

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y  
PETRÓLEOS**

**MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICO Y MODELO  
GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 3D DE LA CIUDAD DE PORTOVIEJO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA GEÓLOGA**

**OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**KELLY GRACE ALVARADO ALCÍVAR**  
kellygeo86@gmail.com

**DIRECTOR: MSc. DIEGO RENATO CÁRDENAS CÁRDENAS**  
diego.cardenas@epn.edu.ec

**CO-DIRECTORA: PhD. ISABEL CAROLINA BERNAL CARRERA**  
isabel.bernal@epn.edu.ec

**Quito, mayo 2017**

## DECLARACIÓN

Yo, Kelly Grace Alvarado Alcívar, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

KELLY GRACE ALVARADO ALCÍVAR

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Kelly Grace Alvarado Alcívar, bajo mi supervisión.

---

MSc. Diego Cárdenas  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

PhD. Carolina Bernal  
**CO-DIRECTORA DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento y a quien es mérito de este triunfo es a Dios y a mi madre Elizabeth. A Dios por darme la sabiduría y una madre única, muy inteligente que me inculcó inmensurables virtudes, me enseñó con su ejemplo a no darme por vencida, a seguir luchando siempre, ser valiente para afrontar la vida. A mi ñaña Angie que con su sabiduría me ha ayudado en incontables ocasiones a lo largo de mi carrera. También agradezco a mi ñaño Layonel y a mi Papá que han estado ayudándome a lo largo de mi carrera.

A Gema y José Luís mis primos quienes me brindaron su ayuda en Manabí. Por ellos, por la gente de Manabí, mi familia, fue inspirado este proyecto para que pueda servir a futuro como base de investigación para prevenir posibles daños estructurales en esta provincia hermosa

A mi novio Carlos que fue un gran apoyo en los años más complicados de la carrera y con quien afrontamos grandes retos y compartimos buenos momentos.

Al MSc. Diego Cárdenas que me guio y apoyó durante la investigación, quien fue un gran profesor y amigo. A la MSc. Eliana Jiménez que depositó su confianza en mi persona para realizar este proyecto a pesar de todos los obstáculos que existían, de la misma forma le agradezco al PhD. Hugo Yepes.

Dentro del desarrollo de este proyecto conocí a gente espléndida tanto por su intelecto como por sus virtudes: Michael Shmidt, Romina, y los sabios y valiosos aportes del Ing. Realpe, Andrés Muñoz y Sebastián Morales. También agradezco a la contribución del equipo de FUNVISIS, IGEPN, y al apoyo del GAD de Portoviejo.

A mis amigos que estuvieron siempre apoyándome a Kimy, Santiago, Oscar, Fabián, Francisco, y Jhonny. También agradezco a los consejos del PhD. José Luís Román y el apoyo de la PhD. Carolina Bernal.



## DEDICATORIA

*A quien amo desde mi uso de razón  
a mi hermosa madre Elizabeth,  
A mis queridos hermanos Angie y Layonel,  
A mi padre Franklin  
Y a mí amado novio Carlos.*

## CONTENIDO

<i>DECLARACIÓN</i> .....	<i>II</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i> .....	<i>IV</i>
<i>DEDICATORIA</i> .....	<i>V</i>
<i>CONTENIDO</i> .....	<i>VI</i>
<i>LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS</i> .....	<i>X</i>
<i>ÌNDICE DE FIGURAS</i> .....	<i>XI</i>
<i>INDICE DE TABLAS</i> .....	<i>XIV</i>
<i>ÍNDICE DE ANEXOS</i> .....	<i>XIV</i>
<i>RESUMEN</i> .....	<i>XV</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>XVI</i>
<i>CAPÍTULO I</i> .....	<i>1</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	<i>1</i>
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICATIVOS.....	<i>1</i>
1.2 OBJETIVOS .....	<i>1</i>
1.2.1 Objetivo General.....	<i>1</i>
1.2.2 Objetivos Específicos .....	<i>1</i>
1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	<i>2</i>
1.4 SÍNTESIS DE ESTUDIOS PREVIOS .....	<i>3</i>
<i>CAPÍTULO II</i> .....	<i>3</i>
<i>MARCO REFERENCIAL</i> .....	<i>3</i>
2.1 CLIMA Y PRECIPITACIONES.....	<i>3</i>
2.2 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA .....	<i>5</i>
2.3 AMBIENTE GEODINÁMICO ACTUAL.....	<i>6</i>
2.4 GEOLOGÍA REGIONAL .....	<i>8</i>
2.5 GEOLOGÍA LOCAL.....	<i>9</i>
2.5.1 Formación Dos Bocas .....	<i>10</i>
2.5.2 Formación Villingota .....	<i>11</i>
2.5.3 Formación Onzole .....	<i>11</i>
2.5.4 Depósitos del Cuaternario.....	<i>12</i>
2.6 TECTÓNICA REGIONAL Y SISMICIDAD .....	<i>13</i>
<i>CAPITULO III</i> .....	<i>15</i>
<i>MARCO TEÓRICO</i> .....	<i>15</i>
3.1 SUELOS.....	<i>15</i>
3.1.1 Formación.....	<i>15</i>
3.1.2 Depósitos del Suelo en la Naturaleza .....	<i>16</i>
3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS .....	<i>17</i>
3.2.1 Tamaño y Mineralogía.....	<i>17</i>

3.2.3	Consistencia Del Suelo .....	18
3.2.3.1	Límites de Atterberg .....	19
3.2.3.2	Índice De Plasticidad .....	20
3.2.3.3	Índice De Liquidez .....	21
3.2.3.4	Carta De Plasticidad .....	21
3.2.4	Actividad .....	22
3.2.5	Clasificación De Los Suelos .....	23
3.2.5.1	Sistema Unificado De Clasificación De Suelos (SUCS) .....	23
3.3	CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS DE LOS SUELOS .....	25
3.3.1	Expansividad .....	25
3.3.1.1	Potencial De Expansividad .....	25
3.3.1.2	Presión De Hinchamiento .....	28
3.3.2	Módulo Elástico de Cizalladura .....	28
3.3.2.1	Módulo Elástico de Cizalladura Máximo .....	29
3.4	RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS DE LOS SUELOS .....	30
3.4.1	Gravedad específica (Gs) .....	30
3.4.2	Contenido de Humedad (w) .....	30
3.4.3	Porosidad (n) .....	30
3.4.4	Índice de vacíos (e) .....	30
3.4.5	Grado de saturación (S) .....	30
3.5	EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO .....	31
3.5.1	Métodos Geofísicos .....	31
3.5.1.1	Refracción por Micro-Tremores (ReMi) .....	31
3.5.2	Sondeos de Perforación .....	32
3.5.3	Prueba de Penetración Estándar (SPT) .....	32
3.5.3.1	Factores de Corrección .....	33
3.6	MAPAS GEOTÉCNICOS .....	34
3.6.1	Tipos de Mapas Geotécnicos .....	34
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>35</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>		<b>35</b>
4.1	ANÁLISIS DE LA SATURACIÓN DE AGUA EN EL SUELO .....	35
4.1.1	Análisis de las Épocas de Estiaje y Riada .....	35
4.1.2	Procesamiento de Imágenes Satelitales para la Estimación de Zonas Propensas a la Saturación de Agua en el Suelo .....	37
4.1.3	Mapa de Estimación de Saturación de Agua en el Suelo .....	39
4.2	MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS .....	39
4.3	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS .....	41
4.4	CORRELACIONES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL .....	42
4.5	RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS CON LAS VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE ( $V_s$ ) DE LOS ENSAYOS ReMi. ....	42
4.6	DETERMINACIÓN DE ECUACIONES MEDIANTE LA CORRELACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE ( $V_s$ ) Y LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTANDAR ( $N_{SPT} - N_{60}$ ) .....	43
4.7	ELABORACIÓN DE PERFILES ESTRATIGRÁFICOS-GEOTÉCNICOS .....	44
4.8	MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICO .....	45

4.9	DISEÑO DEL MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO.....	45
<i>CAPÍTULO V.....</i>		<i>46</i>
5.1	ANÁLISIS DE LAS ÉPOCAS DE ESTIAJE Y RIADA.....	46
5.2	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL ANÁLISIS DE SATURACIÓN DE AGUA EN EL SUELO.....	50
5.3	MAPA DE SATURACIÓN DE AGUA EN EL SUELO.....	53
5.4	CLASIFICACIÓN DEL SUELO.....	54
5.5	MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS.....	55
5.6	MAPAS DE LAS CORRELACIONES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	60
5.7	RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS CON LAS VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE ( $V_s$ ) DE LOS ENSAYOS ReMi.....	65
5.8	ECUACIONES DE CORRELACIÓN DE LAS VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE ( $V_s$ ) Y LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTANDAR ( $N_{SPT} - N_{60}$ ).....	65
5.9	PERFILES ESTRATIGRÁFICOS-GEOTÉCNICOS.....	67
5.10	MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICO.....	70
5.11	MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 3D.....	71
<i>CAPÍTULO VI.....</i>		<i>73</i>
<i>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....</i>		<i>73</i>
6.1	ZONAS PROPENSAS A LA SATURACIÓN DE AGUA.....	73
6.2	CLASIFICACIÓN DEL SUELO Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.....	75
6.3	PROPIEDADES MECÁNICAS A TRAVÉS DE LA CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.....	78
6.4	RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS Y LAS VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS ReMi ...	82
6.5	ECUACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE ( $V_s$ ) Y LOS VALORES DE $N_{SPT}$ .....	82
6.6	PERFILES ESTRATIGRÁFICOS-GEOTÉCNICOS.....	84
6.7	MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICO LA CIUDAD DE PORTOVIEJO.....	85
6.8	MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 3D DE LA CIUDAD DE PORTOVIEJO.....	87
<i>CAPÍTULO VII.....</i>		<i>89</i>
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</i>		<i>89</i>
7.1	CONCLUSIONES.....	89
7.2	RECOMENDACIONES.....	92

<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	93
<i>ANEXOS</i> .....	97
ANEXO No 2 .....	99
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS .....	99
ANEXO No 3 .....	101
CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS .....	101
ANEXO No 4 .....	104
RELACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE ONDA DE CORTA Y N-SPT CON EL TIPO DE MATERIAL DEL SUELO .....	104
ANEXO No 5 .....	107
COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS-GEOTÉCNICAS DE LOS SONDEOS DE PERFORACIÓN DE LA CIUDAD DE PORTOVIEJO.....	107

## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

AASHTO.- Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte

ASTM.- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

BRE. - UK Building Research Establishment

ETP. - Evapotranspiración Potencial

Fm.- Formación

IL.- Índice de Liquidez

IP.- Índice de Plasticidad

IS.- Índice de Presión

LL.- Límite Líquido

LP.- Límite Plástico

LS.- Límite de Contracción

MASW. - Multichannel Analysis of Surface Waves

SASW. - Spectral Analysis of Surface Waves

ReMi.- Refracción de Microtremores

SUCS.- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

SEV.- Sondeo Eléctrico Vertical

SNI.- Sistema Nacional de Información

OCR.- Relación de la sobre consolidación de un suelo

G.- Módulo de elástico de cizalladura

$G_{m\acute{a}x}$ .- Módulo de elástico de cizalladura máximo

Gs.- Gravedad específica

M<sub>w</sub>.- Magnitud de momento sísmico

n.- Índice de Poros

$\rho$  .- Densidad natural del suelo

S.- Grado de Saturación

V<sub>s</sub>.- Velocidad de la onda sísmica cizallamiento

V<sub>v</sub>.- Volumen de vacíos

V<sub>w</sub>.- Volumen de agua

w .- Contenido de humedad

W<sub>s</sub>.- Peso del sólido (Peso unitario)

W<sub>w</sub>.- Peso del agua

$\gamma_w$ .- Densidad del agua

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. 1</b> Mapa de localización de la zona de estudio. ....	2
<b>Figura 2. 1</b> Mapa de zonas de Precipitación del cantón Portoviejo, la línea roja circunscribe el área de estudio (Modificado de GAD Portoviejo, 2015) .....	4
<b>Figura 2. 2</b> Periodos secos y húmedos de la Ciudad de Portoviejo (Modificado de SNI, 2012). ....	4
<b>Figura 2. 3</b> Mapa de zonas de déficit hídrico del cantón Portoviejo, la línea azul circunscribe el área de estudio. (Modificado de GAD Portoviejo, 2015) .....	5
<b>Figura 2. 4</b> Mapa Geomorfológico del cantón Portoviejo, la línea roja circunscribe el área de estudio (Modificado de GAD Portoviejo, 2015).....	6
<b>Figura 2. 5</b> Esquema geodinámico del Ecuador (Tomado de Gutscher et al., 1999). ...	7
<b>Figura 2. 6</b> Esquema geológico regional del Ecuador. (Tomado de Ferrari & Tibaldi et al., 1992). El recuadro en rojo representa la zona de estudio .....	8
<b>Figura 2. 7</b> Estratigrafía de la Cuenca de Manabí. (Tomado de Reyes et al., 2013)...	10
<b>Figura 2. 8</b> Geología de la zona de estudio. (Modificado de IGEPN, 2017).....	11
<b>Figura 2. 9</b> Sismicidad superficial en la zona de interface con profundidad hipocentral $Z \leq 50$ m. El recuadro en azul, corresponde a la zona de estudio. (Modificado de Yepes et al, 2016).....	13
<b>Figura 2. 10</b> Mapa del peligro sísmico del Ecuador para propósitos de diseño estructural. El recuadro en azul, corresponde a la zona de estudio. (Tomado de la NEC, 2015)...	14
<b>Figura 3. 1</b> Ciclo de la rocas y origen del suelo (Tomado de Braja et al., 2014) .....	15
<b>Figura 3. 2</b> Distintos tipos de formación de suelo (Tomado de Duque, 2016).....	16
<b>Figura 3. 3</b> Límites de Atterberg. (Tomado de Braja et al., 2014). ....	18
<b>Figura 3. 4</b> Prueba del Límite Líquido en un equipo tipo “Casagrande”. a) Equipo. b) Procedimiento. (Tomado de Braja et al., 2014).....	19
<b>Figura 3. 5</b> Índice de Liquidez (Tomado de Braja et al., 2014) .....	21
<b>Figura 3. 6</b> Carta de Plasticidad (Tomado de Braja et al 2014). ....	22
<b>Figura 3. 7</b> Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. (Tomado de las Pruebas ASTM D-2487).....	24
<b>Figura 3. 8</b> Clasificación del Potencial de Hinchamiento en base a la actividad. (Tomado de Carter & Bentley et al., 2016).....	27
<b>Figura 3. 9</b> (a)Movimiento céntrico sobre todo en estructuras ligeras (daño a largo plazo). (b) Movimiento perimetral (daños a corto plazo). (c) Movimiento cíclico asociado a cambios cíclicos de expansión y contracción del suelo. (Tomado de Fredlund y Rahardjo et al., 1993) .....	27

<b>Figura 3. 10</b> Relación entre el Índice de presión y la presión de hinchamiento dado por el rango del Límite Líquido. (Tomado de Carter & Bentley et al., 2016) .....	28
<b>Figura 4. 1</b> Esquema del procedimiento metodológico en el proyecto dentro del proyecto de investigación. ....	35
<b>Figura 4. 2</b> Relación entre valores del NSPT y VS para varios tipos de suelo (Tomado de Yoshida et al., 2015) .....	44
<b>Figura 5. 1</b> Precipitaciones acumuladas anuales desde 1980 hasta 2016.....	46
<b>Figura 5. 2</b> Precipitaciones acumuladas mensuales desde 1980 hasta 2016.....	46
<b>Figura 5. 3</b> Precipitaciones acumuladas mensuales máxima, mínima y promedio. ....	46
<b>Figura 5. 4</b> Factores ambientales preponderantes a una profundidad de 0 a 10m. ....	47
<b>Figura 5. 5</b> Valores de pesos específicos a una profundidad de 0 a 10m.....	47
<b>Figura 5. 6</b> Factores ambientales preponderantes a una profundidad de 10 a 20m. ..	48
<b>Figura 5. 7</b> Valores de pesos específicos a una profundidad de 10 a 20m.....	48
<b>Figura 5. 8</b> Factores ambientales reinantes a una profundidad de 20 a 30m.....	49
<b>Figura 5. 9</b> Valores de pesos específicos a una profundidad de 20 a 30m.....	49
<b>Figura 5. 10</b> a) Imagen a color de la zona de estudio. b) Imagen en tonalidades del infrarrojo cercano.....	50
<b>Figura 5. 11</b> Imagen de clasificación supervisada que caracteriza el tipo de suelo en la zona de estudio .....	50
<b>Figura 5. 12</b> Imagen de clasificación Tasseled Cap que caracteriza el suelo en valores de contenido de humedad en la zona de estudio.....	51
<b>Figura 5. 13</b> Imagen que determina el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la zona de estudio. ....	51
<b>Figura 5. 14</b> Superposición de imágenes que determina las zonas con contenido de humedad del suelo en la zona de estudio. a) Superposición (Reclass (Imagen Supervisada) – Reclass (Vegetación densa NDVI)). b) Superposición (Reclass (Tasseled Cap) – Reclass (Vegetación)).....	52
<b>Figura 5. 15</b> Mapa de identificación de zonas propensas a la Saturación de agua en el suelo.....	53
<b>Figura 5. 16</b> Clasificación de suelos de los sondeos de perforación en la carta de plasticidad a una profundidad (a) 0 a 10m. (b) 10 a 20m. (c) 20 a 30m .....	54
<b>Figura 5. 17</b> Mapa de distribución del Tipo de Material en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a una profundidad de 0 a 10m .....	55
<b>Figura 5. 18</b> Mapa de distribución del Tipo de Material en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a una profundidad de 10 a 20 m .....	56
<b>Figura 5. 19</b> Mapa de distribución del Tipo de Material en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a una profundidad de 20 a 30m. ....	57



<b>Figura 5. 20</b> Mapa de distribución del Límite Líquido en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a distintas profundidades. ....	58
<b>Figura 5. 21</b> Mapa de distribución del Índice de Plasticidad en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a distintas profundidades. ....	59
<b>Figura 5. 22</b> Plasticidad para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación.....	60
<b>Figura 5. 23</b> Índice de Liquidez para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación.....	61
<b>Figura 5. 24</b> Mineralogía del contenido arcilloso para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación .....	62
<b>Figura 5. 25</b> Potencial de Expansividad para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación .....	63
<b>Figura 5. 26</b> Presión de Hinchamiento en los sondeos de perforación para la profundidad de (a) 0-10m. (b) 10-20m. y (c) 20-30m.....	64
<b>Figura 5. 27</b> Relación entre la Velocidad de onda de cizalla ( $V_s$ ) y los diferentes tipos de materiales en los sondeos de perforación.....	65
<b>Figura 5. 28</b> Ecuación que caracteriza la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) los suelos del valle de la ciudad de Portoviejo a una profundidad de 0 a 30m. (a) En función del NSPT y (b) En función del $N_{60}$ .....	66
<b>Figura 5. 29</b> Correlaciones con ecuaciones empíricas teóricas de diversas investigaciones que caracterizan la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) y los valores de N-SPT de los suelos .....	66
<b>Figura 5. 30</b> Perfil “A” (P20 a P09) .....	67
<b>Figura 5. 31</b> Perfil “B1” (P09 a P18), el recuadro en rojo señala la posición del Perfil “B1” con respecto al Perfil “B”, que se muestra en la esquina inferior derecha. ....	68
<b>Figura 5. 32</b> Perfil “B2” (P17 a P04), el recuadro en rojo señala la posición del Perfil “B2” con respecto al perfil “B”, que se muestra en la esquina inferior izquierda. ....	69
<b>Figura 5. 33</b> Mapa de Microzonificación Geotécnica de la ciudad de Portoviejo.....	70
<b>Figura 5. 34</b> Modelo Geológico Geotécnico 3D de la ciudad de Portoviejo .....	71

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3. 1</b> Clasificación del Índice de Plasticidad en manera cualitativa. (Tomado de Braja et al., 2014) .....	20
<b>Tabla 3. 2</b> Actividad de varios tipos de minerales (Tomado de Holtz & Kovacs et al., 1981) .....	23
<b>Tabla 3. 3</b> Símbolos generales SUCS (Tomado de Braja et al., 2014) .....	24
<b>Tabla 3. 4</b> Identificación de suelos expansivos en base a su índice de plasticidad. (Tomado de Carter & Bentley et al., 2016).....	25
<b>Tabla 3. 5</b> Relación entre El Potencial Expansivo y El Límite Líquido según Dakshanamurthy Y Raman, 1973. ....	26
<b>Tabla 3. 6</b> Factores de corrección para los valores N medidos en los ensayos de SPT, (ASTM D4633-10).....	33
<b>Tabla 4.1</b> Sondeos de Perforación en la zona de estudio.....	40
<b>Tabla 4. 2</b> Parámetros determinados a partir de correlaciones empíricas de las propiedades índices de los suelos. ....	42
<b>Tabla 4. 3</b> Ecuaciones propuesta por Imai et al., 1977 (Tomado de Yoshida et al., 2015) .....	44
<b>Tabla 5. 1</b> Propiedades Físico-Mecánicas de los estratos Geológicos-Geotécnicos definidos para cada microzona del Modelo geológico-geotécnico 3D de la ciudad de Portoviejo.....	72
<b>Tabla 6. 1</b> Consistencia de los suelos a una profundidad de 0 a 10m .....	76
<b>Tabla 6. 2</b> Consistencia de los suelos a una profundidad de 10 a 20m. ....	77
<b>Tabla 6. 3</b> Consistencia de los suelos a una profundidad de 20 a 30m .....	77
<b>Tabla 6. 4</b> Ecuaciones que correlaciona la Velocidad de Onda de Corte (Vs) y los valores de NSPT y N60 para la ciudad de Portoviejo. ....	83

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO.1</b> – Datos Pluviométricos.....	95
<b>ANEXO.2</b> –Propiedades Físicas de los suelos.....	97
<b>ANEXO.3</b> -Datos de la correlación de las propiedades físicas.....	99
<b>ANEXO.4</b> –Relación de las velocidades de onda de corte con N-SPT y el tipo de material.....	102
<b>ANEXO.5</b> – Columnas Estratigráficas-Geotécnicas.....	105

## RESUMEN

La ciudad de Portoviejo se caracteriza por presentar una predominancia de depósitos del Holoceno principalmente de ambiente fluvial, siendo depósitos relativamente jóvenes. Estas características forman una zona de alta vulnerabilidad para desarrollar fenómenos simultáneos como asentamientos, expansión de suelos, licuefacción, entre otros. Ante esta realidad, se genera un mapa geotécnico basado en las propiedades físicas de los suelos obtenidos en pruebas de laboratorio. Se determinaron cinco zonas geotécnicas, dentro de las cuales se encontró una zona geotécnica crítica en el centro de Portoviejo que posee materiales con un elevado Índice de Plasticidad que producen suelos altamente compresibles, teniendo la singularidad de que estos valores aumentan con la profundidad, además el contenido de humedad se encuentra muy cercano a su Límite Líquido por lo que son suelos menos estables bajo una carga externa. Al mismo tiempo, esta zona tiene el mayor porcentaje de contenido en finos dentro de la ciudad y un alto potencial de expansividad que puede causar daños a las estructuras que se encuentran sobre estos suelos. Hacia la zona norte central de la ciudad hay una mayor heterogeneidad de las propiedades índices del suelo debido a los depósitos fluviales marinos mixtos y a la presencia de estructuras tectónicas activas. Esta zona (MH-ML) tiene valores de Índice de Plasticidad menores a 20 que indican que requiere un bajo contenido de agua para reducir su resistencia al corte, además se ha encontrado que es más propenso a la saturación de agua especialmente en tiempos de alta precipitación y en temporadas donde se desarrolla el Fenómeno El Niño. Se genera un modelo geológico-geotécnico 3D de la ciudad de Portoviejo a partir del mapa geotécnico, del módulo de rigidez al corte, valores del  $N_{SPT}$  y de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). Conjuntamente, se ha determinado una ecuación empírica para evaluar las propiedades elásticas del suelo, importante para el análisis de la respuesta del sitio. De esta forma, se evaluó la velocidad de la onda de corte mediante valores de  $N_{SPT}$  obtenidos en 15 pozos.

**Palabras clave:** Portoviejo, propiedades de los suelos, Mapa geotécnico, Modelo Geológico Geotécnico 3D.

## ABSTRACT

The Portoviejo city is characterized by a predominance of Holocene deposits mainly of fluvial environment, being relatively young deposits. These characteristics form a zone of high vulnerability to develop simultaneous phenomena as settlements, swellings, liquefaction. A shallow geotechnical map was generated based on empirical correlations of index properties of soils obtained in laboratory tests. Five geotechnical zones were determined according to the approximate behavior of the soil. According to the distribution of soil properties a critical geotechnical zone is located in the Portoviejo downtown. This zone contain materials with a high plastic index values producing a highly compressible soils, and has the singularity that these values increase with depth. Its moisture content is very close to Liquid Limit thus they are less stable soils under an external load. Additionally this zone has the highest percentage of fines inside the city and a high swelling potential that can cause structures damage that are overlying these soils. Towards in the north central zone of the city there is a greater heterogeneity of soil index properties due to mixed fluvial-marine deposits and the presence of active tectonic structures. This zone (MH-ML) has values of plasticity index lower than 20 which indicate that requires a low water content to reduce its shear strength, also it has been found to be more prone to water saturation especially in times of high rainfall and in seasons where the El Niño Phenomenon develops. The 3D geological-geotechnical model of Portoviejo city is generated from the geotechnical map and the analysis of the elastic shear modulus, N-SPT values of the soils and shear wave velocity ( $V_s$ ). Besides an empirical equation has been determined to appraise the elastic properties of the soil important for the analysis of the site response. In this way the shear wave velocity was evaluated through  $N_{SPT}$  values obtained in 15 wells.

**Keywords:** Portoviejo, Geotechnical map, 3D Geological-Geotechnical Model, soils.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICATIVOS

El 16 de abril del 2016 se generaron diversos fenómenos asociados al sismo de  $M_w$  7.8, con epicentro en la ciudad de Pedernales. Dicho suceso potenció eventos catastróficos en pérdidas humanas y materiales, que se concentraron mayormente en la costa ecuatoriana, donde se sitúa la ciudad de Portoviejo. La ciudad se denominó “zona cero” después del sismo mencionado debido a que fue una de las zonas altamente afectadas en el país, en gran parte debido a los fenómenos asociados al suelo.

La ciudad de Portoviejo ha sido proclive a diversas amenazas como sismos de gran intensidad al estar situada en un área de alta actividad tectónica, evidenciada por la presencia de fallas corticales y por la zona de subducción, siendo una de las zonas más activas de los márgenes convergentes en el mundo. (Yepes et al., 2016).

La ciudad se caracteriza por presentar una predominancia de depósitos del Holoceno principalmente de ambiente fluvial; al mismo tiempo por su geomorfología y ubicación, es propensa a inundaciones causadas por el desbordamiento del río Portoviejo, lo que genera la saturación del suelo, en especial en épocas donde se desarrolla el Fenómeno de El Niño.

Estas características forman en conjunto una zona de alta vulnerabilidad para desarrollar fenómenos en los suelos, como licuefacción, asentamientos, expansividad, entre otros. Estos fenómenos que pueden ser simultáneos o posteriores a la amenaza principal, como sismos o inundaciones.

Actualmente, en la Ciudad de Portoviejo existe un incremento poblacional y una gran demanda de ocupación del territorio para la ampliación urbana, lo que crea un aumento de la vulnerabilidad ante diversas amenazas relacionados con los suelos.

En este contexto, el desarrollo de este proyecto es evaluar las propiedades físico-mecánicas de los suelos, que permitan valorar a la susceptibilidad a fenómenos como: licuefacción, remociones en masa, inundaciones, subsidencias del terreno inducidas de sismos o por actividad antrópica, grietas en el terreno por la saturación de los suelos ante intensas precipitaciones, entre otros.

Integrando conceptos y metodologías geológicas-geotécnicas para una mejor comprensión del comportamiento de los suelos ante dichas amenazas asociados a factores desencadenantes como precipitaciones y sismos, para una rauda regulación de la zona urbana, siendo un aporte para la planificación territorial de la ciudad y necesaria para prevenir cuantiosas pérdidas humanas, daños estructurales y mermas económicas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar un Mapa de Microzonificación Geotécnico y un Modelo Geotécnico-Geológico 3D para la ciudad de Portoviejo a partir del análisis y evaluación del comportamiento de las propiedades físico-mecánicas del subsuelo hasta una profundidad de 30m.

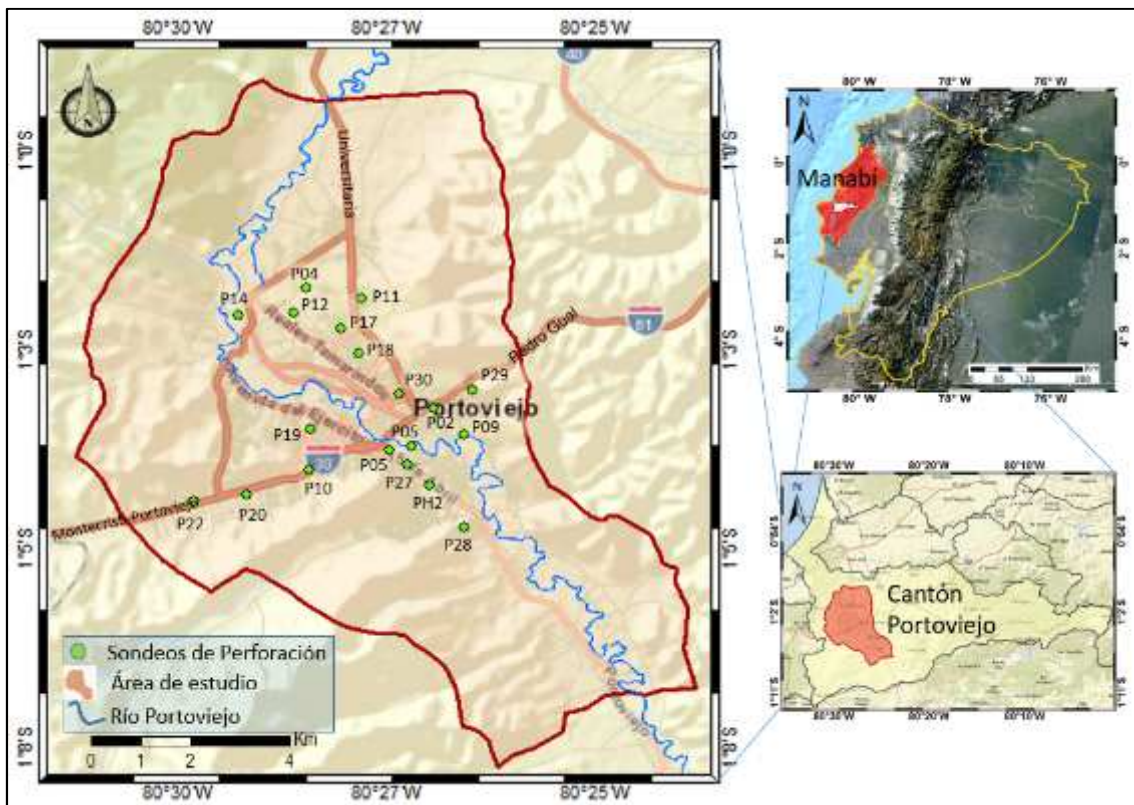
### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar las propiedades físicas fundamentales de los materiales que conforman los suelos a partir de los sondeos de perforación y ensayos de laboratorio.
- Correlacionar las propiedades físicas obtenidas de los suelos con datos geofísicos (ReMi) y la geología del Cuaternario de la ciudad de Portoviejo.
- Determinar una ecuación empírica que permita evaluar las propiedades elásticas del suelo en la zona de estudio.
- Estimar los sectores con mayor retención de humedad en el suelo en la zona de estudio.
- Diseñar un Mapa de Microzonificación Geotécnico para la ciudad de Portoviejo.
- Diseñar un Modelo Geotécnico-Geológico 3D para la Ciudad de Portoviejo

### 1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la Ciudad de Portoviejo, dentro de la Cuenca del Cantón Portoviejo, Provincia de Manabí. Abarca un área total aproximada de 131,03 Km<sup>2</sup>.

Gran parte del área de estudio posee una red compleja de vías de primer orden siendo las principales vías de acceso, aquellas que unen los otros cantones de la zona como son: Pedro Gual, La Universitaria y la vía Montecristi-Portoviejo. Dentro de la zona de estudio se ejecutaron sondeos de perforación, que fueron realizadas en una variada extensión, ubicados principalmente en el centro urbano de la ciudad, cercanamente a vías de primer y segundo orden (Fig. 1.1).



**Figura 1. 1** Mapa de localización de la zona de estudio. Elaborado por: Kelly Alvarado.

## **1.4 SÍNTESIS DE ESTUDIOS PREVIOS**

Gran parte de los trabajos previos han sido enfocados para estudios de construcciones puntuales, dentro de la ciudad, por lo que el estudio geotécnico de la zona es muy limitado. Sin embargo han podido ser muy útiles en la contribución de datos para el análisis geotécnico del área en el presente proyecto.

GeoEstudios S.A (2013), estableció un modelo geotécnico en el sector de la entrada al Florón, cerca del centro de la Ciudad de Portoviejo, para la construcción del Hospital de Especialidades de Portoviejo, mediante el estudio se realizó un sondeo de perforación a percusión de 30m de profundidad, 3 ensayos ReMi, un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), entre otros ensayos. En el cual se obtuvo la caracterización el subsuelo para un análisis de peligro sísmico. En el año 2000, la Dirección Nacional de Geología (DINAGE), del Ministerio de Energía y Minas, lleva a cabo un proyecto de reconocimiento Geológico-Geotécnico de las Colinas de San José en la Ciudad de Portoviejo en donde se obtuvieron datos geomecánicos como densidades secas y saturadas, cohesión, ángulo de fricción interna, ángulo de reposo de las arcillas correspondientes al coluvial perteneciente a la Formación Dos Bocas y Formación Villingota.

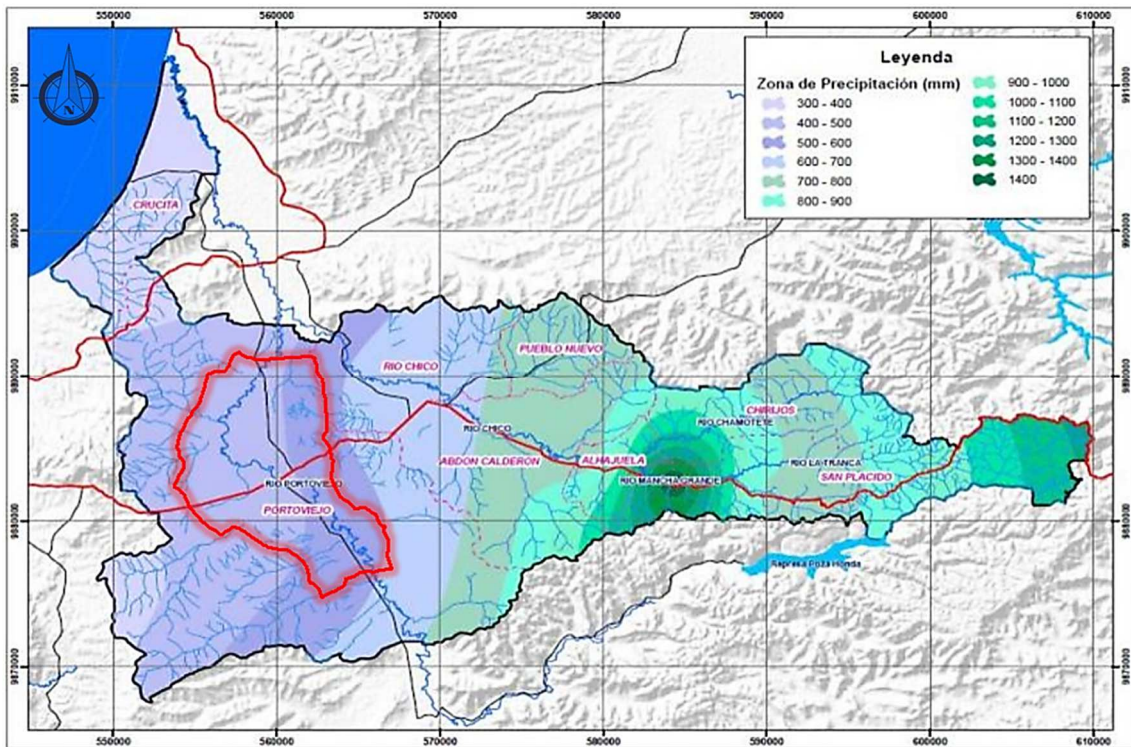
## **CAPÍTULO II**

### **MARCO REFERENCIAL**

#### **2.1 CLIMA Y PRECIPITACIONES**

La Ciudad de Portoviejo está ubicada en la Costa ecuatoriana, en una región Sub-desértica Tropical, según el Mapa Bioclimático del Ecuador; influenciado por cambios que ocurren en el Océano Pacífico y por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Los periodos de lluvia más abundante, ocurren en los periodos de enero a abril, y en los meses de junio a diciembre los periodos de menor precipitación. La variación de la precipitación fluctúa entre 400mm a 1400mm (Fig. 2.1) (SNI, 2012).





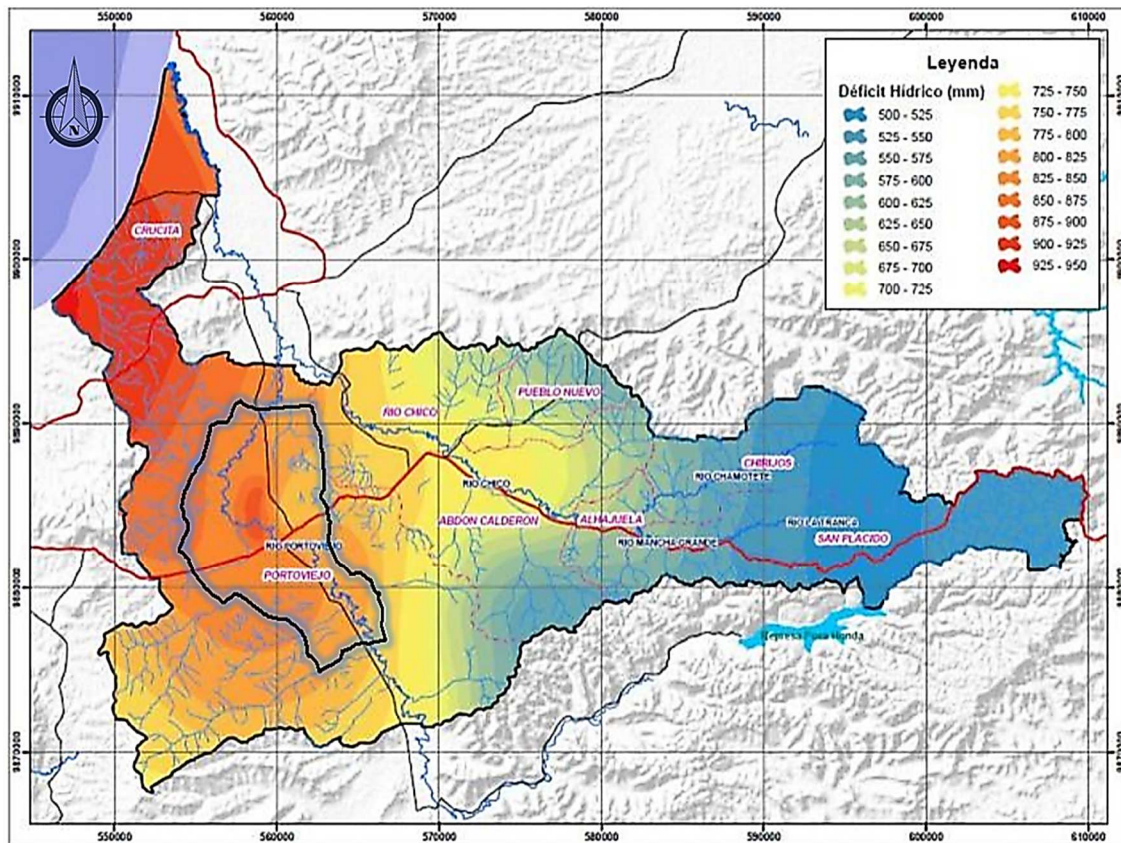
**Figura 2. 1** Mapa de zonas de Precipitación del cantón Portoviejo, la línea roja circunscribe el área de estudio (Modificado de GAD Portoviejo, 2015)

En promedio de dos estaciones meteorológicas de la zona, se tiene un periodo seco de 230 días, un periodo húmedo-seco de 46 días, un periodo semi-húmedo de 73 días, y un periodo húmedo de 31 días. La evaporación es mayor en los meses de junio, julio y agosto con un promedio de 124mm/año y hasta 150mm/año como pico máximo. La variación de la Evapotranspiración Potencial (ETP) es desde 1400mm a 1650mm, en donde los valores más bajos de ETP, corresponden a los meses con menor humedad (Fig. 2.2). El déficit hídrico es de 735,5mm, durante el periodo comprendido entre los meses de marzo y diciembre (Fig. 2.3). (SNI, 2012).

