
| 4 | 8.65 | 11.32 | 1.95 | 1.82 | 1.71 |
| 5 | 9.01 | 11.34 | 1.99 | 1.86 | 1.76 |
| 6 | 8.78 | 11.35 | 2.02 | 1.89 | 1.71 |
| 7 | 8.65 | 11.32 | 2.08 | 1.92 | 1.76 |
| 8 | 8.87 | 10.98 | 1.99 | 1.83 | 1.72 |
| 9 | 8.95 | 10.96 | 2.03 | 1.89 | 1.69 |
| 10 | 8.67 | 10.45 | 1.97 | 1.81 | 1.67 |
| 11 | 9.03 | 10.78 | 1.96 | 1.81 | 1.65 |
| 12 | 8.05 | 10.67 | 1.99 | 1.75 | 1.62 |
| 13 | 8.65 | 11.31 | 1.95 | 1.79 | 1.61 |
| 14 | 8.76 | 11.10 | 2.01 | 1.89 | 1.59 |
| 15 | 8.72 | 10.97 | 1.92 | 1.78 | 1.61 |
| Promedio | 8.73 | 11.10 | 1.99 | 1.86 | 1.71 |
| D. Estándar | 0.23 | 0.29 | 0.04 | 0.06 | 0.08 |
| C. Variación | 2.62 | 2.58 | 2.05 | 3.37 | 4.89 |

Fuente. Universidad de Florida

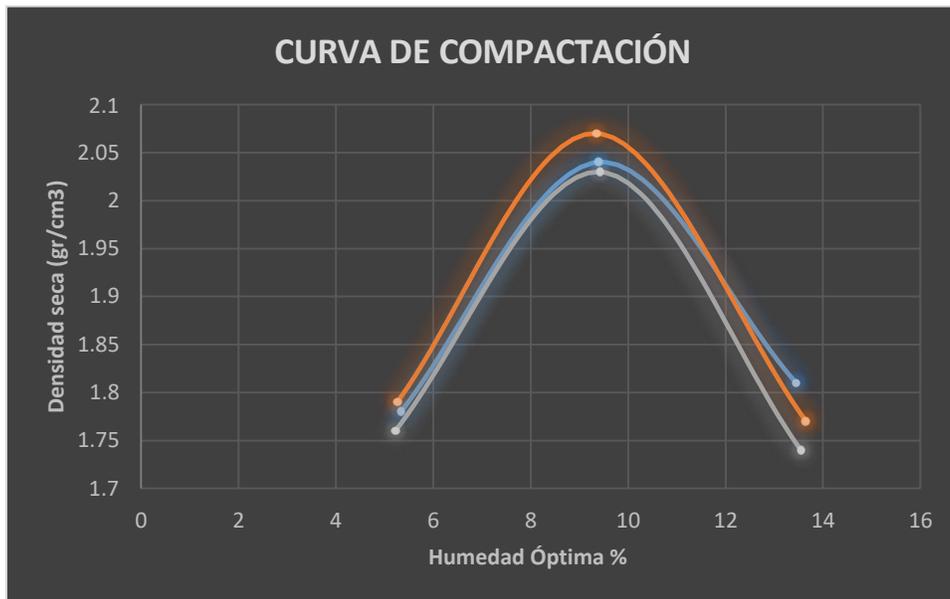
Como se ilustra en la tabla anterior, se encuentra un CBR del 36.36% con una densidad a 56 golpes se determinó una densidad seca de $1.99 \frac{g}{cm^3}$, a 25 golpes de $1.86 \frac{g}{cm^3}$ y a 12 golpes de

$1.71 \frac{g}{cm^3}$, lo que demuestra la validez de estos datos y su relación inversamente proporcional según el Departamento de Transportes de California (1936)⁴¹

10.8. Análisis del Ensayo de Proctor modificado

La siguiente gráfica ilustra la relación entre la densidad seca en gramos sobre centímetro cúbico y la humedad óptima en porcentaje, obtenidas de los archivos del IDIAP.

Ilustración 17. Curva de Proctor modificado



Fuente. Propia

Como se puede observar en la anterior gráfica, las tres muestras que se tomaron como referencia para desarrollar las comparaciones correspondientes, muestran un comportamiento típico según lo descrito en la Norma Invías E-142 de Colombia, la cual

⁴¹ CRESPO VILLALAZ. Carlos. MECANICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES, 5 ed. Monterrey, México, Limusa, NORIEGA Editores, (1976.- 1980).

menciona como punto de referencia por lo menos tres puntos humedad-densidad seca para generar una parábola hacia abajo⁴². También puede observarse en este conjunto de datos que las gráficas no están distantes entre sí, lo cual indica la veracidad de estos datos y como se mencionó anteriormente, se maneja una densidad seca máxima de $2.05 \frac{g}{cm^3}$ a una humedad de 9.39%, lo cual indica un comportamiento típico de un suelo con alto contenido de arcilla, ya que con una humedad mayor al 9.39% este al ser menos denso va a resistir menos carga y ante un eventual cambio volumétrico dado por el agua estos estratos si no se tratan de una forma adecuada como se hizo a la hora de ampliar el canal en el 2006 dónde se emplearon concentraciones de Cal y cenizas vulcanizada⁴³

10.9. Análisis de ensayo de corte directo.

Como se puede observar en la tabla 10, la densidad húmeda máxima es de $1.97 \frac{g}{cm^3}$ mientras que la densidad seca es de $1.67 \frac{g}{cm^3}$, el cual representa una diferencia porcentual del 15% entre ambos valores y según Braja M. Das⁴⁴ al presentarse una diferencia mayor al 10% el suelo es muy inestable en función del contenido de humedad en su composición, por lo tanto, su capacidad de respuesta es mucho menor a suelos que tienen composición granulométrica más gruesa.

⁴² BONILLA GALLO, Elkin Yebraíl y OCHOA OSORIO, Carlos Andrés. Correlación entre el ángulo de fricción interna y CBR tipo 1 para arenas arcillosas (SC): UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA 2010.

⁴³ NARSILIO, Guillermo y SANTAMARIA, Carlos. Clasificación de Suelo: Fundamento Físico: Instituto Tecnológico de Georgia, USA. [En Línea]. [Consultado 23 agosto. 2012]. Disponible.

⁴⁴ JIMENEZ SALAS. José A. MECANICA DEL SUELOS Y SUS APLICACIONES A LA INGENIERIA. Madrid, España, Editorial DOSSAT, 1954.

10.10. Análisis del CBR

La siguiente tabla ilustra los valores de la resistencia del suelo con uno que no es sensible a los cambios de humedad CBR según el departamento de tránsito de California.

Tabla 13. Valores típicos del CBR

| CBR (%) | CLASIFICACIÓN GENERAL | UCS DOMINANTE |
|----------------|------------------------------|-----------------------|
| 0 A 3 | Muy pobre | OH,CH,ML,OL |
| 3 A 7 | Pobre | OH,CH,ML,OL |
| 7 A 20 | Regular | OL, ML,CL,SC,SM,SP,SC |
| 20 A 50 | Bueno | GM,GC,W,SP,GP, SM |
| >50 | Excelente | GW,GM |

Fuente. Departamento de Tránsito de California.

Este suelo al tener un valor promedio del CBR del 11.10%, se encuentra en la categoría de regular, sin embargo, el estrato dominante es la arcilla con alta plasticidad con materia orgánica (CH-OH), este comportamiento que no parece coincidir con lo mostrado en la tabla es dado por que casi el 25% del suelo del sistema hidrográfico del canal de Panamá es arenoso con contenido de arcilla, lo cual permite que la resistencia del mismo se incremente un poco como lo muestran los datos que se mostraron en esta monografía.

11. ANALISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL TRAMO III Y IV DEL RIO MAGDALENA.

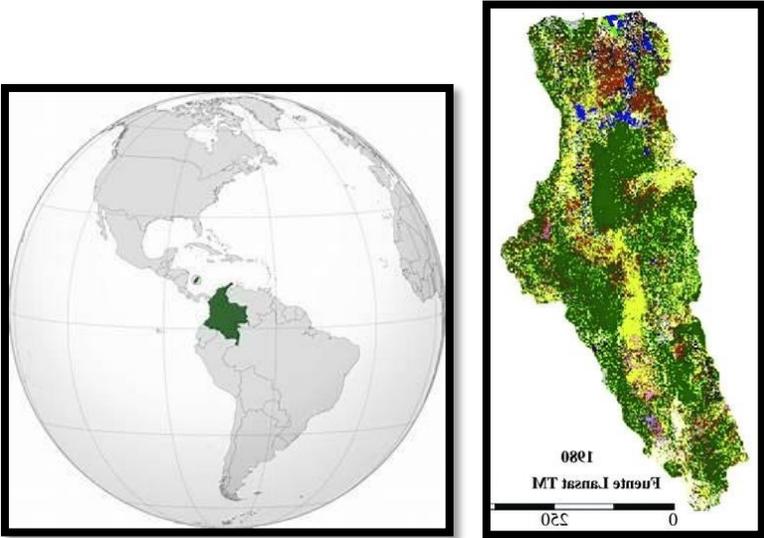
A continuación se presenta las características de la zona de estudio que comprende una longitud total de 256 kilómetros del río Magdalena y se acudirá al concepto de Cuenca para determinar el porcentaje de suelo arcilloso donde se utilizó el sistema de información geográfica (ArcGIS 10.5) y datos de levantamientos de suelos por departamentos realizados en el año 2001 por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC con las características físicas y mecánicas de los estratos suministrados por dicha entidad.

11.1. Ubicación

El tramo III del río Magdalena se localiza entre los municipios de Barrancabermeja en el departamento de Santander y puerto Berrio en el departamento de Antioquía con una longitud de 100 kilómetros mientras que el tramo IV se ubica entre el municipio Antioqueño y Puerto Salgar en Cundinamarca el cual cuenta con una longitud de 156 kilómetros. Ambos tramos según el gobierno Nacional de Colombia⁴⁵ hacen parte de la unidad de Navegabilidad del río Magdalena. UFN. En la siguiente ilustración se muestra la ubicación de los tramos III y IV del afluente más importante de Colombia.

⁴⁵ HUMBOLDT, Alejandro von. Sobre los bogas y remeros. En: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: Alejandro von Humboldt. Viajes por Colombia: Bogotá. 1982. <http://www.lablaa.org/blaavirtual/exhibiciones/humboldt/diario/7.htm>

Ilustración 18. Localización Tramo III y IV Unidad de Navegabilidad Funcional del río Magdalena

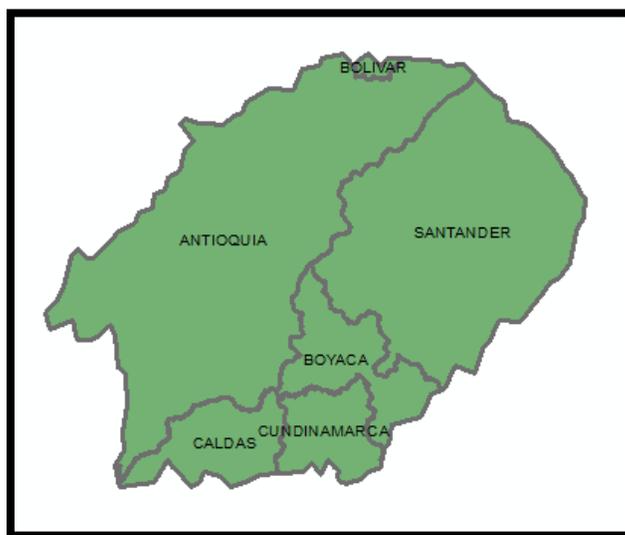


Fuente. Corporación Autónoma Regional del Santander

11.2. *Delimitación de la zona de estudio*

La cuenca hidrográfica del tramo III y IV del río Magdalena abarca territorio de 6 departamentos (Antioquía, Boyacá, Bolívar, Caldas, Cundinamarca, Santander) y la delimitación realizada con la cartografía dada por el IGAC y la generación del sistema por ArcGIS se muestra a continuación.

Ilustración 19. Delimitación de la zona de Estudio



Fuente. Autores

La Subcuenca con un área total de 28535.64 kilómetros cuadrados lo que equivale a un 10.5% del total del sistema hidrográfico principal, pero 10.5 veces mayor que la cuenca hidrográfica del canal de Panamá, lo que permite una proporcionalidad en el estudio de los sistemas según el criterio de cuencas semejantes⁴⁶

⁴⁶ BENITEZ C Arias y W QUIROZ J (1980). Manual de conservación de suelos y agua. Ministerio de agricultura y alimentación. Lima, Perú.

Teniendo en cuenta lo anterior, se muestra en la siguiente tabla la distribución de la cuenca respecto a los seis departamentos con el fin de relacionar esta información a posibles decisiones que tomen las corporaciones autónomas regionales de cada departamento.

Tabla 14. Distribución de la Cuenca por departamentos

| Departamento | Area en km^2 | Porcentaje Area % |
|--------------|-----------------|-------------------|
| Antioquía | 13590.41 | 47.65 |
| Bolívar | 137.28 | 0.48 |
| Boyacá | 2243.05 | 7.86 |
| Caldas | 1789.26 | 6.27 |
| Cundinamarca | 1454.37 | 5.10 |
| Santander | 9311.81 | 32.64 |
| Total | 28526.18 | 100 |

Fuente. Autores

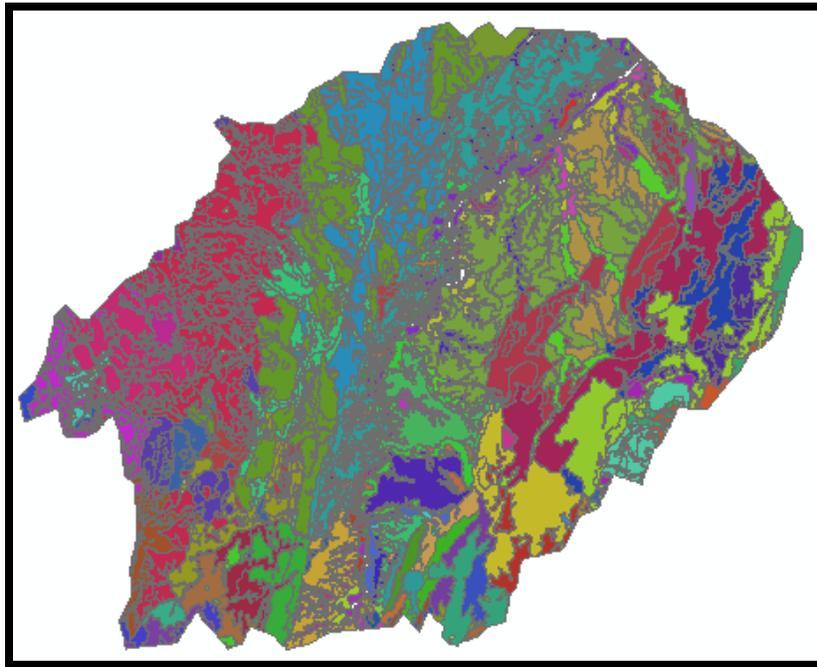
Como se puede observar en la tabla anterior, el 47.65% del área de la zona de estudio se encuentra ubicada en el departamento de Antioquía, lo que indica que los suelos correspondientes a esta región van a ser muy importantes a la hora de la construcción de obras hidráulicas de abastecimiento o de control del caudal del río Magdalena.

11.3. Tipos de Suelos

La unidad de Sistema de clasificación de suelos UCS, según Terzagui (1927) es aquel mecanismo que permite clasificar los suelos según el tamaño y la textura de las partículas correspondientes. Es importante mencionar que este sistema se aplica a los estratos que no han sufrido proceso de consolidación.

Para lograr realizar la clasificación de los suelos, tuvo que realizarse un tratamiento preliminar con la subcuenca generada por ArcGIS y la información de los tipos de suelos suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC lo cual genero el siguiente mapa de clasificación general según la UCS.

Ilustración 20. Clasificación general de los suelos



Fuente. Autores

A continuación, se muestra la clasificación de cada tipo de suelo y su descripción general para clasificarlo más claramente de acuerdo a la unidad de clasificación de suelos por departamento según el IGAC y su equivalente según el Sistema Internacional de Unidad de Clasificación de suelos SUCS.