Estación	SECO s's	HÚMEDO-SECO sh y s'h'	SUBHÚMEDO HÚMEDO hH y H'h'	HÚMEDO HH'	Estación	SECO s's	HÚMEDO-SECO sh y s'h'	SUBHÚMEDO HÚMEDO hH y H'h'
Portoviejo-UTM 560426 9884598	22 junio – 26 enero	27 enero – 10 febrero y 18 mayo – 21 junio	11- 28 febrero y 1 abril – 17 mayo	1 – 31 marzo	Portoviejo-Aeropuerto 559179 9884349	17 mayo – 12 enero	13 – 24 enero y 16 abril – 16 mayo	25 enero – 15 abril

s's      Periodo seco: ER/ETP\*100< 50%  
 Sh y h'S'      Periodo subhúmedo seco: ER/ETP\*100 entre 50% y 75%  
 hH y H'h'      Periodo subhúmedo húmedo: ER/ETP\*100 entre 75% y 100%  
 HH'      Periodo húmedo: ER/ETP\*100= 100%  
 ER Evapotranspiración Real      ETP Evapotranspiración Potencial

**Figura 2. 2** Periodos secos y húmedos de la Ciudad de Portoviejo (Modificado de SNI, 2012).



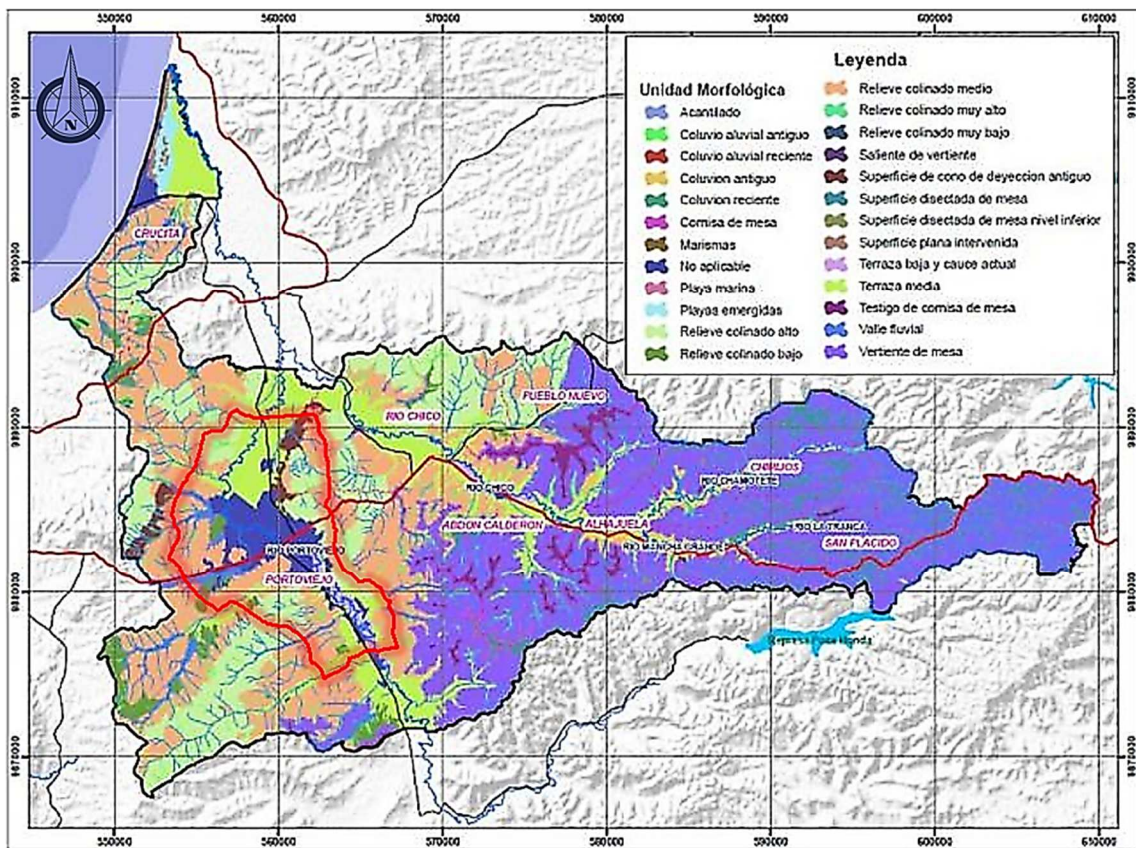
**Figura 2. 3** Mapa de zonas de déficit hídrico del cantón Portoviejo, la línea azul circunscribe el área de estudio. (Modificado de GAD Portoviejo, 2015)

## 2.2 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA

La Ciudad de Portoviejo se encuentra a una altura media de 44 msnm. Presenta una morfología del terreno de tipo disimétrica con relieves que van desde: colinas altas asociadas a la Fm. Villingota, con pendientes que oscilan entre 12% a 70%, con cimas redondeadas, vertientes convexas y agudas. Colinas bajas asociados a las Formaciones Villingota y Dos Bocas con pendientes entre 5% al 40% con cimas redondeadas con vertientes convexas. Cornisas con pendientes muy escarpadas de 40% a 100%, desniveles relativos entre 50m a 250m, cimas agudas y vertientes rectilíneas. Rampas con pendientes entre 5% al 25%, desniveles relativos de 5m a 50m, con topografía relativamente suave. Conos de deyección con pendientes suaves del 5% al 25%, desniveles relativos que oscilan entre 0m a 25m compuesto por depósitos coluvio-aluviales. Terrazas medias a bajas, con pendientes menores al 5%, desnivel relativo de 0m a 5m, cubren gran parte del área, sobre todo en los principales drenajes.



Valle fluvial que conforman los esteros, quebradas, constituyendo con los tributarios al río principal, con pendientes muy suaves a planas que oscilan entre 5% a 0% y un desnivel relativo del mar menor a 5m (Fig. 2.4) (SNI, 2012). La zona de estudio se encuentra en la sub-cuenca de Portoviejo, por el cual atraviesa el Río Portoviejo con dirección SSE-NNW, el principal curso hídrico de la cuenca. Dicho río nace en la parte alta de la cuenca, en el Embalse Poza Honda y sus afluentes hacen de este medio fluvial, una de las características con más alto grado de amenaza de inundaciones. (SNI, 2012).

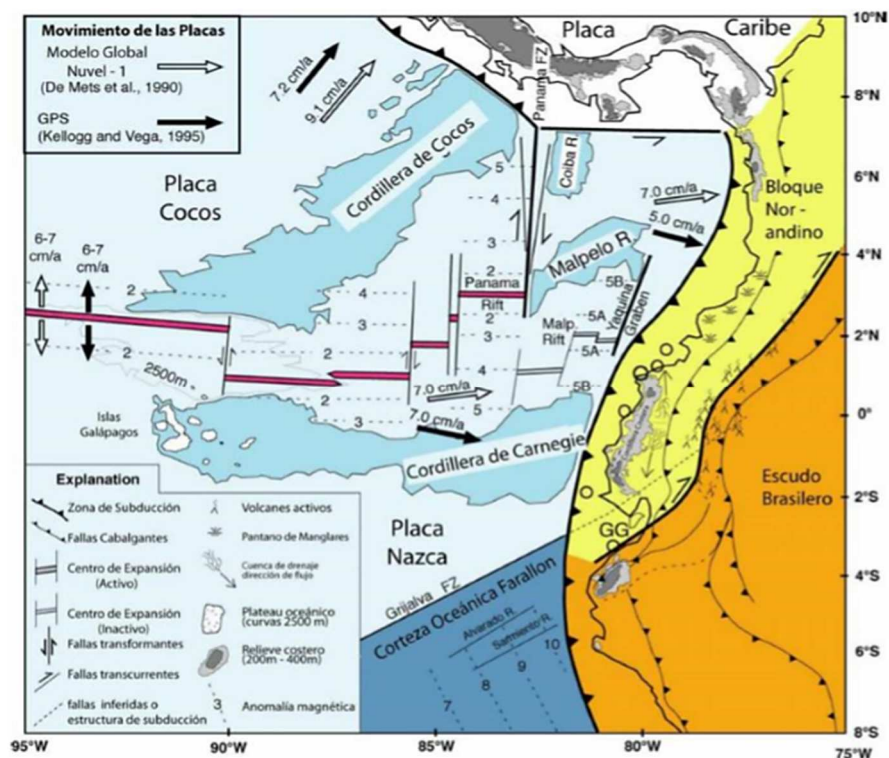


**Figura 2. 4** Mapa Geomorfológico del cantón Portoviejo, la línea roja circunscribe el área de estudio (Modificado de GAD Portoviejo, 2015).

### 2.3 AMBIENTE GEODINÁMICO ACTUAL

El Ecuador se localiza entre las latitudes 1°N a 4°S, caracterizado por un ambiente geodinámico muy activo debido a la zona de subducción. En donde la placa Nazca se desplaza ortogonalmente hacia la placa Sudamericana, subduciendo a una tasa de 58 mm/año. (Trenkamp et al., 2002). La Placa Nazca es producto del rompimiento de la Placa Farallón hace 27 Ma, (Lonsdale et al., 2005), la misma que se dividió al norte en la Placa Cocos y al sur la Placa Nazca.

El margen Ecuatoriano representa una región de intensa deformación crustal relacionado con la subducción, en especial donde la Cordillera de Carnegie se encuentra subduciendo. Dicha zona de subducción ha producido 7 grandes terremotos ( $M_w > 7.75$ ), durante el siglo pasado (Gutscher et al., 1999). La Cordillera de Carnegie es un alto relieve morfo-batimétrico generada sobre el fondo oceánico por la actividad del Punto Caliente de Galápagos, la misma que se extiende debajo de la placa continental, más allá del arco volcánico (Fig. 2.5) (Gutscher et al., 1999; Chunga, 2011).



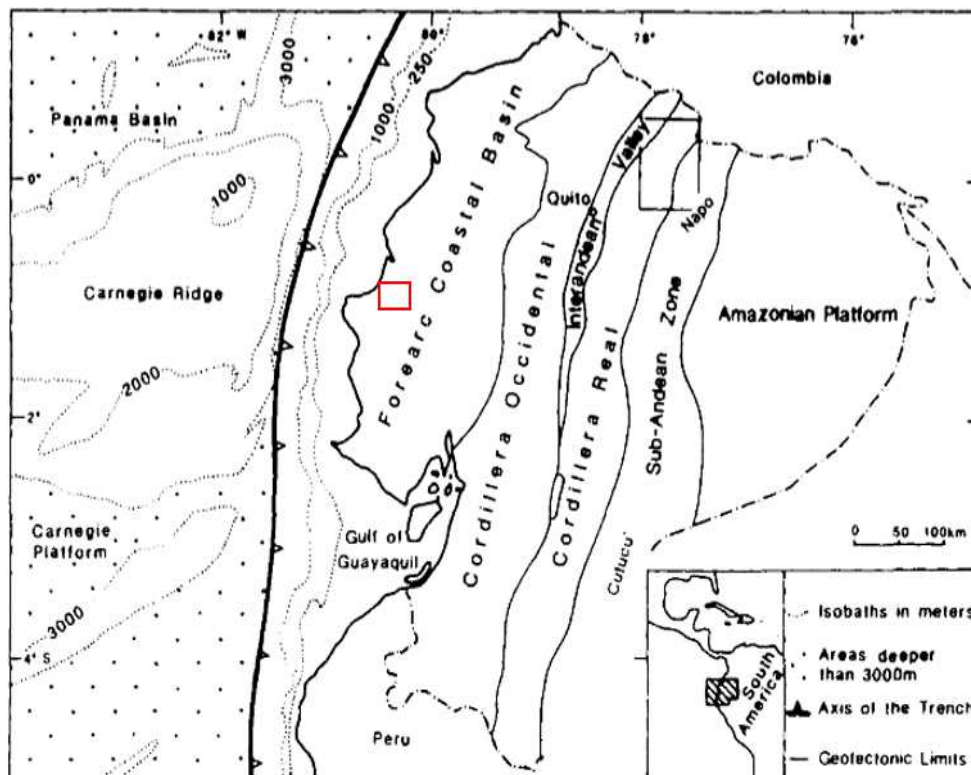
**Figura 2. 5** Esquema geodinámico del Ecuador (Tomado de Gutscher et al., 1999).

Simultáneamente con el proceso de subducción se generan esfuerzos compresivos en la parte continental del Ecuador, generando el desplazamiento del Bloque Nor-Andino (Fig. 2.5), como uno de los resultados de dichos esfuerzos. El bloque se desplaza hacia el NNE, a una tasa de 1cm/año a lo largo del Sistema de fallas Puná – Pallatanga – Chingual – Cosanga (PPCC). (Segovia & Alvarado, 2009). Para varios autores, el desplazamiento del Bloque Nor-Andino, se encuentra influenciado por la colisión de la Cordillera Carnegie con la placa Sudamericana, la misma que pudo haber generado la exhumación de la Cordillera de los Andes en la parte norte del Ecuador durante el Mioceno. (Spikings et al., 2001), además del levantamiento y deformación en la Costa (Pedoja et al., 2006).

## 2.4 GEOLOGÍA REGIONAL

La convergencia entre la placa Sudamericana y la placa Nazca ha generado el cinturón orogénico de los Andes, y su volcanismo asociado, así como también, el desarrollo de las diferentes regiones morfológicas (Fig. 2.6). El cinturón orogénico de los Andes conforma el arco volcánico del país y este divide al territorio ecuatoriano en tres regiones. La región de antearco conformado por la región Costa, compuesta por un basamento oceánico, cubierto por grandes secuencias de depósitos sedimentarios de las cuencas de Esmeraldas-Borbón, Manabí, y Progreso edad Paleógeno-Neógeno (Jaillard et al., 1995).

El sistema orogénico del Ecuador, conforma la región de arco, formado por dos cadenas montañosas subparalelas con dirección NNE-SSW. Al oeste se encuentra la Cordillera Occidental y al este la Cordillera Real, separadas por una depresión morfotectónica, conocida como el Valle Interandino, la misma que está compuesto por potentes depósitos volcano-sedimentarios, que van desde el Mioceno Tardío al Cuaternario, cubriendo en gran parte el basamento (Winkler et al., 2005).



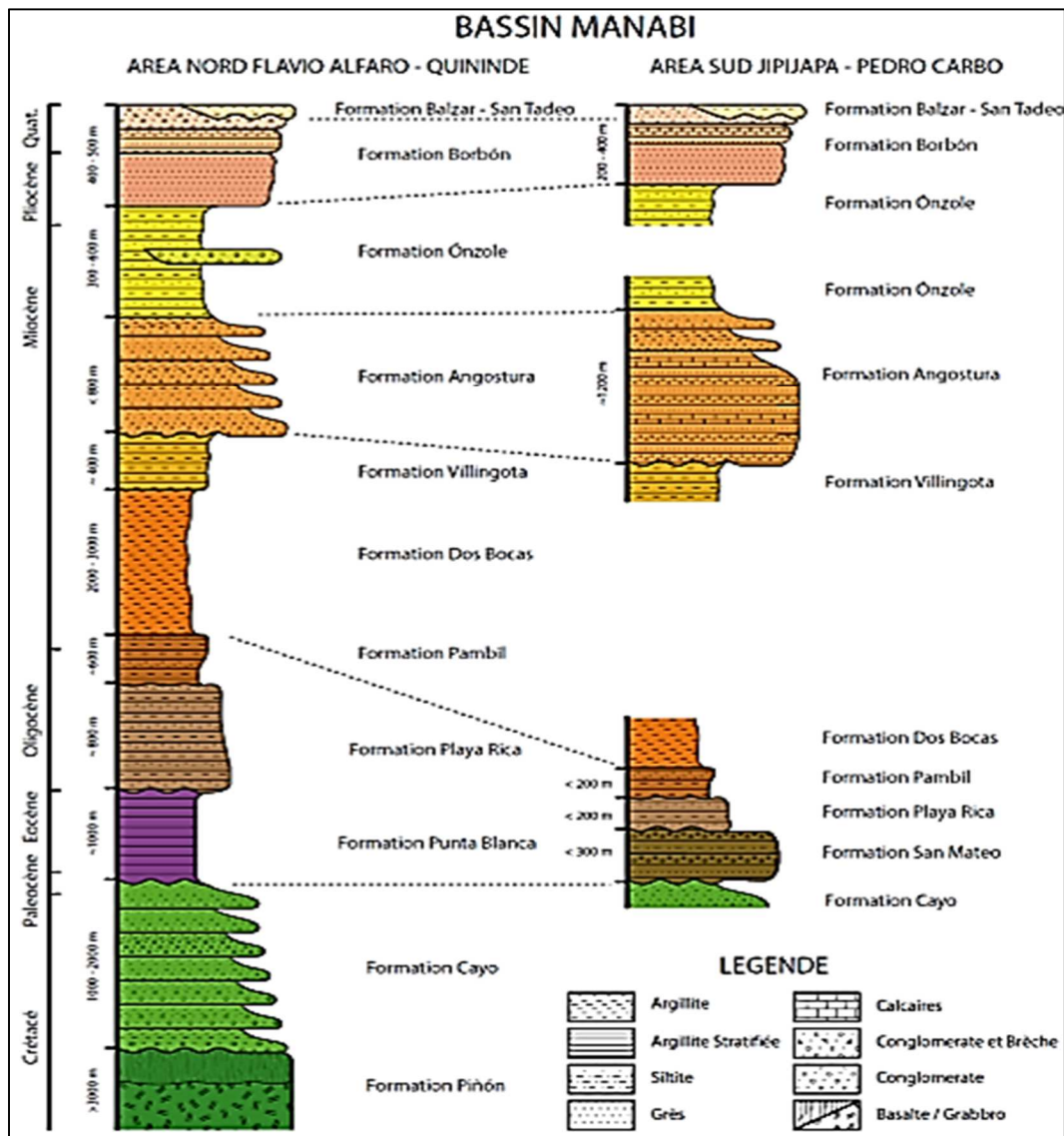
**Figura 2. 6** Esquema geológico regional del Ecuador. (Tomado de Ferrari & Tibaldi et al., 1992). El recuadro en rojo representa la zona de estudio

La Cordillera Occidental incluye rocas intrusivas a volcánicas de composición variable, yuxtapuestas a depósitos tectono-estratigráficos del Cretácico Tardío al Terciario (Vallejo et al., 2009). La Cordillera Real está constituido por un cinturón de rocas metamórficas afectadas por una sucesión de eventos tectónicos-magmáticos; contempla edades desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, separadas por grandes sistemas de fallas regionales (Litherland et al., 1994). La región de trasarco que corresponde a la región Oriente, se compone de sedimentos continentales-marinos de edad Cretácica al Cuaternario, que sobreyacen al basamento formado por el cratón Guyanés y secuencias sedimentarias a ígneas que van desde el Paleozoico al Jurásico. Dentro esta región se encuentra la Zona Subandina, que corresponden a una zona de transición entre la cordillera y la planicie del Oriente, conformada por dos levantamientos, al norte el Levantamiento Napo y al sur el Levantamiento Cutucú. (Baldock, 1982; Ferrari & Tibaldi et al., 1992).

## **2.5 GEOLOGÍA LOCAL**

La zona de estudio se localiza en la Costa Ecuatoriana, dentro de la Cuenca Manabí, la misma que constituye una de las mayores cuencas del Neógeno en el antearco costero, constituido principalmente por rocas sedimentarias de ambiente marino, en donde han existido ocho etapas alternadas con periodos de deformación tectónica y depositación sedimentaria (Reyes et al., 2013; Luzieux et al., 2007). Los estratos más viejos expuestos en la cuenca pertenecen a la Fm. Piñon de edad Cretácica, y los estratos más jóvenes pertenecen a Fm. Tablazo del Cuaternario (Fig. 2.7).





**Figura 2. 7** Estratigrafía de la Cuenca de Manabí. (Tomado de Reyes et al., 2013)

Las formaciones geológicas que afloran en la zona de estudio (Fig. 2.8), desde la más antigua a la más reciente son:

### 2.5.1 Formación Dos Bocas

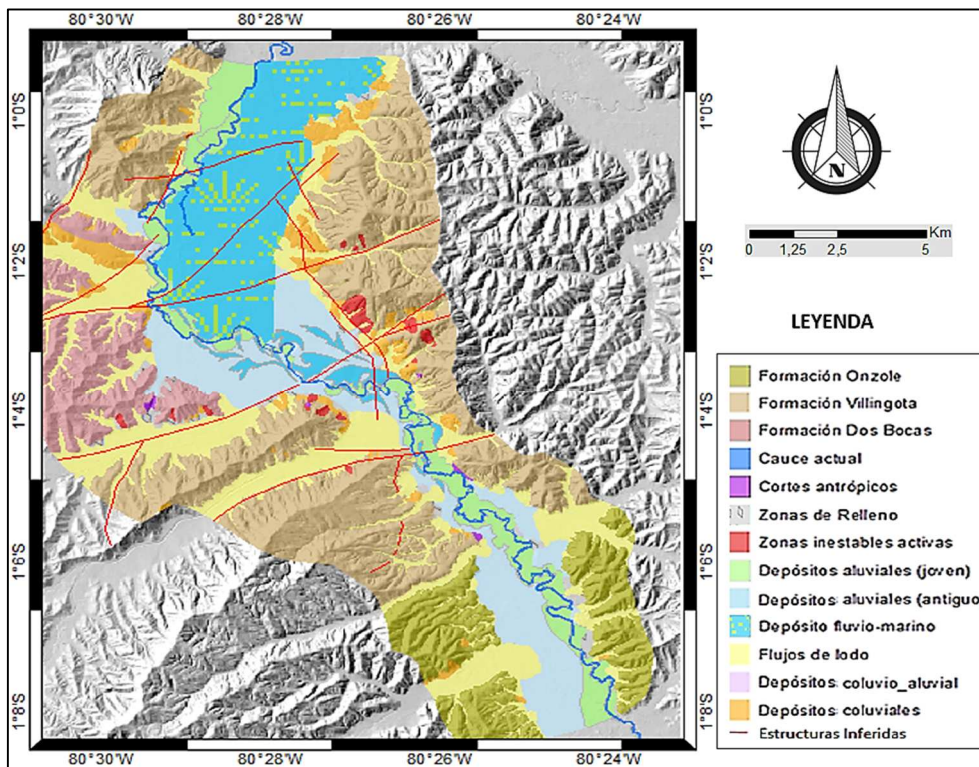
Considerada como una formación clástica de grano fino, que comprende de lutitas laminadas y lodolitas color chocolate, cortadas por diques sedimentarios de areniscas finas y por algunas vetillas de yeso. Presenta concreciones calcáreas y acumulaciones locales de óxidos de hierro y azufre sedimentario. El paleoambiente corresponde a una apertura marina, de ambiente batial, de edad Mioceno Temprano a Mioceno Medio. Hacia el norte de la Cuenca de Manabí, incrementa el tamaño de grano de arcilla a limo y tiene un espesor variable de 1000 a 2500m en la cuenca. (Reyes et al., 2013; Deniaud et al., 2000).

## 2.5.2 Formación Villingota

La formación es la transición gradual de la Fm. Dos Bocas. Compuesta de lutitas diatomáceas grises azuladas a habanas muy laminadas intercaladas con capas delgadas de areniscas y concreciones calcáreas. Corresponde a un paleoambiente de Máxima Transgresión Marina de edad Mioceno Temprano-medio a Mioceno medio. Tiene una potencia alrededor de 300 a 700m en la Cuenca de Manabí. (Reyes et al., 2013; Deniaud et al., 2000).

## 2.5.3 Formación Onzole

Conformada por lutitas a limolitas lodolíticas azuladas, cuando están meteorizadas se muestran de color café amarillento, intercalado con tobas volcánicas blancas, y capas finas de areniscas. La Fm. Onzole es considerada el equivalente lateral de la Fm. Subibaja al sur. Tiene una potencia alrededor de 500m. En ausencia de la Fm. Angostura, la Fm. Onzole sobreyace en discordancia a la Fm. Villingota. El paleoambiente corresponde a un ambiente de depositación batial de 1500m a 2000m de profundidad, de edad Mioceno Tardío a Plioceno Temprano. Tiene un rango de espesor de 300 a 600m en la Cuenca de Manabí. (Reyes et al., 2013; Hernández, 2012; Deniaud et al., 2000).



**Figura 2. 8** Geología de la zona de estudio. (Modificado de IGEPN, 2017).



## **2.5.4 Depósitos del Cuaternario**

### **- Depósitos Aluviales**

Caracterizados por suelos con cantos y gravas en matriz de granulometría fina a muy fina, erosionados y transportados por ríos, en el fondo de los valles a partir de las cuencas de segundo orden. En el cantón Portoviejo está caracterizado por terrazas medias y valles. (SNI, 2012)

### **- Depósitos Coluviales**

Son depósitos retrabajados, de acumulaciones de suelos residuales no consolidados, generados por la degradación de las formaciones Dos Bocas, Villingota y Onzole (IGEPN, 2017). Se depositan en los cambios bruscos de pendientes debido a los efectos de la dinámica gravitacional, acarreo fluvial o diluvial. Conforman terrazas más desarrolladas, con espesor más apreciable. Contienen fragmentos de roca angulosos distribuidos caóticamente en una matriz abundante de granulometría limo-arcillosa.

### **- Depósitos Coluvio-Aluvial**

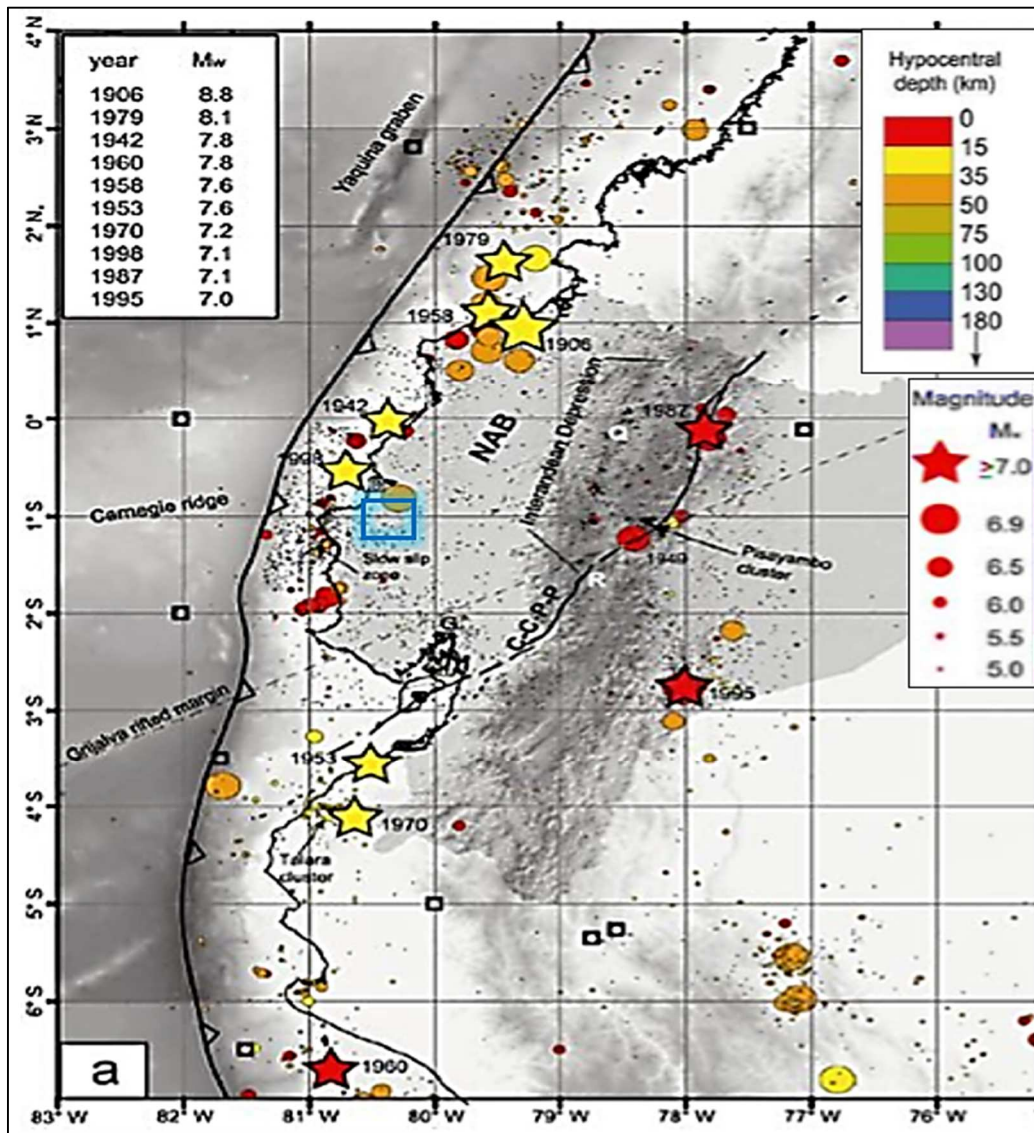
Depósitos de origen denudativos, compuestos principalmente por arenas, gravas y limos. En el Cantón Portoviejo se encuentran formando conos de deyección con pendientes suaves (SNI, 2012).

### **- Depósitos Fluvio-marino**

Depósitos conformados por suelos arenosos y limo arcillosos de estuario, con posible cantidad de materia orgánica y carbonatos. Resultado de aportes sedimentarios continentales y marinos, en la zona intermareal. Posiblemente estos depósitos pertenecen a la ría fósil del Río Portoviejo, de edad Pleistoceno Superior. (IGEPN, 2017).

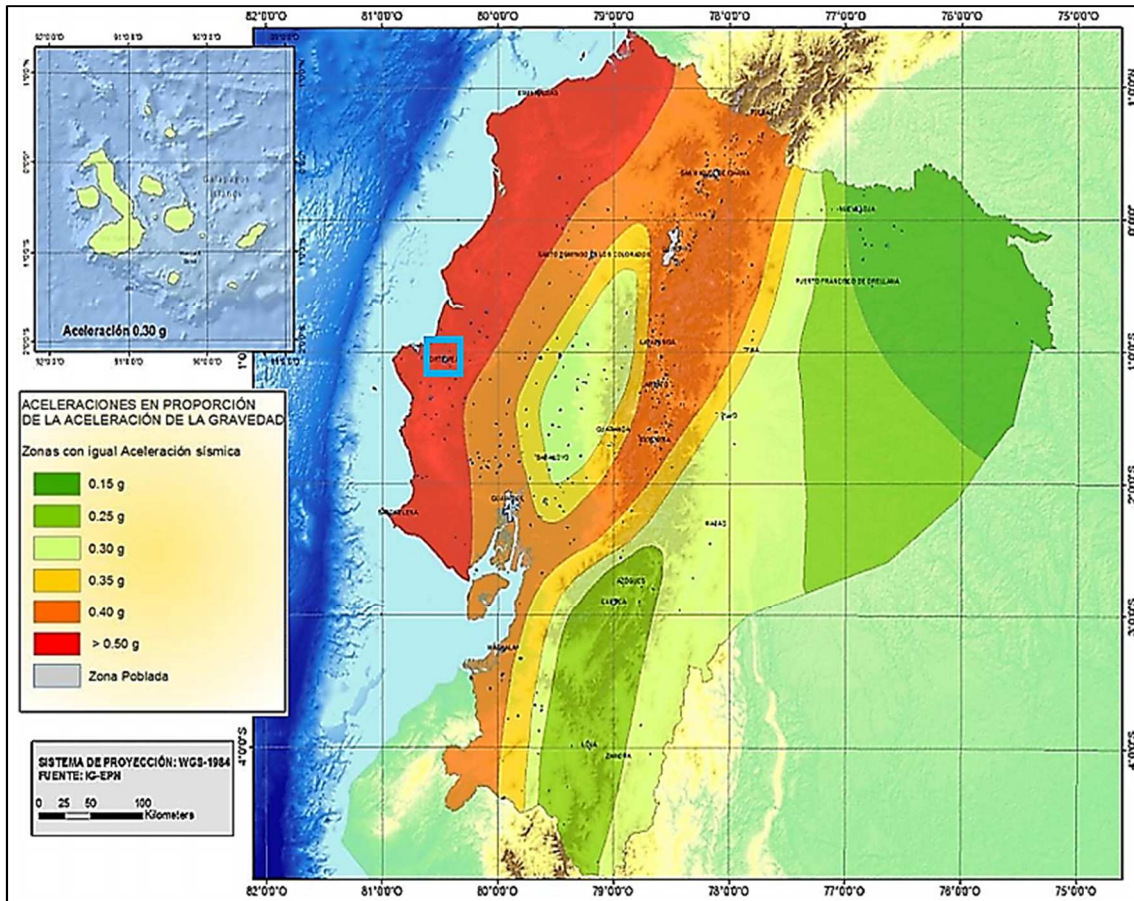
## 2.6 TECTÓNICA REGIONAL Y SISMICIDAD

La región Costa está caracterizada por una complejidad morfo-estructural atribuida a la tectónica activa interplaca. La misma que asocia hacia el sur a una estructura sismogénica de “fallas *megaplay*”, relacionado a la apertura de la corteza continental, capaz de generar sismos mayores a 7 en magnitud. En la parte central, evidencia tasas moderadas a altas en mm/año, de un levantamiento tectónico en las terrazas marinas Plio-cuaternarias, generadas por la subducción de la Cordillera de Carnegie. Y hacia la parte norte la subsidencia de la Cuenca Esmeraldas genera sismos delineados en el sector Galera, al sur de la provincia de Esmeraldas. (Chunga, 2011; Yepes et al., 2016).



**Figura 2. 9** Sismicidad superficial en la zona de interface con profundidad hipocentral  $Z \leq 50m$ . El recuadro en azul, corresponde a la zona de estudio. (Modificado de Yepes et al, 2016)

Durante el último siglo aproximadamente, ha habido cinco grandes terremotos asociados con la subducción, principalmente en la zona sísmogénica interplaca, ocurridos en los años: 1906 ( $M_w$  8.8), 1942 ( $M_w$  7.8), 1958 ( $M_w$  7.8), 1979 ( $M_w$  8.1), 2016 ( $M_w$  7.8), con planos de fallas que se extienden más de los 100 km de ruptura (Beauval et al., 2013; Yepes et al., 2016) (Fig. 2.9), lo que convierte a la región del litoral en una zona de alto riesgo sísmico, con valores altos de aceleración (Fig. 2.10).



**Figura 2. 10** Mapa del peligro sísmico del Ecuador para propósitos de diseño estructural. El recuadro en azul, corresponde a la zona de estudio. (Tomado de la NEC, 2015).

El sismo del 2016 en Pedernales, ocurrió en el mismo segmento de ruptura del sismo de 1942, a 20 km de profundidad, y con una intensidad máxima de 9 en la Escala Macrosísmica Europea (EMS), la cual es un indicador de la fuerza del evento que afecta a un lugar específico. En Pedernales la aceleración máxima del suelo sobrepasó la aceleración de la gravedad en la estación ubicado en la misma zona. En Manta y Portoviejo, los valores están en un rango de 1,17 a 6,00 m/seg<sup>2</sup>, que sobrepasan el 30% de la aceleración de la gravedad.

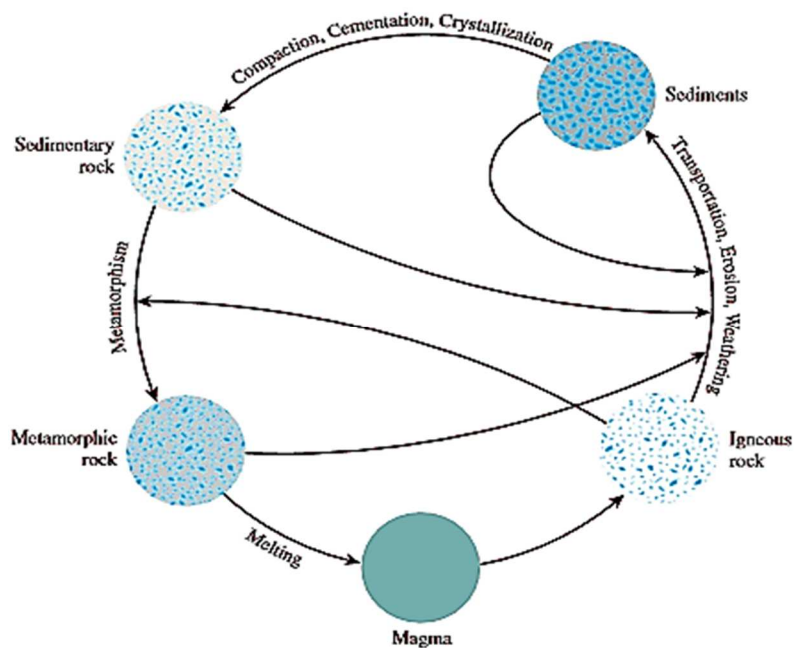
Siendo la aceleración un parámetro que permite conocer la fuerza que debe soportar una edificación durante un sismo. (IGEPN, 2016). Las fallas corticales representan una amenaza sísmica a la zona de estudio y está asociado principalmente al sistema de fallas de Jipijapa y de Montecristi.

## CAPITULO III

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1 SUELOS

Suelo, se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta, que en conjunto conforman una de las fases del suelo, la fase sólida. La fase líquida y gaseosa ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. Gran parte de las propiedades físicas del suelo son dictadas por el tamaño, forma, y composición química de los granos. (Braja et al., 2014).



**Figura 3. 1** Ciclo de la rocas y origen del suelo (Tomado de Braja et al., 2014)

#### 3.1.1 Formación

El suelo es producido por intemperismo, fruto de la alteración de varios tipos de rocas en fragmentos y partículas más pequeñas, mediante procesos mecánicos, químicos y biológicos. Generalmente inicia con la alteración mecánica, cuando se induce a esfuerzos que deforman y fraccionan la roca, siendo la erosión, la que permite la disminución de presiones (Fig 3.1).



Una vez que los suelos han sido depositados pueden sufrir diversos fenómenos, (Braja, 2014; TGE, 2000) como:

- Presiones, con lo que mejora la resistencia, disminuyendo la permeabilidad y compresibilidad.
- Variaciones del nivel freático.
- Cambios en el entorno, como la variación o cambio del nivel de tensiones, agua intersticial, la temperatura, etc.
- Acciones sísmicas o tectónicas, etc.

### 3.1.2 Depósitos del Suelo en la Naturaleza

Los suelos residuales: Son aquellos que se depositan en el lugar donde se formaron (Fig. 3.2). Los suelos residuales que se forman en climas templados o semiáridos, son usualmente rígidos y estables y no se extienden en gran profundidad, mientras que los suelos residuales que se desarrollan en climas cálidos húmedos, donde el tiempo de exposición ha sido largo, tienden a extenderse a profundidades que pueden sobrepasar los 100m. (Braja et al., 2014; Terzaghi., 1996).

Suelos transportados: Son aquellos que han sido movilizados a otros lugares por procesos físicos (Fig. 3.2), dividiéndose en diversas categorías, según el agente transportador (Braja et al., 2014; Duque, 2016).

1. **Aluviales o fluviales:** Depositados por agua en movimiento.
2. **Coluviales:** Formados por el movimiento del suelo del lugar original por acción de la gravedad, como por ejemplo, durante los deslizamientos.
3. **Lacustres:** Depositados en lugares de baja energía, lagos.
4. **Marinos:** Formados por la depositación de la marea.
5. **Glaciales:** Depositados por acción glaciaria.
6. **Eólicos:** Depositados por acción del viento.