Tabla 15. Distribución de los suelos en el departamento de Antioquía

| Identificación | UCS | Area km^2 | SUCS |
|---|-----|-------------|-------|
|  | AL | 33.34 | GW |
|  | BE | 72.93 | SW |
|  | CA | 265.21 | CA |
|  | CB | 164.24 | SP |
|  | CL | 13.18 | SP-SC |
|  | CS | 101.19 | GW-GM |
|  | EC | 714.81 | SW-SC |
|  | FG | 43.64 | SW-SM |
|  | GD | 866.51 | SW |
|  | GS | 83.44 | SP-SC |
|  | IT | 341.42 | SW-SC |
|  | IV | 465.63 | GP-GC |
|  | JD | 191.81 | SW-SC |
|  | JR | 280.71 | SW-SC |
|  | LB | 95.01 | SW-SC |
|  | LL | 2.58 | SP |

| | | | |
|---|----|----------|-------|
| ■ | LP | 72.24 | SW-SC |
| ■ | LR | 240.12 | SW-SC |
| ■ | NQ | 33.67 | SW-SC |
| ■ | PO | 48.91 | SW-SM |
| ■ | PÑ | 180.74 | SW-SC |
| ■ | RM | 1658.55 | SW-SC |
| ■ | RN | 105.30 | GW-GC |
| ■ | RV | 405.81 | SW-SC |
| ■ | SD | 185.61 | ML |
| ■ | TE | 484.71 | SW-SC |
| ■ | TR | 136.63 | SW-SC |
| ■ | YA | 2506.29 | SW-SC |
| ■ | YM | 1619.55 | SW-SC |
| ■ | ZC | 2130.31 | SW-SC |
| ■ | ZL | 19.65 | SP-SC |
| ■ | ZU | 26.37 | ZU |
| | | 13590.41 | |

Fuente. Autores

Tabla 16. Distribución de los suelos en el departamento de Bolívar.

| Identificación | UCS | Area km^2 | SUCS |
|---|-----|---------------|------|
|  | LVA | 124.85 | GW |
|  | VVA | 10.35 | SP |
|  | VVB | 2.08 | SP |
| Total | | 137.28 | |

Fuente. Autores

Tabla 17. Distribución de los suelos en el departamento de Boyacá

| Identificación | UCS | Area Km^2 | SUCS |
|---|-----|-------------|-------|
|  | CA | 76.46 | CA |
|  | LVD | 416.90 | GW |
|  | LVG | 360.16 | SP-SC |
|  | MPA | 196.42 | CL |
|  | MPE | 14.34 | ML |
|  | MPH | 1.47 | GW-GM |
|  | MVA | 676.44 | CL |
|  | MVE | 8.87 | CL |
|  | MVH | 1.08 | SW-SM |
|  | MVX | 21.34 | SW-SM |
|  | VVA | 59.51 | SP-SC |
|  | VVB | 310.47 | SP-SC |
|  | VVC | 42.30 | OH |
|  | VVD | 55.50 | SW-SC |

| | | | |
|---|----|---------|-------------|
|  | ZU | 1.77 | Zona Urbana |
| | | 2243.05 | |

Fuente. Autores

Tabla 18. Distribución de los suelos en el departamento de Caldas

| Identificación | UCS | Area km^2 | SUCS |
|---|-----|-------------|-------|
|  | CA | 8.96 | CA |
|  | CM | 367.96 | OH |
|  | ER | 204.21 | ML |
|  | FE | 1.92 | GW-OH |
|  | FR | 41.83 | ML |
|  | GA | 65.64 | GW-GM |
|  | GR | 26.59 | GW-GM |
|  | HO | 366.24 | SW |
|  | LA | 34.73 | GW |
|  | LO | 129.50 | CL |
|  | PF | 33.56 | CL |
|  | RR | 325.38 | SW |
|  | SE | 85.08 | SW-OH |
|  | SR | 75.30 | SW-OH |
|  | VB | 22.36 | CH |
| | | 1789.26 | |

Fuente. Autores

Tabla 19. Distribución de los suelos en de departamento de Cundinamarca

| Identificación | UCS | Area km^2 | SUCS |
|---|-------|-------------|-------|
|  | LVCd | 115.06 | SW-SC |
|  | LVCe2 | 100.76 | SW-SC |
|  | LVJb | 49.59 | SW-SC |
|  | LVNa | 22.76 | SP-SC |
|  | LVNb | 2.36 | SW-SC |
|  | LWCe | 1.37 | SW-SC |
|  | LWCe2 | 13.58 | SP-SC |
|  | MPKd | 9.61 | SP-SC |
|  | MPSg | 0.97 | SP-SM |
|  | MPVe | 14.07 | CL |
|  | MPVf | 296.71 | CL |
|  | MQCe | 2.02 | SW-SC |
|  | MQVe | 0.77 | SW-SC |
|  | MQVf | 11.59 | SW-SM |
|  | MVCe | 88.61 | SW-SM |
|  | MVCf | 25.50 | SW-SM |
|  | MVFe | 121.21 | SW-SM |
|  | MVFf | 67.46 | SW-SC |
|  | MVKd | 0.67 | SW-SC |
|  | MVNa | 5.59 | SW-SC |
|  | MVSg | 37.84 | GW-GC |

| | | | |
|---|------|---------|-------------|
|  | MVVe | 117.21 | SW-SC |
|  | MVVf | 146.76 | SW-SC |
|  | MWBe | 8.72 | SW-SM |
|  | MWCe | 15.67 | SW-SC |
|  | MWFf | 2.98 | SW-SC |
|  | MWSg | 0.10 | SW-SC |
|  | VVOa | 47.26 | SW-SC |
|  | VVQa | 84.45 | CH |
|  | VVQb | 19.00 | CH |
|  | VWOa | 0.00 | SW-SC |
|  | VWQa | 20.91 | SW-SC |
|  | ZU | 3.21 | Zona urbana |
| | | 1454.37 | |

Fuente. Autores

Tabla 20. Distribución de los suelos en el departamento de Santander

| Identificación | UCS | Area km^2 | SUCS |
|---|-----|-------------|-------|
|  | CA | 289.70 | CA |
|  | LVA | 1112.60 | SW-SC |
|  | LVB | 1870.41 | SW-SC |
|  | LVF | 309.35 | SW-SC |
|  | MLA | 211.00 | SW-SM |
|  | MLD | 87.24 | SW-SM |
|  | MLE | 2.27 | SW-SC |

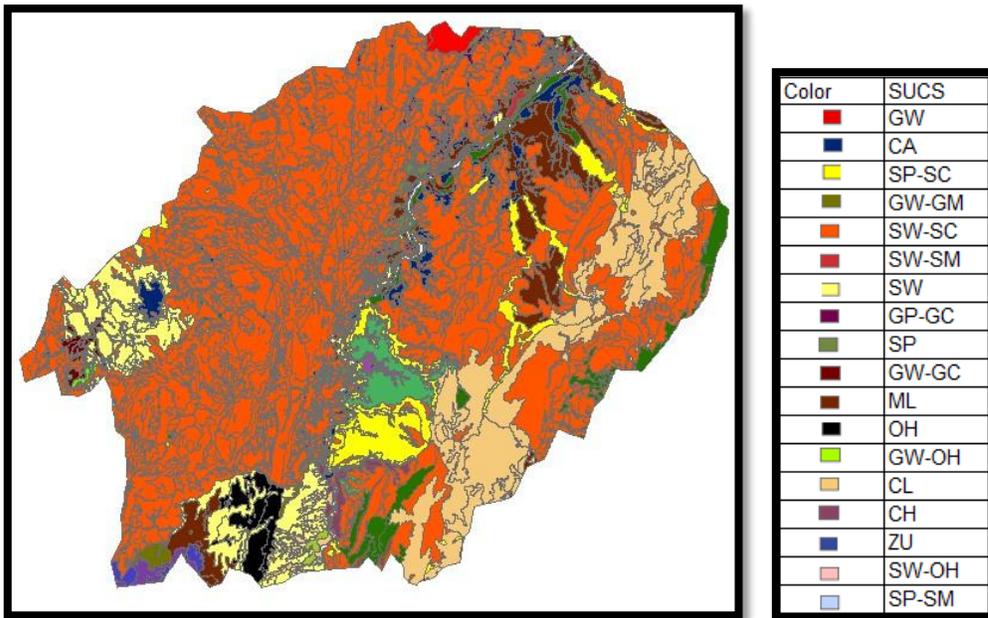
| | | | |
|---|-----|---------|-------------|
| ■ | MLG | 10.55 | SW-SC |
| ■ | MLI | 252.92 | SW-SC |
| ■ | MQA | 991.37 | SW-SC |
| ■ | MQD | 12.26 | SW-SC |
| ■ | MQG | 14.55 | CL |
| ■ | MQH | 313.30 | SW-SC |
| ■ | MQI | 68.99 | SW-SC |
| ■ | MVA | 1228.92 | CL |
| ■ | MVE | 53.41 | SW-SC |
| ■ | MVF | 89.13 | SW-SC |
| ■ | MVH | 597.86 | CL |
| ■ | PVA | 794.12 | ML |
| ■ | PVB | 20.78 | ML |
| ■ | PVF | 60.01 | SW-SC |
| ■ | RVA | 194.64 | SW-SM |
| ■ | RVB | 103.72 | ML |
| ■ | RVC | 93.04 | ML |
| ■ | VVA | 496.50 | SP-SC |
| ■ | VVB | 30.66 | SP-SC |
| ■ | ZU | 2.50 | Zona Urbana |
| | | 9311.81 | |

Fuente. Propia

De acuerdo a la información anterior y según la clasificación que permite el IGAC se encontró en la zona de estudio tiene 117 tipos de suelos diferentes. El departamento que tiene más variedad en los suelos es el departamento de Cundinamarca con 31 tipos de suelos diferentes a pesar de que el departamento abarca tan solo el 5.14% del total de la cuenca como se pudo evidenciar en la tabla 2.