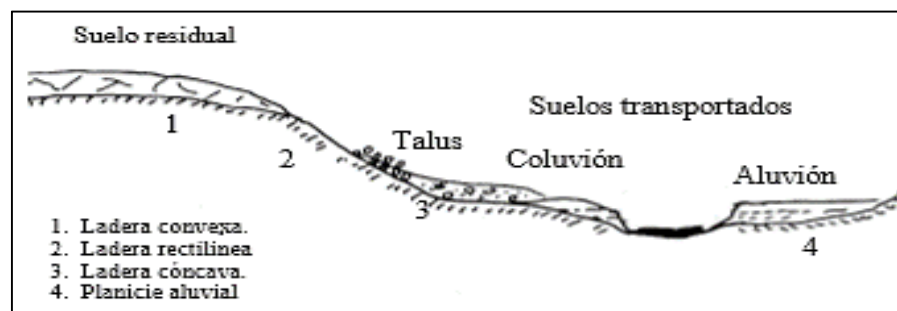


Figura 3. 2 Distintos tipos de formación de suelo (Tomado de Duque, 2016)

Suelos Orgánicos.; son aquellos suelos inorgánicos que se mezclan con porcentajes grandes de turba, son altamente compresibles, con un contenido natural de agua entre 200% y 300%, bajo carga generan un gran asentamiento debido a la consolidación secundaria de los suelos orgánicos.

La turba se forma principalmente en áreas costeras y regiones glaciares, donde los niveles freáticos presentan poca profundidad, lo cual ayuda al soporte del crecimiento de plantas acuáticas, que al descomponerse forman la *turba*. (Braja et al., 2014). La estructura del suelo puede ser natural (“in situ”) o suelo de cimentación o artificial (suelo como material de construcción o relleno). (Duque, 2016).

## **3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS**

### **3.2.1 Tamaño y Mineralogía**

El tamaño del suelo varía en amplio rango, el cual es independiente de su origen. Su clasificación más general según su tamaño, relacionada con el diámetro de las partículas. (Braja et al; 2014; Gonzáles de Vallejo, 2002):

**GRAVAS.-** Son fragmentos de rocas entre 76.2 y 2mm, ocasionalmente con partículas de cuarzo, feldespato y otros minerales. No retienen el agua

**ARENAS.-** Son partículas comprendidas entre 2 y 0.075mm. Formados principalmente de cuarzo y feldespatos, aunque también puede estar conformados por otros granos minerales visibles a simple vista, al mezclarse con agua no forman agregados continuos, sino que se separan con facilidad.

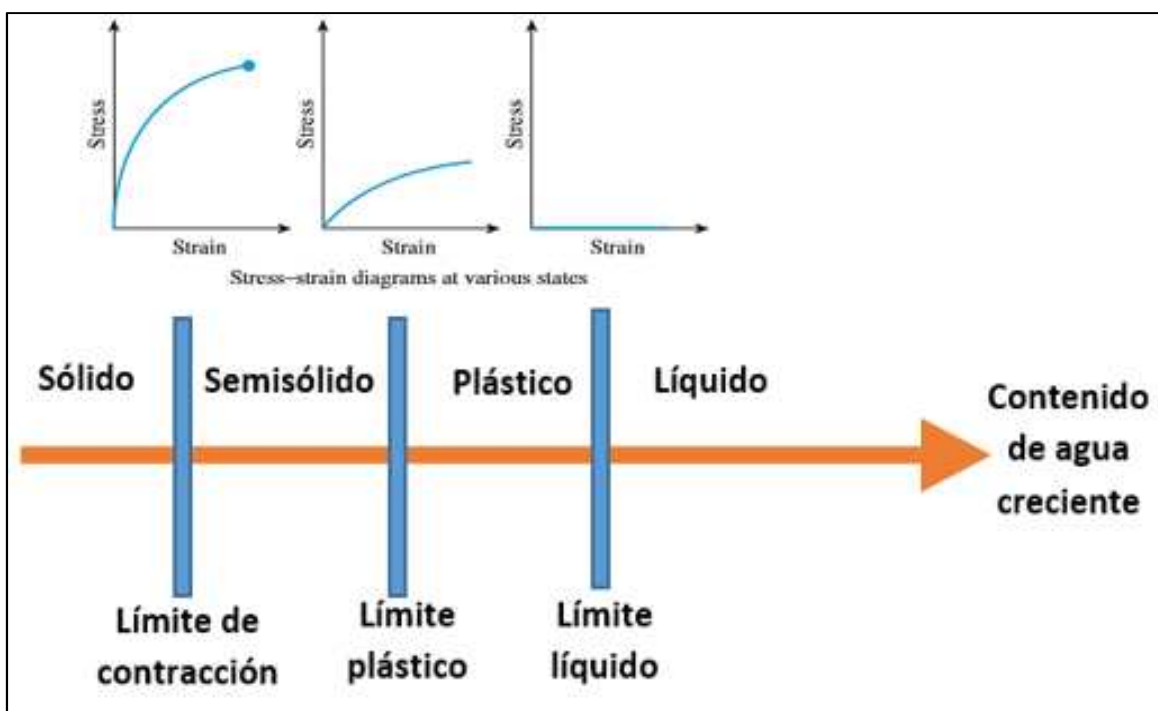
Al secarse no se retraen, se comprime rápidamente y normalmente no presentan cohesión.

**LIMOS.-** Son partículas microscópicas de suelo, comprendidas entre 0.075 y 0.002 mm. Compuesto principalmente de cuarzo y algunas partículas micáceas. Retiene el agua, y forma una pasta agua-limo, al golpear con la mano la pasta, sale con facilidad el agua. El limo al estar seco posee una baja resistencia.

**ARCILLAS.-** Son partículas con tamaños inferiores a 0.002 mm, sub-microscópicas. Compuesta principalmente por minerales arcillosos y otros minerales. Las partículas de arcilla en su mayoría corresponden al tamaño coloidal con 2  $\mu\text{m}$  de límite superior, y no siempre corresponde con la mineralogía de minerales arcillosos. Estas partículas poseen gran retención del agua debida a su estructura de enlaces débiles, permitiendo ingresar con gran facilidad las moléculas de agua, incrementando el volumen de las arcillas, por lo que al secarse tienden a retraerse. Son muy compresibles y presentan cohesión. Al estar seca posee una alta resistencia.

### 3.2.3 Consistencia Del Suelo

En la naturaleza, el comportamiento del suelo de grano fino dependerá del contenido de agua y en función de ello se define su consistencia. El suelo se divide en cuatro estados básicos de acuerdo al comportamiento: sólido, semisólido, plástico y líquido, la transición de un estado a otro definen el umbral sobre el cual el suelo pasa de un comportamiento a otro. Esta transición están definidos por los Límites de Consistencia o *Límites de Atterberg* (Fig. 3.3), que son parámetros físicos, que permiten generar una clasificación para suelos finos y no son límites absolutos. (Braja et al., 2014; Gonzáles de Vallejo, 2002; ASTM D4318).

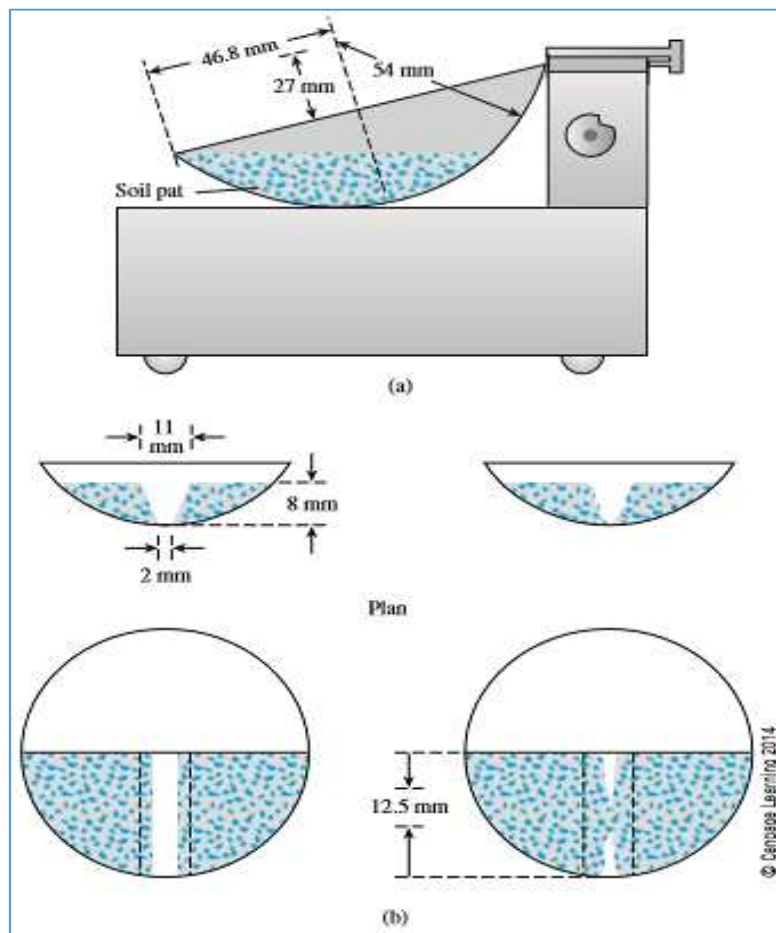


**Figura 3. 3** Límites de Atterberg. (Tomado de Braja et al., 2014).

### 3.2.3.1 Límites de Atterberg

#### - Límite líquido

La transición entre el estado líquido al estado plástico está denotado por el límite líquido (LL). Está representado por el bajo contenido de agua en el cual el suelo se comporta como un líquido. Este valor está dada por una prueba que consiste en colocar una pasta de suelo en una copa de bronce de un equipo tipo “Casagrande”, al cual se corta una ranura estándar en el centro de la pasta de suelo y luego se levanta la copa y se deja caer sobre una base de hule duro repetidamente a una altura de 10mm, en dicha prueba el contenido de agua necesario para cerrar una distancia de 12.7mm debe cerrarse después de los 25 golpes, define el límite líquido. El límite líquido representa la cantidad mínima de humedad en el cual la resistencia al corte es mínima (Fig. 3.4). (Braja et al, 2014; Verruijt et al., 2001; ASTM D4318; Carter et al., 2016).



**Figura 3. 4** Prueba del Límite Líquido en un equipo tipo “Casagrande”. a) Equipo. b) Procedimiento. (Tomado de Braja et al., 2014).



### - Límite Plástico

La transición entre el estado plástico al estado semisólido esta denotado por el Límite Plástico (LP). Está representado por el contenido de agua en el cual el suelo puede ser enrollado hasta formar cilindros de aproximadamente 3mm de diámetro, hasta que comienza a desmoronarse, se puede considerar como una medida de dureza en el suelo (la energía requerida para fracturarlo), relacionada con la resistencia al corte. (Braja et al, 2014; Verruijt et al., 2001; ASTM D4318; Carter et al, 2016).

### - Límite De Contracción

La transición entre el estado poco plástico o semisólido al estado sólido esta denotado por el límite de contracción (LS), representado por el contenido de agua en el cual la masa del suelo no presenta un cambio de volumen. (Braja et al, 2014; Verruijt et al., 2001; ASTM D4318).

#### 3.2.3.2 Índice De Plasticidad

Corresponde a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo. El Índice de Plasticidad (IP) es el cambio del contenido de humedad necesario para provocar un cambio de resistencia, aproximadamente cien veces más. Existe una correlación entre la plasticidad y el índice plástico dado por la Tabla 3.1. (Braja et al, 2014; Carter et al 2016).

<b>Índice Plástico</b>	<b>Descripción</b>
0	No Plástico
1-5	Ligeramente plástico
5-10	Plasticidad baja
10-20	Plasticidad media
20-40	Plasticidad alta
>40	Plasticidad muy alta

**Tabla 3. 1** Clasificación del Índice de Plasticidad en manera cualitativa. (Tomado de Braja et al., 2014)

### 3.2.3.3 Índice De Liquidez

Cuantifica la consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural. Varía entre 0 y 1 (Fig. 3.5) (Braja et al, 2014). Y está dado por (3.1)

$$IL = \frac{w-PL}{LL-PL} \quad (3.1)$$

Donde  $w$  = contenido de agua del suelo *in situ*.

Con esta relación se obtienen los diferentes casos (Braja et al, 2014):

$IL > 1$  Cuando el contenido de humedad in situ es mayor al límite líquido en una arcilla sensitiva. Estos suelos se comportan como líquido viscoso, al ser remoldeados.

$IL < 0$  Cuando el contenido de humedad natural es menor al límite plástico, entonces se dice que los suelos están sobre consolidados.

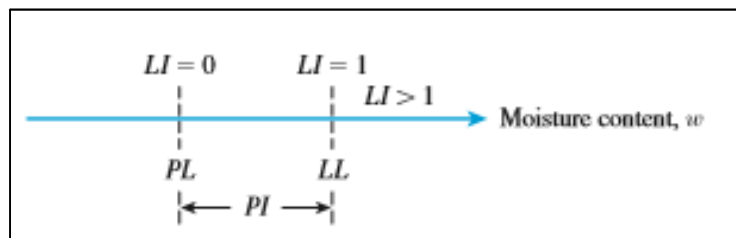
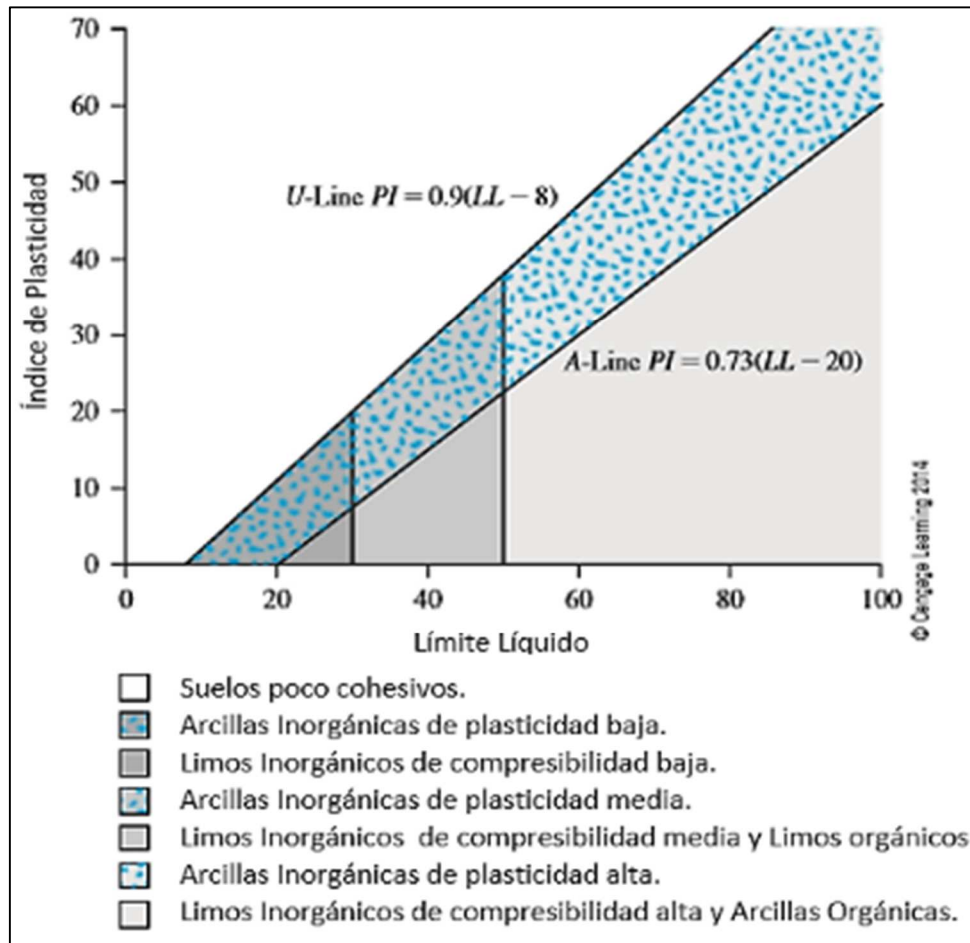


Figura 3. 5 Índice de Liquidez (Tomado de Braja et al., 2014)

### 3.2.3.4 Carta De Plasticidad

La Carta de Plasticidad proporciona información para la clasificación de los suelos de grano fino en base al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. La Carta de Plasticidad representa una gráfica del Índice de Plasticidad vs el Límite Líquido (Fig. 3.6), en el cual se incorpora una línea A, que separa en la parte inferior a los limos inorgánicos de las arcillas inorgánicas en la parte superior de la línea. Los limos orgánicos se encuentran en una región bajo la línea A y con el LL entre 30 y 50. Las arcillas orgánicas se encuentran en una región bajo la línea A y con el LL mayor a 50. La línea U representa el límite superior aproximado de la relación del Índice de Plasticidad vs el Límite Líquido para cualquier tipo de suelo. (Braja et al 2014).



**Figura 3. 6** Carta de Plasticidad (Tomado de Braja et al 2014).

### 3.2.4 Actividad

Se denomina *Actividad* a la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje del material fino <0.002mm. Skempton et al., 1953, observó una relación lineal (3.2) cuanto más incrementaba el porcentaje de arcillas en el suelo también incrementaba el índice de plasticidad, siendo la plasticidad característico de varios tipos de minerales arcillosos, de esta manera puede ser una ayuda a una identificación aproximada de la naturaleza del mineral arcilloso. (Braja *et al.*, 2014).

$$A = \frac{PI}{\% \text{ material fino } < 0.002mm} \quad (3.2)$$

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>TIPO DE MINERAL</b>
<b>4 – 7</b>	Na-Montmorillonita
<b>1.5</b>	Ca-Montmorillonita
<b>0.5 – 1.3</b>	Illita
<b>0.3 – 0.5</b>	Halloysita (deshidratada)
<b>0.1</b>	Halloysita (hidratada)

**Tabla 3. 2** Actividad de varios tipos de minerales (Tomado de Holtz & Kovacs et al., 1981)

### 3.2.5 Clasificación De Los Suelos

Existen distintas organizaciones que han descrito los suelos por el tamaño de sus partículas siendo la más difundida la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO). Sin embargo en la actualidad el sistema de clasificación aceptado universalmente, es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual ha sido acogido por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) (Braja et al., 2014). Según la semejanza de las propiedades físicas del suelo se han dividido en dos grandes grupos (Braja et al 2014):

1. Clasificación Textural: basado en la distribución por el tamaño de grano.
2. Comportamiento Ingenieril: basado en el comportamiento del suelo, tomando en consideración a la granulometría y la consistencia del suelo.

#### 3.2.5.1 Sistema Unificado De Clasificación De Suelos (SUCS)

Esta clasificación fue propuesta por Casagrande en 1942, en cual ha tenido diversas modificaciones durante el transcurso del tiempo. La clasificación se basa en parámetros de los límites de consistencia y la composición granulométrica de los suelos, tomando en cuenta el contenido de materia orgánica que pueda poseer (Fig 3.7). En la actualidad es utilizado para las Pruebas de la ASTM D-2487. Esta clasificación (Tabla 3.3) divide a los suelos en tres grupos:

Tipo de Suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
<b>Grava</b>	G	Bien graduado	W
<b>Arena</b>	S	Pobrementemente graduado	P
<b>Limo</b>	M	Limoso	M
<b>Arcilla</b>	C	Arcilloso	C
<b>Orgánico</b>	O	Límite líquido > 50	L
<b>Turba</b>	Pt	Límite líquido < 50	H

**Tabla 3. 3** Símbolos generales SUCS (Tomado de Braja et al., 2014)

- Suelos de Granulometría gruesa (G y S): Constituidos por gravas y arenas con más del 50% retenido al pasar por el tamiz N° 200.
- Suelos de Granulometría fina (M y C): Constituidos por limos y arcillas inorgánicas con al menos el 50%, pasando por el tamiz N°200.
- Suelos orgánicos (O, Pt): Constituidos por suelos altamente orgánicos y turba o lodos.

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests <sup>A</sup>				Soil Classification		
				Group Symbol	Group Name <sup>D</sup>	
COARSE-GRAINED SOILS	Gravels (More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve)	Clean Gravels (Less than 5 % fines <sup>C</sup> )	$Cu \geq 4$ and $1 \leq Cc \leq 3^D$	GW	Well-graded gravel <sup>E</sup>	
			$Cu < 4$ and/or $[Cc < 1$ or $Cc > 3]^D$	GP	Poorly graded gravel <sup>E</sup>	
		Gravels with Fines (More than 12 % fines <sup>C</sup> )	Fines classify as ML or MH	GM	Silty gravel <sup>E,F,G</sup>	
	More than 50 % retained on No. 200 sieve		Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel <sup>E,F,G</sup>	
		Sands (50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve)	Clean Sands (Less than 5 % fines <sup>H</sup> )	$Cu \geq 6$ and $1 \leq Cc \leq 3^D$	SW	Well-graded sand <sup>I</sup>
				$Cu < 6$ and/or $[Cc < 1$ or $Cc > 3]^D$	SP	Poorly graded sand <sup>I</sup>
FINE-GRAINED SOILS	Sils and Clays	inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line <sup>J</sup>	CL	Lean clay <sup>K,L,M</sup>	
			$PI < 4$ or plots below "A" line <sup>J</sup>	ML	Silt <sup>K,L,M</sup>	
	50 % or more passes the No. 200 sieve	Sils and Clays	inorganic	$\frac{Liquid\ limit - oven\ dried}{Liquid\ limit - not\ dried} < 0.75$	OL	Organic clay <sup>K,L,M,N</sup> Organic silt <sup>K,L,M,O</sup>
					OH	Organic clay <sup>K,L,M,P</sup> Organic silt <sup>K,L,M,O</sup>
		Sils and Clays	inorganic	PI plots on or above "A" line	CH	Fat clay <sup>K,L,M</sup>
				PI plots below "A" line	MH	Elastic silt <sup>K,L,M</sup>
HIGHLY ORGANIC SOILS	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor			PT	Peat	

**Figura 3. 7** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. (Tomado de las Pruebas ASTM D-2487).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS DE LOS SUELOS

#### 3.3.1 Expansividad

La expansión del suelo es el aumento del volumen de poros, reordenando las partículas en una estructura más abierta, esto es debido a la adsorción de agua, dada la deficiencia eléctrica del suelo, su alta superficie específica y su capacidad catiónica de cambio. Los problemas que ocasionan están vinculados con las altas presiones y grandes deformaciones por el hinchamiento que sufre el suelo. (González de Vallejo, 2002)

##### 3.3.1.1 Potencial De Expansividad

Proporciona la susceptibilidad de un suelo a la contracción o expansión debido a disminución o aumento del contenido de humedad. El potencial de expansividad puede ser inferido con propiedades físicas del suelo y se rigen por las cantidades y tipos de arcillas presentes. Seed et al. (1962) establece una relación del potencial de hinchamiento con el índice de plasticidad, que se aplica a suelos finos con contenido de arcilla entre el 8% y 65%, sin embargo puede alcanzar un 33% de error. Existen otras correlaciones entre el índice de plasticidad y el potencial de expansividad (Tabla. 3.4), que considera al material grueso presente en el suelo como el UK Building Research Establishment (BRE, 1993) y el UK National House Building Council (NHBC), que utilizan estas correlaciones junto con los métodos de diseño y otros factores para determinar las profundidades mínimas de cimientos. (Carter & Bentley et al., 2016; Braja et al., 2014).

<i>Potencial de Expansión (%)</i>	<i>Índice de Plasticidad</i>		<i>Índice de Plasticidad Modificado</i>	
	<i>Seed et al. (1962)</i>	<i>Krebs and Walker (1971)</i>	<i>BRE (1993)</i>	<i>NHBC (2008)</i>
<i>Bajo</i>	0 - 15	0 - 15	<20	<20
<i>Medio</i>	10 - 30	15 - 24	20 - 40	20 - 40
<i>Alto</i>	20 - 55	25 - 46	40 - 60	>40
<i>Muy alto</i>	>40	>46	>60	--

**Tabla 3. 4** Identificación de suelos expansivos en base a su índice de plasticidad. (Tomado de Carter & Bentley et al., 2016).

Generalmente los suelos con alto índice de plasticidad tienen altos valores de hinchamiento sin embargo no siempre sucede, por lo que se convierte en una guía aproximada del potencial de expansividad, son expansivos algunas veces los suelos clasificados como limos inorgánicos de plasticidad alta (MH), las arcillas de plasticidad alta (CH), con límites líquidos mayores de 50%. (Carter & Bentley et al., 2016; Braja et al., 2014). Así mismo se han realizado estudios relacionando el Límite Líquido con el grado de hinchamiento (Tabla 3.5).

<b>Límite Líquido</b>	<b>Grado de Expansión</b>
0 - 20	No hay hinchamiento
20 - 35	Baja hinchamiento
35 - 50	Hinchamiento medio
50 - 70	Alto hinchamiento
70 - 90	Hinchamiento muy alto
>90	Hinchamiento extra alto

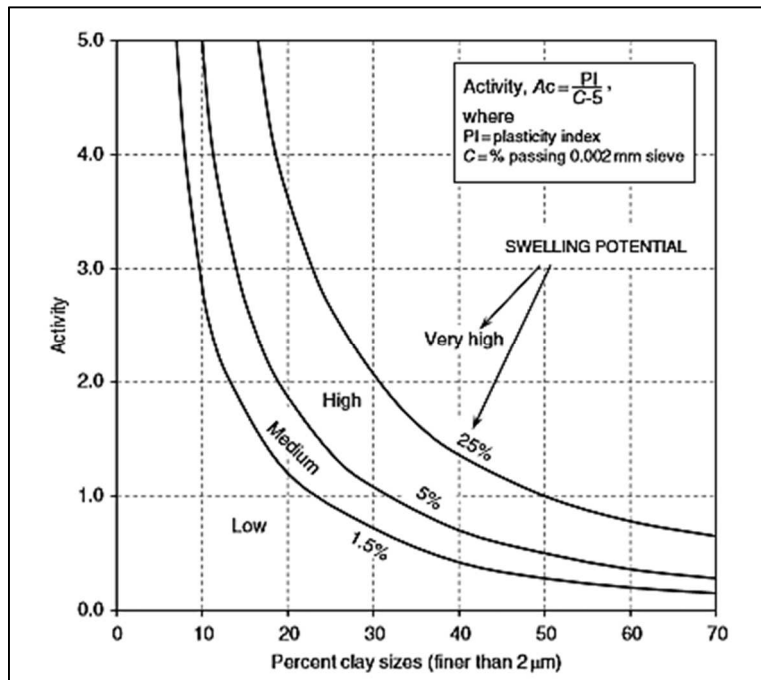
**Tabla 3. 5** Relación entre El Potencial Expansivo y El Límite Líquido según Dakshanamurthy Y Raman, 1973.

Otra forma de determinar la expansividad de los suelos mediante correlaciones es la medida en la que una arcilla en presencia de agua se expande, incorporando considerables cantidades de agua en su red mineral, y esto está asociado con la actividad de los minerales arcillosos, por lo tanto puede ser una guía para identificar de arcillas expansivas. (Braja *et al.*, 2014).

Seed *et al.* (1962), sugiere una correlación entre el potencial de hinchamiento y la actividad del contenido de material fino (<0.002mm), (Fig 3.8) que está modificado a partir de la correlación de Skempton (3.3):

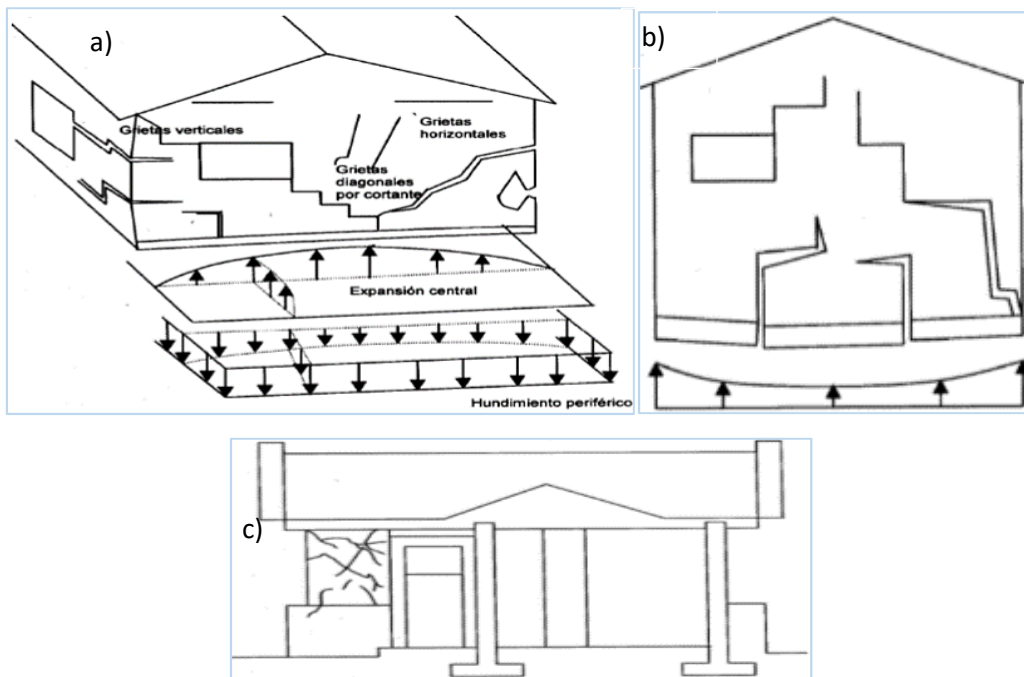
$$Ac = \frac{PI}{C-5} \quad (3.3)$$

Donde C es el contenido de material fino (<0.002mm).



**Figura 3. 8** Clasificación del Potencial de Hinchamiento en base a la actividad.  
 (Tomado de Carter & Bentley et al., 2016).

Los daños generados por suelos expansivos han causado grandes pérdidas económicas a nivel mundial en daños estructurales, dentro de los daños más comunes se encuentran las grietas de desecación, distorsiones, entre otras. (Fig 3.9)



**Figura 3. 9** (a) Movimiento céntrico sobre todo en estructuras ligeras (daño a largo plazo). (b) Movimiento perimetral (daños a corto plazo). (c) Movimiento cíclico asociado a cambios cíclicos de expansión y contracción del suelo. (Tomado de Fredlund y Rahardjo et al., 1993)

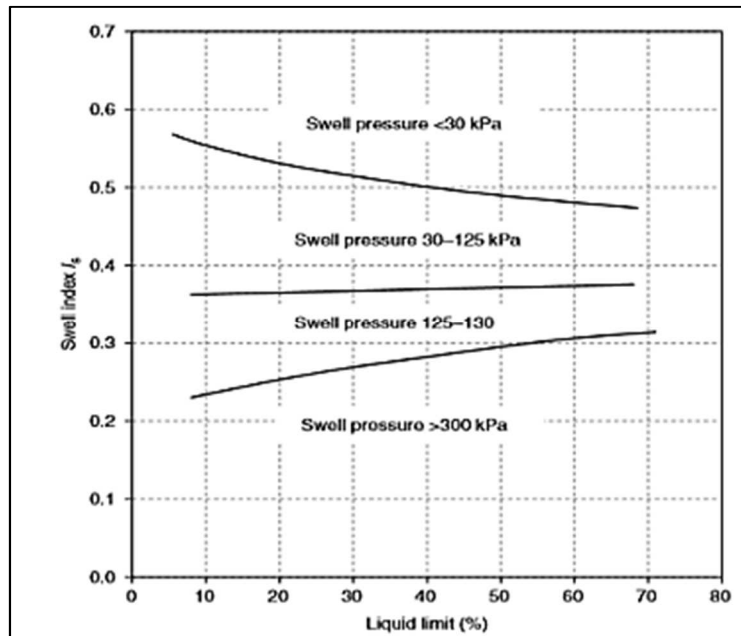


### 3.3.1.2 Presión De Hinchamiento

La presión de hinchamiento es una evaluación, necesaria para propósitos de diseño, esta presión se puede determinar por un ensayo de edómetro (consolidómetro), sin embargo también se puede estimar desde relaciones empíricas (Fig 3.10). Komornik & David *et al.* (1969) han propuesto una estimación a partir del límite líquido, definiendo un Índice de Presión dado por:

$$IS = \frac{m}{LL} \quad (3.4)$$

Donde  $m$  es la humedad natural y  $LL$  es el límite líquido



**Figura 3. 10** Relación entre el Índice de presión y la presión de hinchamiento dado por el rango del Límite Líquido. (Tomado de Carter & Bentley et al., 2016)

### 3.3.2 Módulo Elástico de Cizalladura

Denominado también Módulo Dinámico de Corte o Módulo de Rigidez al Esfuerzo Cortante (G) y define la relación de esfuerzo cortante–deformación angular en un suelo. El comportamiento mecánico del suelo puede representarse por Modelos Lineales cuando el suelo está sometido a deformaciones pequeñas, Modelos visco-elásticos cuando las deformaciones que actúan son “medianas”, y Modelos no Lineales cuando existen grandes deformaciones, en donde se incrementa la degradación de la rigidez y la disipación de la energía (Ortiz, 2013).

### 3.3.2.1 Módulo Elástico de Cizalladura Máximo

El módulo dinámico de corte máximo o inicial ( $G_{\text{máx}}$ ) o ( $G_0$ ), define el comportamiento del suelo a pequeñas deformaciones, toman valores bajo el límite de deformación elástica lineal (aproximadamente  $\gamma=5 \times 10^{-3}\%$ ). Este parámetro es importante en la deducción de amplificación o atenuación de las ondas generadas por sismos en un depósito de suelo. (Ortiz, 2014). Este valor se puede obtener mediante la relación (3.5), para diversos tipos de suelos.

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (3.5)$$

$G_{\text{máx}}$ .- Módulo de elástico de cizalladura máximo

$\rho$  .- Densidad natural del suelo

$V_S$ .- Velocidad de cizallamiento (Este valor generalmente se obtiene mediante en ensayos geofísicos).

Los factores que influyen en el módulo de rigidez al corte del suelo son (Braja et al., 2014; Yoshida, et al., 2015):

- Incrementa con el incremento esfuerzo efectivo principal o tensión total efectiva vertical,  $\sigma'_v$
- Disminuye con el incremento del índice de vacíos,  $e$
- Disminuye con el incremento de la deformación en arcillas de alta plasticidad.
- Aumenta con el incremento del índice de plasticidad ( $OCR > 1$ ) en suelos ligeramente consolidados.
- Permanece más o menos con el incremento del índice de plasticidad ( $OCR = 1$ ) en suelos normalmente consolidados.
- Incrementa con la edad geológica.
- Incrementa con el grado de cementación.

### **3.4 RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS DE LOS SUELOS**

#### **3.4.1 Gravedad específica (Gs)**

Está definido como la relación del peso unitario ( $W_s$ ) de un material al peso unitario del agua (3.6). Los valores típicos están asociados a la densidad de los minerales que constituyen la fase sólida del suelo. Por lo general estos valores están comprendidos entre 2.6 a 2.9 Los suelos arenosos que en general están compuestas por cuarzo y tienen valores de 2.65, y para suelos limosos y arcillosos varían desde 2.6 a 2.9 (Braja et al., 2014).

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (3.6)$$

#### **3.4.2 Contenido de Humedad (w)**

Es la cantidad de agua que posee el suelo en estado natural. Representado por la relación entre el peso de la fase líquida del suelo ( $W_w$ ) y el peso de la fase sólida del suelo ( $W_s$ ) y expresada en porcentaje. (Braja et al., 2014).

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} (100) \quad (3.7)$$

#### **3.4.3 Porosidad (n)**

Es la relación entre el volumen de vacíos ( $V_v$ ) al volumen total ( $V$ ). Expresa la cantidad de vacíos en el volumen total, valor que se da en porcentaje. En un sólido perfecto  $n=0$ , sin embargo en los suelos  $n \neq 0$  y  $n \neq 100$ . (Braja et al., 2014)

$$n\% = \frac{V_v}{V} (100\%) \quad (3.8)$$

#### **3.4.4 Índice de vacíos (e)**

Es la relación entre el volumen de vacíos ( $V_v$ , comprende el volumen de la fase líquida y gaseosa) y el volumen de sólidos ( $V_s$ ). (Braja et al., 2014).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.9)$$

#### **3.4.5 Grado de saturación (S)**

Es la razón del volumen de agua ( $V_w$ ) al volumen de vacíos ( $V_v$ ).

$$S\% = \frac{V_w}{V_v} (100\%) \quad (3.10)$$

## 3.5 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

### 3.5.1 Métodos Geofísicos

La exploración geofísica es un método indirecto que permite determinar diferentes propiedades físicas de los diversos tipos de materiales que conforman la tierra y sus campos de fuerza. Dentro de los cuales existen dos tipos de métodos geofísicos para determinar sus estudios (Moon et al., 2006):

- Métodos Pasivos: Envuelve a medidas naturales existentes en el campo y permite evaluar indirectamente la conformación de los materiales, como las métodos gravimétricos, magnéticos, de radioactividad natural, etc.
- Métodos Activos: Mide la respuesta del suelo a la inducción de un estímulo exterior, dentro de ellos se encuentran los métodos eléctricos, electromagnéticos, sísmicos, radioactividad artificial, entre otros.

#### 3.5.1.1 Refracción por Micro-Tremores (ReMi)

La Refracción por Micro-tremores (ReMi), es un método sísmico pasivo nuevo, derivado de los métodos MASW y SASW, que en el cual se obtiene mediciones in situ de perfiles de velocidad de ondas de cizalla ( $V_s$ ) en función de la profundidad, permitiendo observar directamente la dispersión de las ondas superficiales generadas por el ruido sísmico ambiental o microtremores como fuente de energía. (Louie et al., 2001).

Evalúa y caracteriza el terreno analizando el espectro de registros de ruido ambiental, obteniendo un modelo de velocidades de onda  $V_s$  en los primeros 30m ( $V_{s30}$ ), este parámetro es ampliamente utilizado para caracterizar geotécnicamente el subsuelo sobre todo porque es un método de bajo costo y no invasivo por lo que es de gran utilidad en zonas urbanas e industriales, en especial cuando no se puede usar explosivos, como sucede en gran parte de los métodos tradicionales de refracción y reflexión.

### 3.5.2 Sondeos de Perforación

Los sondeos de perforación en el suelo se efectúan por diversos métodos: sondeos por barrena, por lavado, por percusión y los usuales por rotación.

Los sondeos de rotación son los más usuales en la exploración de suelos. Pueden perforar a grandes profundidades alcanzado los 1000m, cualquier tipo de suelo o roca. Se caracteriza por una extracción continua de testigos, la recuperación del testigo puede ser alta con respecto a la longitud perforada. Sin embargo la recuperación del testigo suele ser baja cuando se perfora materiales tipo grava y arenas finas bajo el nivel freático, debido al arrastre propio del fluido de perforación. (Gonzáles de Vallejo, 2002). Las muestras tomadas de la perforación son (Braja et al., 2014):

- Muestras Alteradas: Son muestras representativas utilizadas generalmente para pruebas en el laboratorio de análisis granulométrico, determinación del contenido orgánico, determinación de los límites de consistencia, clasificación de los suelos, densidad de la fase sólida en los suelos, entre otros.
- Muestras Inalteradas: Estas muestras se usan para hacer pruebas de consolidación, permeabilidad, resistencia al corte, entre otros.

### 3.5.3 Prueba de Penetración Estándar (SPT)

La prueba de penetración estándar (SPT), es un método semidirecto de exploración del subsuelo que estima las propiedades físicas-mecánicas a partir de correlaciones empíricas, que frecuentemente son estimadas con el número N de penetración estándar.

Las muestras se toman en un tubo de acero partido longitudinalmente con un acople en la parte superior ("*cuchara partida*"), el cual se conecta a la barra de perforación y se lleva a la profundidad que se va a realizar la prueba. Posteriormente se procede a golpear el muestreador en el suelo con un martillo en la parte superior de la varilla de perforación, el peso del martillo corresponde a 63.5 kg a 75cm de altura. Se registra el número de golpes realizados durante la penetración en tres intervalos de 15cm. Se suman el número de golpes en los últimos 30cm del ensayo y esta cifra corresponde al valor de N.

Luego se recupera la muestra tomada por la *cuchara partida* y se coloca en una botella de vidrio y se transporta al laboratorio para posteriores ensayos. (Braja et al., 2014; Yoshida et al., 2015). Las ventajas de este método es que nos permite tener numerosas correlaciones con propiedades geotécnicas de los suelos, los ensayos nos dan un indicio de la densidad y estructura de los suelos, historial de esfuerzos y deformaciones por ende permite determinar la resistencia al corte bajo condiciones no drenadas.