Aunque la clasificación dada gracias a los levantamientos en terreno del IGAC da una información muy precisa acerca de los estratos encontrados en cada departamento, para entender mejor el objetivo de este documento se clasificó las características dadas en los perfiles de cada tipo de suelo y en la proporción de las partículas a su equivalente de acuerdo al sistema de unidad de clasificación de suelo SUCS para entender mejor su comportamiento y de este modo, caracterizar los suelos arcillosos presentes en la zona de estudio correspondiente. La siguiente ilustración muestra el sistema hidrográfico en mención clasificado.

Ilustración 21. Clasificación de los suelos según la UCS



Fuente. Autor

Como se puede observar en la siguiente imagen hay 14 tipos de suelos distintos según la clasificación de la SUCS, la mayor parte corresponde a la categoría “Suelo arenoso bien gradado con contenido de arcilla” (SP-SC) y se encuentra predominante en el departamento de Antioquía, el cual es el que tiene territorio del sistema hidrográfico en estudio.

Para entender el comportamiento geotécnico de los suelos arcillosos que son objeto de estudio en este documento se mostrará en la siguiente tabla la distribución de los suelos clasificados según la SUCS.

Tabla 21. Clasificación de los suelos de acuerdo al UCS

| SUCS | Area km2 | Porcentaje Area |
|-------|-----------------|-----------------|
| GW | 609.81 | 2.14% |
| CA | 640.33 | 2.24% |
| SP-SC | 1419.53 | 4.98% |
| GW-GM | 194.79 | 0.68% |
| SW-SC | 16990.98 | 59.56% |
| SW-SM | 863.48 | 3.03% |
| SW | 1631.06 | 5.72% |
| GP-GC | 465.63 | 1.63% |
| SP | 179.65 | 0.63% |
| GW-GC | 143.15 | 0.50% |
| ML | 1457.66 | 5.11% |
| OH | 410.26 | 1.44% |
| GW-OH | 1.93 | 0.01% |
| CL | 3196.91 | 11.21% |
| CH | 125.81 | 0.44% |
| ZU | 33.85 | 0.12% |
| SW-OH | 160.39 | 0.56% |
| SP-SM | 0.97 | 0.01% |
| | 28526.18 | |

Fuente. Autores

De acuerdo a la anterior tabla se puede observar que el suelo dominante en la zona de estudio es el arenoso bien gradado con contenido arcilla (Tipo SW-SC) con un 59.56%, donde la mayoría se encuentra en el departamento de Antioquía el cual es el departamento con mayor territorio dentro de la subcuenca. El segundo suelo dominante es el *arcilloso de baja plasticidad* CL el cual ocupa un 11.21% y se encuentra en el departamento de Boyacá y Santander como se puede observar en la ilustración 10.

Teniendo en cuenta la clasificación de la SUCS la siguiente tabla ilustra los suelos que tienen un contenido de arcilla mayor al 5% el cual permitirá realizar el análisis correspondiente en el tramo III y IV del río Magdalena.

Tabla 22. Clasificación de los suelos de acuerdo al porcentaje de arcilla

| Suelo | Area | Porcentaje |
|--------------|-----------------|----------------|
| CL | 3196.9084 | 11.21% |
| CH | 125.80678 | 0.44% |
| Con arcilla | 19019.291 | 66.67% |
| Sin arcilla | 6184.1732 | 21.68% |
| Total | 28526.18 | 100.00% |

Fuente. Autores.

Como se puede observar, el 78.32% del suelo en la zona de estudio delimitada tiene un contenido mayor al 5% de arcilla de acuerdo a los levantamientos realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC ; frente al 65.66% del suelo encontrado en el Canal de Panamá, lo que indica que en el tramo III y IV del río Magdalena es de origen arenoso con alto contenido de arcilla y arcilloso con baja plasticidad y lo que permite la validez de la comparación entre ambos sistemas hidrográficos en el marco de posibles diseños de obras hidráulicas en el afluente más importante de Colombia ya que las dos zonas tienen un contenido de arcilla mayor al 50%.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, a continuación, se muestran los parámetros de los suelos arcillosos extraídos de estudios realizados por el IGAC en asociación con las corporaciones autónomas regionales de los departamentos.

11.4. . Límites de Atterberg

A partir de información suministrada por corporaciones Autónomas regionales de los departamentos de Antioquía, Cundinamarca, Boyacá, caldas, Santander y Bolivar se recopiló la siguiente información entre los años 2007 y 2009.

Tabla 23. Recopilación Límites de Atterberg del tramo III y IV del río Magdalena

| Limite líquido en % | Límite plástico en % | Índice de plasticidad |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 52.46 | 27.87 | 24.59 |
| 52.34 | 28.78 | 23.56 |
| 53.45 | 27.68 | 25.76 |
| 55.46 | 28.20 | 27.26 |
| 51.67 | 28.34 | 23.33 |
| 53.42 | 27.68 | 25.74 |
| 55.67 | 27.01 | 28.66 |
| 49.56 | 27.09 | 22.47 |
| 50.90 | 27.45 | 23.45 |
| 51.23 | 28.89 | 22.34 |
| 51.09 | 27.49 | 23.60 |
| 51.08 | 26.67 | 24.41 |
| 50.67 | 27.86 | 22.81 |
| 52.23 | 27.09 | 25.14 |
| 51.20 | 28.76 | 22.44 |
| 50.12 | 28.65 | 21.47 |

| | | |
|-------|-------|-------|
| 50.43 | 26.90 | 23.53 |
| 51.54 | 27.83 | 23.71 |
| 52.34 | 27.10 | 25.24 |
| 51.45 | 27.56 | 23.89 |

Fuente. Corporaciones Autónomas regionales

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores del límite líquido están entre 50% y 60% y el límite plástico oscila entre el 20% y el 30%. Estos valores tienen concordancia con lo mencionado en informes de laboratorio realizados por el departamento de suelos de la Universidad Nacional de Colombia para el caso de arcillas con alta plasticidad o estratos que tienen en su composición entre un 5% y un 12% del material fino.

Dicho lo anterior, el índice de plasticidad calculado como la diferencia del límite líquido y el límite plástico arrojó valores entre el 25% y el 35%. A través de promedio aritmético se pudo determinar que el índice de plasticidad obtenido en la cuenca hidrográfica del tramo III y IV del río Magdalena es de 24.17%, el límite líquido promedio es de 51.92 % y el límite plástico promedio es de 27.75 %.

Teniendo en cuenta los anteriores valores, tal cual como se hizo en el anterior capítulo; se confirmará si el suelo es de alta plasticidad según la carta de Casagrande.

11.4.1. Clasificación según la carta de Casagrande

En este estudio, para el tramo III y IV, el valor de la línea A se muestra a continuación.

$$IPA=0.73(LP-LL)$$

$$IPA=0.73(51.92-27.75)$$

$$IPA = 17.64$$

Como este valor es menor al límite plástico, se confirma que este suelo es dominado por una arcilla de alta plasticidad CH.

11.4.2. Índice de liquidez

Según estudios en campo realizados por las corporaciones Autónomas regionales CAR y el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM, el valor de humedad natural del suelo (W_n) del 50.94% en el tramo III y IV del río Magdalena. Teniendo en cuenta lo anterior, el valor del índice de liquidez se muestra a continuación.

$$IL = \frac{50.94 - 27.75}{24.17}$$

$$IL= 0.95$$

Tal como en el canal de Panamá, este suelo presenta un índice de liquidez entre 0 y 1 el cual lo caracteriza con un comportamiento típico de las arcillas.