### 3.5.3.1 Factores de Corrección

El ensayo SPT, a pesar de ser un ensayo estándar posee muchas variantes sobre todo de los factores del entorno y factores mecánicos que se emplea en el procedimiento. Dentro de los cuales el más común es:

- Corrección a la energía aplicada

$$N_{60} = CN \cdot CE \cdot CB \cdot CS \cdot CR \cdot N_{medido} \quad (3.11)$$

$$N_{60} = N_{medido} \cdot \frac{ER}{60\% \cdot 475J} \quad (3.12)$$

FACTOR	VARIABLE	Corrección
<b>CN</b> Presión de Sobre carga		≤ 2
<b>CE</b> Relación de Energía	Martillo cilíndrico	0.5 – 1.0
	Martillo de seguridad	0.7 – 1.2
	Martillo Automático cilíndrico	0.8 – 1.3
<b>CB</b> Diámetro de la Perforación	65mm – 115mm	1.00
	150mm	1.05
	200mm	1.15
<b>CR</b> Longitud de Varillaje	3m – 4m	0.75
	4m – 6m	0.85
	6m – 10m	0.95
	10m – 30m	1.00
	>30m	>1.00
<b>CS</b> Tipo de Muestreador	Cuchara Estándar	1.0
	Cuchara sin líneas	1.1– 1.3
<b>ER</b> Energía realmente aplicada		

**Tabla 3. 6** Factores de corrección para los valores N medidos en los ensayos de SPT, (ASTM D4633-10)

### 3.6 MAPAS GEOTÉCNICOS

Los mapas geotécnicos muestran información integral de varias disciplinas como geología, hidrogeología, geomorfología, entre otras; enfatizando en las características y propiedades físico-mecánicas del suelo-roca, con el objetivo de evaluar su comportamiento y poder prever problemas geológicos y geotécnicos, y que además permitan orientar una mejor planificación y uso del territorio que va a ser representado en el mapa. (Dearman et al., 1991; Gonzáles de Vallejo, 2002).

Los mapas están en función de los objetivos, contenido, extensión de la zona de estudio, y escala. (Dearman et al., 1991). Dentro de los mapas geotécnicos se consideran diversos aspectos que permitan un mejor entendimiento de las condiciones reinantes del lugar a ser representado, entre los cuales pueden ser (Gonzáles de Vallejo, 2002):

- Descripción y clasificación geotécnica de suelos y/o rocas.
- Características y propiedades físico-mecánicas de los materiales.
- Condiciones hidrogeológicas y distribución del agua.
- Condiciones y procesos geomorfológicos.
- Procesos dinámicos.

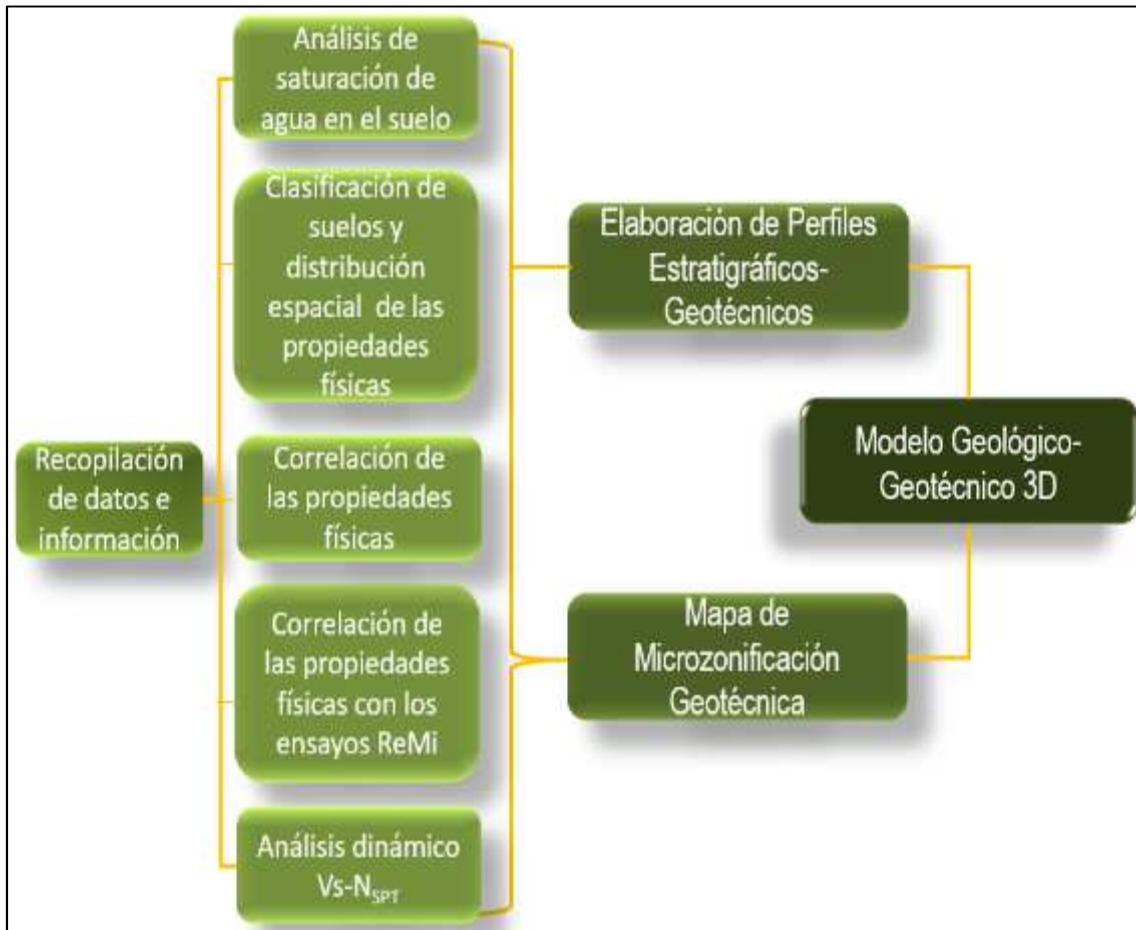
#### 3.6.1 Tipos de Mapas Geotécnicos

- Mapas de Evaluación Geotécnica del Terreno: Representa de forma cualitativa, clasificaciones generales, características geotécnicas de formaciones superficiales, zonificación somera, identificación de zonas problemáticas e información interpretativa del comportamiento del terreno para futuras aplicaciones geotécnicas.
- Mapas de Caracterización Geotécnica: Caracterización del terreno con propiedades e indicadores de calidad e información cuantitativa a detalle, zonificación geotécnica a detalle para aplicaciones ingenieriles (cimentaciones, taludes, obras concretas, etc). (Gonzáles de Vallejo, 2002).

## CAPÍTULO IV

### MARCO METODOLÓGICO

Con el propósito de cumplir los objetivos planteados, en esta investigación se ejecutaron los siguientes pasos:



**Figura 4. 1** Esquema del procedimiento metodológico en el proyecto dentro del proyecto de investigación.

#### 4.1 ANÁLISIS DE LA SATURACIÓN DE AGUA EN EL SUELO

##### 4.1.1 Análisis de las Épocas de Estiaje y Riada

Para el análisis pluviométrico, se obtuvieron datos de las precipitaciones de tres estaciones pluviométricas: Estación Portoviejo, Portoviejo UTM, y Portoviejo DAC, que se ubican dentro de la ciudad de Portoviejo, los datos fueron brindados por el Gobierno Autónomo de Portoviejo y poseen información desde el año 1981 hasta el año 2010, sin embargo la estación: Portoviejo UTM posee información desde 1981 hasta el año 2016.



Los datos corresponden a las precipitaciones acumuladas medias mensuales en cada año, sin embargo en muchos meses no existían datos, lo que suele ser común en la información de precipitaciones, para lo cual se procedió a completar de la base de datos la estación Portoviejo UTM, utilizando el método Multivariante, dentro del cual se encuentra el método Razón Normal. El método de la Razón Normal permite estimar el dato incompleto de una serie con un alto grado de correlación, empleando tres estaciones contemporáneas y vecinas, a través de la expresión (Barrera, 2004):

$$x(t) = \frac{1}{3} \left[ \frac{\bar{x}}{\bar{x}_1} x_1(t) + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_2} x_2(t) + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_3} x_3(t) \right] \quad (4.1)$$

Donde  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ , son las medias de las variables en cuestión de la serie incompleta y de las series de las estaciones vecinas.

$x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  y  $x_3(t)$ , son los datos correspondientes a las series vecinas respectivamente.

Una vez con los datos realizados, se procede a analizar la variación de las precipitaciones acumuladas mensuales multianuales y la precipitación medio anual, mediante gráficos de distribución, con el análisis se pretende tener datos de las propiedades físicas de los suelos que sean característicos para los factores ambientales reinantes para dicha época en la que se realizaron los ensayos de perforación, entre ellos se determina el índice de vacíos, el contenido de humedad, el grado de saturación en el suelo, densidad aparente, seca y saturada para diferentes profundidades en cada sondeo de perforación.

Posteriormente se homogenizan los valores de las propiedades del suelo como es la porosidad, peso específico seco, húmedo y saturado, grado de saturación y la humedad reinante para la época en la que se realizó los sondeos de perforación caracterizando y homogenizando estos valores para esta época a distintas profundidades de 0m a 10m, de 10m a 20m y de 20m a 30m.

#### **4.1.2 Procesamiento de Imágenes Satelitales para la Estimación de Zonas Propensas a la Saturación de Agua en el Suelo**

Para el análisis de saturación de agua en el suelo se procede a realizar en el software ArcGIS 10.5, un procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 de noviembre del 2016, la cuales fueron elegidas por estar dentro de la época seca permitiendo identificar los suelos que poseen mayor retención de humedad durante dicha época, estas imágenes contienen una imagen pancromática de resolución 15m y una imagen multiespectral de 30m de resolución, otorgado por el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE). A través de la percepción remota y mediante distintas metodologías se identifica las características físicas del suelo, como son las zonas con mayor contenido de humedad en el suelo (Castro, 2011). Para lo cual se procedió de la siguiente manera:

a. Metodología de combinación de bandas para discriminar zonas de mayor contenido de humedad.

La combinación se realiza con la herramienta de análisis de imágenes de ArcGis, combinando las bandas 2,3,6, la combinación nos brinda una imagen en tonalidades rojizas, característico del infrarrojo cercano, siendo esta la peculiaridad de la banda 6, la misma que permite diferenciar con mayor claridad zonas de tierra húmeda que poseen reflectancia en el infrarrojo cercano.

b. Metodología de clasificación supervisada

En este método se procede a una clasificación con el método de máxima verisimilitud de ArcGis, para obtener un mapa de las diferentes coberturas, así como de los suelos con humedad, para lo cual se toma campos de entrenamiento que poseen diferentes firmas espectrales, estos campos son lugares que se comprobaron el tipo de cobertura, con observaciones en campo. Además se utilizó la imagen obtenida del literal anterior para caracterizar mayor número de zonas de suelo con mayor contenido de humedad. De esta manera se tiene diferentes respuestas a las firmas espectrales obteniendo las siguientes zonas:

1. Suelo con humedad
2. Suelo sin humedad
3. Cuerpos de agua
4. Zona urbana
5. Vegetación

c. Metodología de Tasseled Cap

La metodología es una transformación de imágenes satelitales que proporciona una manera analítica para determinar diferentes componentes de los suelos como el brillo, verdor y humedad, el tercer componente representa las entidades húmedas, como el agua y la humedad en el suelo. Para lo cual se realiza la siguiente transformación (4.2) (Baig et al., 2014):

$$\text{Húmedad} = 0.1511(B2) + 0.1973(B3) + 0.3283(B4) + 0.3407(B5) - 0.7117(B6) - 0.4559(B7) \quad (4.2)$$

d. Metodología del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Esta Metodología también es conocida como *Normalized Difference Vegetation Index*, o NDVI por sus siglas en inglés, que permite identificar el índice de vegetación en la zona (Castro, 2011). Para lo cual se procedió a realizar en la herramienta de análisis de imágenes, que posee un módulo de cálculo NDVI, utilizando la siguiente operación entre las bandas de las imágenes satelitales:

$$NDVI = \frac{NIR(B5) - RED(B4)}{NIR(B5) + RED(B4)} \quad (4.3)$$

e. Superposición de Imágenes Satelitales

Se realiza un *Reclass*, de la imagen obtenida en NDVI donde se discrimine suelos con vegetación de los suelos sin cobertura vegetativa, lo mismo se realiza un *Reclass* de la imagen obtenida de la clasificación supervisada, para obtener una imagen que posea sólo la capa de suelos con humedad (4.4). Simultáneamente se realiza un *Reclass* de los suelos con mayor humedad de la imagen de obtenida por la metodología de Tasseled Cap.

Al final se realiza una superposición de imágenes satelitales con las reclasificaciones de la imagen supervisada y la imagen de Tasseled Cap con la reclasificación del NDVI (4.5), con el propósito de descartar zonas con cierto tipo de vegetación que posean un similar espectro a los suelos húmedos y que no se hayan descartado en las imágenes obtenidas en el literal b y c. humedad (Castro, 2011).

$$\text{Superposición (a): } \text{Reclass (Imagen Supervisada)} - \text{Reclass (Vegetación densa NDVI)} = \text{Suelos con humedad} \quad (4.4)$$

$$\text{Superposición (b): } \text{Reclass (Tasseled Cap)} - \text{Reclass (Vegetación densa NDVI)} = \text{Suelos con humedad} \quad (4.5)$$

#### **4.1.3 Mapa de Estimación de Saturación de Agua en el Suelo**

El mapa de Estimación de Saturación de agua en el suelo se realiza a partir del compendio de: los drenajes de la zona de estudio, zonas de inundación, zonas de estancamiento de agua en épocas de alta pluviosidad, isoyetas de los niveles freáticos de la zona datos que fueron otorgados por el Gobierno Autónomo Descentralizado de Portoviejo, y las zonas de humedad obtenidos durante el análisis de las imágenes satelitales, y los valores de humedad homogenizados a diferentes profundidades en cada sondeo de perforación, para de esta manera poder estimar las zonas más propensas a la saturación de agua en el suelo.

#### **4.2 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

Se realizó el levantamiento de información de cada sondeo de perforación, los cuales corresponden a 19 sondeos realizados por el Área de Mecánica de Suelos-PUCE en la ciudad de Portoviejo, en los meses de mayo a junio del año 2017, a dicha información se le añadió la información de un sondeo de perforación (*P2H*), realizado por la empresa GeoEstudios S.A, en marzo del año 2013, dentro de la misma ciudad (Tabla 4.1).

<i>SONDEOS</i>	<i>COORDENADA</i>		<i>PROFUNDIDAD</i> ( <i>m</i> )
	<i>ESTE</i>	<i>SUR</i>	
<i>P02</i>	561285,999	9883528,000	30
<i>P04</i>	558532,000	9886295,000	160
<i>P05</i>	560802,000	9882653,999	30,45
<i>P06</i>	560324,999	9882551,000	30
<i>P09</i>	561968,999	9882922,999	30,45
<i>P10</i>	558580,999	9882120,000	30
<i>P11</i>	559729,999	9886037,000	30
<i>P12</i>	558255,000	9885722,000	30,45
<i>P14</i>	557044,999	9885649,000	30,45
<i>P17</i>	559275,000	9885355,000	30,45
<i>P18</i>	559672,000	9884794,999	30,45
<i>P19</i>	558613,999	9883032,999	30,45
<i>P20</i>	556081,000	9881373,000	30
<i>P22</i>	557228,000	9881528,000	15,45
<i>P27</i>	560726,000	9882228,000	15
<i>P28</i>	561959,000	9880789,999	15
<i>P29</i>	562137,999	9883944,000	15
<i>P30</i>	560550,999	9883852,999	30,45
<i>P2H</i>	561210	9881746	30

**Tabla 4.1** Sondeos de Perforación en la zona de estudio.

Considerando los parámetros cualitativos para la clasificación de suelos según las pruebas ASTM D2488-09, el cual es una guía para la evaluación manual-visual de las características físicas de los suelos, se evaluó: la resistencia en seco, dilatancia, y plasticidad. La evaluación se realizó en campo, durante la recuperación de testigos en las perforaciones realizadas por el Área de Mecánica de Suelos y Geotécnia-PUCE. Así como también se añadió los datos proporcionados por su laboratorio y los datos del sondeo de perforación de la empresa GeoEstudios S.A.

Parámetros cualitativos evaluados en los testigos de Área de Mecánica de Suelos y Geotécnia-(PUCE):

**Resistencia en seco:** Permite determinar la resistencia del suelo a desmoronarse, esta prueba se realiza, ejerciendo presión con los dedos a una determinada porción del suelo en condición seca. Para suelos con alto contenido en limos se desmorona con facilidad, de lo contrario son suelos con alto contenido en arcillas.

**Dilatancia:** Permite determinar la capacidad de retención del agua al humedecer una porción de suelo. Cuando los suelos tienen alto contenido de limos, al agitar la porción de suelo, el agua aflora con facilidad. Si el agua no aflora de la muestra de suelo al agitarse, el suelo posee un alto contenido en arcillas.

**Plasticidad:** Se forman cilindros de 3mm de diámetro de una porción de suelo. Si se forman grietas cerca a formar el cilindro de 3mm de diámetro, la muestra tendrá una plasticidad baja, y su humedad debe estar cerca al límite plástico. La muestra de suelo será de alta plasticidad cuando al formar el cilindro de 3mm de diámetro, conservará una consistencia maleable y plástica.

Con los datos obtenidos en laboratorio se procede a homogenizar los datos de cada perforación a una profundidad de 0 a 10m, 10 a 20m y de 20 a 30m, para posteriormente ingresar dichos datos al gráfico de la carta de plasticidad.

#### **4.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS**

Para la distribución espacial se procedió a elaborar mapas con las propiedades físicas-mecánicas de los suelos a diferente profundidad de 0-10m, 10-20m y de 20 a 30m, en el cual se realiza una homogenización de los datos para las diferentes profundidades con la clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Por medio de símbolo de barras se representa el índice de plasticidad y el límite líquido a diferentes profundidades para distinguir visualmente la variación de estas propiedades índices con la profundidad. La distribución de las propiedades físicas-mecánicas se encuentran sobre el mapa geológico y sobre el mapa de Microzonificación Sísmica de Portoviejo otorgado por el *IGEPN, 2017*.

#### 4.4 CORRELACIONES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Las propiedades físicas de los suelos nos permiten determinar propiedades mecánicas mediante correlaciones empíricas que proponen diversas literaturas. Se determinaron distintos parámetros (Tabla 4.2), homogenizando los datos para las profundidades de 0 a 10m, de 10 a 20m y de 20 a 30m. Posterior a los cálculos se realizan mapas de caracterización de las propiedades mecánicas en la zona de estudio.

Parámetros determinados		Propiedades índice que toma en cuenta	
Índice de Liquidez (IL)		w%, LP, IP	Braja et al., 2014
Plasticidad		IP	Burmister et al., 1949
Actividad (Ac)		IP, %part.<0.002mm	Skempton et al., 1953
Clasificación del contenido en Arcillas		Ac	Skempton et al., 1953
Potencial de hinchamiento	A	IP	Seed et al., 1962
	B	IP	Krebs & Walker, 1971
	C	IP	NHBC, 2008
	D	LL	Dakshanamurthy & Raman et al, 1973
	E	Ac	Seed et al., 1962
Índice de Hinchamiento	IS	LL, %w	Komornik & David, 1969
Presión de Hinchamiento	SP	IS, LL	Komornik & David, 1969

**Tabla 4. 2** Parámetros determinados a partir de correlaciones empíricas de las propiedades índices de los suelos.

#### 4.5 RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS CON LAS VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE ( $V_s$ ) DE LOS ENSAYOS ReMi.

En muchos estudios se establece una correlación de las velocidades de onda de corte con el tipo de material, estos estudios son principalmente datos recolectados in situ, como un ensayo de tipo *crosshole* o *downhole*. Sin embargo para esta investigación se tratará de correlacionar los datos de velocidades de

onda obtenidos en los ensayos ReMi que evalúan los 30 primeros metros del subsuelo y que se encuentren cercanos a los ensayos de perforación, estos datos fueron proporcionados por el proyecto de Estudio de Microzonificación Sísmica del Cantón Portoviejo realizado en el año 2017, realizado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

El objetivo de la correlación será determinar la continuidad de los estratos entre cada sondeo, para lo cual se escogió los primeros estratos del subsuelo entre 0 a 10m y se intenta establecer una correlación con el valor de la velocidad de onda de corte dado por el ensayo ReMi hasta los 10m y el tipo de material encontrado a dicha profundidad, y esta manera poder caracterizar los suelos de la ciudad de Portoviejo, con mayor confiabilidad en los datos.

A cada tipo de material de suelo se le atribuye un valor ponderado de  $N_{SPT}$ , el cual consiste en promediar los valores de  $N_{SPT}$  que se encuentren dentro del espesor del material discretizado.

#### **4.6 DETERMINACIÓN DE ECUACIONES MEDIANTE LA CORRELACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE ( $V_S$ ) Y LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTANDAR ( $N_{SPT}$ - $N_{60}$ )**

Para la determinación de las ecuaciones empíricas, se realiza un análisis de las velocidades de las ondas de cizalla ( $V_S$ ) obtenidos en los ensayos ReMi hasta una profundidad de 30m que se correlacionan con los valores de los ensayos de Penetración Estándar  $N_{SPT}$ . Muchas ecuaciones de regresión de  $N_{SPT}$  versus velocidad de onda de corte utilizaron el valor de  $N_{SPT}$  no corregido, pero a veces se usan correcciones de valores de  $N$ , las correcciones generalmente están en base a la energía de martillo, longitud de varilla y diámetro interior de la muestra, esta corrección se denomina  $N_{60}$ , que se determinó en base a la ecuación (3.12). Los valores de  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$  se ponderan de acuerdo a cada espesor de cada material discretizado, para las profundidades de 0 a 10m, 10 a 20m y de 20 a 30m (Anexo 4). La ecuación que caracteriza los suelos del valle de Portoviejo posee un configuración según la forma de la ecuación (4.1)

$$V_S = aN^b \quad (4.1)$$

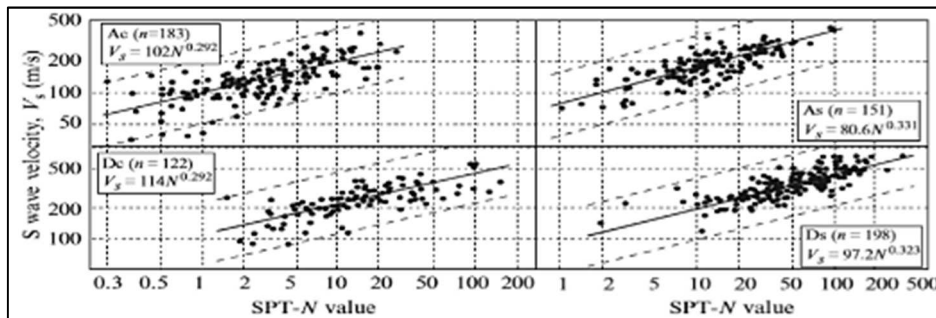
Donde  $V_S$  es la velocidad de la onda de corte,  $N$  es el valor  $N_{SPT}$ , "a" y "b" son constantes determinadas por la regresión estadística del conjunto de datos.



Estas ecuaciones se basan y se comparan con ecuaciones empíricas propuestas por diferentes investigadores en la literatura (Tabla 4.3) (Fig 4.2), permitiendo ser un parámetro para determinar las propiedades elásticas del suelo, importante para el análisis de la respuesta de sitio, se calcula diversas ecuaciones para los distintos materiales del subsuelo de la ciudad de Portoviejo a una profundidad de 0-30m.

Autores	Todo tipo de suelos	Suelos finos	Coefficiente de Correlación	Lugar de estudio
Imai (1977)	$V_s=91.0N^{0.337}$	$V_s=102N^{0.292}$	--	Depósitos Aluviales del Cuaternario y Pleistoceno (Japón)
Iwasaki (1977)	--	$V_s=143N^{0.0777}$		
Seed & Idriss (1981)	$V_s=61.0N^{0.3}$			
Ohba & Toriumi (1970)	$V_s=84N^{0.410}$			
Ohta & Goto (1978)	$V_s=85.35N^{0.442}$	$V_s=68.79N^{0.171}$ $H^{0.190}$	0,719	Depósitos Aluviales del Cuaternario y Pleistoceno (Japón)
Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_s=90N^{0.201}$	$V_s=297.89N^{0.249}$	0,73	Depósitos Aluviales y detritos del Cuaternario (Turquía)
Fatchnia (2015)		$V_s=77.1N^{0.233}$		

**Tabla 4. 3** Ecuaciones empíricas propuestas por otros investigadores.



**Figura 4. 2** Relación entre valores del NSPT y VS para varios tipos de suelo (Tomado de Yoshida et al., 2015)

#### 4.7 ELABORACIÓN DE PERFILES ESTRATIGRÁFICOS-GEOTÉCNICOS

Se elaboran Columnas Estratigráficas-Geotécnicas a detalle conforme a la evaluación manual-visual de los suelos del levantamiento de datos de los sondeos de perforación en la zona de estudio y de la respectiva evaluación mediante pruebas de laboratorio;

Posteriormente se realizan Perfiles Estratigráficos en los cuales se toma en cuenta, las columnas estratigráficas-geotécnicas, los valores de velocidades de onda de cizallamiento ( $V_s$ ) obtenidos en el ensayo ReMi, los valores del  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$ , además se calcula con los datos disponibles de los ensayos de laboratorio, el Módulo de rigidez al cortante en base a la ecuación (3.5).

#### **4.8 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICO**

El Mapa de Microzonificación Geotécnico se genera desde el conjunto de mapas obtenidos a partir de las propiedades físicas-mecánicas, así como también de las correlaciones obtenidas y comportamientos inferidos de los suelos en los sondeos de perforación. Estos análisis de los mapas previamente generados se correlacionan con:

- Depósitos Geológicos Cuaternarios de la zona de estudio.
- Estructuras geológicas
- Elementos geomorfológicos
- Mapa de aproximación de la saturación del agua en el suelo elaborado

En la elaboración del mapa cabe mencionar que existirán zonas con un mayor nivel de confianza en donde concurra el mayor número de sondeos de perforación en la zona de estudio.

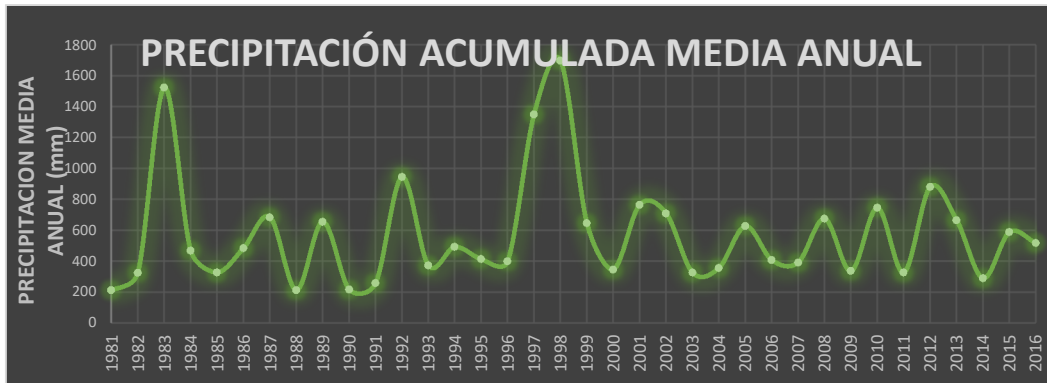
#### **4.9 DISEÑO DEL MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**

El diseño del Modelo Geológico-Geotécnico 3D se genera a partir del compendio de mapas generados de las propiedades físicas de los suelos que se realizaron con una distribución espacial para cada uno de ellas. Se analizaron los mapas de las propiedades mecánicas, así como de diversos comportamientos del suelo inferidos a partir de las propiedades índices del suelo como consistencia y consolidación, estructura del suelo, entre otros. Los mismos que permitieron generar el Mapa de Microzonificación Geotécnica. Dentro del análisis se incorpora los diversos estratos identificados en los perfiles geológicos-geotécnicos, los cuales se disponen para formar Microzonas que permitan obtener una visualización aproximada de una probable configuración de los suelos hasta los primeros 30m de profundidad en la ciudad de Portoviejo.

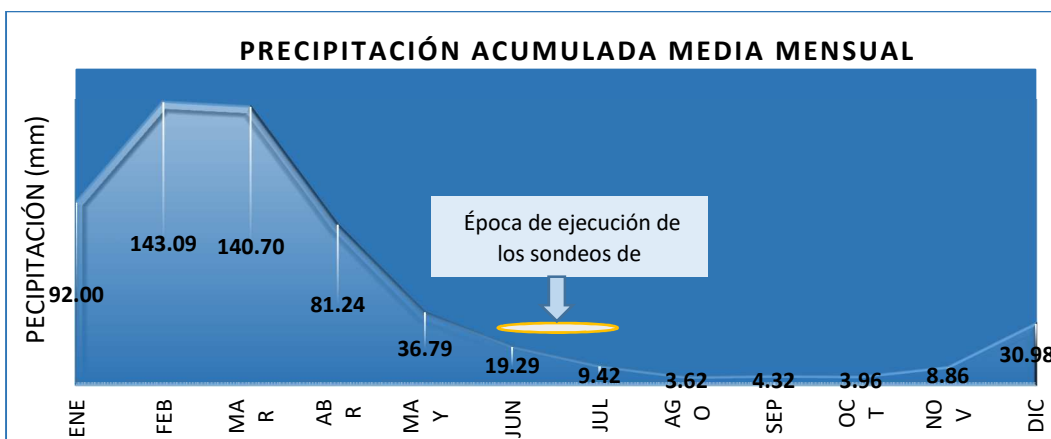
# CAPÍTULO V RESULTADOS

## 5.1 ANÁLISIS DE LAS ÉPOCAS DE ESTIAJE Y RIADA

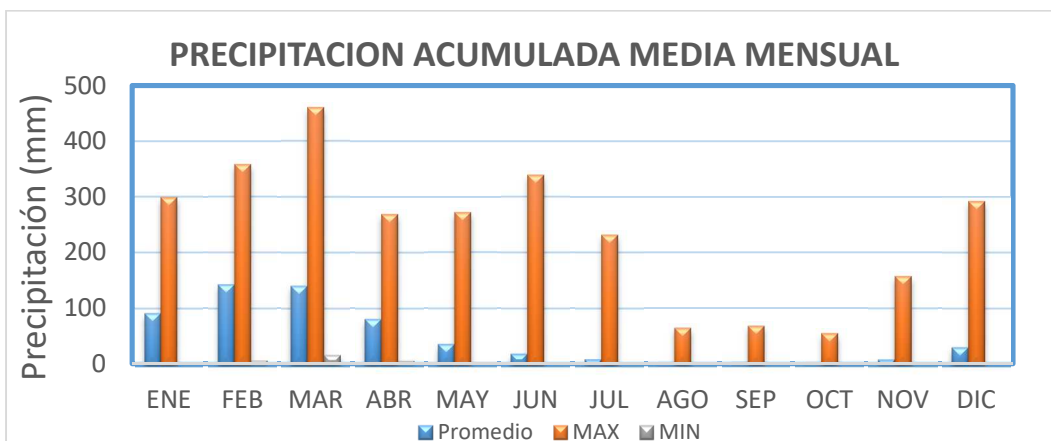
Las precipitaciones acumuladas medias mensuales en cada año obtenido en las distintas estaciones (Figuras: 5.1 a 5.3) (Anexo 1).



**Figura 5. 1** Precipitaciones acumuladas anuales desde 1980 hasta 2016.



**Figura 5. 2** Precipitaciones acumuladas mensuales desde 1980 hasta 2016.



**Figura 5. 3** Precipitaciones acumuladas mensuales máxima, mínima y promedio.

Factores ambientales preponderantes para la época en la que se realizaron los ensayos de perforación (Figuras 5.4 a 5.9) (Anexo 2).

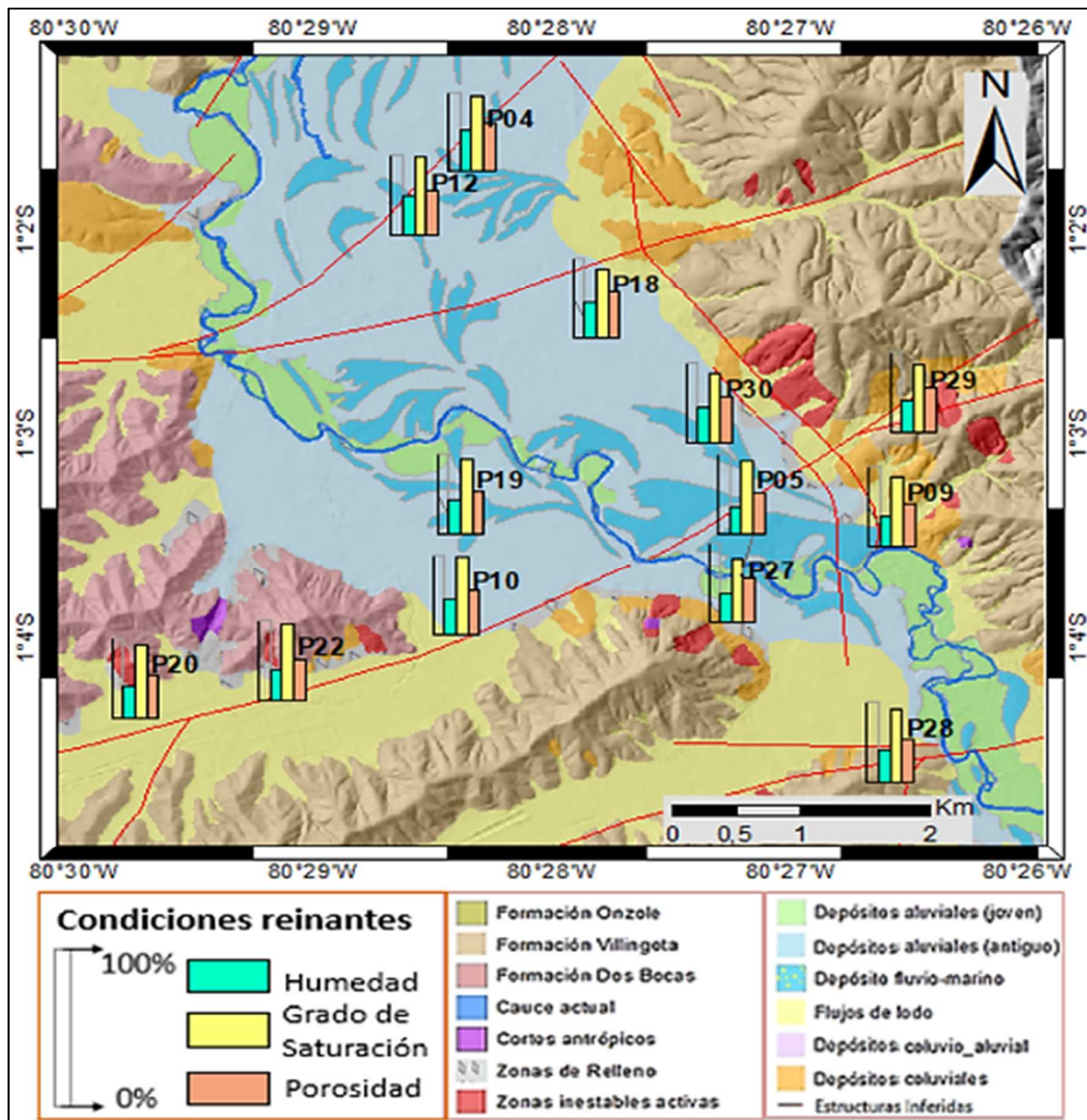


Figura 5. 4 Factores ambientales preponderantes a una profundidad de 0 a 10m.

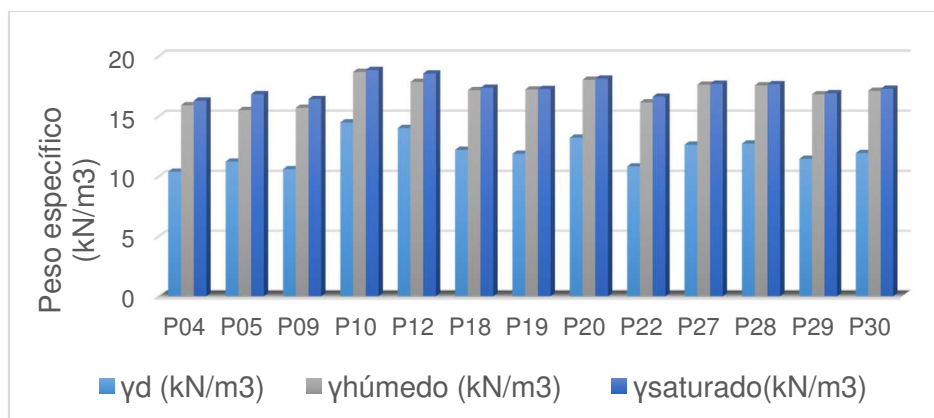


Figura 5. 5 Valores de pesos específicos a una profundidad de 0 a 10m.



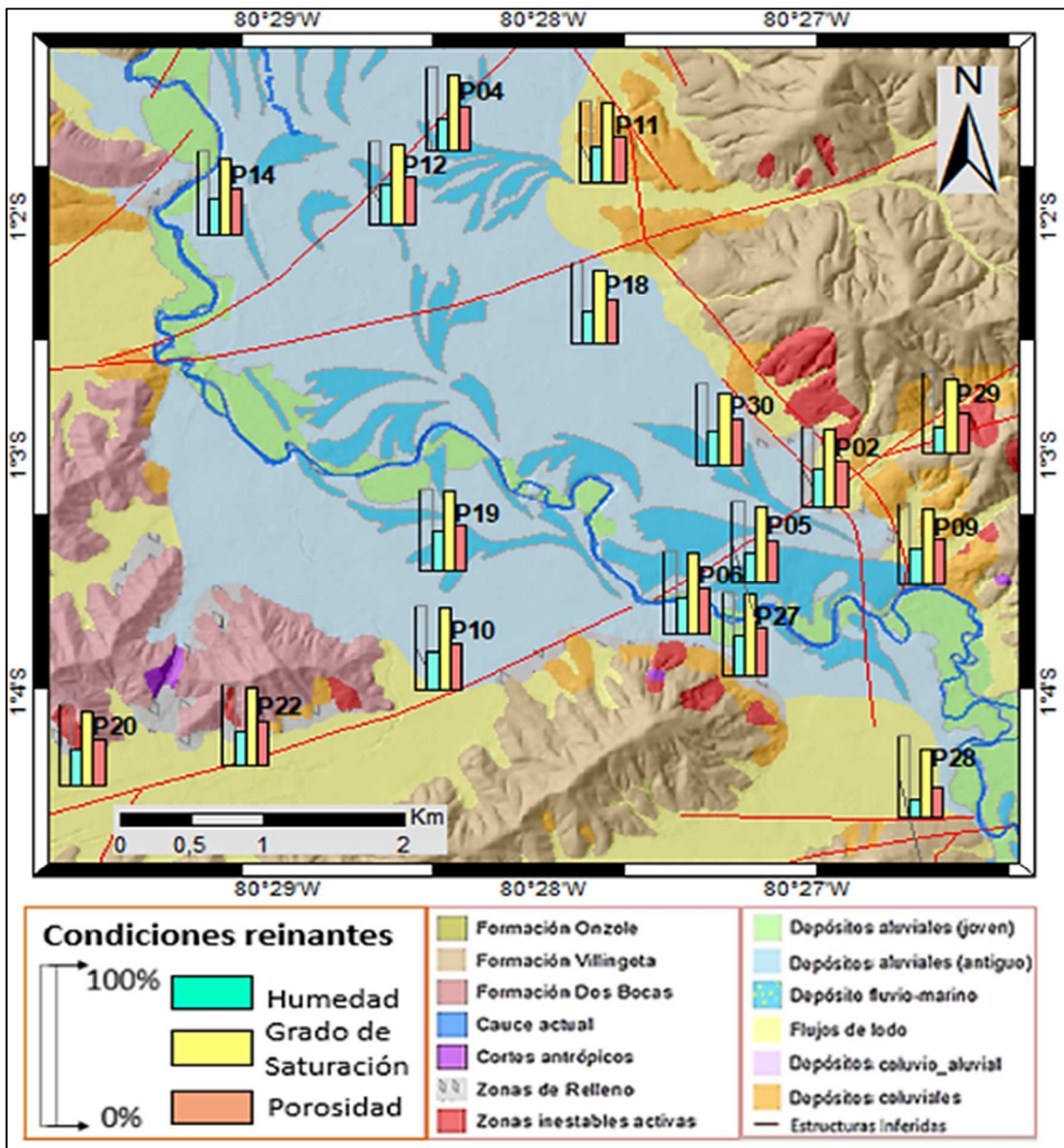


Figura 5. 6 Factores ambientales preponderantes a una profundidad de 10 a 20m.