11.5. Proctor modificado

Para determinar el grado de compactación del suelo, se evaluaron datos suministrado de las corporaciones autónomas regionales de los departamentos dónde está ubicada la cuenca se obtuvieron los siguientes datos de humedad optima y densidad seca máxima.

Tabla 24. Ensayo de Proctor Modificado en el río Magdalena

| MUESTRA | HUMEDAD OPTIMA (%) | DENSIDAD MÁXIMA(g/CM3) |
|-----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | 9.05 | 1.99 |
| 2 | 9.03 | 2.05 |
| 3 | 9.04 | 2.02 |
| Promedio | 9.04 | 2.02 |

Fuente. Corporación Autónoma regional del Santander.

Según la anterior tabla, a partir del promedio aritmético se obtuvo una densidad seca máxima de $2.02 \frac{g}{cm^3}$ y una humedad óptima de 9.04%

11.6. Ensayo de Corte directo

Una vez determinada la humedad óptima con el ensayo de Proctor modificado, se realizaron 15 ensayos de corte directo con dicha humedad, la cual fue de 9,0%, en total estos ensayos suman 45 especímenes de acuerdo a la carga aplicada que iba desde 0.5, 1.0 y 2.0 Kg/cm². Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 25. Ensayo de Corte directo en el tramo III y IV del río Magdalena

| Ensayo | Humedad (%) | Densidad Húmeda (gr/cm3) | Φ | Densidad seca (gr/cm3) |
|--------------------|-------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| 1 | 9.33 | 1.9 | 41.7 | 1.39 |
| 2 | 9.32 | 1.84 | 38.5 | 1.69 |
| 3 | 8.83 | 1.84 | 40.5 | 1.69 |
| 4 | 8.96 | 1.86 | 37.3 | 1.71 |
| 5 | 9.38 | 1.78 | 38.2 | 1.63 |
| 6 | 8.93 | 1.93 | 37.3 | 1.77 |
| 7 | 9.19 | 1.83 | 39 | 1.68 |
| 8 | 9.12 | 1.95 | 38 | 1.79 |
| 9 | 9.06 | 1.98 | 37.4 | 1.82 |
| 10 | 9.06 | 1.97 | 38.1 | 1.81 |
| 11 | 8.93 | 1.93 | 37.9 | 1.77 |
| 12 | 8.98 | 1.84 | 38.3 | 1.69 |
| 13 | 8.92 | 1.86 | 38.5 | 1.71 |
| 14 | 9.09 | 1.86 | 38.1 | 1.71 |
| 15 | 9.04 | 1.86 | 38.5 | 1.71 |
| Promedio | 9.08 | 1.88 | 38.49 | 1.70 |
| D. Estándar | 0.16 | 0.06 | 1.14 | 0.10 |
| C variación | 1.76 | 2.98 | 2.97 | 5.79 |

Fuente. Corporación Autónoma regional de Santander.

Como se puede observar en la anterior tabla, los coeficientes de variación oscilan entre 1.76 % y 5.79%, lo cual indica un comportamiento normal en el flujo de datos ya que Pascal (1676) plantea que para que los datos sean confiables deben estar entre un rango de 0% al 16%.

11.7. Ensayo del CBR

Al igual que en la cuenca del canal de Panamá, en este ensayo se analizaron 15 muestras en los departamentos de Antioquía, Bolívar, Boyacá, Caldas, Cundinamarca y Santander según

lo establecido por el departamento de tránsito de California y se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 26. Ensayo del CBR para el tramo III y IV del río Magdalena

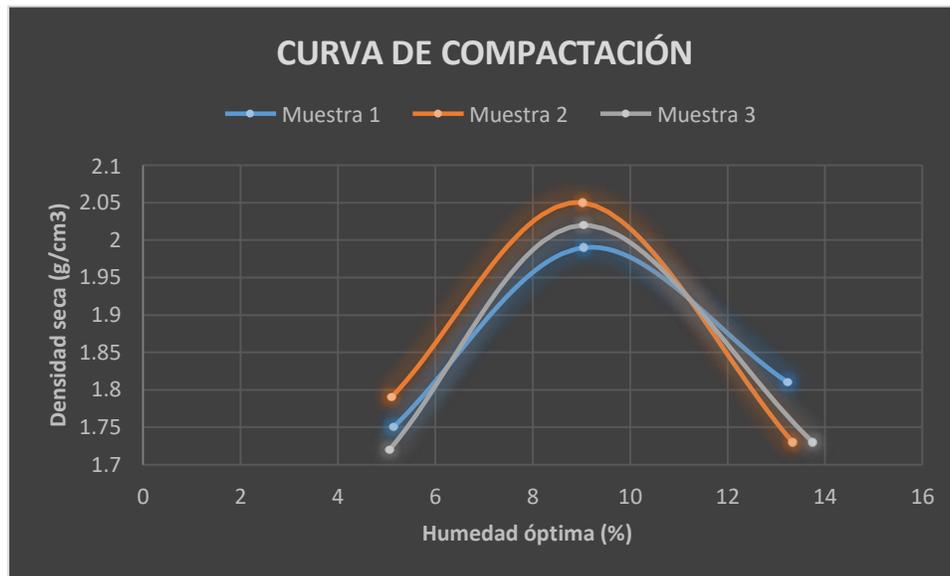
| Muestra | Humedad (%) | CBR (%) | Y 56 golpes (g/cm3) | Y 25 golpes (g/cm3) | Y12 golpes (g/cm3) |
|---------------------|--------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1 | 9.33 | 15.16 | 1.98 | 1.93 | 1.86 |
| 2 | 8.91 | 15.14 | 2.01 | 1.95 | 1.9 |
| 3 | 9.02 | 15.12 | 2.07 | 1.91 | 1.8 |
| 4 | 8.95 | 15.06 | 2.16 | 1.99 | 1.82 |
| 5 | 8.93 | 15.43 | 2.24 | 1.93 | 1.73 |
| 6 | 9 | 14.86 | 2.14 | 1.82 | 1.62 |
| 7 | 9.36 | 15.32 | 2.32 | 1.92 | 1.71 |
| 8 | 9.13 | 15.23 | 2.05 | 1.76 | 1.61 |
| 9 | 8.99 | 15.04 | 2.11 | 1.76 | 1.62 |
| 10 | 8.94 | 15.67 | 2.25 | 1.74 | 1.69 |
| 11 | 9 | 15.65 | 2.16 | 1.76 | 1.58 |
| 12 | 8.99 | 14.76 | 2.06 | 1.76 | 1.58 |
| 13 | 9.01 | 15.02 | 2.11 | 1.82 | 1.58 |
| 14 | 9.03 | 15.32 | 2.18 | 1.7 | 1.64 |
| 15 | 9.02 | 15.64 | 2.09 | 1.76 | 1.54 |
| Promedio | 9.04 | 15.20 | 2.13 | 1.83 | 1.69 |
| D. Estándar | 0.13 | 0.27 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| C. Variación | 1.44 | 1.77 | 4.23 | 4.92 | 6.51 |

Fuente. Corporación Autónoma regional de Santander.

11.8. Análisis Proctor modificado

A continuación, se muestra la compilación de las tres muestras en una curva típica de compactación según los datos generados por las Corporaciones Autónomas Regionales.

Ilustración 22. Curva de compactación para el tramo III y IV del río Magdalena



Fuente. Autores

Como se puede observar en la anterior gráfica, las tres muestras que se tomaron como referencia para desarrollar las comparaciones correspondientes, muestran un comportamiento típico según lo descrito en la Norma Invías E-142 de Colombia tal como en el análisis del Canal de Panamá. También puede observarse en este conjunto de datos que las gráficas no están distantes entre sí, lo cual indica la veracidad de estos datos y como se mencionó anteriormente, se maneja una densidad seca máxima de $2.02 \frac{g}{cm^3}$ a una humedad de 9.04%, lo cual indica un comportamiento típico de un suelo con alto contenido de arcilla,

ya que con una humedad mayor al 9.04% este al ser menos denso va a resistir menos carga y ante un eventual cambio volumétrico dado por el agua.