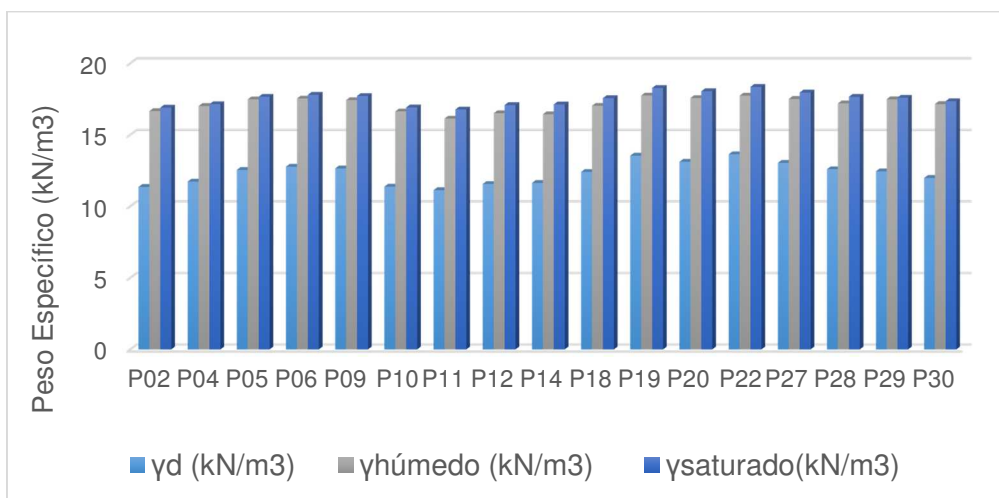


Figura 5. 7 Valores de pesos específicos a una profundidad de 10 a 20m.

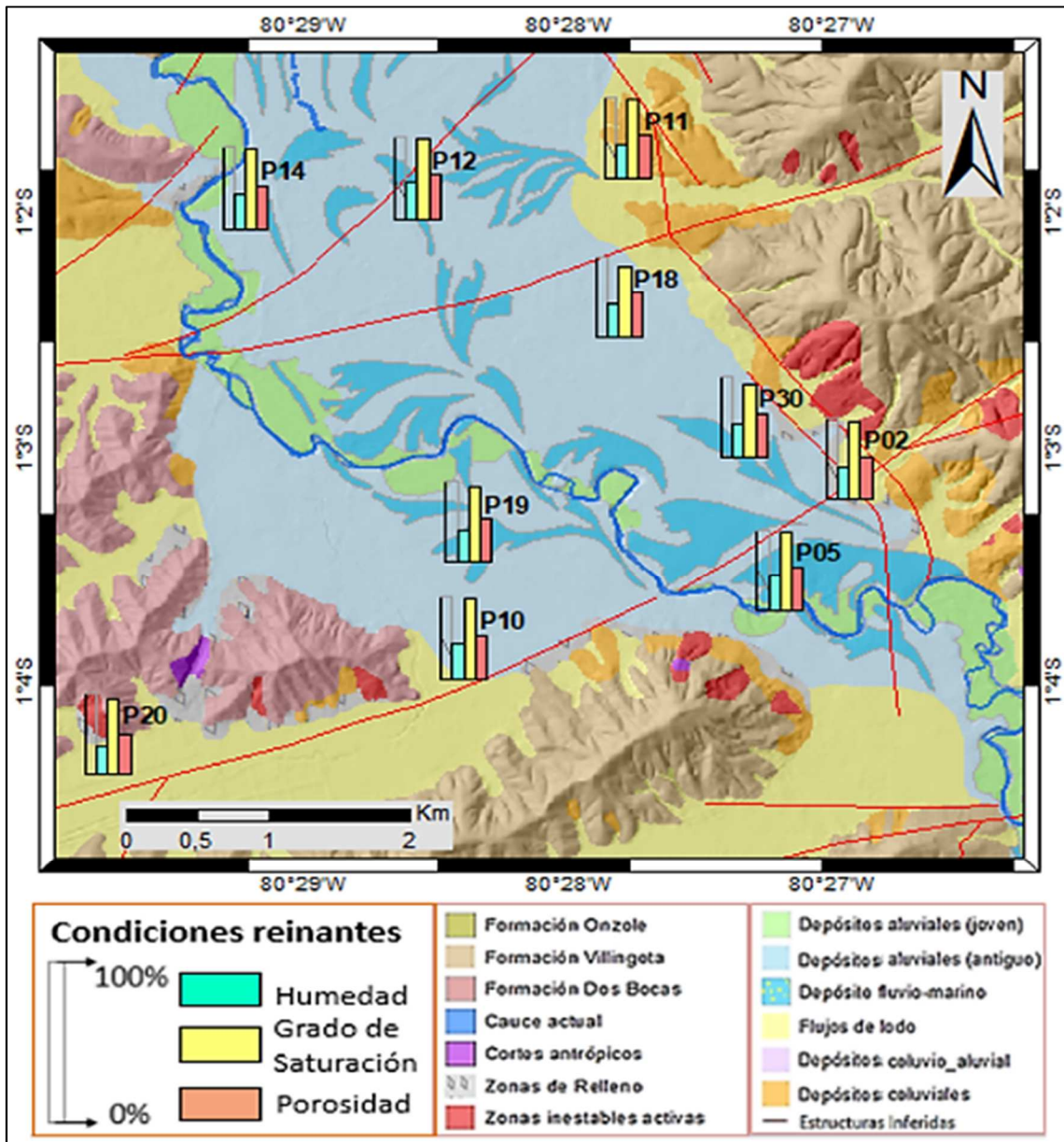


Figura 5. 8 Factores ambientales reinantes a una profundidad de 20 a 30m

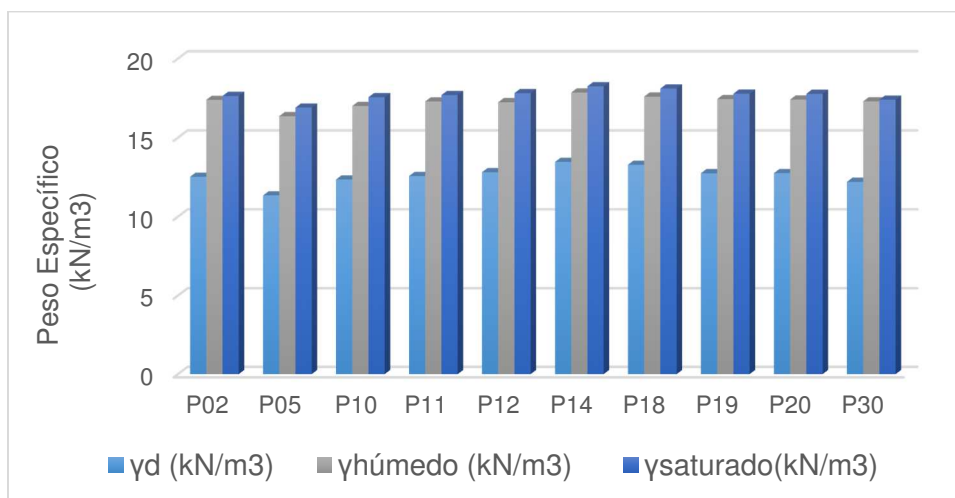
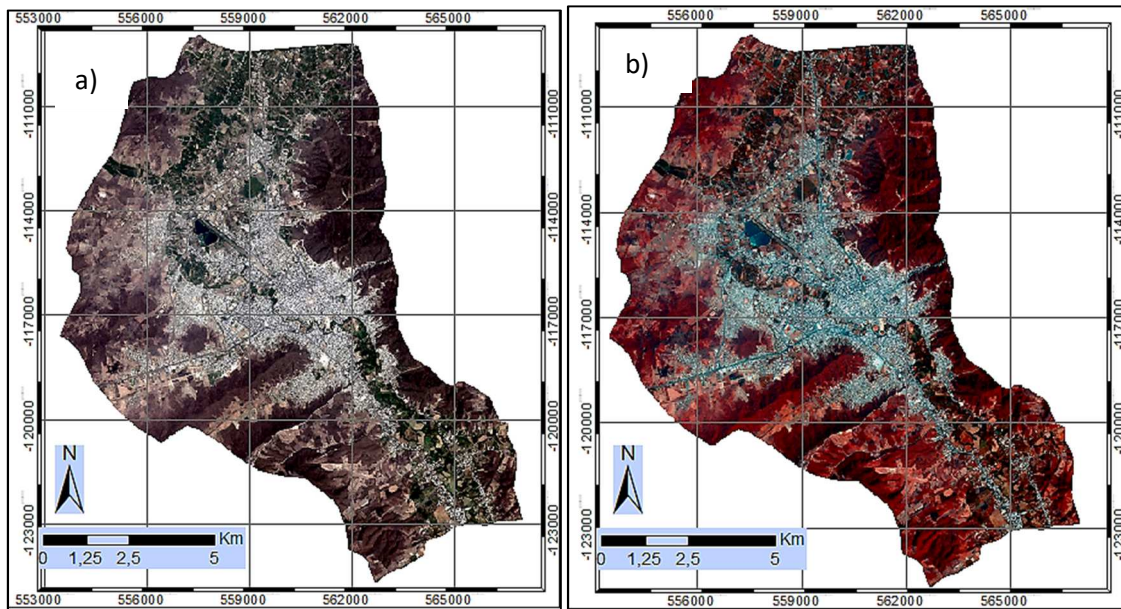


Figura 5. 9 Valores de pesos específicos a una profundidad de 20 a 30m.

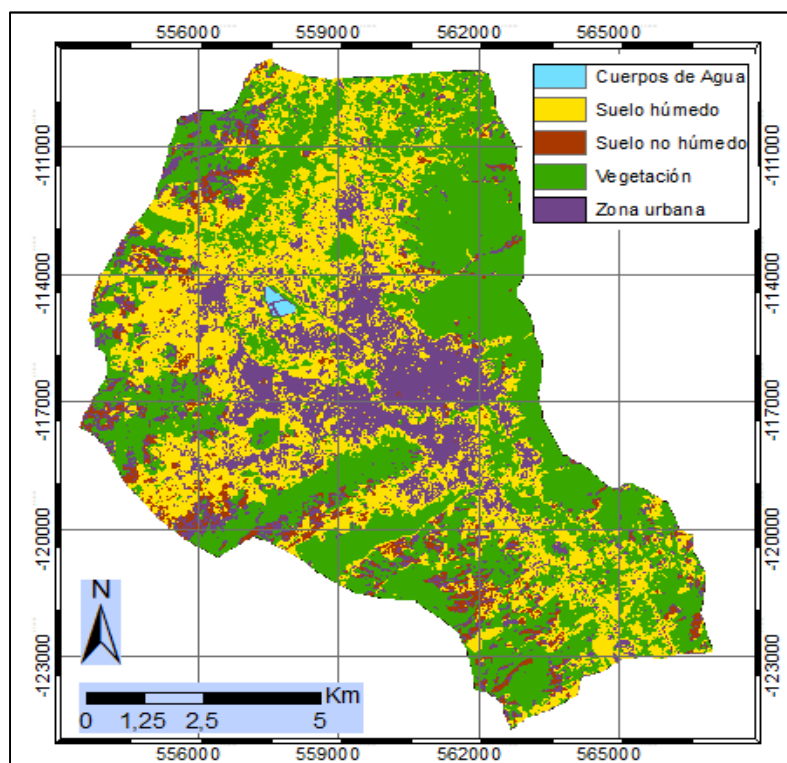


## 5.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL ANÁLISIS DE SATURACIÓN DE AGUA EN EL SUELO

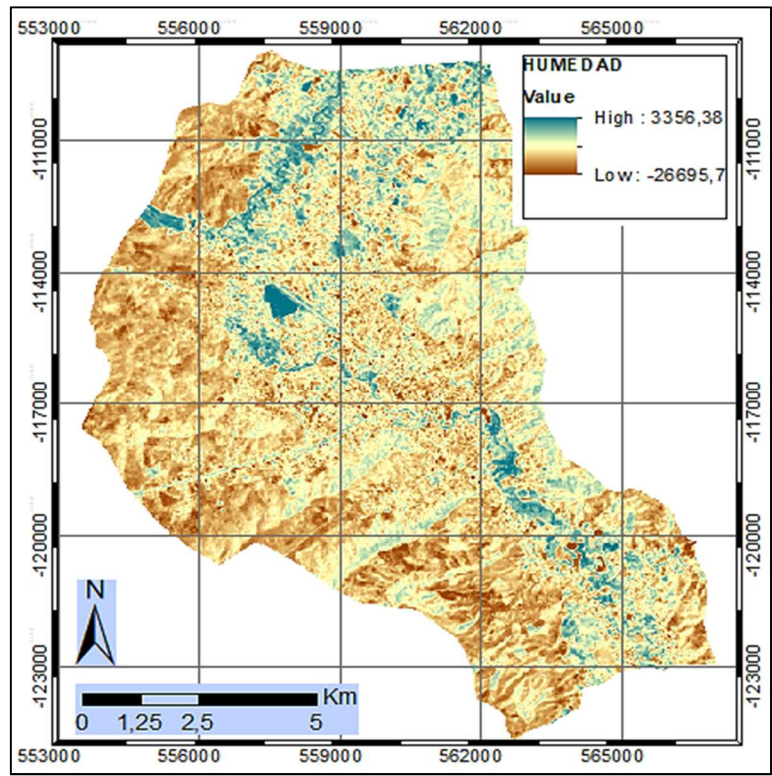
El procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 para determinar las zonas con mayor contenido de humedad en el suelo. (Figuras 5.10 a 5.14)



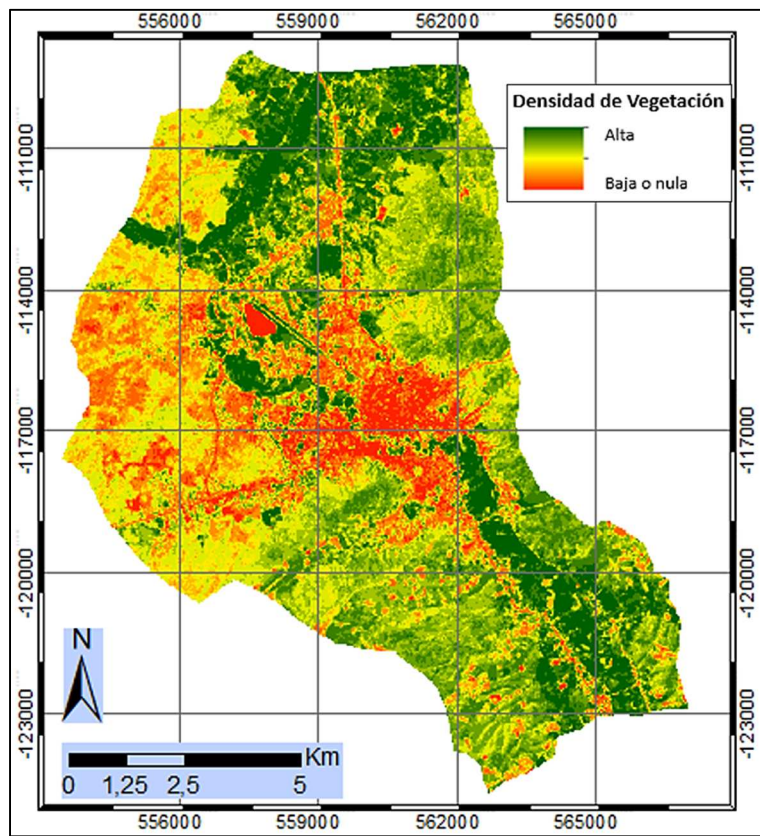
**Figura 5. 10** a) Imagen a color de la zona de estudio. b) Imagen en tonalidades del infrarrojo cercano



**Figura 5. 11** Imagen de clasificación supervisada que caracteriza el tipo de suelo en la zona de estudio

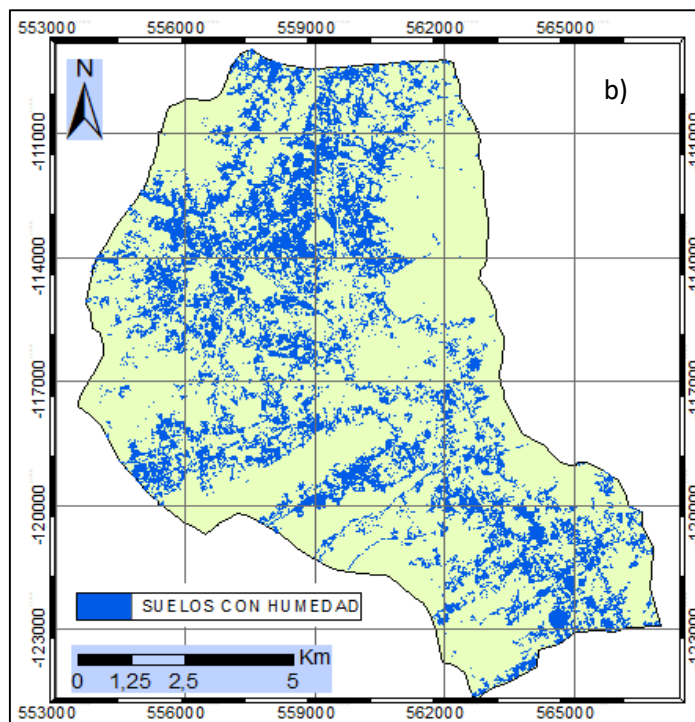
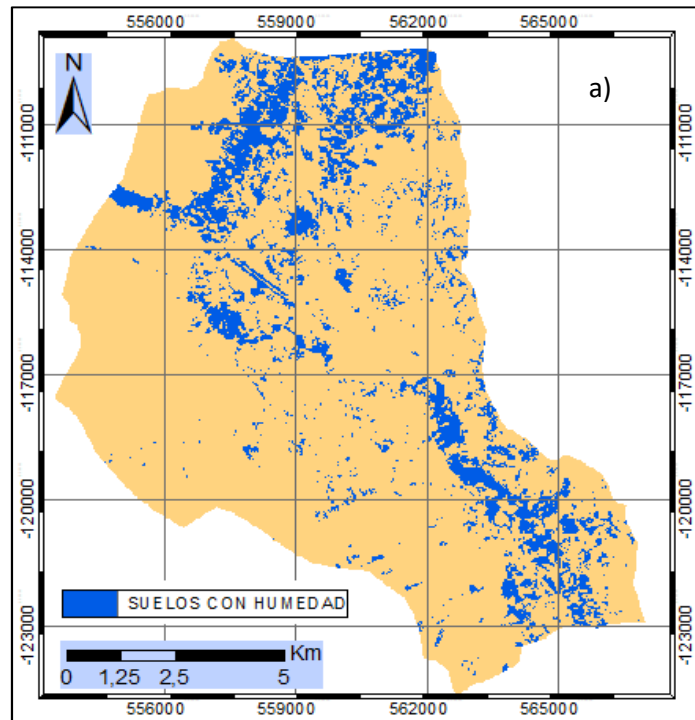


**Figura 5. 12** Imagen de clasificación Tasseled Cap que caracteriza el suelo en valores de contenido de humedad en la zona de estudio.



**Figura 5. 13** Imagen que determina el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la zona de estudio.





**Figura 5. 14** Superposición de imágenes que determina las zonas con contenido de humedad del suelo en la zona de estudio. a) Superposición (Reclass (Imagen Supervisada) – Reclass (Vegetación densa NDVI)). b) Superposición (Reclass (Tasseled Cap) – Reclass (Vegetación))

### 5.3 MAPA DE SATURACIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Mapa que permite estimar las zonas más propensas a la saturación de agua en el suelo (Fig. 5.15).

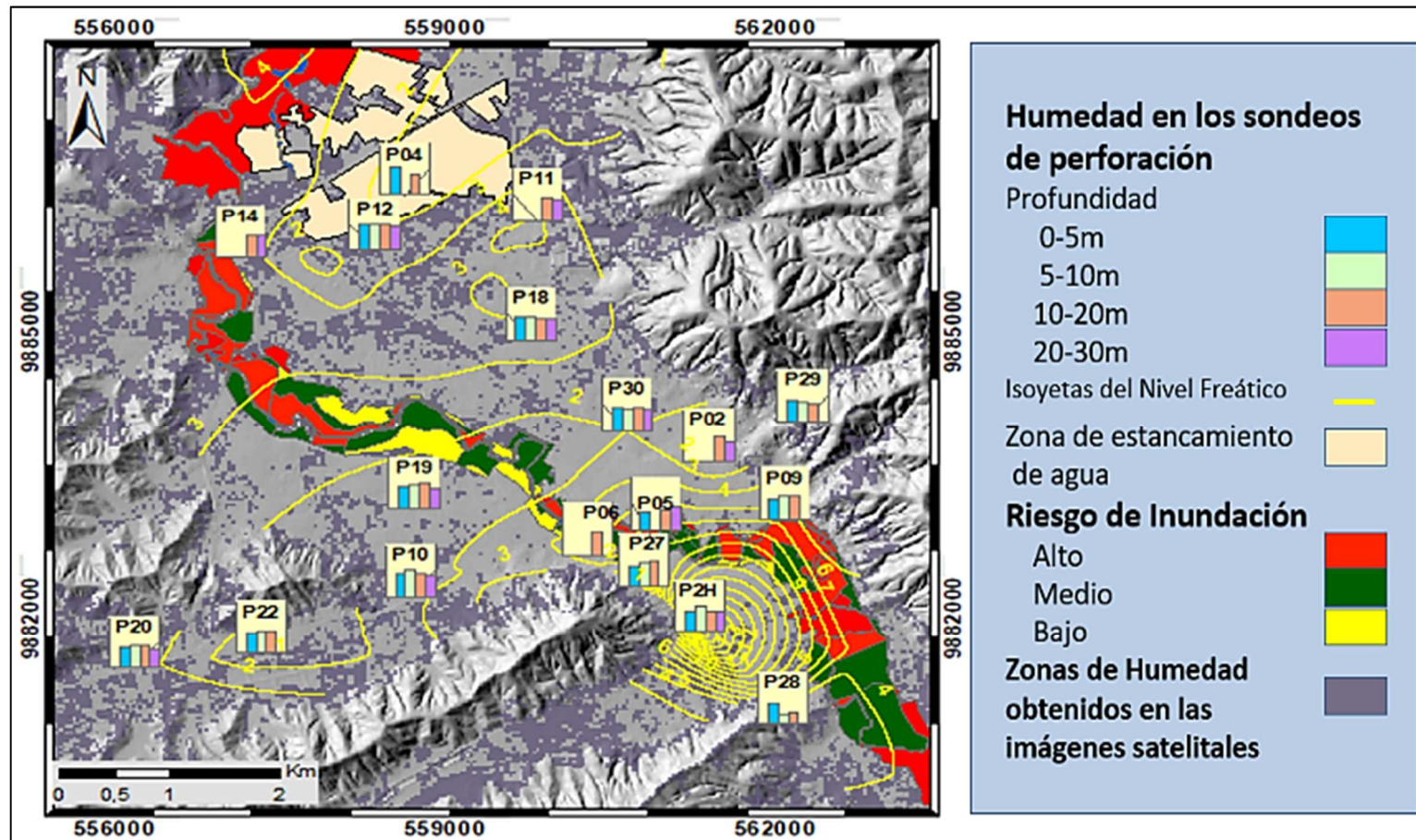


Figura 5. 15 Mapa de identificación de zonas propensas a la Saturación de agua en el suelo.

## 5.4 CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Con los datos obtenidos en laboratorio se introdujeron los datos en la carta de plasticidad homogenizando los datos a distintas profundidades (Fig. 5.16).

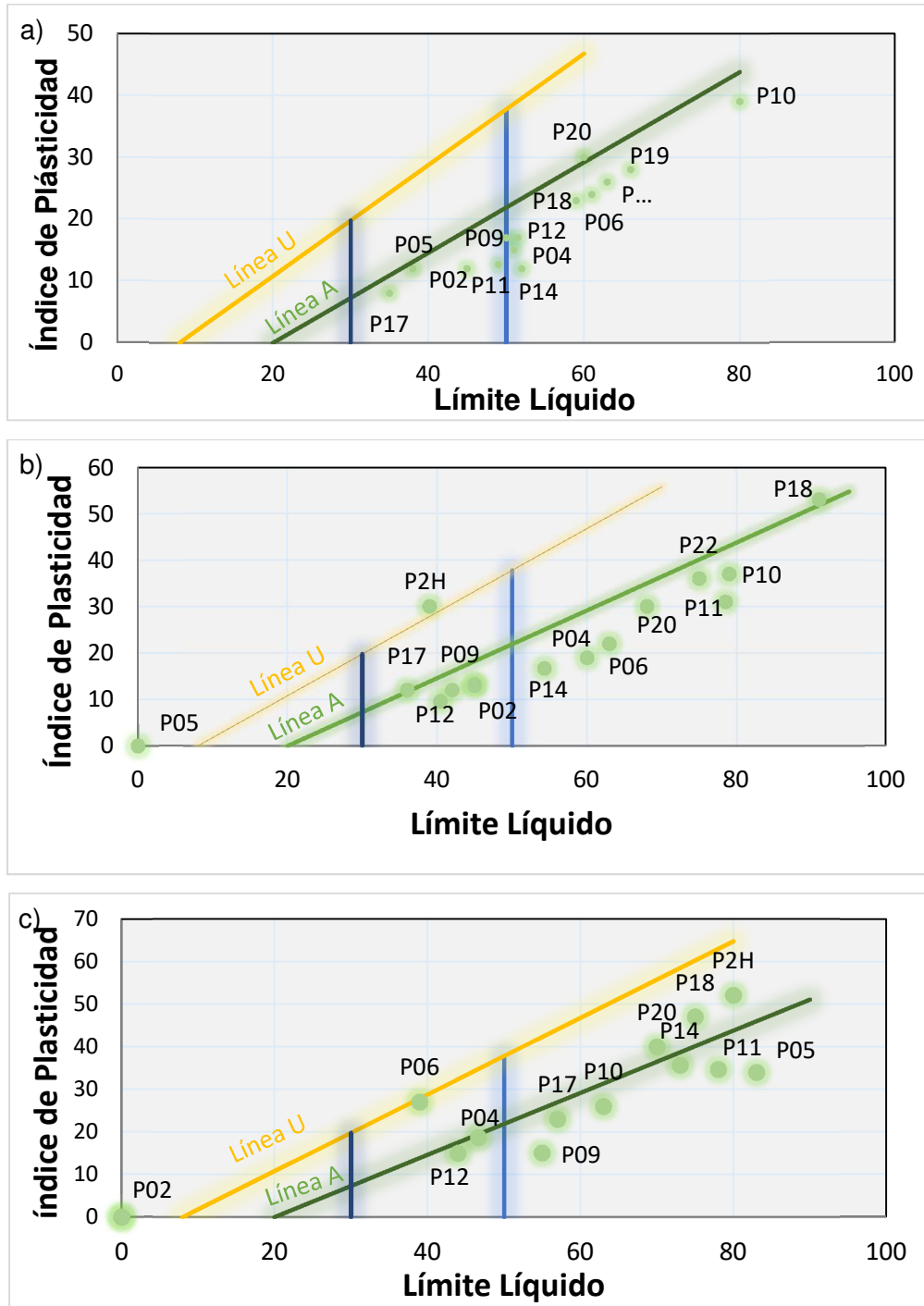


Figura 5. 16 Clasificación de suelos de los sondeos de perforación en la carta de plasticidad a una profundidad (a) 0 a 10m. (b) 10 a 20m. (c) 20 a 30m



## 5.5 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS

Se elaboró mapas con la distribución espacial las propiedades físicas-mecánicas de los suelos en los sondeos de perforación a diferente profundidad de 0-10m, 10-20m y de 20 a 30m, representando por medio de símbolos una homogenización de los datos con la clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Figuras: 5.17 a 5.19)

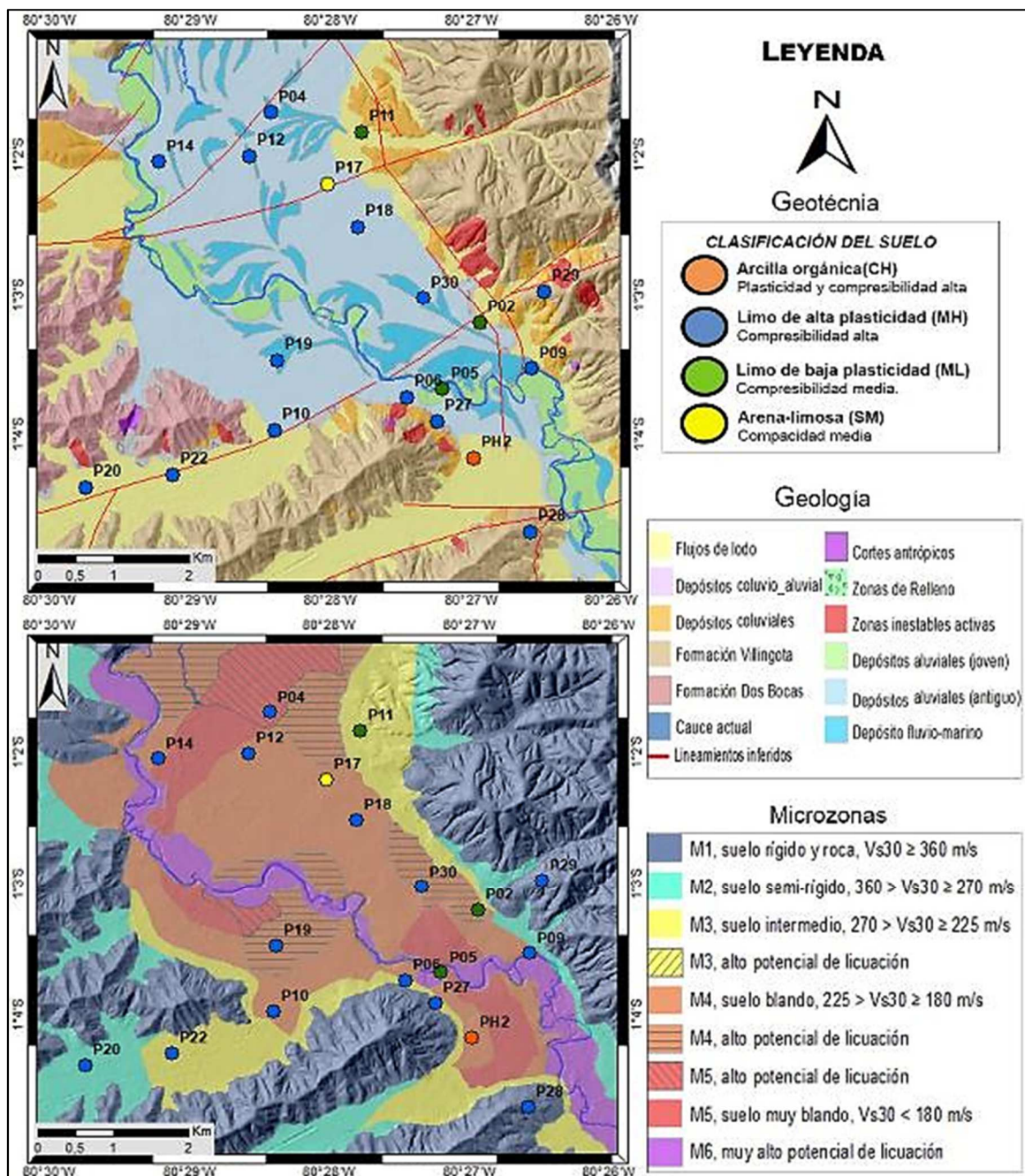
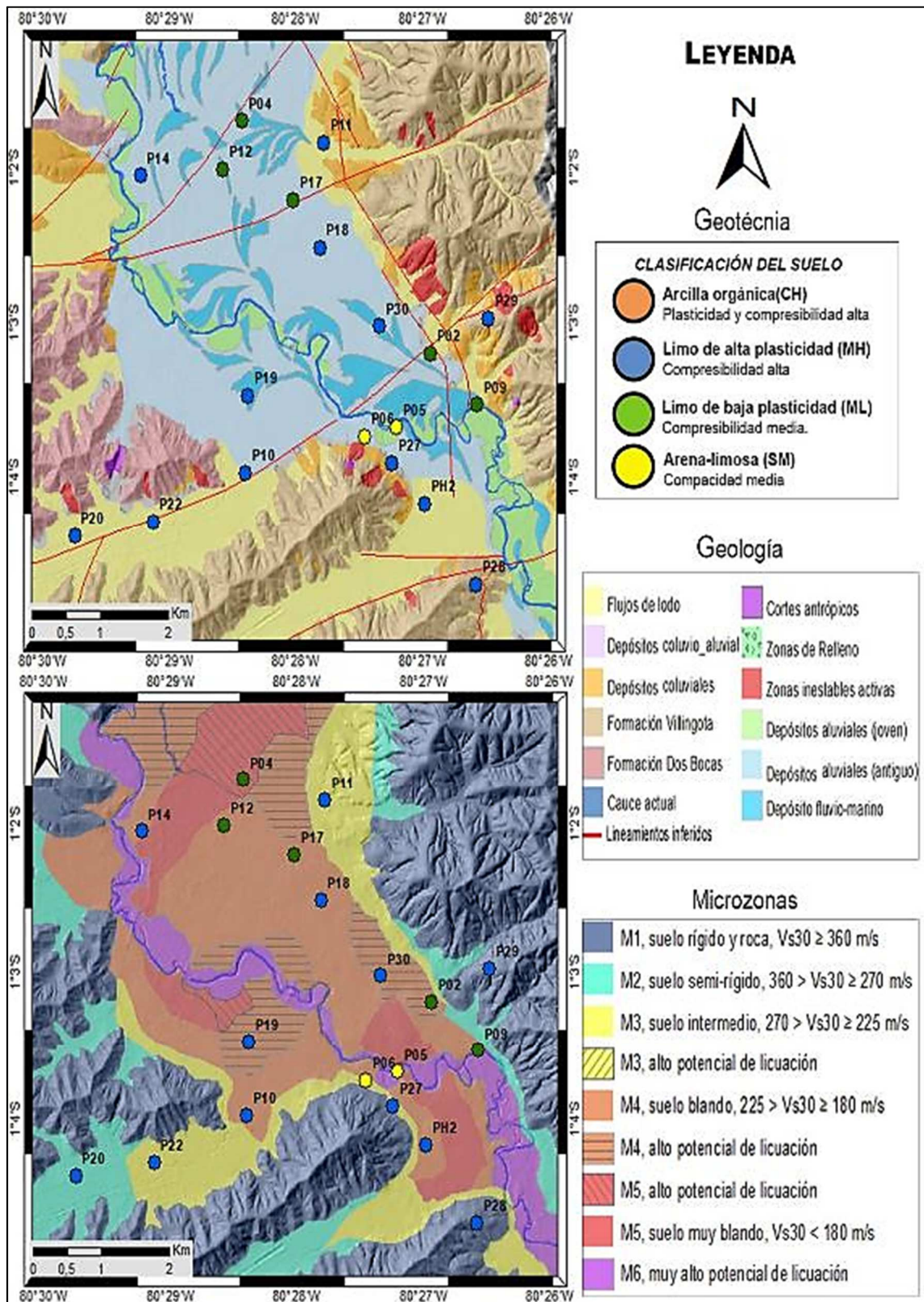


Figura 5. 17 Mapa de distribución del Tipo de Material en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a una profundidad de 0 a 10m





**Figura 5. 18** Mapa de distribución del Tipo de Material en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a una profundidad de 10 a 20 m



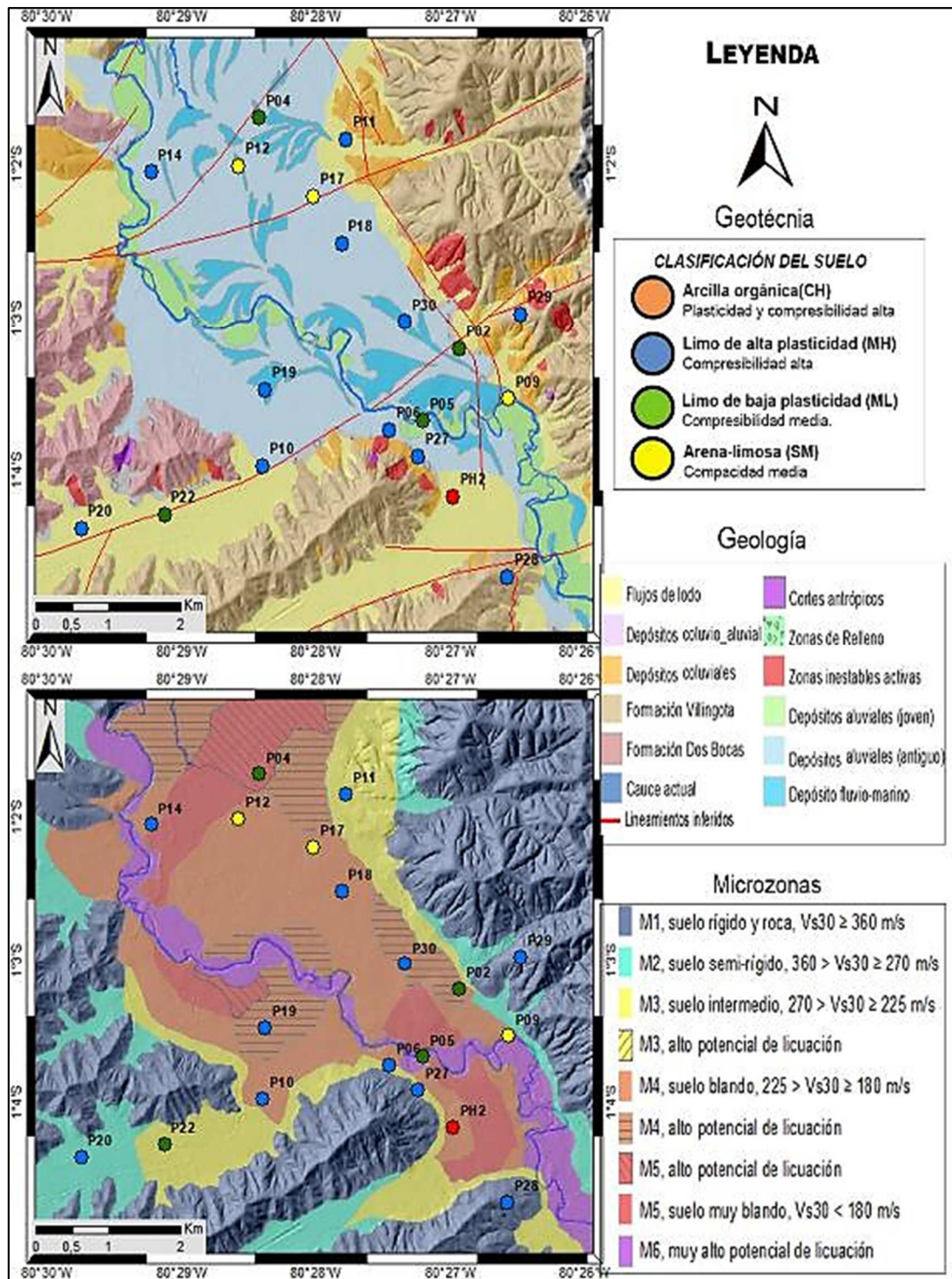


Figura 5. 19 Mapa de distribución del Tipo de Material en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a una profundidad de 20 a 30m.



Por medio de símbolo de barras se representa el índice de plasticidad y el límite líquido a diferentes profundidades para distinguir visualmente la variación de estas propiedades índices con la profundidad (Figuras 5.20 y 5.21).

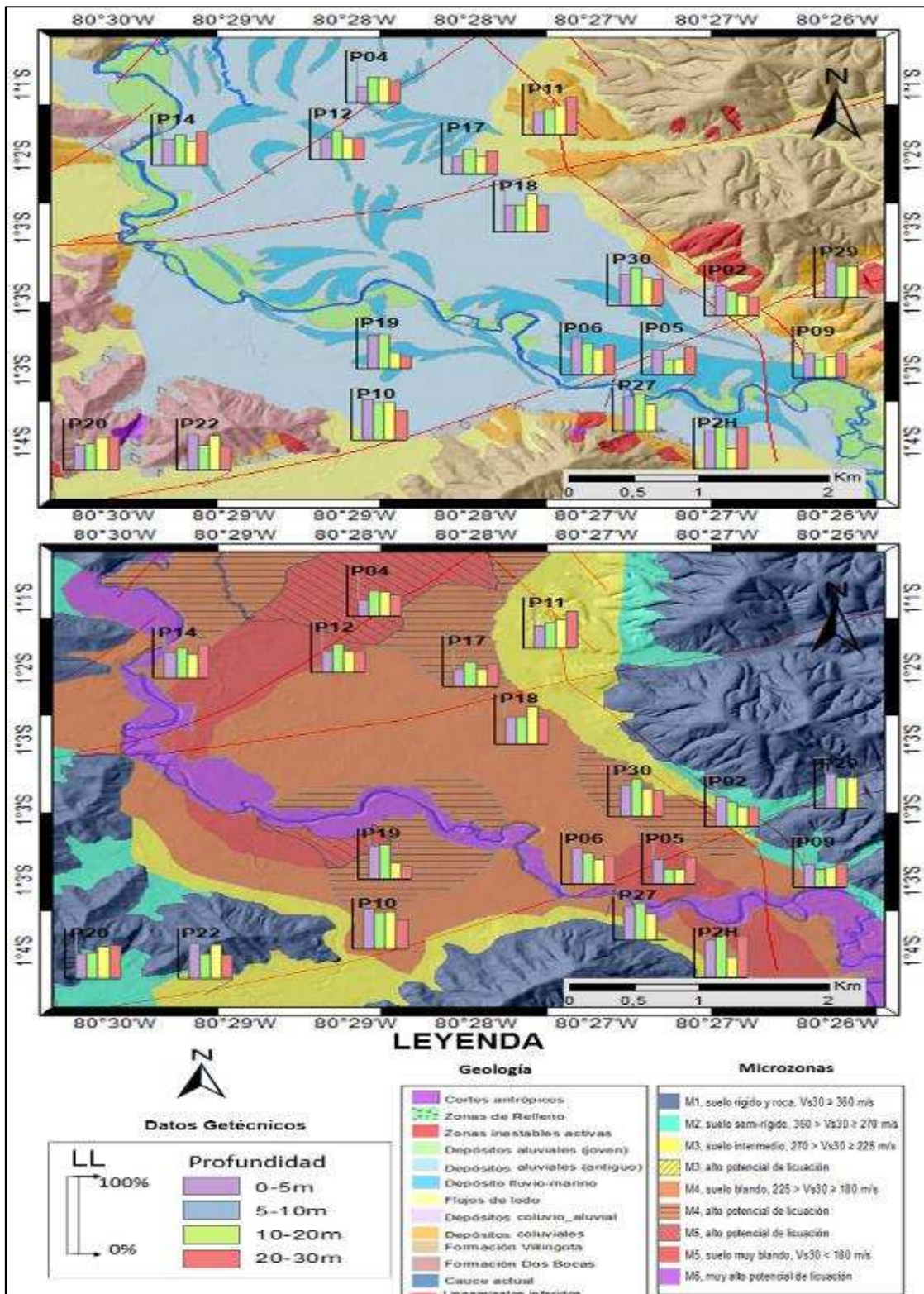


Figura 5. 20 Mapa de distribución del Límite Líquido en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a distintas profundidades.



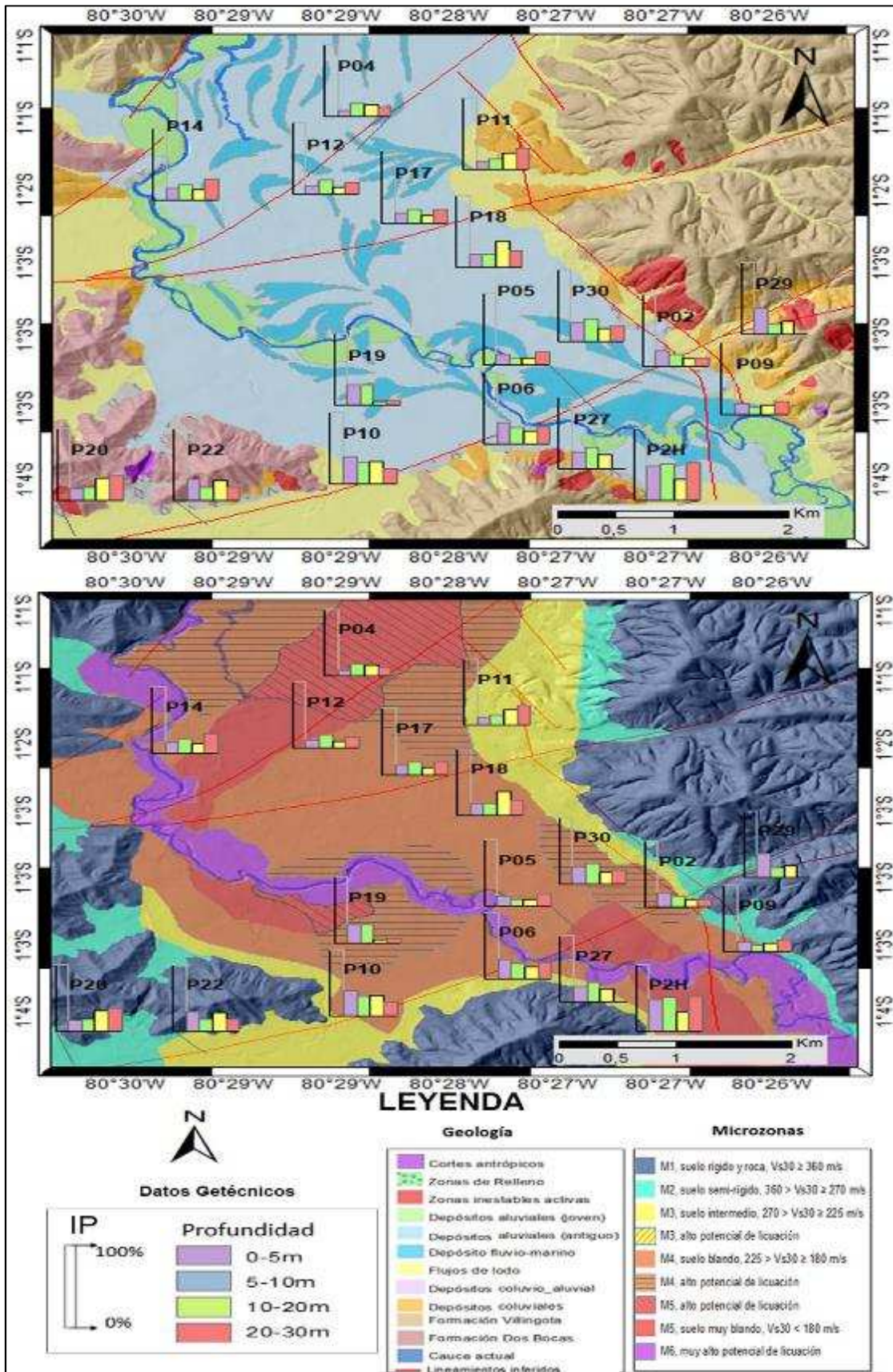


Figura 5. 21 Mapa de distribución del Índice de Plasticidad en el suelo definido en los sondeos geotécnicos a distintas profundidades.



## 5.6 MAPAS DE LAS CORRELACIONES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Las correlaciones de las propiedades índices (Anexo 2) permitieron determinar distintos parámetros obtenidos de diversas literaturas para diferentes profundidades (Figuras 5.22 a 5.26) (Anexo 3).

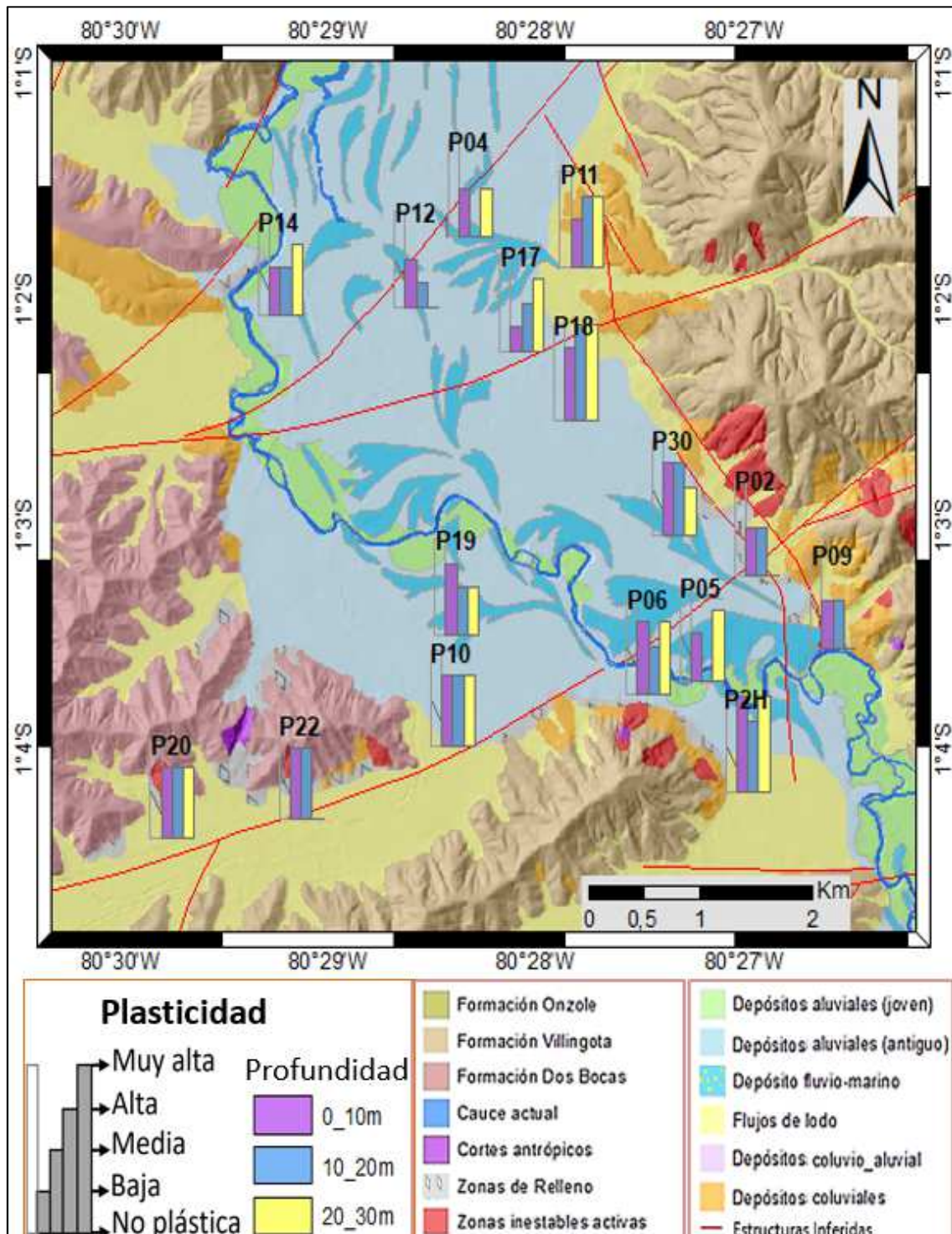
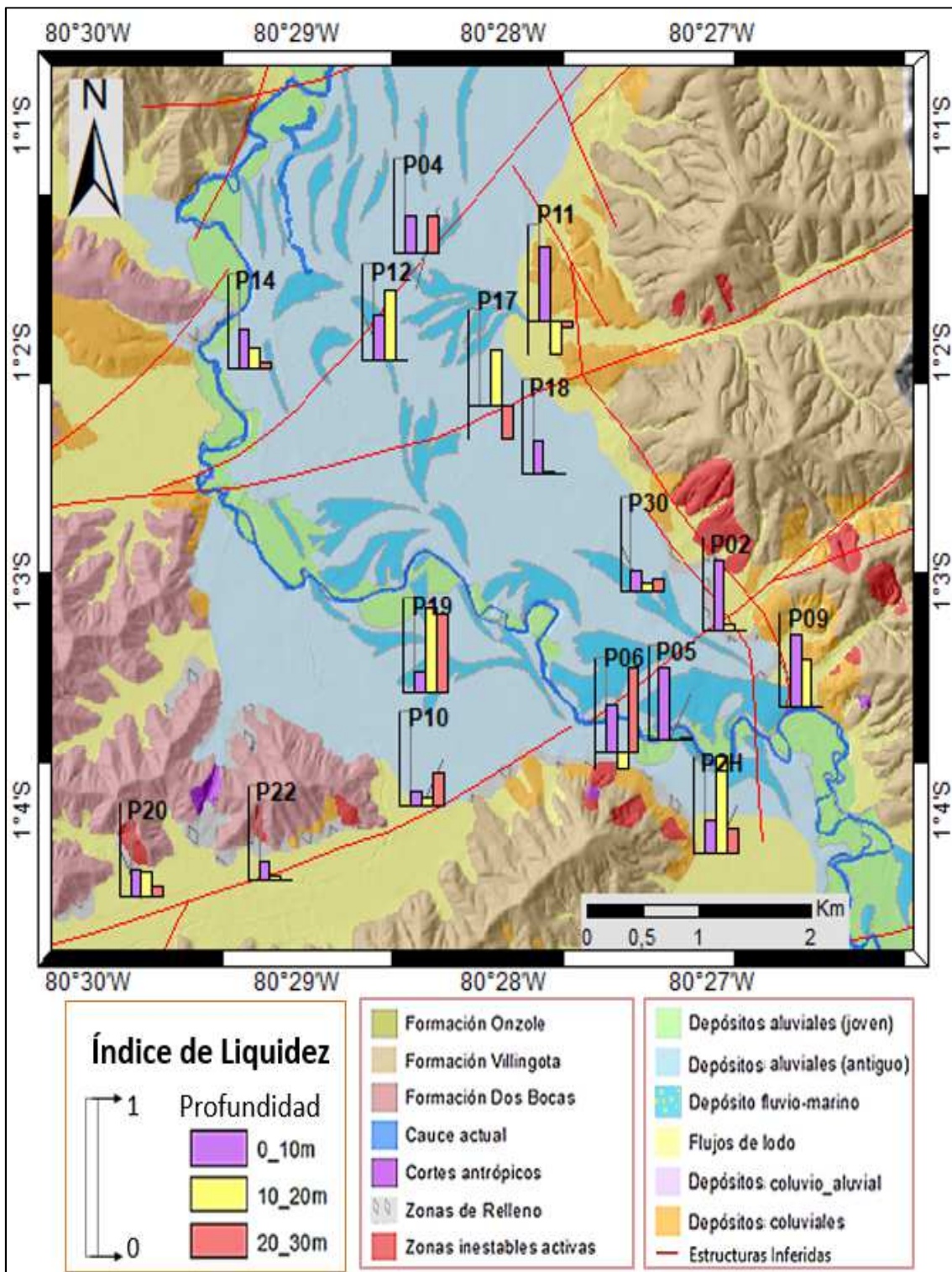
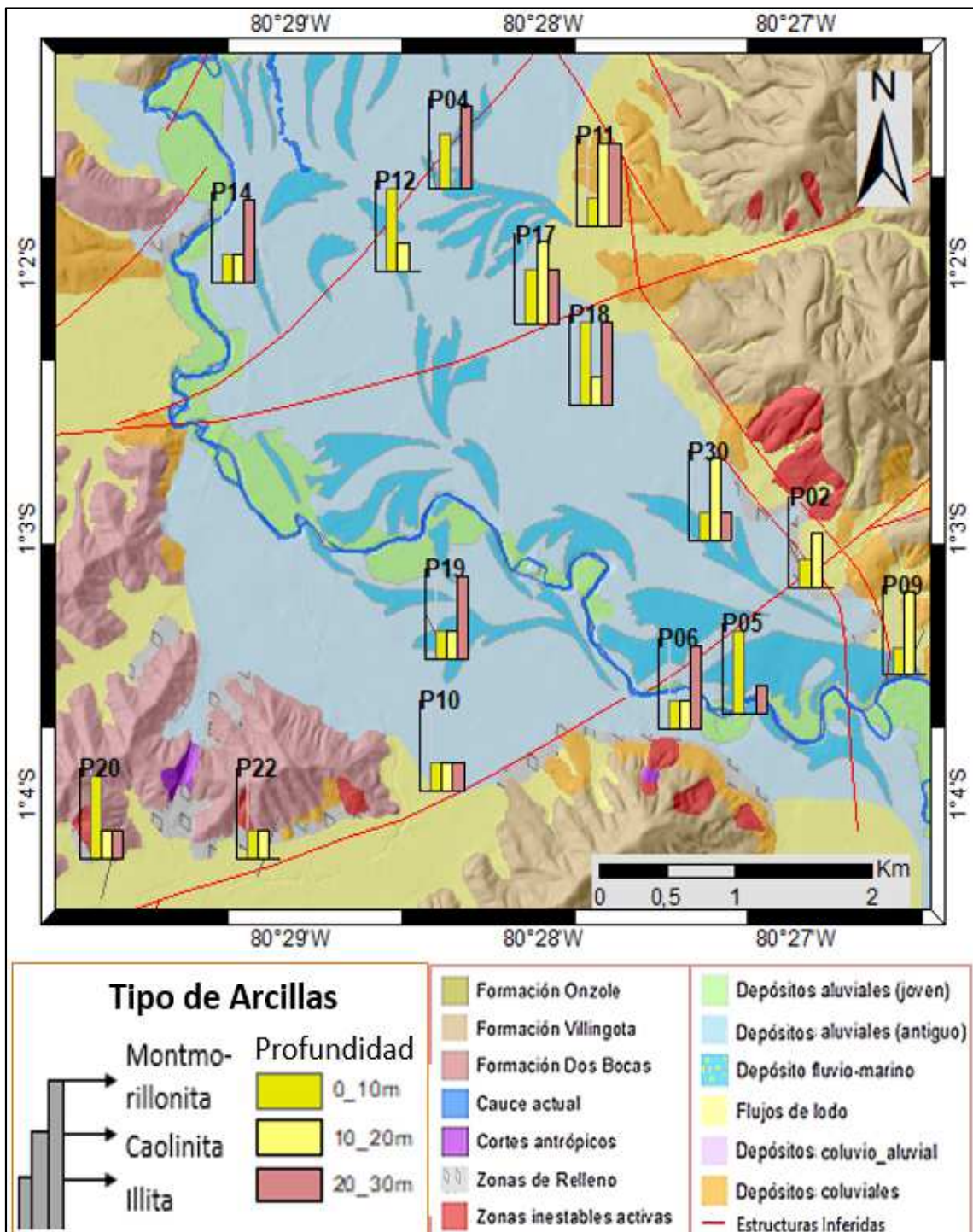


Figura 5. 22 Plasticidad para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación.



**Figura 5. 23** Índice de Liquidez para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación.





**Figura 5. 24** Mineralogía del contenido arcilloso para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación

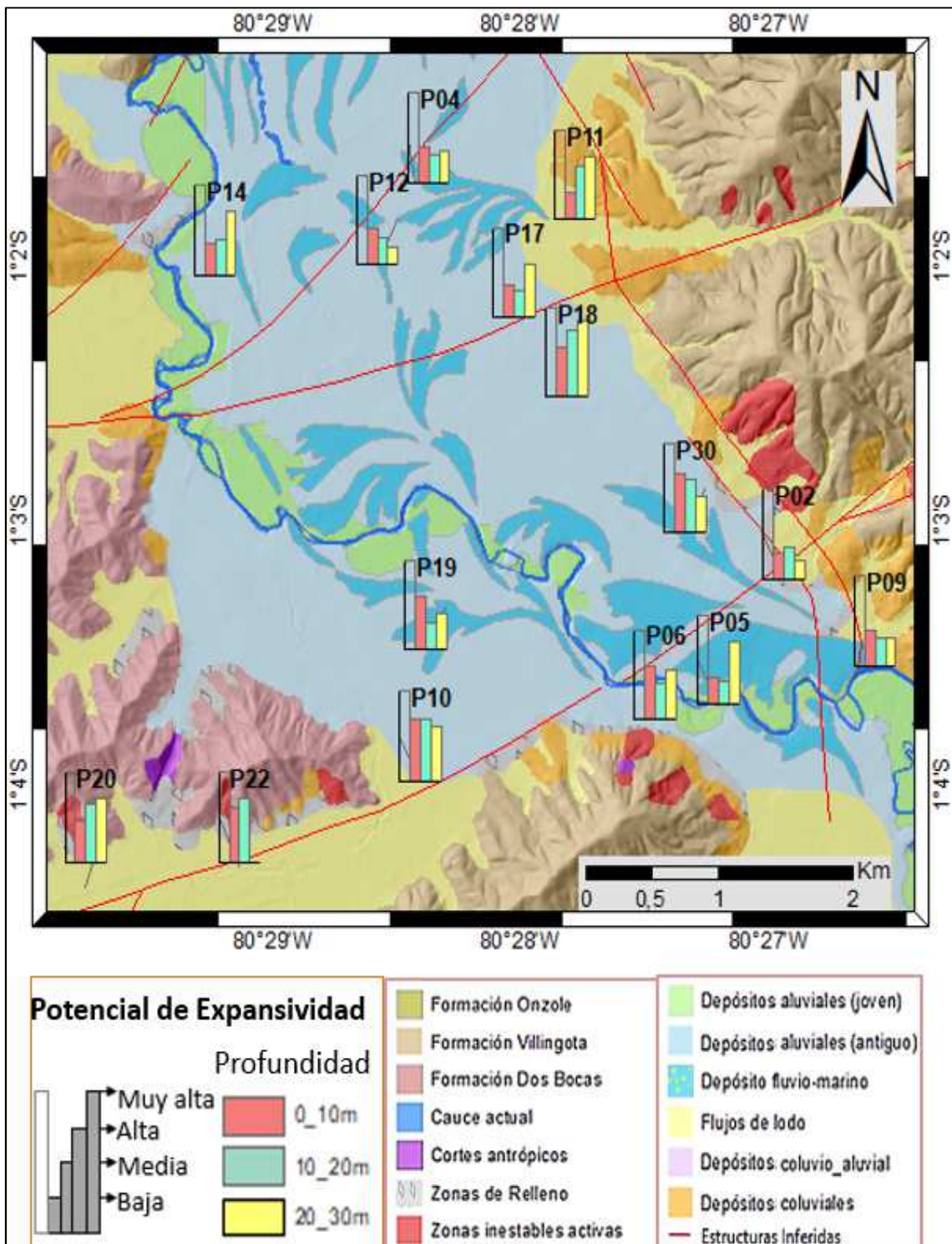
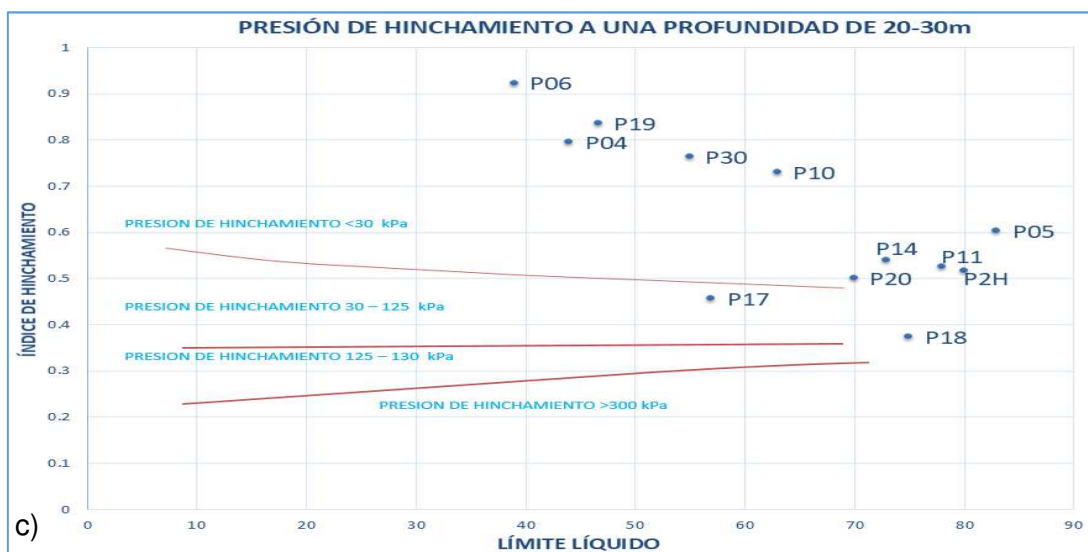
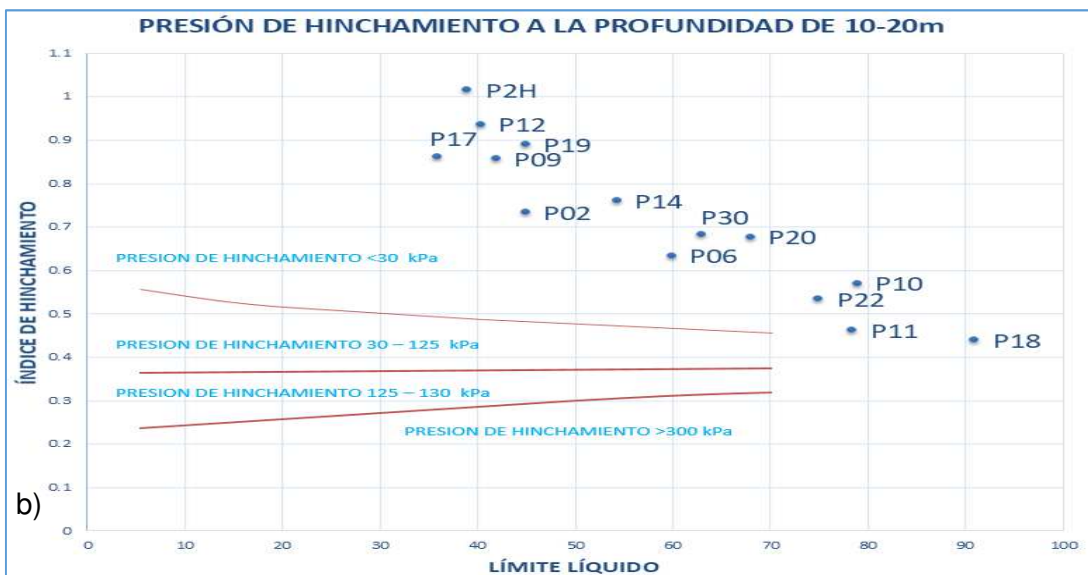
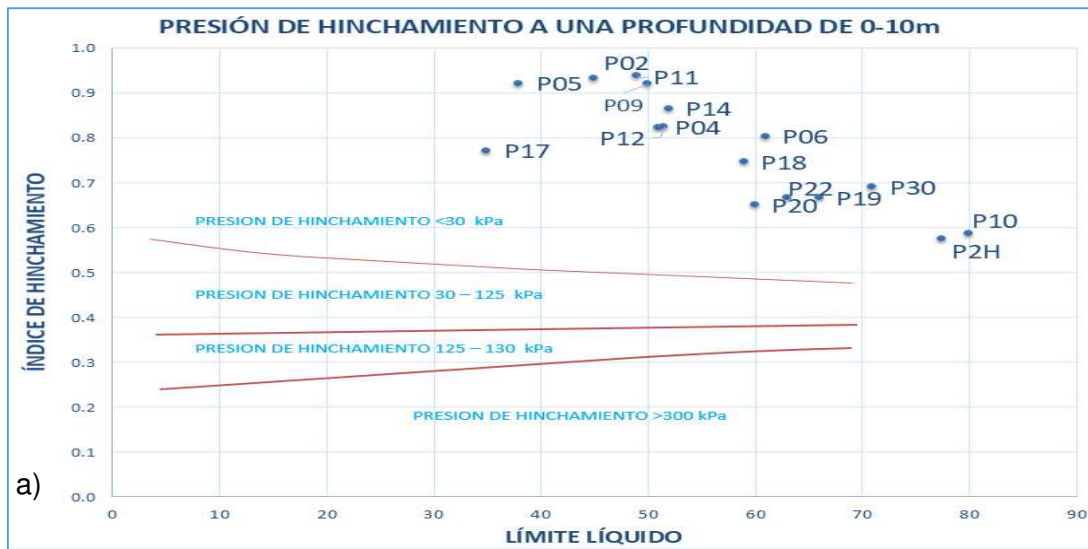


Figura 5. 25 Potencial de Expansividad para las diferentes profundidades en los sondeos de perforación

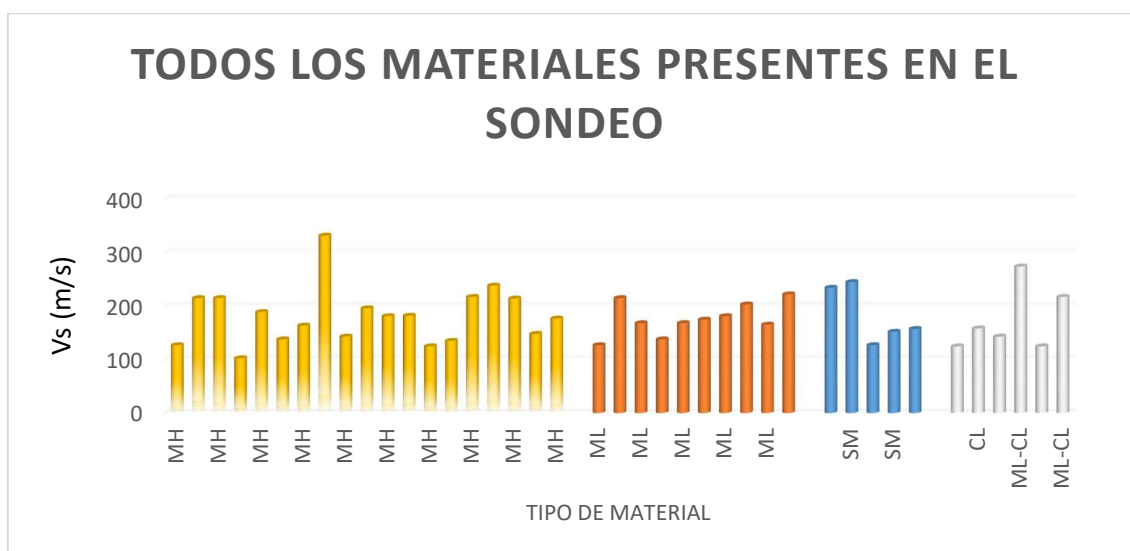


**Figura 5. 26** Presión de Hinchamiento en los sondeos de perforación para la profundidad de (a) 0-10m. (b) 10-20m. y (c) 20-30m



## 5.7 RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS CON LAS VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE ( $V_s$ ) DE LOS ENSAYOS ReMi

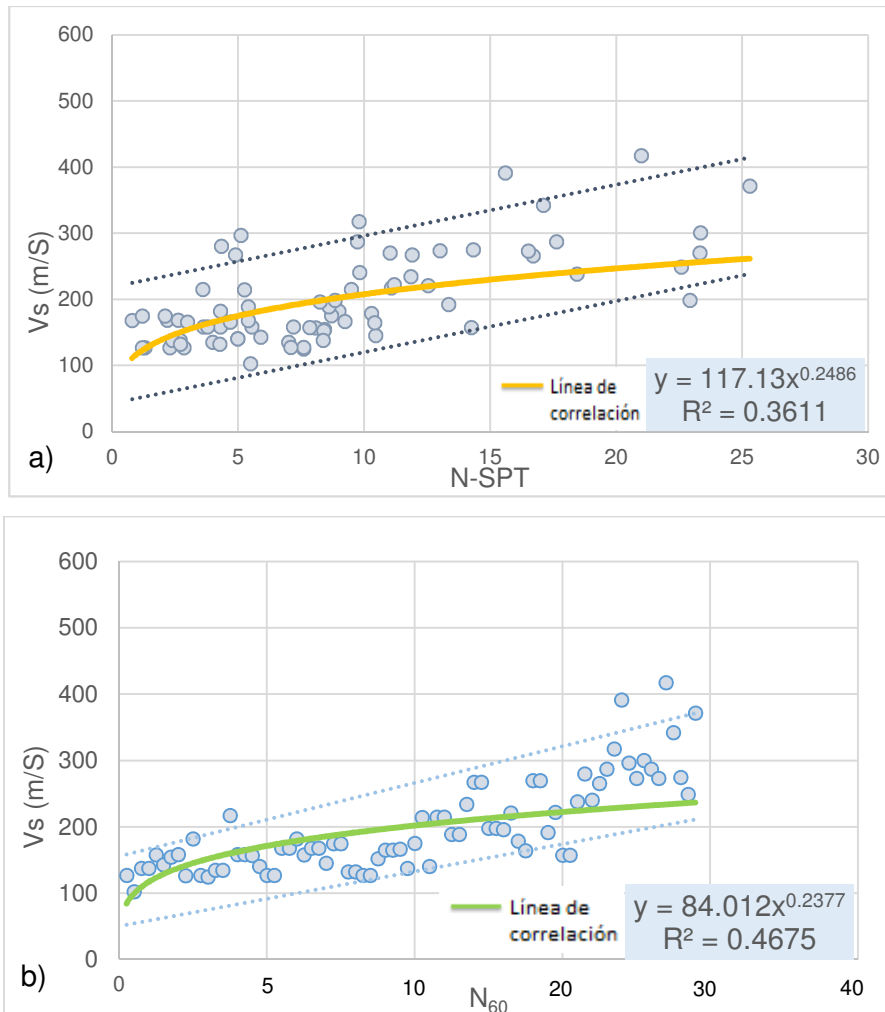
Se escogió los primeros estratos del subsuelo entre 0 a 10m (Anexo 4) y se intenta establecer una relación de los valores de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) obtenidos en el ensayo ReMi y el tipo de material discriminado a dicha profundidad, para caracterizar los suelos de la ciudad de Portoviejo (Fig. 5.27)



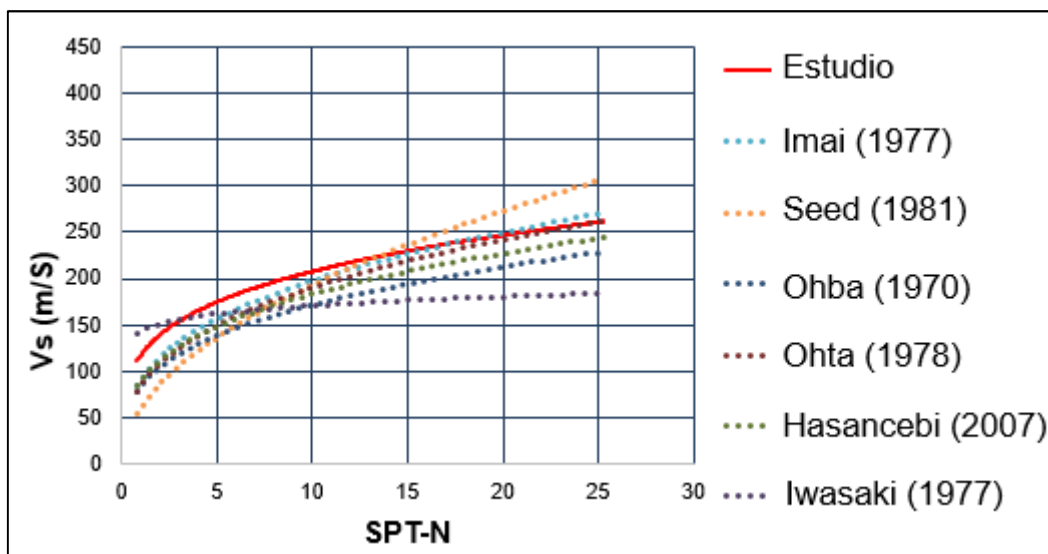
**Figura 5. 27** Relación entre la Velocidad de onda de cizalla ( $V_s$ ) y los diferentes tipos de materiales en los sondeos de perforación

## 5.8 ECUACIONES DE CORRELACIÓN DE LAS VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE ( $V_s$ ) Y LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTANDAR ( $N_{SPT}$ - $N_{60}$ )

Las ecuaciones empíricas que correlacionan la onda de cizalla a través de valores del  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$  ponderados para cada tipo de material, valores que fueron discretizados para las profundidades de 0 a 10m, 10 a 20m y de 20 a 30m, obtenidos en 15 sondeos de perforación que se encuentran en el valle de la ciudad de Portoviejo (Anexo 4) (Figuras: 5.28 y 5.29).



**Figura 5. 28** Ecuación que caracteriza la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) los suelos del valle de la ciudad de Portoviejo a una profundidad de 0 a 30m. (a) En función del NSPT y (b) En función del  $N_{60}$



**Figura 5. 29** Correlaciones con ecuaciones empíricas teóricas de diversas investigaciones que caracterizan la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) y los valores de N-SPT de los suelos

## 5.9 PERFILES ESTRATIGRÁFICOS-GEOTÉCNICOS

El análisis de las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ), Módulo de Rigidez al corte máximo ( $G_{m\acute{a}x}$ ) y de los valores de  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$ , permitieron delimitar estratos geológicos-geotécnicos y correlacionarlos dentro de los perfiles: el Perfil "A" que corta transversalmente la zona de estudio (Fig.5.30) y el Perfil "B" que corta longitudinalmente la zona de estudio, este último perfil se encuentra dividido en dos partes: Perfil "B1" (Fig 5.31) y Perfil "B2" (Fig 5.32).