11.9. Análisis de ensayo de corte directo.

Como se puede observar en la tabla 10, la densidad húmeda máxima es de $1.88 \frac{g}{cm^3}$ mientras que la densidad seca es de $1.70 \frac{g}{cm^3}$, el cual representa una diferencia porcentual del 10 % entre ambos valores y según Braja M. Das⁴⁷ al presentarse una diferencia mayor o igual 10% el suelo es muy inestable en función del contenido de humedad en su composición, por lo tanto, su capacidad de respuesta es mucho menor a suelos que tienen composición granulométrica más gruesa.

11.10. Análisis del CBR

Este suelo al tener un valor promedio del CBR del 15.20 %, se encuentra en la categoría de regular, donde se justifica este comportamiento con el hecho de que su composición sea mayormente de arena con alto contenido de arcilla (SW-SC) como se muestra en la tabla del departamento de tránsito de California.

⁴⁷ ENSAYO DE CORTE DIRECTO PARA UNA ARENA DENSA Y SUELTA. [En Línea]. [Consultado 25 agosto. 2012]. Disponible en

12. ANALISIS COMPARATIVO

A continuación, se muestra un conjunto de comparaciones en varios aspectos importantes entre la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá y el Tramo III y IV de la unidad de Navegabilidad Funcional del río Magdalena.

12.1. *Tamaño*

La cuenca del Canal de Panamá tiene un área de 2711.69 kilómetros cuadrados, mientras que la cuenca del tramo III y IV del río Magdalena cuenta con 28526.18 kilómetros cuadrados, lo cual representa un tamaño 10.5 veces mayor, sin embargo, ambos sistemas en los estratos de suelo tienen un porcentaje de suelos arcillosos que supera el 50%, lo que permite que las comparaciones que se ilustrarán a continuación adquieran validez.

12.2. *Composición de suelos*

En el canal de Panamá el 95.24% del suelo tiene un contenido de arcilla mayor al 5% en su composición mientras que el 78.32% del Tramo III y IV del río Magdalena cuentan con un contenido del fino mayor a la veinteava parte del total, lo que indica que según las informaciones de las entidades correspondientes, estos suelos deben tratarse de una forma muy cuidadosa por el cambio volumétrico que sufren y además, los tratamientos que se

aplicaron en la ampliación del canal de Panamá pueden implementarse en el río Magdalena por sus características semejantes.

12.3. Límites de Atterberg.

La siguiente tabla ilustra los 5 parámetros obtenidos tanto en la cuenca del Canal de Panamá como en el tramo III y IV del río Magdalena.

Tabla 27. Comparaciones entre límites de Atterberg entre el canal de Panamá y el tramo III y IV del río Magdalena

| Parámetro | Canal de Panamá | Tramo III y IV río Magdalena |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Límite líquido (%) | 55.06 | 51.92 |
| Límite plástico (%) | 24.16 | 27.75 |
| Índice de Plasticidad (%) | 30.90 | 24.71 |
| Línea A | 22.55 | 17.64 |
| Índice de Liquidez | 0.91 | 0.95 |

Fuente. Autores

Como se puede observar en la anterior tabla, en ambos casos el límite líquido supera el 50% lo que confirma la composición dominante arcillosa en los dos sectores. En este parámetro la diferencia es del 3.14%, lo que permite contemplar una similitud en el cambio de estado de los suelos en las zonas de estudio. El límite plástico entre ambas zonas de estudio tan solo muestra una diferencia porcentual del 3.59%, mientras que el índice de plasticidad que es el valor con más variación es del 6.19%, lo que confirma la similitud en el comportamiento de ambos suelos en la consistencia. Por otra parte, como el índice de plasticidad en los dos sistemas hidrográficos supera el 20%, se considera que tiene una alta plasticidad, es decir el

suelo requiere gran cantidad de agua para cambiar de estado plástico a semilíquido⁴⁸, sin embargo, como las obras implementadas en el Canal de Panamá estaban realizadas sobre los cuerpos acuáticos, es muy fácil que al no controlarse en la implementación del Magdalena que el suelo sufra variaciones en su consistencia.

Por otra parte, el índice de liquidez entre ambos sistemas presenta una variación del 4%, siendo un poco más blando el suelo del río Magdalena ante la aplicación de cargas.

12.4. *Proctor Modificado*

La densidad seca máxima en las muestras analizadas dentro del canal de Panamá es de $2.05 \frac{g}{cm^3}$ a una humedad óptima de 9.39%, mientras que en el Tramo III y IV del río Magdalena se obtuvo una densidad seca máxima de $2.02 \frac{g}{cm^3}$ al 9.39% del contenido de agua, lo que indica nuevamente una cercanía entre los valores de densidad el cual solo tiene una variación de 0.03 y la humedad de 0.35%, lo que nuevamente marca una similitud entre las zona modelo y de implementación. Las densidades máximas obtenidas son superiores a las bases y a la subbase granulares utilizadas en pavimentos e inferior a la densidad del concreto de $2.4 \frac{g}{cm^3}$, sin embargo, al tener alto contenido de agua, la relación masa-volumen hace de los suelos en mención poco resistente a las cargas aplicadas tanto en el sector del Canal de Panamá como en el tramo III y IV del río Magdalena con grandes similitudes.

⁴⁸ LAMBE, T. William. MECANICA DE SUELOS: Suelos con agua-Régimen estático o flujo establecido. 2 ed. México: Editorial Limusa S.A, 1996. 323p.

12.5. Ensayo de Corte directo

A continuación, se muestran los parámetros promedio obtenidos en esta prueba.

Tabla 28. Comparaciones del corte directo entre el Canal de Panamá y el tramo III y IV del río Magdalena

| Parámetro | Canal de Panamá | Tramo III y IV |
|---------------------------------------|-----------------|----------------|
| Humedad (%) | 8.73 | 9.08 |
| Densidad Húmeda (gr/cm ³) | 1.97 | 1.88 |
| Angulo de fricción (°) | 34.42 | 38.49 |
| Densidad seca (gr/cm ³) | 1.67 | 1.70 |

Fuente. Autores

Como se puede observar en la anterior tabla, como en análisis preliminares los valores de estos parámetros son muy similares. La humedad entre el Canal de Panamá y el tramo III y IV del río Magdalena varía un 0.35%, la densidad húmeda en $0.09 \frac{g}{cm^3}$ mientras que la densidad seca es de $0.03 \frac{g}{cm^3}$ y el ángulo de fricción varía un 4.07 grados.

Respecto a la densidad húmeda, los valores obtenidos no alcanzan a igualar a los alcanzados en la prueba de Proctor modificado, lo que confirma la vulnerabilidad en ambos terrenos ante la aplicación de cargas. Por otra parte, los ángulos de fricción interna al ser mayores de 30° son típicos de suelos cohesivos, es decir en ambos estratos, las partículas tienden a estar muy unidas por efectos electroquímicos⁴⁹, lo que indica que no es tan probable que ante excavaciones sufran derrumbes, pero pueden agrietarse en función del contenido de humedad.

⁴⁹ NARSILIO, Guillermo y SANTAMARIA, Carlos. Clasificación de Suelo: Fundamento Físico: Instituto Tecnológico de Georgia, USA. [En Línea]. [Consultado 23 agosto. 2012]. Disponible .

12.5. Ensayo del CBR

Para el Canal de Panamá se encontró un valor de CBR del 11.10%, mientras que en el tramo III y IV se encontró un valor del 15.20%, ambos valores dentro de la clasificación del departamento de tránsito de California se encuentran dentro de la categoría de “regular”. Estos valores tienen una diferencia porcentual del 4.10%, lo que permite comparar los suelos en el aspecto de resistencia. Según Lambe y Whitman (1994), un suelo con un módulo CBR está relacionado al tener una baja capacidad portante y unos asentamientos diferenciales bastante grandes, que según estudios de las corporaciones Autónomas regionales pueden variar a razón de 2 centímetros por año en algunos puntos cercanos al municipio de Barrancabermeja⁵⁰

⁵⁰ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER, Por lo cual se establecen las condiciones para la navegabilidad del río Magdalena entre Puerto Wilches y Barrancabermeja. Bogotá. 2008

13. CONCLUSIONES

1. La proporción de suelos arcillosos en el Canal de Panamá respecto al tramo III y IV del río Magdalena es mayor; es decir los estratos que conforman el sistema hidrográfico del paso Interoceánico presenta condiciones más desfavorables las cuales se manejaron con proporciones de Cal y de cenizas volcánicas o geotextiles; por lo tanto, la creación de esclusas y obras similares pueden implementarse en el río Magdalena.
2. En un área 10 veces más grande como la del sistema Hidrográfico correspondiente al tramo III y IV del río Magdalena se encuentra un rango de plasticidad menor que la del canal de Panamá, aunque los resultados están en el mismo rango, ya que no superan el 5% de diferencia entre ambos valores; por lo tanto, se pueden aplicar procedimientos semejantes a los implementados en el Canal de Panamá
3. En el momento de realizar excavaciones para la cimentación de las obras hidráulicas son poco probables los deslizamientos debido a que los ángulos de fricción fueron mayores de 30° e indican que los suelos del tramo III y IV son cohesivos, propiedad de las arcillas expansivas.
4. La visita técnica Internacional llevada a cabo en el año 2019 permitió la recolección de información importante para poderla comparar con un sistema semejante, por lo tanto, al estar directamente en el lugar de referencia el registro y con especialistas que resuelvan inquietudes de los interesados, es mucho más preciso y actualizado que al realizar una consulta especializada como en el caso del tramo III y IV del río Magdalena.

14. RECOMEDACIONES

1. Se insta a que si bien, se obtuvieron valores muy parecidos en los dos sistemas hidrográficos a profundizar los parámetros presentados en esta monografía para la implementación de las obras que contemplen la regulación del caudal entre el Tramo III y IV de la Unidad Funcional de Navegabilidad del río Magdalena en los puntos dónde se realicen las intervenciones de acuerdo a los criterios de prefactibilidad y factibilidad.
2. Se recomienda realizar un estudio de consolidación unidimensional en la zona dónde se implementen dichas intervenciones, debido a que los valores presentados en la monografía indica que las obras civiles realizadas pueden colapsar sino se evalúa este aspecto a detalle.
3. Se exhorta a evaluar la posibilidad de crear un lago artificial en el valle del magdalena medio, como el Lago Gatun en Panamá, sabiendo que la capacidad de respuesta del suelo es semejante, puede regular los caudales requeridos para la navegabilidad del afluente más importante de Colombia.

15. BIBLIOGRAFIA

1. MDAS, Braja. Fundamento de ingeniería de Cimentaciones, ed.7. Cengage learning. Madrid España. 776P
2. DELGADILLO SANTANDER Alejandro y MORENO BARRIOS Ade (2005). Ensayo de límites. 28P.
3. PANAMA CANAL AUTHORITY, Julio 2009, “Geological and Geotechnical Investigations for the Boriquem DAM 1E and PC-14. Panamá City.
4. CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE ANTIOQUÍA. Diagnóstico y localización tramo III y IV rio magdalena. Bogotá D.C. 2017. 366P.
5. INSTITUTO COSTARRICENSE DE SUELOS. Principales fuentes de Costa Rica. San José de Costa Rica. 2004
6. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Resolución 2833. Por lo cual se establecen los objetivos de calidad de agua para la cuenca del río Sumapaz a lograr en el año 2020. Bogotá D.C. 2008
7. RUBIO RIVAS pedro y AREVALO ARIAS Juan M. Clasificación del suelo por capacidad de uso. En: Estudio General de Suelos y Zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Bogotá. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2001. P.388.
8. MALDONADO A., Zuemmy C. (s.f.). Clasificación del río Sonora tramo Mazocahui-presa. Rodríguez A, Capítulo 5. Capacidad de asimilación. [Tesis]. Disponible en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5404/Capitulo5.pdf>

9. IAH (1995). Hydrogeological Maps: A Guideline and Standard Leyend, Preparado con la colaboración de miembros de IAH/IAHS/IHP con financiamiento de Unesco.
10. PEREZ ORTIZ, Miguel. Consideraciones ríos de Norteamérica. New York. 1994. Ed. Cengage Learning. 345p.
11. OECD (2001). Environmental Indicators. Towards Sustainable Development Libro Blanco. Evaluación de la calidad de agua (Libro Blanco de España, cap. 3, numeral 3.1) La calidad de las aguas. España
12. El artículo tomado hace parte de una serie de ocho artículos contratados para presentar en los foros regionales "¿Para dónde va el río Magdalena? Riesgos sociales, ambientales y económicos del proyecto de navegabilidad". [citado 14 abril, 2015] Disponible en Internet.
13. ORDOÑEZ, Jorge Iván. El rio Magdalena y su navegabilidad. Bogotá D.C. 2015. Editorial Norma. 163p
14. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 3930 (25 de octubre de 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Bogotá D.C. 2010
15. UNAM (2009). Contaminantes emergentes en el agua. Revista Digital, Vol.10 (8). Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art54/int54.htm>
16. VILLON BEJAR Máximo (1988). Hidrología. Instituto tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola. Cartago Costa Rica. 435P.
17. ORDOÑEZ, Jorge Iván. El rio Magdalena y su navegabilidad. Bogotá D.C. 2015. Editorial Norma. 163p
18. ARBUCK, E. y LUTGENS, F.K. (2005). "Ciencias de La Tierra: Una Introducción a La Geología Física". Editor Pearson Prentice Hall (Martín-Romo): Madrid-España, octava

- Edición. Arosemena, D (1997). Historia documental del Canal de Panamá. Panamá: Editorial Mariano Arosemena del Instituto de Cultura.
19. SOTELO NAVALPOTRO J.A., SOTELO PÉREZ, M., GARCIA QUIROGA, F. y SOTELO PEREZ, I. (2017). “Riscaldamento globale e impronta hídrica in Spagna”. Bollettino Della Società Geografica italiana, serie XIII, vol. X, pp. 257-269
 20. RODRIGUEZ, B. (2010). Los tratados Torrijos-Carter y el pacto de Neutralidad del Canal de Panamá. El Libertador. <https://www.ellibrepensador.com/2010/03/25/lostratados-torrijos-%E2%80%93carter-y-el-pacto-de-neutralidad-del-canal-de-panama/>
 21. INSTITUTO DE INVESTIFGACIÓN AGROPECUARIA DE PANAMÁ. Por lo cual se dictan disposiciones sobre el manejo de sedimentos en el canal de Panamá. 1963. Ciudad de Panamá. 345P.
 22. BELEÑO, Samuel Álvarez. Listos los diseños de las esclusas y compuertas para el Canal del Dique. EL UNIVERSAL. [En línea] 06 de 05 de 2017. <http://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/listos-los-disenos-de-las-esclusas-ycompuertas-para-el-canal-del-dique-252463>.
 23. CANAL PANAMÁ Elementos geométricos de la sección de un canal, [en línea]: [citado 26 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/libre/seccion.html> <http://micanaldepanama.com/ampliacion/>>
 24. ETESA, unimos a Panamá con energía, sitio [en línea]: [citado 20 agosto, 2017]. Disponible en Internet: 1 Informe Final de la Región Occidental de la Cuenca del Canal, [en línea]: [citado 20 agosto, 2017]. Disponible en Internet:

25. Slides at the Panama Canal by Mayor General George W. Goethals, U.S. Army
Governor of the Panama Canal, Washington. Governor printing office. 1916
26. UNESCO World Heritage center. Dike canal. Disponible en Internet:
<http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5756/>>
27. Alberto Aleman Zubieta Backhoe Dredger - Ship Technology. (n.d.). from
<https://www.ship-technology.com/projects/alberto-aleman-zubieta-backhoe-dredger/>
28. Ministerio de Ambiente desarrollo sostenible. (2017). RESOLUCION No. 1595 DE
2017. Retrieved from
[http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/b2-RESOL
1595.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/b2-RESOL1595.pdf)
29. ROOVERS, M. (1989). The removal, treatment and use of sediment from reservoirs
international water power & dam construction
30. SUAREZ BADILLO, Eulalio – RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Fundamentos de la
Mecánica de Suelos, Tomo I. Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tercera
edición. 1992. Pag 149-152.
31. TUPIA, Carlos y ALVA, Jorge, EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE
DEL TERRENO POR MEDIO DE UN EQUIPO DE PENETRACIÓN DINAMICA. XI
Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, nov. 2001.
32. BOWLES, Joseph E. 1980. Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil.
Bogotá, Colombia. Editorial Mc GRAW-HILL LATINOAMERICA, Pag 80-86
33. MALDONADO A., Zuemmy C. (s.f.). Clasificación del río Sonora tramo Mazocahui-
presa. Rodríguez A, Capítulo 5. Capacidad de asimilación. [Tesis]. Disponible
en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5404/Capitulo5.pdf>