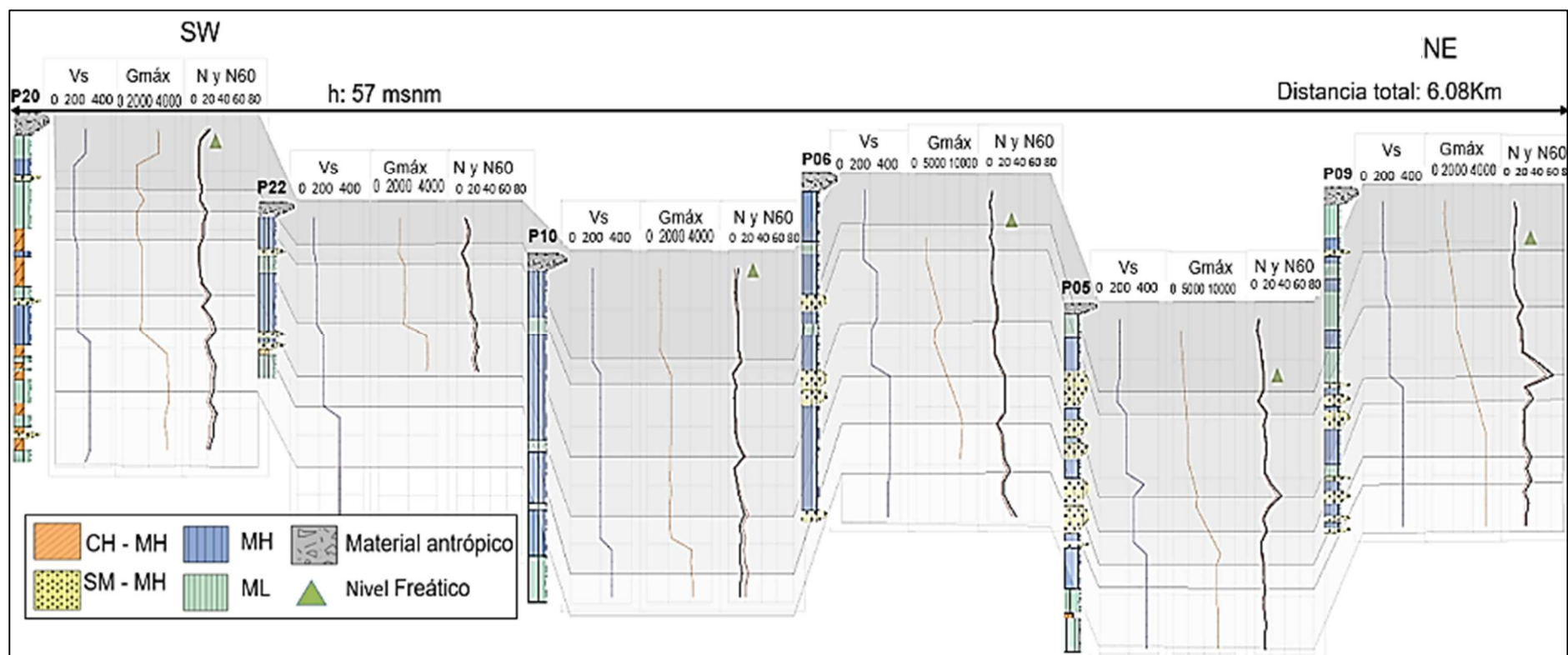
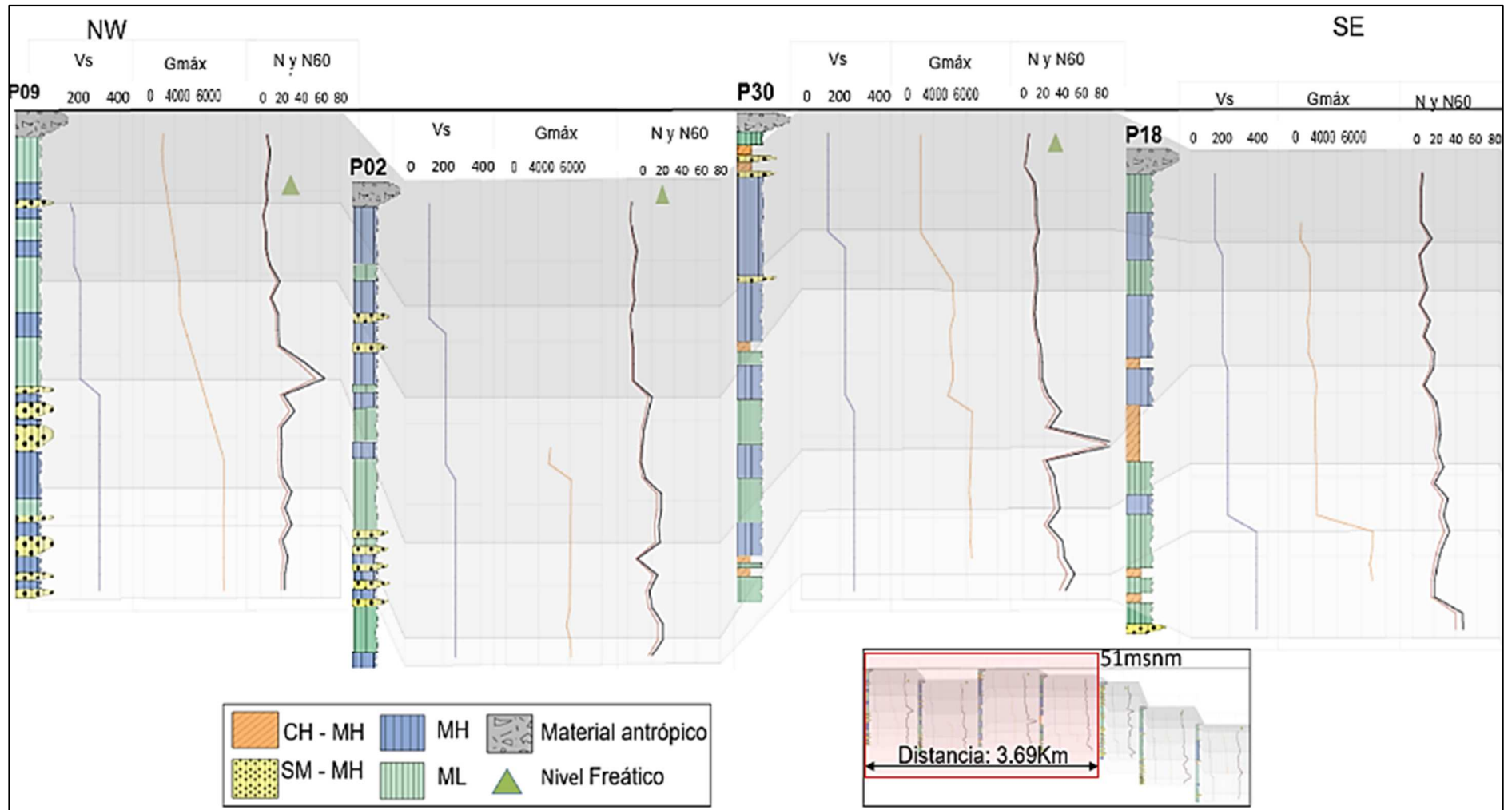


Figura 5. 30 Perfil "A" (P20 a P09)





**Figura 5. 31** Perfil “B1” (P09 a P18), el recuadro en rojo señala la posición del Perfil “B1” con respecto al Perfil “B”, que se muestra en la esquina inferior derecha.

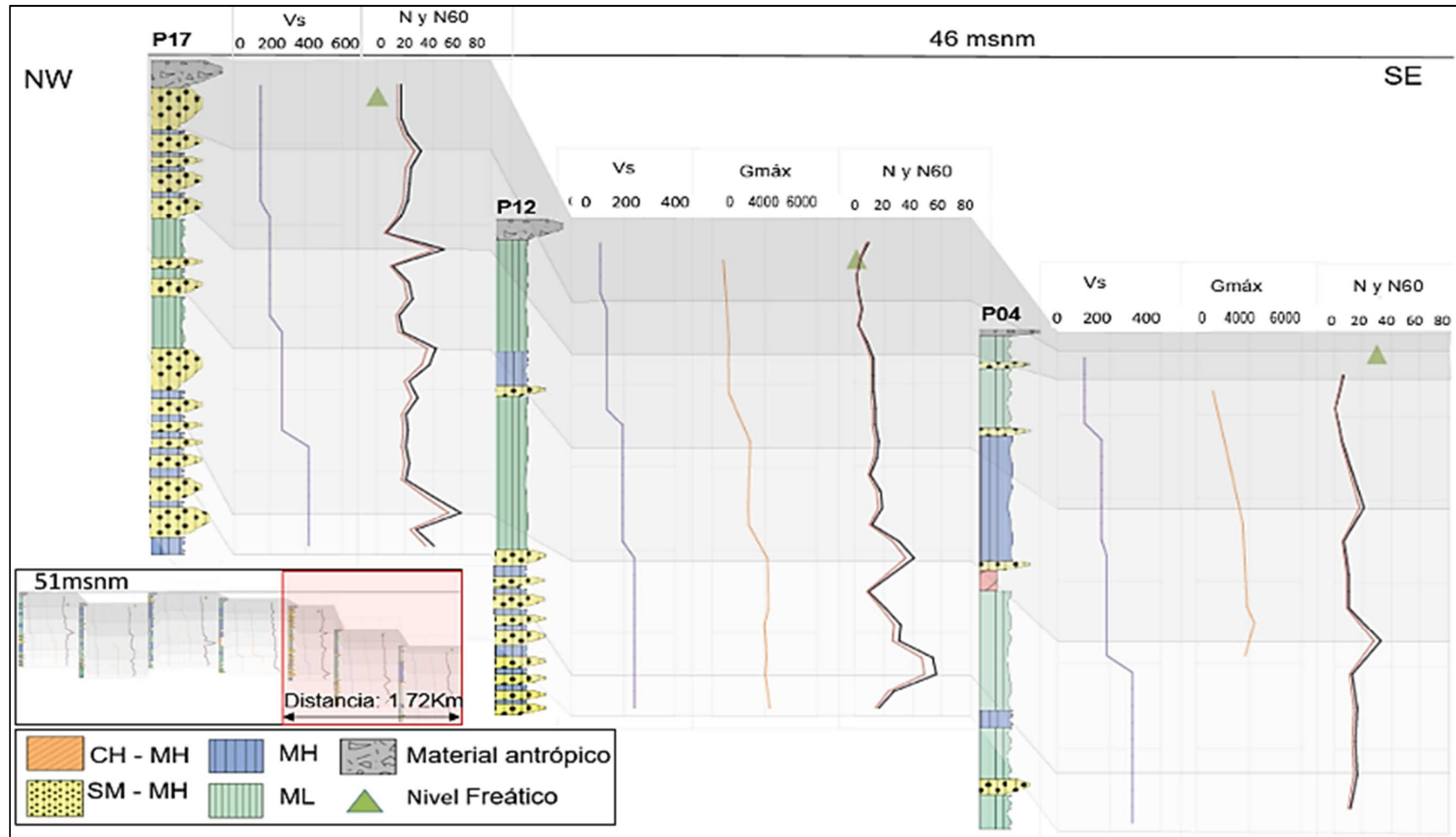


Figura 5. 32 Perfil “B2” (P17 a P04), el recuadro en rojo señala la posición del Perfil “B2” con respecto al perfil “B”, que se muestra en la esquina inferior izquierda.

## 5.10 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICO

El Mapa de Microzonificación Geotécnica está dividido en cinco microzonas, que poseen propiedades físico-mecánicas similares, delimitadas por un análisis geológico-estructural (Fig. 5.34).

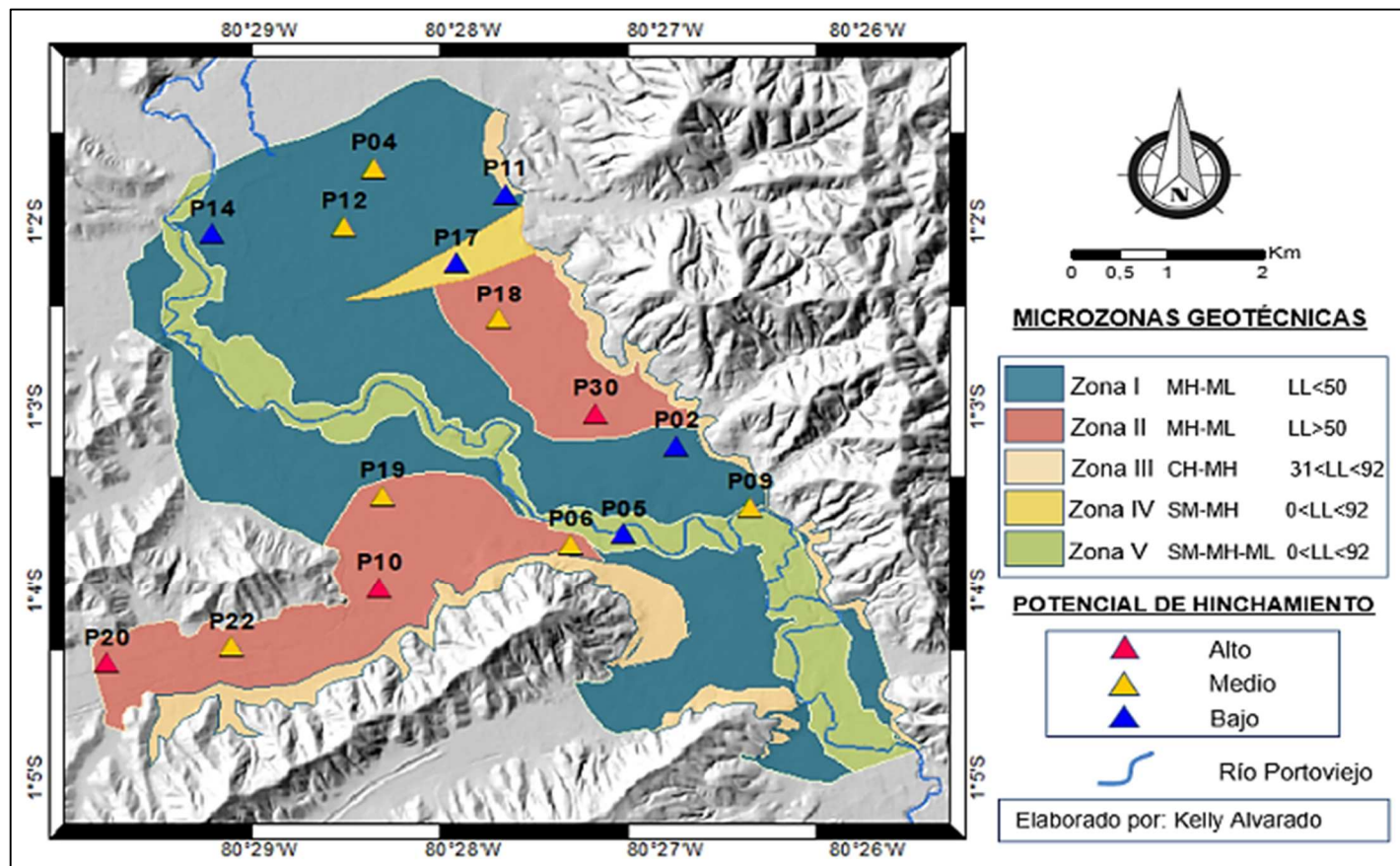
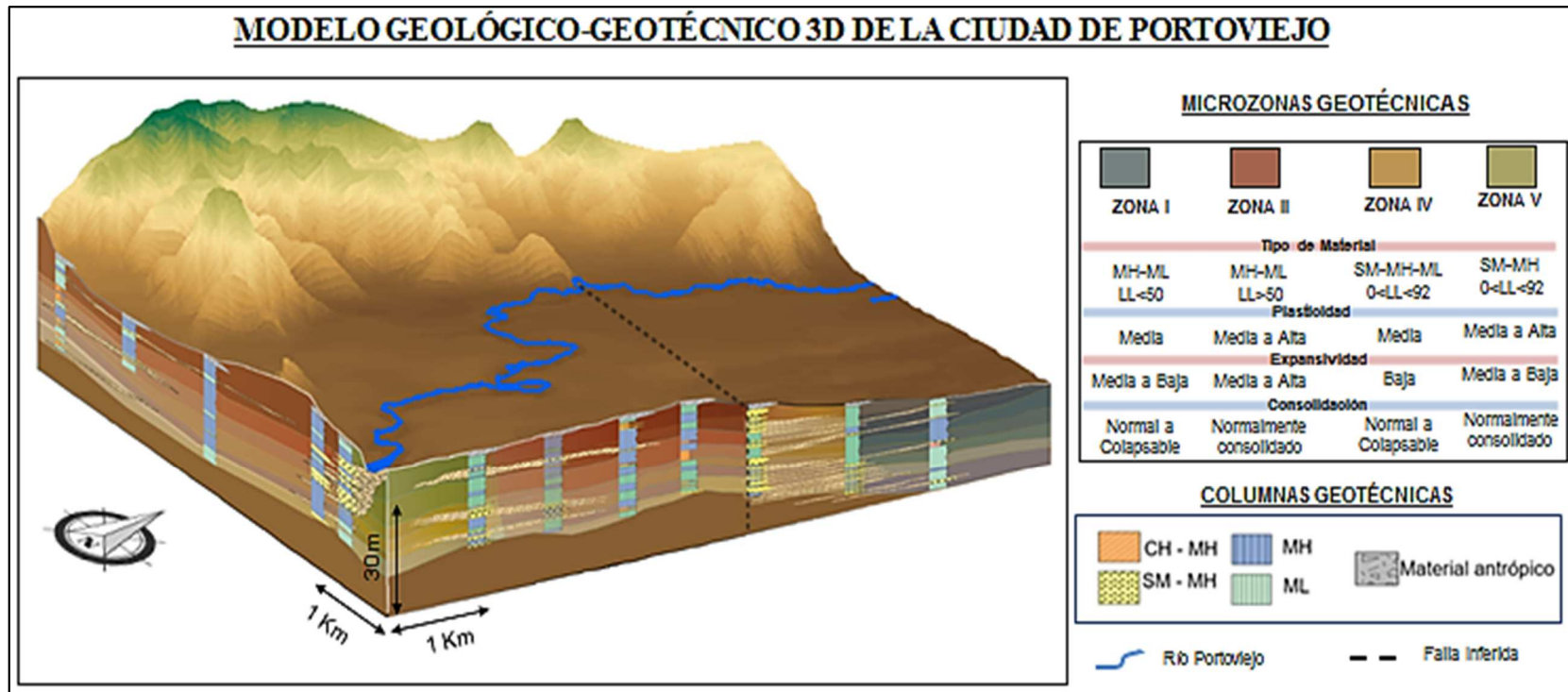


Figura 5. 33 Mapa de Microzonificación Geotécnica de la ciudad de Portoviejo.

### 5.11 MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 3D

El Modelo Geológico-Geotécnico 3D está generado en base a la correlación de las propiedades físico-mecánicas del suelo y su distribución espacial a lo largo de los perfiles diseñados anteriormente, los cuales permitieron delimitar los estratos geológicos-geotécnicos. El Mapa de Microzonificación Geotécnica, permitió definir las microzonas en donde se encuentran los perfiles estratigráficos-geotécnicos. En el diseño no se considera la zona III, que se encuentra bordeando las laderas (Fig. 5.33) y (Tabla 5.1).



**Figura 5. 34** Modelo Geológico Geotécnico 3D de la ciudad de Portoviejo



MICROZONA I													
W%	LL	IP	IL	e	S%	Cc	Vs (m/s)	GMÁX	PLASTICIDAD	CONSISTENCIA	CONSOLIDACIÓN	TIPO DE ARCILLA	EXPANSIVIDAD
42-50	40-54	13-19	0.6-1.6	1.3-1.5	95.2	0.3-0.4	102-234	646	Media	Blanda	Normal	Montmorillonita	Media a Baja
42-50	40-54	13-19	0.6-1.6	1.3-1.5	98.5	0.3-0.4	168-334	6424-6545	Media	Blanda	Normal-Colapsable	Illita	Media a Baja
42-43	41-57	10-23	0.4-1.2	1.2-1.3	96,3	0.2-0.4	168-490	1783-14585	Media	Blanda	Normal-Colapsable	Illita	Media a Baja
42-43	41-57	10-23	0.4-1.2	1.2-1.3	89.9	0.2-0.4	189-602	14079-21380	Media	Blanda	Normal-Colapsable	Illita	Media a Baja
42-45	42-72	17-30	0-0.8	1.1-1.2	94.9	0.3-0.5	189-602	19892-20615	Media a Alta	Blanda	Normal	Montmorillonita	Media a Baja
42-45	42-72	17-30	0-0.8	1.1-1.2	97.7	0.3-0.5	287-602	20179-21923	Media	Blanda	Normal	Illita	Media a Baja
MICROZONA II													
40-49	47-78	17-38	0.2-0.5	1.2-1.4	87,6	0.4-0.5	135-175	1098-1818	Media	Blanda	Normal	Illita	Media a Alta
40-49	47-78	17-38	0.2-0.5	1.2-1.4	87.3	0.4-0.5	121-198	1098-2520	Media	Semi-rígido	Normal	Illita	Media a Alta
39-49	31-72	6-36	0.2-1.2	1.2-1.3	92.5	0.3-0.6	175-245	1151-3510	Media a Alta	Blanda	Normal	Illita	Media a Alta
39-49	31-72	6-36	0.2-1.2	1.2-1.3	93.1	0.3-0.6	196-333	1477-5934	Media	Blanda	Normal	Montmorillonita	Media a Alta
34-42	25-65	7-33	0.2-0.6	1.0-1.2	90.4	0.1-0.4	249-333	3316-6035	Media a Alta	Muy Blanda	Normal-Colapsable	Illita	Media a Alta
34-42	25-65	7-33			92.3		318-320	3253-6285	Media a Alta	Muy Blanda	Normal	Illita	Media
MICROZONA IV													
31-46	27-50	10-16	0.7-1.4	1.3-1.5	--	0.2-0.4	152-274	--	Media	Blanda	Normal-Colapsable	Illita	Baja
31-46	27-50	10-16	0.7-1.4	1.3-1.5	--	0.2-0.4	152-334	--	Media	Muy Blanda	Normal-Colapsable	Montmorillonita	Media a Baja
31-43	33-41	23-30	0.8-1.2	1.32	--	0.2-0.3	203-490	--	Media	Blanda	Normal-Colapsable	Montmorillonita	Baja
31-43	33-41	23-30	0.8-1.2	1.32	--	0.2-0.3	270-490	--	Media	Blanda	Normal-Colapsable	Illita	Baja
20-40	42-45	25-27	0.1-0.8	1.25	--	0.4-0.5	270-490	--	Media	Blanda	Normal	Illita	Baja
20-40	42-45	25-27	0.1-0.8	1.25	--	0.4-0.5	490-600	--	Media	Semi-rígido	Normal	Montmorillonita	Baja
MICROZONA V													
34-46	35-46	8-15	0.8-1.2	1.0-1.2	88,7	0.2-0.4	143-168	1154-1259	Media	Blanda	Normal	Illita	Media a Baja
34-46	35-46	8-15	0.8-1.2	1.0-1.2	93,9	0.2-0.4	168-182	2307-2360	Media	Blanda	Normal	Illita	Media a Baja
37-46	28-39	11-18	0.6-1.2	1.1-1.3	94.0	0.2-0.4	182-198		Media	Blanda	Normal	Illita	Media
37-46	28-39	11-18	0.6-1.2	1.1-1.3	92.3	0.2-0.4	234-297	5220-5220	Media a Alta	Blanda	Normal-Colapsable	Illita	Media
34-45	46-55	18-25	0.6-0.9	1.1-1.2	96.7	0.2-0.3	234-297	5189-5214	Media a Alta	Blanda	Normal	Illita	Media a Baja
34-45	46-55	18-25	0.6-0.9	1.1-1.2	96.7	0.2-0.3	297-318		Media	Blanda	Altamente Plástico	Illita	Media a Baja
<b>W%:</b> Humedad <b>LL:</b> Límite Líquido <b>IP:</b> Índice de Plasticidad <b>e:</b> Índice de Vacíos <b>S%:</b> Grado de Saturación en % <b>Cc:</b> Índice de Compresión <b>Vs:</b> Velocidad de Onda de Corte <b>Gmáx:</b> Módulo de Rigidez al Cortante													

**Tabla 5. 1** Propiedades Físico-Mecánicas de los estratos Geológicos-Geotécnicos definidos para cada microzona del Modelo geológico-geotécnico 3D de la ciudad de Portoviejo.

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

#### 6.1 ZONAS PROPENSAS A LA SATURACIÓN DE AGUA

La precipitación media anual en la zona de estudio es 574.26mm; teniendo las máximas precipitaciones en épocas donde se desarrolla el Fenómeno del niño llegando a considerar una precipitación media de 1400mm al año. Los sondeos de Perforación se ejecutaron en los meses de Junio y Julio del 2016 que poseen una pluviosidad media mensual de 21.6mm y 7.3mm respectivamente, con valores máximos de 338.9mm, la pluviosidad de los meses mencionados en el año 2016, se caracterizan por ser los rezagos de la época del Fenómeno del Niño. Los meses de mayo y junio son épocas subhúmedas, con una humedad ambiental que varía entre el 50% al 70% y donde existe mayor evaporación según datos de la SNI, 2012. A su vez esta época que corresponde al inicio de la sequía, el suelo presenta una humedad que oscila entre 17% al 53%, destacando que el grado de saturación del suelo tiene un valor medio de 92.28% y una porosidad que fluctúa entre 31% al 60%. Las densidades húmedas fluctúan entre 11.22 a 23.84 kN/m<sup>3</sup>, densidades secas entre 7.60 a 23.26 y densidades saturadas que varían entre 14.51 a 24.26 kN/m<sup>3</sup>. La gravedad específica (Gs) posee un rango medido de 2.64 a 2.72, valores que fueron determinados en laboratorio, de un total 130 muestras ensayadas de suelos de los sondeos de perforación.

El nivel freático en la ciudad Portoviejo se encuentra cercano a los 3 metros de profundidad, es decir a un nivel muy somero en el cual los estratos que se encuentran sobre el nivel freático son más susceptibles a cambios de humedad y por ende a un mayor potencial de hinchamiento. Gran parte de la zona de estudio posee una humedad que se encuentra por encima del 30%, correspondiente a la finalización del periodo de mayor pluviosidad de la zona en el cual, gran parte de la expansión en el suelo ya tuvo lugar en el periodo precursor y solo se esperaría un leve hinchamiento remanente o su subsecuente contracción que podrían generar daños estructurales a corto o a largo plazo.

La zona del pozo PH2, posee un nivel freático aproximado de 17m de profundidad, en dicha profundidad se caracteriza por un alto contenido en arcillas los cuales pueden ser estratos con estados críticos de expansión o contracción de arcillas, cuando exista un cambio importante de humedad.

Dentro del análisis de humedad se realizó un procesamiento de imágenes satelitales en donde se identificó los suelos con mayor retención de humedad durante la época de baja pluviosidad, este análisis corresponde a la capa más superficial de los suelos, donde predominan procesos de infiltración, escorrentía y evapotranspiración. A su vez se añadió las zonas de riesgo de inundación y estancamiento de agua generado por un estudio por parte del GAD de Portoviejo, obteniendo como resultado un mapa de las zonas más propensas a la saturación de agua en el suelo de Portoviejo sobre todo en las zonas más someras y de gran relevancia para la construcción de estructuras livianas como viviendas, las cuales tienen mayor susceptibilidad a daños estructurales, dado el escenario de cambios cíclicos de humedad en el suelo.

Bajo este análisis se reconoció la posible extensión espacial de los suelos con mayor retención de humedad dentro de la zona de estudio, obteniendo como resultado: Al sur, los sectores que poseen mayor retención de la humedad en el suelo que coincide con la llanura de inundación del río y de los drenajes de menor relevancia, sin embargo hacia la zona norte de la ciudad posee sectores con retención de la humedad que tiene una gran extensión territorial siendo una zona muy apta para la agricultura sin embargo para el crecimiento urbano es una zona de mayor susceptibilidad a desarrollar fenómenos asociados con los suelos. Hacia el centro de la zona de estudio la reflectancia de las ondas espectrales reflejan las obras estructurales construidas en este sector y que a su vez generan un tipo de impermeabilización de los suelos interrumpiendo con los procesos hidrogeológicos entre ellos la evaporación provocando una mayor retención de la humedad en los suelos y por ende un alto potencial de hinchamiento y daños estructurales.

El grado de humedad depende de diferentes factores como el clima, cobertura vegetal, topografía, propiedades físicas y químicas del suelo como la estructura que depende del índice de vacíos del suelo el cual tiene un promedio de 1.19. Los valores por sectores de la zona de estudio dan un indicio de que el suelo en el sector norte tiene una estructura semi abierta y dispersa mientras que al sector sur la estructura del suelo tiende a ser más cerrada, lo mismo sucede a profundidad, con una estructura del suelo que tiende a ser más cerrada.

## **6.2 CLASIFICACIÓN DEL SUELO Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS**

La clasificación del suelo realizada en los sondeos de perforación se distingue por poseer suelos limosos arcillosos en su gran mayoría y arenas y gravas en menor proporción. Los limos y arenas se encuentran principalmente en depósitos de tipo fluvial y aluvial, en menor proporción en depósitos de tipo coluvial, coluvio-torrencial, siendo sedimentos generados por la erosión de los materiales que conforman las laderas del valle de Portoviejo. A su vez el contenido en arcillas se asume que se producen principalmente por la meteorización y descomposición de las lutitas que conforman las formaciones de Villingota, Ónzole y Dos Bocas. Mientras que las arenas acompañadas por gravas pertenecen a canales fluviales y paleocanales.

Además se encontró pequeñas capas de ceniza de origen volcánico en el sector NE de la zona de estudio a una profundidad aproximada de 11m, su espesor varía desde 0.05m hasta 0.25m. El material de ceniza de origen volcánico que se preservó en este sector probablemente se depositó en un ambiente donde la erosión no fue tan exhaustiva para que las capas de ceniza se hayan conservado o a su vez este depósito de ceniza representa una acumulación de este material, producto de la erosión de las laderas y lugares circundantes para dicho sector y su posteriormente preservación, añadiendo que en ciertos sondeos de perforación, la capa de ceniza se encontraba mezclado con limos a la base de esta capa, propiciando un indicio de remoción del depósito original.

En cada sondeo de perforación se homogenizaron los datos correspondientes a la clasificación de los suelos, para obtener una clasificación predominante a



las profundidades de 0 a 10m, 10 a 20m y de 20 a 30m. Respecto a la consistencia de los suelos suponemos que el suelo tiene una consistencia blanda cuanto más cercano se encuentre el contenido de humedad al límite líquido y por lo contrario cuando el contenido de humedad está cercano o por debajo del límite plástico, suponemos que la consistencia del suelo tiende a comportarse de forma rígida, de esta forma se intenta caracterizar la consistencia del suelo para cada profundidad.

Profundidad de 0 a 10m.- En los sondeos de perforación existe una predominancia tanto espacial como en profundidad de suelos limosos arcillosos inorgánicos que presentan una ligera variación espacialmente en el extremo norte y sur de la zona de estudio así mismo exhibe una variación en profundidad de la compresibilidad que va de media a alta. Con respecto a la consistencia de los suelos tenemos al noreste y sur una consistencia blanda mientras que hacia el oeste presenta una consistencia semi rígida. Esta consistencia puede ser caracterizada en sectores de menor área (Tabla 6.1).

<b>SECTOR</b>	<b>W%</b>	<b>LL</b>	<b>IP</b>	<b>Consistencia</b>
Norte	48-53	30-56	11-22	Muy blando
Centro-Este	44-45	50-72	17-30	Blando
Centro-Oeste	38-49	47-78	15-38	Semi rígido
Sur	34-46	35-46	8-15	Blando

**Tabla 6. 1** Consistencia de los suelos a una profundidad de 0 a 10m

Profundidad de 10 a 20m.- Espacialmente la predominancia de suelos limosos arcillosos se mantiene en la zona central y centro oeste de la zona de estudio mientras que para la zona norte y zona sur se destaca una ligera heterogeneidad en el tipo de suelos teniendo suelos limo arcillosos de compresibilidad media y arenas limosas de compacidad media. En profundidad la compresibilidad tiene un similar comportamiento a la profundidad anterior (0 a 10m), con un ligero incremento en la compresibilidad teniendo en gran parte de los pozos una compresibilidad alta y en menor proporción una compresibilidad media que corresponden a los sondeos de la zona norte y sur. Además existe un aumento

en el contenido arcillas y plasticidad sobre todo en el sondeo P18. En relación a la consistencia de los suelos en la mayor parte de la zona de estudio son suelos blandos (Tabla 6.2).

<b>SECTOR</b>	<b>W%</b>	<b>LL</b>	<b>IP</b>	<b>Consistencia</b>
Norte	38-49	41-57	10-23	Blando
Centro-Este	39-47	39-72	13-36	Blando a Muy Blando
Centro-Oeste	42-49	31-71	6-31	Blando
Sur	37-46	28-39	11-18	Muy Blando

**Tabla 6. 2** Consistencia de los suelos a una profundidad de 10 a 20m.

Profundidad de 20 a 30m.- En la zona de estudio espacialmente existe un incremento de la compresibilidad y de la compacidad, este último relacionado con el incremento en el contenido de arenas especialmente en los sondeos P17, P12 y P09. En profundidad la mayoría de sondeos poseen una alta compresibilidad y un aumento de la plasticidad. En escasos sondeos se presentan una compresibilidad media. En cuanto a la consistencia se distingue para cada sector (Tabla 6.3).

<b>SECTOR</b>	<b>W%</b>	<b>LL</b>	<b>IP</b>	<b>Consistencia</b>
Norte	42-45	42-72	17-30	Blando
Centro-Este	39-40	38-49	13-23	Blando a Muy Blando
Centro-Oeste	34-42	25-65	7-33	Blando a Muy Blando
Sur	34-45	46-55	18-25	Blando

**Tabla 6. 3** Consistencia de los suelos a una profundidad de 20 a 30m

En síntesis el valle de la ciudad de Portoviejo se caracteriza por poseer suelos limosos arcillosos presentando una consistencia blanda y un mayor aumento de la compresibilidad a mayor profundidad y un ligero incremento en el contenido de arcillas. Es importante destacar que en cuanto los suelos posean mayor contenido en arcillas, estas controlarán la permeabilidad y la velocidad de consolidación. El Índice de Plasticidad hacia el norte y sur de la zona de estudio es bajo ( $IP < 20$ ), lo que implica que se requiera bajas cantidades de humedad,

para cambiar su resistencia de 100kPa a 1kPa. En las laderas de la ciudad de Portoviejo se encuentra un comportamiento similar para el incremento de la compresibilidad hasta los 15m y bajo esta profundidad se encuentra el substrato rocoso.

### **6.3 PROPIEDADES MECÁNICAS A TRAVÉS DE LA CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS**

Estas propiedades describen el comportamiento de los suelos bajo cambios del medio ambiente y esfuerzos inducidos:

#### **Plasticidad**

En la zona de estudio se identifica para el sector central una predominancia de alta plasticidad y se mantiene este comportamiento hasta una profundidad de 30m. Hacia el norte y sur posee una heterogeneidad en la plasticidad, destacando una plasticidad media hasta los 10m, una plasticidad media a baja a una profundidad de 10 a 20m y una plasticidad alta a una profundidad de 20 a 30m. La plasticidad esperada para la zona de estudio es correspondiente a suelos cohesivos que predominan en la zona, sin embargo esta plasticidad podría cambiar con cuerpos que no poseen plasticidad como lentes de arena que pueden encontrarse aleatoriamente en profundidad.

#### **Índice de Liquidez**

Los valores medidos en suelos remoldeados de la zona de estudio corresponden a suelos normalmente consolidados, donde el índice de liquidez es cercano a uno, característicos de suelos que no han estado sometidos a presiones efectivas mayores a lo largo de su historia geológica, sin embargo estos valores pueden cambiar para suelos inalterados sobre todo en aquellos, donde el Índice de Liquidez es menor a cero es decir suelos sobre consolidados así como también en suelos cementantes y en arcillas sensitivas.

Sector norte (P04, P11, P12 y P14) .- El índice de liquidez predominante es cercano a uno, prevaleciendo suelos normalmente consolidados tanto espacialmente como en profundidad sin embargo en el sondeo P11, el índice de liquidez disminuye a profundidad dando lugar a suelos sobre consolidados a mayor profundidad.

Sector centro este (P18, P30, P02).- Los suelos normalmente consolidados predominan en las profundidades más someras hasta los 10m aproximadamente, bajo esta profundidad existe un ligero cambio gradual a suelos sobre consolidados hasta una profundidad de 30m. Sin embargo a mayor detalle existe una variación del índice de liquidez dando lugar a suelos que tienden a ser pre consolidados, es decir con Índice de Liquidez cercano a cero, sobre todo en los sondeos P18 y P30.

Sector centro oeste (P19, P10, P20, P22).- Existe una predominancia de suelos pre consolidados o con índices de liquidez cercanos a cero, dichos valores varían en profundidad hasta tender a ser suelos normalmente consolidados o con índices de liquidez cercano a uno.

Sector sur (P05, P06, P09, P2H).- Los suelos normalmente consolidados son dominantes en este sector, sin embargo a profundidad posee variaciones significativas del índice de liquidez, que tienden a dar suelos alternantes entre suelos normalmente consolidados y suelos pre consolidados.

Esta evaluación de pre-factibilidad, permite conocer el estado de esfuerzos de los estratos para el análisis de consolidación y determinación de asentamientos a largo plazo para las cimentaciones superficiales.

### **Actividad**

La actividad calculada para el contenido de arcilla en los sondeos, nos permite determinar la propensión a hincharse en presencia de agua, teniendo tendencias espaciales como a profundidad y a su vez nos permite una posible identificación del tipo de mineralogía de las arcillas que priman en los sondeos, como resultado de procesos intensos de meteorización química en los sedimentos acumulados en la planicie de inundación (González, 2014).

Se reconoció que los minerales predominantes en el valle son illita y montmorillonita y en menor proporción caolinita. En los sondeos P19, P14 y P06 poseen los valores de actividad similares en profundidad destacando valores altos a una profundidad de 20 a 30m con predominancia de montmorillonita, siendo esta profundidad la más susceptible a la expansión de las arcillas. Los sondeos mencionados podrían pertenecer a una terraza antigua con un origen sedimentario similar. La presencia de montmorillonita puede ser debido a un mismo origen sedimentario para los sondeos o pertenecer a la neoformación de la alteración química de la Illita, que es muy usual en planicies aluviales (Gonzales, 2014).

Los sondeos P09 y P05 a pesar de estar más próximo al río que los anteriores sondeos mencionados no poseen la misma similitud de la actividad, debido a que pertenecen a una terraza más joven que los anteriores teniendo valores muy variados de la actividad y por ende un origen sedimentario distinto, que aportan a dicho depósito por medio del transporte del río. También se puede considerar una meteorización química distinta y más acelerada en los primeros estratos de los sondeos mencionados, y que a su vez son dependientes de las condiciones de humedad reinantes en el momento de la depositación, para lo cual se podría contemplar un contenido de humedad elevado que generó la alteración química acelerada en los sedimentos.

En los sondeos P10 y P22 presentan valores bajos de actividad, indicando una predominancia de illita en este sector. La presencia de esta arcilla nos sugiere que el tiempo y recorrido de la depositación de las arcillas ha sido muy corta para generar arcillas neoformadas, teniendo como resultado general sedimentos inmaduros para dicho sector.

En los sondeos P02 y P17 tiene un aporte de caolinita que usualmente se asocia a sedimentos muy meteorizados de ambientes altamente lavados o provenientes de una erosión lateral de otros depósitos y bancos desarrollados en la planicie de inundación, sin embargo también se puede considerar la probabilidad de una mineralogía heredada de las formaciones sedimentarias adyacentes en el piedemonte y que fueron depositadas bajo condiciones climáticas tropicales (Gonzales, 2014).

En el sector norte incluyendo el sondeo P18 poseen una actividad similar, caracterizando a este sector con valores altos, predominando illita y montmorillonita la misma que se desarrolla en planicies de inundación con mal drenaje y que pueden estar asociadas con condiciones semiáridas a húmedas (Singer, 1984; Gonzales, 2014).

### **Potencial de Expansión**

La correlación hallada a través de las propiedades físicas son evaluaciones iniciales que sirven para una etapa de prefactibilidad para una posterior verificación mediante pruebas de consolidación o edómetro. La zona de estudio posee potencial de expansión media a una profundidad de 0 a 20m. De 20 a 30m posee un potencial de expansividad alto, sin embargo a esta profundidad sería muy inusual un cambio de humedad, y por ende son inusitados los daños a las estructuras.

En el sector sur (P05, P06 y P09) existe un potencial de expansión medio a bajo. En el sector centro oeste (P10, P19, P20, P22) se caracteriza por poseer un potencial de hinchamiento heterogéneo, destacando valores medios a altos en los sondeos P18 y P30, valores bajos en el sondeo P02.

Hacia el sector norte posee una expansividad media, la cual va reduciéndose junto con la profundidad hasta tener valores bajos. Cabe destacar que los suelos que tiene un alto potencial de hinchamiento generan daños estructurales sobre todo a estructuras ligeras como viviendas, dejando diferentes tipos de daños como grietas y distorsiones que pueden generarse a corto o a largo plazo.

### **Presión de Hinchamiento**

La presión de hinchamiento que puede generar el suelo, sobre las estructuras o cimentaciones en la ciudad de Portoviejo es relativamente baja. En todo el valle de Portoviejo se caracteriza por poseer una presión de hinchamiento <30kPa tanto espacialmente como a profundidad, sin embargo esta presión cambia hasta aumentar la presión de 30-125kPa en los sondeos P18 y P11 a una profundidad de 10m a 20m y continúa incrementando esta presión en el sondeo P18, dentro de este mismo rango de presión mencionado, a la profundidad de 20m a 30m.



El sondeo P17 presenta un comportamiento similar en el incremento de presión dentro del rango de 30-125kPa en la profundidad de 20 a 30m.

#### **6.4 RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS Y LAS VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS ReMi**

El ensayo geofísico de refracción por microtemores, ReMi, es un método geofísico no invasivo, que nos permite caracterizar el terreno sobre todo en zonas urbanas. Los resultados obtenidos proporcionan respuestas de las velocidades de onda de corte que atraviesan los diferentes estratos con cambios intempestivos en las propiedades físicas, de esta manera se homogenizan varios estratos de suelo, sin embargo para el propósito de esta investigación, este ensayo deja desapercibido estratos de gran interés geotécnico para obras civiles puntuales, como por ejemplo: estratos con lentes de arena.

Dentro del estudio para la caracterización de distintos materiales geotécnicos se obtuvieron similares respuestas de velocidad de onda de corte, siendo una limitante para una óptima relación entre el tipo de material y la velocidad de onda de corte característico. Para este propósito es necesario un método que permita medir in situ las propiedades físicas del suelo sobre todo la densidad del tipo de material que es la principal propiedad que determinará la velocidad de onda de corte característico para cada tipo de suelo.