34. OECD (2001). Environmental Indicators. Towards Sustainable Development Libro Blanco. Evaluación de la calidad de agua (Libro Blanco de España, cap. 3, numeral 3.1) La calidad de las aguas. España.
35. LAS MULAS DEL CANAL DE PANAMÁ. Lacanga.com. [en línea]. Disponible en Internet:
36. BELEÑO, Samuel Álvarez. Listos los diseños de las esclusas y compuertas para el Canal del Dique. EL UNIVERSAL. [En línea]. <http://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/listos-los-disenos-de-las-esclusas-ycompuertas-para-el-canal-del-dique-252463>
37. SCIENTIFIC AMERICAN, INC. Culebra cut the problem of the slides (November 09, 1912)
38. UNESCO World Heritage center. Dike canal [en línea]: Disponible en Internet: <http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5756/>
39. PROYECTO CHECUA CONTRA EROSIÓN - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. (1997), from <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-540739>
40. Roy Adolfo Ahumada Marco Ameglio S Rafael E Bárcenas P Guillermo O Chapman, R. A., Nicolás Corcione Ricardo De la Espriella Toral Norberto Delgado D Eduardo A Quirós B Alfredo Ramírez, J. R., & José Sosa A Jorge L Quijano Administrador Manuel E Benítez Subadministrador, J. A. (n.d.). Febrero 2013-No.58.
41. CRESPO VILLALAZ. Carlos. MECANICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES, 5 ed. Monterrey, México, Limusa, NORIEGA Editores, (1976.- 1980).

42. BONILLA GALLO, Elkin Yebrail y OCHOA OSORIO, Carlos Andrés. Correlación entre el ángulo de fricción interna y CBR tipo 1 para arenas arcillosas (SC): UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA 2010.
43. NARSILIO, Guillermo y SANTAMARIA, Carlos. Clasificación de Suelo: Fundamento Físico: Instituto Tecnológico de Georgia, USA. [En Línea]. [Consultado 23 agosto. 2012]. Disponible.
44. JIMENEZ SALAS. José A. MECANICA DEL SUELOS Y SUS APLICACIONES A LA INGENIERIA. Madrid, España, Editorial DOSSAT, 1954.
45. HUMBOLDT, Alejandro von. Sobre los bogas y remeros. En: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: Alejandro von Humboldt. Viajes por Colombia: Bogotá. 1982. [http:// www.lablaa.org/blaavirtual/exhibiciones/humboldt/diario/7.htm](http://www.lablaa.org/blaavirtual/exhibiciones/humboldt/diario/7.htm)
46. BENITEZ C Arias y W QUIROZ J (1980). Manual de conservación de suelos y agua. Ministerio de agricultura y alimentación. Lima, Perú.
47. ENSAYO DE CORTE DIRECTO PARA UNA ARENA DENSA Y SUELTA. [En Línea]. [Consultado 25 agosto. 2012].
48. LAMBE, T. William. MECANICA DE SUELOS: Suelos con agua-Régimen estático o flujo establecido. 2 ed. México: Editorial Limusa S.A, 1996. 323p.
49. NARSILIO, Guillermo y SANTAMARIA, Carlos. Clasificación de Suelo: Fundamento Físico: Instituto Tecnológico de Georgia, USA. [En Línea]. [Consultado 23 agosto. 2012]. Disponible.
50. CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE SANTANDER, Por lo cual se establecen las condiciones para la navegabilidad del río Magdalena entre Puerto Wilches y Barrancabermeja. Bogotá. 2008.

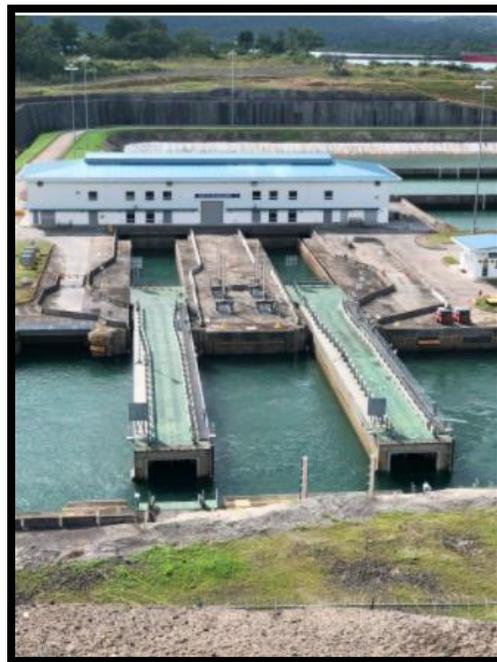
16. ANEXOS.

Fotografía 1. Lago y Esclusa de Gatum



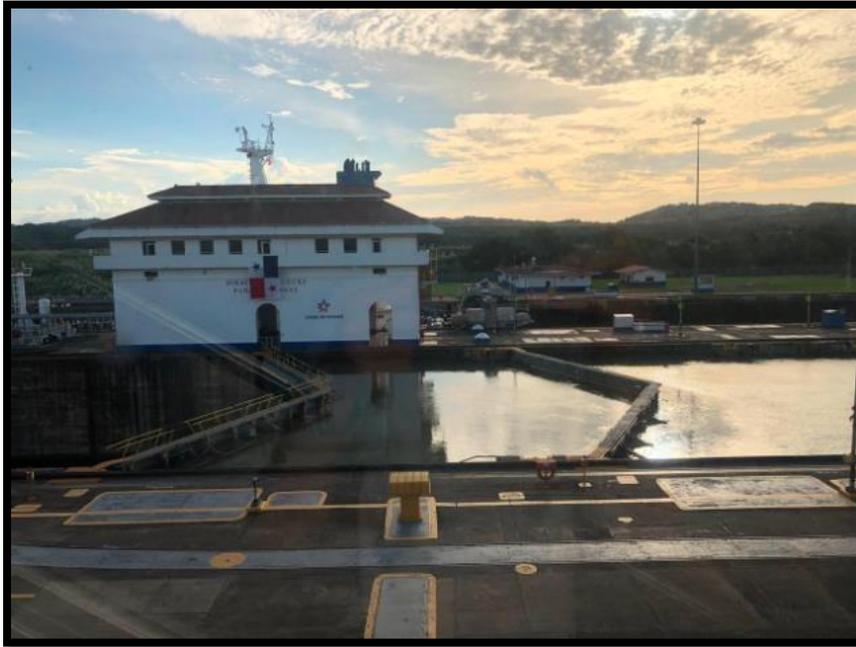
Fuente. Autores

Fotografía 2. Esclusa de Gatum



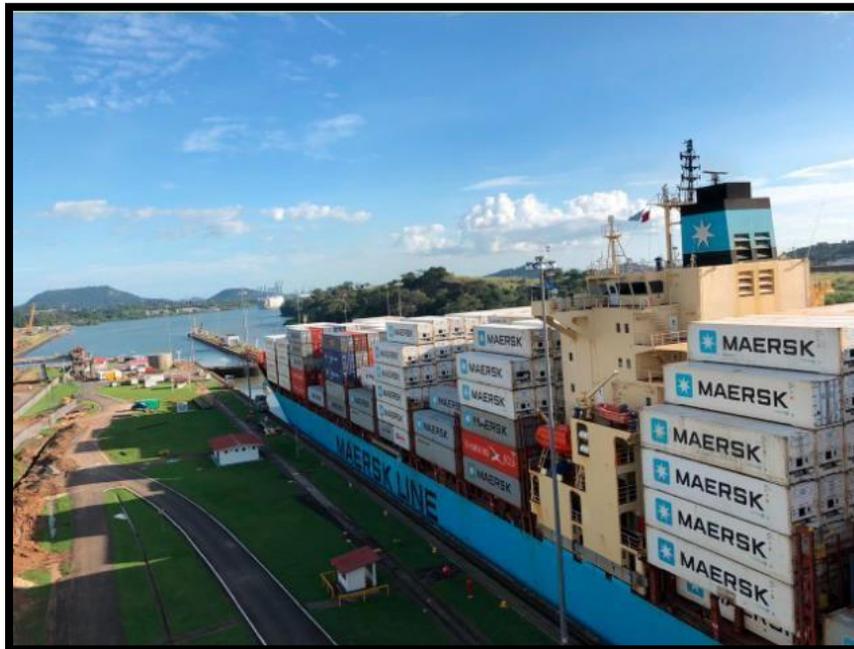
Fuente. Propia

Fotografía 3. Biblioteca Canal de Panamá



Fuente. Propia

Fotografía 4. Buque pasando por el canal de Panamá



Fuente. Propia