#### **6.5 ECUACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE ( $V_s$ ) Y LOS VALORES DE $N_{SPT}$**

La velocidad de la onda de corte ( $V_s$ ) es parte de los parámetros geotécnicos importantes de los suelos que permiten evaluar los efectos de sitio, análisis del peligro y el movimiento del suelo, necesarios para una evaluación completa del peligro sísmico. Por otro lado, el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) es una prueba geotécnica que proporciona medidas indirectas de las resistencias de los suelos. Este estudio fue obtenido a través del análisis de las velocidades de onda de corte de los ensayos ReMi hasta una profundidad de 30m con los números los ensayos de Penetración Estándar N-SPT. En base a lo cual se obtuvieron dos ecuaciones.

En este estudio, se generan dos expresiones empíricas a partir de las cuales se genera una ecuación de la correlación de  $V_s$  versus N-SPT (valores de N, no corregidos) y otra se desarrolla a partir de la correlación de  $V_s$  en función de  $N_{60}$  (valores de N, corregidos).

El objetivo fue analizar estas correlaciones empíricas y considerar la correlación mejor ajustada de la velocidad de la onda de corte y la prueba de penetración estándar con un alto coeficiente de correlación ( $R^2$ ). Las dos ecuaciones generadas son aplicables a todos los tipos de suelo en el área de estudio y se intenta comparar con ecuaciones de velocidad de onda de corte versus  $N_{SPT}$  para todos los tipos de suelo propuestos por otros investigadores, encontrando que la correlación desarrollada para  $N_{SPT}$  sin corregir muestra un buen rendimiento de predicción y ajuste similar a otras correlaciones de otras investigaciones. Sin embargo las correlaciones de otras literaturas en gran parte de los casos están en función del  $N_{SPT}$  (N sin corregir) por lo que no se pudo realizar una comparación de la ecuación desarrollada en función del  $N_{60}$ .

<b>Vs f(<math>N_{SPT}</math>)</b>	$V_s = 117,13N_{SPT}^{0.2486}$	$R^2=0.36$
<b>Vs f(<math>N_{60}</math>)</b>	$V_s = 84.012N_{60}^{0.4675}$	$R^2=0.47$

**Tabla 6. 4** Ecuaciones que correlaciona la Velocidad de Onda de Corte ( $V_s$ ) y los valores de  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$  para la ciudad de Portoviejo.

De las observaciones, la correlación de la velocidad de la onda de corte en función de  $N_{60}$  proporciona un coeficiente de correlación ligeramente más alto que el dado por la correlación con el N-SPT. Además en comparación con las curvas de las correlaciones propuestas por varios autores, estas se ajustan mejor con las curvas obtenidas en este estudio cuando N-SPT es mayor a 6. Las correlaciones son aplicable solo para este sitio y posee un alto nivel de confianza donde existe mayor número de sondeos, sin embargo requiere mayor énfasis en la investigación donde no hay sondeos de perforación.

## 6.6 PERFILES ESTRATIGRÁFICOS-GEOTÉCNICOS

Los perfiles estratigráficos-geotécnicos están dispuestos de forma WSW-ENE “Perfil A”, que corta transversalmente la zona de estudio, albergando a los sondeos P20, P22, P10, P06, P05 y P09, y en sentido NW-SE el “Perfil B”, corta longitudinalmente la zona de estudio, albergando a los sondeos P09, P02, P30, P18, P17, P12 y P04. Este último perfil se dividió en dos secciones “Perfil B1” y “Perfil B2” con la finalidad de tener una mejor representación del Perfil, para un mejor entendimiento.

Para la formación de los perfiles se tomó en cuenta el tipo de material de los suelos el mismo que se dispuso en forma de columnas estratigráficas geotécnicas para cada sondeo de perforación, que permitieron identificar cuerpos de interés geotécnico sobre todo para obras de ingeniería civil, como son los lentes de arena y su posible continuidad espacial. A este análisis se añade registros de la velocidad de onda sísmica de cizalla ( $V_s$ ) y el Módulo de Rigidez al cortante máximo ( $G_{\max}$ ) y de los valores de  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$ , que permitieron identificar 6 estratos de suelos y su continuidad espacial. Destacando que de estos registros las velocidades de ondas sísmicas de cizalla ( $V_s$ ) y el Módulo de Rigidez al cortante máximo ( $G_{\max}$ ) incrementan con la profundidad en los Perfiles “A” y “B”, que conjunto a los valores de  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$ .

Sin embargo para una mejor identificación de estratos se utilizó el registro de los valores de  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$ , debido que estos registran un comportamiento del suelo más detallado y que se encuentra en función de su resistencia y densidad, por lo que ciertos picos de los registros de las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) y del Módulo de Rigidez al corte máximo ( $G_{\max}$ ) coinciden con los picos de los registros del  $N_{SPT}$  y  $N_{60}$ , teniendo picos altos cuando un material o un estrato cambia de resistencia o densidad, por lo que denota un cambio en el material.

De esta forma se analizaron los picos de cada registro y su posible semejanza entre sondeos para delimitar los estratos en continuidad, teniendo como resultado 6 estratos con cambios significativos en sus propiedades físico-mecánicas.

Cabe mencionar que en el sondeo P17 no había valores de densidades por lo que no existe registro de  $G_{máx}$  para ese sondeo, además en el sondeo P02, no se pudo obtener un registro completo de  $G_{máx}$  debido a la falta de datos de las densidades de los materiales en las profundidades someras. Cabe mencionar que la velocidad también depende de la temperatura y la salinidad del agua. Por lo que en suelos saturados y blandos se esperaría valores muy altos de las velocidades  $V_s$ , lo cual no es indicativo del incremento de rigidez de un suelo.

## **6.7 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICO LA CIUDAD DE PORTOVIEJO.**

El mapa de microzonificación geotécnica es una guía que nos permite evaluar espacialmente las propiedades físicas-mecánicas homogéneas que caracterizan el suelo de la ciudad de Portoviejo hasta una profundidad de 30m.

La delimitación de las microzonas en la caracterización geotécnica están basadas en la geología y estructuras tectónicas de la ciudad de Portoviejo que engloban las propiedades físico-mecánicas que poseen características similares como el tipo de material, límite líquido, índice de plasticidad, consistencia, índice de liquidez, plasticidad, actividad y expansividad. A partir de ello se identificó cinco zonas con características geotécnicas homogéneas en base a los datos obtenidos en los sondeos de perforación.

-Zona I: (MH-ML) Predominan materiales limos arcillosos inorgánicos de plasticidad media, consistencia blanda que varía a profundidad a una consistencia semi blanda. La compresibilidad varía de media a alta, caracterizados por tener límites líquidos menores al 50% e índices de plasticidad menores a 20 que implica que se requiere bajas cantidades de agua para cambiar de manera considerable su resistencia al esfuerzo cortante, además posee una expansividad media a baja.

-Zona II: (MH-ML) Constituida principalmente por suelos de tipo limo arcillosos de alta compresibilidad y en menor proporción de mediana compresibilidad, media a alta plasticidad, consistencia blanda, con valores superiores al 50% en el límite líquido e índices de plasticidad mayores al 20%, si este valor incrementa,

el suelo no se estabilizará bajo cargas y existirá una mayor degradación del módulo dinámico de corte, G. Esta zona posee un potencial de expansividad media a alta.

-Zona III: (CH-MH) Conformada por suelos arcillo limosos de alta compresibilidad y plasticidad, caracterizados por poseer niveles freáticos profundos, límite líquido superior al 50% e índice de plasticidad cercanos al 50%, además son suelos muy plásticos con potencial de expansividad muy alto.

-Zona IV: (SM-MH-ML) Conformada por suelos limo arcillosos de alta compresibilidad interdigitados por estratos de arena limosa de compacidad media, con espesores mayores a 0.65m, con valores muy bajos del límite líquido e índice de plasticidad. Esta zona probablemente pertenezca a una zona de barra de arena que fue depositado en un ambiente transicional marino-continental y que puede extenderse hacia el oeste.

-Zona V: (SM-MH) Estos suelos se encuentran muy próximos al cauce del río Portoviejo caracterizados por ser suelos poco cohesivos de tipo areno limosos con grava y suelos limo arcillosos de compacidad media y alta a mediana compresibilidad respectivamente, estos depósitos se encuentran en constante remoción del depósito original.

Las zonas con mayor proporción de arenas en el suelo tienen una gran susceptibilidad a generar licuefacción, estos suelos poseen estructuras sueltas, sin cohesión y que contienen materiales finos de baja plasticidad, los estratos que se encuentran sobre el nivel freático tendrán su resistencia al corte igual al ángulo de fricción efectivo, sin embargo de bajo del nivel freático los suelos poco cohesivos y densos tienden a dilatarse durante un sismo y suelos poco cohesivos y flojos tienden a contraerse durante un sismo, disminuyendo a cero su resistencia al corte.

Cabe mencionar que, los depósitos de suelos antiguos no cohesivos que fueron sometidos a cargas sísmicas tienen mayor resistencia a la licuefacción en comparación a las zonas recién formadas del mismo tipo de suelo. Los suelos cohesivos generalmente no se licuan sin embargo ante cargas sísmicas tienden a reducir significativamente la fuerza de corte no drenada (Braja et al., 2014).

Dentro de la microzonificación geotécnica, las áreas con escasa o nula presencia de sondeos de perforación requerirá mayor investigación futura para estos fines, por ende existirá mayor confiabilidad en las áreas donde exista mayor número de investigación in situ. Para la caracterización geotécnica no se tomaron en cuenta los sondeos de las laderas para evitar errores por la influencia topográfica.

## **6.8 MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 3D DE LA CIUDAD DE PORTOVIEJO.**

Los suelos de la zona de estudio presentan una heterogeneidad en sus propiedades físico-mecánicas correspondientes a la dinámica geológica que forman diversos depósitos en un área reducida y en un intervalo de tiempo geológico corto. Los depósitos predominantes del sitio de estudio son depósitos aluviales inundables y no inundables, coluviales, coluvios-torrenciales, depósitos fluviales-marinos que tienden a solaparse entre sí, cubriendo en muchas ocasiones grandes extensiones, a esto se suma las zonas de rellenos antrópicos en la superficie de los suelos donde existe un gran desarrollo urbano. Al mismo tiempo la tectónica regional que es dinámica, provoca una erosión considerable de las formaciones circundantes, generando un relleno de gran espesor en el valle fluvial del río Portoviejo.

Portoviejo antiguamente fue conocido como un puerto donde sus pobladores tenían actividades comerciales marítimas en un área reducida con un accidente geográfico de bahía, según las crónicas de Cieza de León en el año 1553 (Alcívar, 2011). En base a los datos históricos, se podría figurar que la zona donde irriga el río Portoviejo puede tener un levantamiento tectónico latente o que existieron cambios fuertes en el nivel eustático del mar para que exista un retroceso del mar muy acelerado en tiempos geológicos, refiriéndose a la escala del tiempo geológico.

Por lo tanto se asume que gran parte de los sedimentos hacia el sector norte de la zona de estudio fueron depositados en un ambiente de transición marino-continental, deduciendo que el contenido de arcillas tiene un alto porcentaje de iones que genera una estructura abierta e inestable, que puede generar floculación en el suelo y causar un colapso bajo cargas externas, sin embargo



hacia profundidades más someras, predominan sedimentos fluviales y por lo tanto se espera una estructura dispersa y un poco más resistente del suelo. La zona de estudio se distingue por tener en gran proporción suelos residuales y transportados de tipo limo-arcillosos inorgánicos con gran heterogeneidad en sus propiedades índice.

Además posee una acumulación considerable de suelos, que se profundizan hacia el oeste según los ensayos geofísicos (IGEPN, 2017). Probablemente la mayor acomodación de sedimentos se deba a una falla tectónica que controla el espacio de acomodación, formando una cuenca asimétrica con borde fallado hacia el noroeste, el mismo que generaría en superficie un control leve en el curso del río Portoviejo, ocasionando un cierto lineamiento al oeste del río, este control puede ser fuerte o leve dependiendo del dinamismo que tenga la falla, de la misma manera se pueden observar pequeños rasgos geomorfológicos de facetas triangulares en las colinas próximas a la zona de mayor control estructural del río. En este concepto tectónico se espera una menor proporción en el espesor de los suelos hacia el este, teniendo al sondeo P04, un sondeo semi-central norte a la zona de estudio con un espesor de sedimentos de 64m bajo el cual comienza el saprolito con presencia de fósiles bien preservados de ambiente marino-continental de tamaño <1,5cm, el saprolito se mantiene hasta una profundidad aproximada de 94m, y a partir de esta profundidad comienza el saprolito joven con un 50% de roca fracturada hasta una profundidad de 130m, donde comienza aparecer más del 50% de roca blanda que puede extenderse más de los 160m de profundidad, en donde concluye el sondeo P04.

Dentro de este contexto geológico se delimitan zonas en cada perfil geotécnico-estratigráfico. Estas zonas corresponden a las zonas identificadas en la generación del Mapa de caracterización Geotécnica. En cada zona, los estratos poseen su caracterización geotécnica (Tabla 5.1) en el cual se valora para cada estrato la consistencia, plasticidad, consolidación, compresibilidad, y expansividad de los suelos, entre otros. Con este análisis se obtuvo un modelo 3D de la zona de la ciudad de Portoviejo, que nos permite observar una representación y posible configuración de los suelos en profundidad de la ciudad de Portoviejo.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados presentados, a continuación se señalan las conclusiones obtenidas :

- El suelo de la ciudad de Portoviejo presenta materiales y propiedades heterogéneos, tanto espacialmente como en profundidad, que corresponden a la dinámica geológica que forman los diversos depósitos que rellenan el valle fluvial en un tiempo geológico corto, teniendo aluviales inundables y no inundables, coluviales, coluvios-torrenciales, depósitos fluviales con influencia marina mareal de la ría antigua de Portoviejo que se encuentran a profundidad, estos depósitos se sobreponen entre sí, cubriendo en muchas ocasiones grandes extensiones, añadiendo en la parte la más superficial, zonas de relleno antrópico.
- La cuenca posee un gran espesor de depósitos de suelos que se profundizan hacia el oeste, teniendo probablemente una falla al oeste de ésta, que controla el espacio de acomodación de sedimentos dando lugar a la generación de una cuenca asimétrica con borde fallado hacia el oeste.
- En las laderas de la ciudad de Portoviejo, las propiedades físicas son homogéneas teniendo suelos limosos arcillosos de alta compresibilidad, consistencia blanda hasta los 15m de profundidad y bajo el cual se encuentra el substrato rocoso fragmentado perteneciente a las formaciones geológicas circundantes.
- En el valle de la ciudad de Portoviejo hay una predominancia de suelos limo-arcillosos inorgánicos de compresibilidad media a alta. La compresibilidad y el contenido de arcillas en el subsuelo aumentan con la profundidad. Generalmente en el centro del valle los valores del límite líquido son superiores al 50% con índices de plasticidad cercanos al 30%, hacia el norte y sur presenta valores del límite líquido inferiores al 50% e índices de plasticidad menores al 20%.

- La consistencia de los suelos es blanda por ende su resistencia al corte será baja teniendo poca capacidad portante y con la probabilidad de desarrollar asentamientos significativos ante cargas muy bajas, a su vez estos suelos cohesivos son normalmente consolidados hasta una profundidad de 10m y bajo el cual varía su índice de liquidez, dando generalmente suelos pre consolidados, sin embargo estos valores pueden cambiar para suelos inalterados sobre todo en suelos de profundidades someras y donde el Índice de Liquidez es menor a cero, es decir suelos sobre consolidados así como también en suelos cementantes y en arcillas sensitivas.
- Los suelos del valle poseen una plasticidad media a alta. Existe una gran susceptibilidad a generar colapsos de la estructura del suelo al ser sometidos a corte o remoldeo en los sondeos P04 y P09, porque poseen su contenido de humedad superior al límite líquido, de la misma manera es muy alta la susceptibilidad de generar colapsos en suelos de relleno no compactos, bajo cargas incluso moderadas, sobre todo en épocas de alta pluviosidad o inundación.
- La actividad calculada para la zona de estudio posee una variabilidad de valores muy bajos y muy altos, los mismos que corresponden a illita y montmorillonita como mineralogía reinante en el contenido de arcillas. Las zonas con predominancia en montmorillonita tiene mayor propensión a hincharse, además confiere a la zona una característica de drenaje deficiente y altos contenidos de humedad en condiciones climáticas semi-áridas a húmedas.
- El potencial de expansividad es medio a bajo en la zona norte y sur de estudio y medio alto en el centro hasta una profundidad de 20m, a partir del cual incrementa hasta tener un potencial de expansividad alto, siendo poco usual un cambio de humedad, que pueda generar un cambio de volumen en el suelo a esta profundidad. La presión de hinchamiento que caracteriza a los suelos tiene valores menores a 30kPa que incrementa ligeramente en profundidad. La humedad presente en el suelo en la mayor parte de la zona de estudio se encuentra por encima del 30% y

corresponde al fin del periodo de mayor pluviosidad de la ciudad de Portoviejo, en el cual gran parte de la expansión en el suelo ya tuvo lugar en el periodo precursor y solo se esperaría un leve hinchamiento remanente o su subsecuente contracción generando daños estructurales a corto o a largo plazo.

- Los valores de gravedad específica fluctúan entre 2,64 y 2,72. El valor de relación de vacíos igual a 1,19 en promedio. El del grado de saturación tiene un valor medio de 92,28% y una porosidad que fluctúa entre 31 al 60%. Las densidades húmedas fluctúan entre 11,22 a 23,84 kN/m<sup>3</sup>, densidades secas entre 17,60 a 23,26 y densidades saturadas que varían entre 14,51 a 24,26 kN/m<sup>3</sup>.
- La caracterización de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) para los suelos de la ciudad de Portoviejo es un importante componente dinámico en el análisis sísmico, incluyendo el análisis de respuesta de sitio y el análisis de peligro. De las ecuaciones generadas se concluye que la correlación de la velocidad de la onda de corte en función de  $N_{60}$  proporciona un coeficiente de correlación ligeramente más alto que el dado por la correlación con el  $N_{SPT}$ . La correlación propuesta puede ser aplicable para todo tipo de material en esta zona específica de estudio, la cual es útil en la microzonificación sísmica de esta área, debido a que el movimiento del suelo es uno de los parámetros importantes para el estudio del suelo.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- El estudio de las propiedades físicas y sus correlaciones son evaluaciones iniciales que son útiles para una etapa de prefactibilidad y para una fase de estudio geotécnico más avanzado se requiere las debidas verificaciones de las correlaciones a través de pruebas de laboratorio. Las pruebas de los límites de consistencia realizados se basan en suelos remoldeados y las correlaciones pueden tener variaciones significativas para suelos no disturbados.
- Los estudios realizados en esta investigación son aplicables solo para esta área de estudio, posee un alto nivel de confianza donde existe mayor número de sondeos, sin embargo requiere mayor énfasis en la investigación donde existen pocos o ningún sondeo de perforación.
- Para valores de expansividad y deformabilidad es necesario verificarlos por medio de ensayos de Lambe y pruebas de consolidación (edómetro), análisis de cohesiones mediante ensayos de triaxiales estas valoraciones son necesarias para evaluar la capacidad portante de una cimentación y su respuesta frente a esfuerzos externos.
- El alcance del mapa de microzonificación geotécnica es un estudio preliminar, sujeto a investigación para seguir con las recomendaciones de la NEC.
- Para la caracterización de las velocidades de onda por tipo de material es necesario realizar ensayos geofísicos, que midan in situ las propiedades físicas de los suelos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGIES. (2017). Normas de Seguridad Estructural para la República de Guatemala. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. NSE 2.1
- Alcívar, J. (2011). Nativos del Manabí Prehispánico. Casa de la Cultura Ecuatoriana Benjamín Carrión. Manabí-Ecuador. 130p.
- ASTM-D-1586-11 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.
- ASTM D2488-09 Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)
- ASTM D422 Test Method for Particle-Size Analysis of Soils
- ASTM D4318 Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils
- ASTM D4254 – 16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density
- ASTM D7263 – 09 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens
- ASTM D2487 – 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- Baig, M.H.A., Zhang, L., Shuai, T., Tong, Q. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sens.* 423-431.
- Baldock, J.W. (1982). Geology of Ecuador: explanatory bulletin of the national geological map of the Republic of Ecuador, 1: 1,000,00 scale 1982. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Dirección General de Geología y Minas, Quito.
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2A, pp 773-786.
- Braja, M. D., Khaled, S. (2014). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning. Eighth Edition. 770p.
- Barrera, A. (2004). Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NOA en la distribución de la precipitación en España. Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Programa de doctorado de Astronomía y Meteorología (Bienio 2002-2004).
- Carrillo Gil, A. and Alcayhuaman, L. (2008). Licuación de Suelos Durante el Sismo Pisco-Perú-2007. Sixth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2008).
- Carter, M. and Bentley, S. (2016). Soil properties and their correlations. Cardiff University, UK. Second Edition. 244p.
- Castro, J.C., Balderas, M.A., Hernandez, M. (2011). Identificación de Humedad en el Suelo a través de la Teledetección para el Mejor Manejo de la Tierra: Caso Zona Florícola, Estado de México, Toluca, México.
- Chunga, K., Michetti, A., Gorshkov, A., Panza, G., Soloviev, A., Martillo, C. (2011). Aplicación del Método de Zonación Morfo-Estructural para Identificar Nudos Sismogénicos en la Región Costera y Cadenas Montañosas de los Andes Septentrionales del Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*. Vol 16, No. 1, 26p.



- Dakshanamurthy, V., Raman, V. (1973) A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and Foundations*. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering 13, 97–104
- Day, R.W. (2002). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. McGraw-Hill. 615p.
- Deniaud, Y. (2000). *Enregistrements Sedimentaire et Structural de L'Evolution Geodynamique des Andes Equatoriennes Au Cours Du Neogene: Etude Des Bassins D'Avant-Arc et Bilans de Masse*. PhD Thesis. Université Joseph Fourier-Grenoble, pp 157.
- Dearman W. R. (1991). *Engineering Geological Mapping*. Editorial Butterworth-Heinemann, Primera Edición, 387 pp.
- DINAGE. (2000). *Reconocimiento Geológico-Geotécnico de las Colinas de San José-Portoviejo*. Ministerio de Energía y Minas, Portoviejo. 31p.
- Duque, G., y Escobar, P. (2016). *Geomecánica. Curso de Mecánica de Suelos I*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ferrari, L., Tibaldi, A. (1992). Recent and Active Tectonics of the North-Eastern Ecuadorian Andes. *J. Geodynamics Vol. 15, 1/2*, pp. 39-58.
- GAD Portoviejo. (2015). *Diagnóstico por Componentes Ambiental, Socio Cultural, Económico, Institucional y Diagnóstico Integrado*. Portoviejo-Ecuador, 358p
- GeoEstudios S.A. (2013). *Estudio de Respuesta Dinámica de Sitio del Proyecto Hospital 400 camas en la Ciudad de Portoviejo*. Instituto de Contratación de Obras, Portoviejo, 39p.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, Carlos. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, 744p.
- González, O.J., Bezada, M., Del Valle Millán, Z., Carrera, J.M. (2014). Caracterización de las arenas y arcillas minerales de los depósitos de canal y planicie de inundación del río Portuguesa, Venezuela. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 85, pp. 18-32.
- Gutchster, M.A., Malavieille, J., Lallemand, S., Collot, J.Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168, 255-270.
- Hernández, M.H. (2012). *El Sistema de Fallas de Jama en la Plataforma Continental (Off-Shore) del Margen Ecuatoriano*. Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional. 143p.
- Holtz, R.D., and Kovacs, W.D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*
- IGEPN. (2016). *Observaciones del sismo del 16 de abril de 2016 de magnitud  $M_w$  7.8. Intensidades y Aceleraciones*. Informe sísmico especial N.18 – 2016.
- IGEPN. (2017). *Estudio de Microzonificación Sísmica del Cantón Portoviejo. Segunda Fase*.
- Imai T. 1977. P- and S-wave velocities of the ground in Japan. In: *Proceedings, 9th ISSMFE, Tokyo*, vol 2, pp 257–260
- Jaillard, E., Ordoñez, M., Benitez, S., Berrones, G., Jiménez, N., Montenegro, G., y Zambrano, I. (1995). Basin development in an accretionary, oceanic-floored fore-arc setting: southern coastal Ecuador during late Cretaceous-late Eocene time, in A. J. Tankard, R. Suárez S., and H.J Welsink, *Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62*,p. 615-631.
- Krebs, R. D. and Walker, E. D. 1971. *Highway Materials*. McGraw-Hill, New York.
- Komornik, A. and David, D. 1969. Prediction of swelling pressure of clays. *Journal of Soil Mechanics, ASCE* 95(1): 209–226.
- Litherland, M., Aspen, J. A., and Jemielita, R.A. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador (Vol. 11)*. British Geological Survey. Overseas Memoir 11, 147p.

- Louie, J.N. (2001). Faster, Better: Shear-Wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 2, pp. 347-364.
- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics* 404. 237-264.
- Luzieux, L. (2007). Origin and Late Cretaceous-Tertiary Evolution of the Ecuadorian Forearc. Université de Lausanne. Dipl. De Géologue. DISS. ETH NO.16983, 198p.
- Moon, C.J., Whateley, K., Evans, A.M. (2006). *Introduction to Mineral Exploration*. Blackwell Publishing. Second Edition. 499p.
- NEC. (2015). *Cargas Sísmicas – Diseño Sismo Resistente en la Norma Ecuatoriana de la Construcción*, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Quito, 1-139.
- NHBC. 2008. *Building Near Trees*. National House-Building Council, Milton Keynes. Chapter 4.2.
- Ortiz, M.P., Gaitán, J.F., Camacho, J.F. (2014). Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba, Colombia. *Revista de la Universidad Nacional de Colombia*. Vol. 81, Núm.184, 11p.
- Pedoja, K., Dumont, J.F., Lamothe, M., Ortlieb, L., Collot, J-Y., Ghaleb, B., Auclair, M., Alvarez, V., Labrousse, B. (2006). Plio-Quaternary uplift of the Manta Peninsula and La Plata Island and the subduction of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences* 22. 1-21.
- Reyes, P. (2013). *Évolution du Relief le Long des Marges Actives: Étude de la Déformation Plio-Quaternaire de la Cordillère Cotière D'Équateur*. PhD Thesis. Université de Nice Sophia Antipolis. 311p.
- Seed, H.B, Woodward, R.J., Jr and Lundgren, R. et al. (1962). "Prediction of Swelling Potential for compacted Clays". *Journal ASCE, Soils Mechanics and foundation Div. ASCE*, Vol. 88:53-87.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985). "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 12, 1426–1445.
- Segovia, M. y Alvarado, A. (2009). Breve análisis de la sismicidad y del campo de esfuerzos en el Ecuador, en *Geología y Geofísica Marina y terrestre del Ecuador*, Comisión Nacional de Derechos del Mar, Quito, pp. 131-149.
- Singer, A. (1980). The paleoclimatic interpretation of Clay minerals in sediments- a review, *Earth-Science Review*, no. 21, pp. 251-293.
- Skempton, A. W. 1953. The colloidal activity of clays. *Proceedings of 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Zurich, 57–61.
- SNI (Sistema Nacional de Información). (2012). Proyecto: "Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional. 1: 25.000" Cantón Portoviejo. *Memoria Técnica - Geomorfología*. 35p.
- SNI (Sistema Nacional de Información). (2012). Proyecto: "Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional. 1: 25.000" Cantón Portoviejo. *Memoria Técnica – Clima e Hidrología*. 24p.
- Spikings, R.A., Winkler, W., Seward, D., Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 186, 57-73.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3<sup>rd</sup> ed., Wiley, New York. 770pp.
- TGE. (2000). *Manual de Ingeniería Geológica*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España del Ministerio de Industria y Energía. 626p.

- Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T., Mora, H.P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences* 15, 157-171.
- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R., Luzieux, L., Heller, F., Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. *The Geological Society of America Memoir* 204-09.
- Verruijt, A. (2001). *Soil Mechanics*. Delft University of Technology. 340p.
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, St., Egeuz, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences* 19, 5-19.
- Yepez, H., Laurence, A., Alvarado, A., Beauval, C. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: implication in seismogenic sources definition and seismic hazard. *American Geophysical Union*.
- Yoshida, N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. Vol. 36, 370p.

## **ANEXOS**

### **Anexo 1. DATOS PLUVIOMÉTRICOS**

AÑO	ESTACION PORTOVIEJO UTM Precipitación acumulada media mensual (RR)												
	ENE	FEB	MARZ	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1981	49,80	95,60	39,00	17,90	0,56	0,50	1,03	0,20	0,10	2,30	0,20	8,40	215,59
1982	20,00	7,30	28,90	6,50	9,70	2,60	1,71	0,57	1,10	35,20	98,30	116,70	328,58
1983	139,43	125,00	205,00	254,70	271,50	338,90	231,60	23,40	46,80	1,70	0,70	25,60	1664,33
1984	1,70	202,60	106,00	31,60	0,40	2,90	2,78	2,25	0,87	0,10	8,50	115,10	474,80
1985	40,30	78,00	95,90	35,10	42,60	1,60	5,66	3,14	2,24	0,30	1,12	34,00	339,96
1986	277,60	44,20	75,70	79,60	0,60	1,15	0,70	1,61	0,52	3,50	2,24	3,80	491,22
1987	70,60	333,30	138,30	95,80	23,30	0,07	0,80	16,50	1,50	0,10	2,40	2,80	685,47
1988	29,36	96,90	30,00	44,20	23,80	0,29	1,00	0,20	12,20	2,95	0,60	5,00	246,50
1989	232,30	164,00	189,10	60,50	1,40	1,00	0,10	0,92	6,10	0,90	2,25	0,50	659,07
1990	32,20	76,30	59,30	37,80	1,20	1,70	0,40	3,00	0,49	3,35	0,10	8,80	224,64
1991	57,20	95,90	28,40	36,20	17,00	0,10	1,46	0,20	1,90	1,35	3,20	18,80	261,71
1992	106,60	139,30	300,00	234,80	145,80	9,40	0,50	1,98	0,42	0,47	0,20	8,80	948,28
1993	30,60	181,90	93,90	57,00	0,10	6,00	2,96	0,00	0,10	0,40	1,80	1,70	376,46
1994	72,60	56,80	183,20	27,50	73,60	0,70	1,21	3,35	0,40	2,50	0,40	75,00	497,26
1995	139,50	153,20	34,50	57,30	7,90	8,60	1,20	3,00	3,04	0,10	0,10	8,80	417,24
1996	46,80	91,20	197,70	62,00	0,10	2,24	0,80	1,60	1,44	0,29	0,60	0,30	405,07
1997	71,90	128,40	217,90	79,10	54,80	110,70	50,00	65,00	68,50	55,10	157,40	292,10	1350,90
1998	298,90	357,60	460,20	245,10	216,90	81,90	20,60	0,20	0,20	1,54	17,40	3,77	1704,31
1999	29,60	322,70	122,10	135,70	19,00	1,80	0,20	2,30	0,10	0,50	1,50	11,90	647,40
2000	89,70	76,30	38,80	62,10	54,20	5,40	0,10	0,20	0,50	0,77	1,80	18,30	348,17
2001	242,90	122,00	301,90	84,40	10,00	0,20	0,20	0,11	0,13	1,19	2,10	2,50	767,63
2002	60,90	233,70	230,10	132,30	18,40	0,90	2,33	0,20	0,84	1,50	0,70	31,70	713,58
2003	59,30	181,50	25,40	24,50	9,10	0,20	0,10	1,38	5,22	0,10	1,30	26,10	334,20
2004	24,10	131,60	153,40	23,30	14,60	7,30	1,65	1,81	1,70	1,40	0,69	0,40	361,96
2005	64,10	153,70	118,00	269,00	26,85	0,50	0,10	5,45	1,96	5,06	0,08	22,30	667,11
2006	60,70	157,90	161,90	16,90	0,30	1,10	0,49	1,20	2,05	1,45	2,90	5,60	412,50
2007	99,30	26,60	121,80	108,70	6,90	2,70	2,80	0,70	0,19	1,50	0,20	21,30	392,69
2008	222,90	236,40	151,70	49,10	5,50	2,20	4,60	0,50	0,60	1,40	0,80	0,20	675,90
2009	98,10	92,50	80,70	22,50	28,20	0,70	0,36	11,60	0,21	0,44	0,85	3,20	339,37
2010	115,30	126,50	185,90	79,90	78,20	3,30	3,90	0,10	0,60	2,32	3,10	149,10	748,22
2011	64,70	121,80	17,30	49,30	0,30	42,50	1,40	0,00	0,10	1,30	0,00	29,50	328,20
2012	212,10	292,60	246,70	39,30	57,50	7,30	0,00	0,00	0,00	0,00	2,30	24,20	882,00
2013	134,60	103,50	244,70	157,80	13,30	0,40	0,00	0,30	0,30	10,20	0,00	1,30	666,40
2014	58,10	85,90	47,70	28,60	50,80	10,40	0,30	0,00	1,50	0,00	0,10	7,40	290,80
2015	99,20	142,70	139,10	82,40	37,90	19,70	10,70	4,20	4,70	3,60	10,20	34,00	588,40
2016	27,90	115,90	194,90	96,10	29,50	21,60	7,30	0,20	6,60	18,80	0,00	0,00	518,80

Datos calculados de la precipitación acumulada media mensual (RR)

**ANEXO No 2**  
**PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS**



Sondeo	e	S	w%	n	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{húmedo}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
P04	1,52	93,50	53,25	60,30	10,40	15,93	16,31
P05	1,02	90,33	34,24	50,27	11,24	15,53	16,85
P09	1,16	85,78	37,18	53,50	10,61	15,72	16,44
P10	1,23	99,00	45,42	55,08	14,50	18,70	18,86
P12	1,35	98,50	49,65	57,20	14,03	17,87	18,57
P18	1,40	87,60	45,71	58,40	12,22	17,18	17,38
P19	1,19	92,93	41,47	54,05	11,89	17,24	17,27
P20	1,12	91,13	38,48	52,38	13,23	18,05	18,14
P22	1,09	95,07	38,68	52,10	10,84	16,17	16,64
P27	1,34	79,80	36,68	57,10	12,65	17,64	17,71
P28	1,15	90,76	38,93	53,52	12,74	17,58	17,68
P29	1,29	85,03	41,48	56,00	11,47	16,84	16,93
P30	1,37	87,43	44,98	57,77	11,95	17,13	17,30

Factores ambientales reinantes a una profundidad de 0 a 5m.

Sondeo	e	S	w%	n	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{húmedo}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
P02	1,11	94,98	39,39	52,20	12,52	17,39	17,64
P05	1,19	96,74	43,35	54,22	11,35	16,36	16,90
P10	1,14	98,51	41,81	53,14	12,35	17,00	17,56
P11	1,14	97,67	41,28	53,23	12,57	17,29	17,70
P12	1,25	97,74	45,36	55,20	12,81	17,24	17,82
P14	1,14	98,78	41,78	53,15	13,46	17,85	18,25
P18	1,23	86,84	39,89	55,12	13,29	17,60	18,11
P19	1,14	92,85	40,34	52,88	12,75	17,44	17,78
P20	1,03	92,30	33,98	49,30	12,76	17,41	17,78
P30	1,18	90,38	40,22	53,83	12,20	17,30	17,40

Factores ambientales reinantes a una profundidad de 10 a 20m

Sondeo	e	S	w%	n	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{húmedo}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
P09	1,32	93,93	46,62	56,87	11,27	16,51	16,86
P10	1,34	99,10	49,28	57,07	11,18	16,49	16,80
P12	1,34	98,05	48,96	57,25	11,49	16,76	16,99
P18	1,36	88,33	44,91	57,63	11,80	17,14	17,20
P19	1,26	93,72	44,06	55,54	11,57	16,99	17,07
P20	1,48	83,86	44,11	58,58	11,31	16,82	16,90
P22	1,26	90,83	42,16	55,70	11,30	16,85	16,89
P27	1,27	96,80	45,62	55,85	11,57	17,02	17,05
P28	0,55	79,06	17,41	31,28	11,78	17,16	17,18
P29	1,14	85,30	36,33	53,15	11,54	17,02	17,03
P30	1,33	82,90	41,64	57,10	11,71	17,11	17,15

Factores ambientales reinantes a una profundidad de 5 a 10m.

Sondeos	e	S	w%	n	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{húmedo}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
P02	1,31	95,50	46,77	56,63	11,36	16,66	16,91
P04	1,16	89,95	38,36	53,08	11,73	17,01	17,14
P05	1,05	92,35	36,85	51,08	12,55	17,48	17,66
P06	1,18	97,40	43,18	53,95	12,78	17,54	17,80
P09	1,30	94,00	45,85	56,50	12,65	17,43	17,72
P10	1,22	99,43	45,65	54,95	11,38	16,64	16,92
P11	1,25	96,75	45,08	55,63	11,13	16,14	16,77
P12	1,32	97,30	48,59	56,78	11,57	16,51	17,08
P14	1,21	91,50	41,68	54,27	11,64	16,44	17,13
P18	1,19	89,72	39,44	54,18	12,41	17,03	17,57
P19	1,33	98,80	48,91	57,12	13,55	17,75	18,28
P20	1,30	89,20	43,31	56,30	13,12	17,57	18,05
P22	1,21	93,45	41,68	54,48	13,64	17,74	18,35
P27	1,30	97,20	46,98	56,53	13,04	17,51	17,96
P28	0,67	80,88	21,57	36,08	12,60	17,20	17,66
P29	0,95	90,80	32,30	48,73	12,45	17,49	17,60
P30	1,30	86,62	42,31	56,32	11,99	17,15	17,35

Factores ambientales reinantes a una profundidad de 20 a 30m

**ANEXO No 3**  
**CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE**  
**LOS SUELOS**

POTENCIAL DE HINCHAMIENTO																	
Pozos	% Finos	part <0.002mm	w%	LL	LP	IP	IL	Plasticidad	Ac	Tipo de Arcillas	IS	A	B	C	D	E	SP (kPa)
P02	95,5	27	42	45	33	12	0,75	Medio	0,44	Caolinita	0,93	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P04	98	44	42	51	36	15	0,40	Medio	0,34	Caolinita	0,82	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	<30
P05	61	16	35	38	26	12	0,75	Medio	0,75	Illita	0,92	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P06	98	35	49	61	37	24	0,50	Alto	0,69	Illita	0,80	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio	<30
P09	92	29	46	50	33	17	0,76	Medio	0,59	Illita	0,92	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	<30
P10	98	52	47	80	41	39	0,15	Alto	0,75	Illita	0,59	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	<30
P11	97	31,5	46	49	36,33	12,67	0,76	Medio	0,40	Caolinita	0,94	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P12	97,5	19	42,5	51,5	34,5	17	0,47	Medio	0,89	Illita	0,83	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	<30
P14	95	24	45	52	40	12	0,42	Medio	0,50	Illita	0,87	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	<30
P17	14	5	27	35	27	8	0,00	Bajo	1,60	Montmorillonita	0,77	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio	<30
P18	99,5	25	44	59	36	23	0,35	Alto	0,92	Illita	0,75	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio	<30
P19	87	37	44	66	38	28	0,21	Alto	0,76	Illita	0,67	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio	<30
P20	89	23	39	60	30	30	0,30	Alto	1,30	Montmorillonita	0,65	Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	<30
P22	98	34	42	63	37	26	0,19	Alto	0,76	Illita	0,67	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio	<30
P30	100	37	49	71	43	28	0,21	Alto	0,76	Illita	0,69	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Medio	<30

POTENCIAL DE HINCHAMIENTO																	
Pozo	% Finos	part <0.002mm	w%	LL	LP	PI	LI	Plasticidad	Ac	Tipo de Arcillas	IS	A	B	C	D	E	SP (kPa)
P02	86,7	9	33	45	32	13	0,08	Medio	1,44	Montmorillonita	0,73	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio	<30
P05	32,5	8	27	0	0	0		No plástico	0,00	Caolinita		Bajo	Bajo	Bajo	Sin Hinchamiento	Medio	<30
P06	63	21	38	60	41	19	0,16	Medio	0,90	Illita	0,63	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	<30
P09	65	15	36	42	30	12	0,50	Medio	0,80	Illita	0,86	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P10	98	38	45	79	42	37	0,08	Alto	0,97	Illita	0,57	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	<30
P11	73,25	26,25	36,25	78,5	47,5	31	0,36	Alto	1,18	Illita	0,46	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	30-125
P12	85,2	14,6	37,8	40,4	30,8	9,6	0,73	Bajo	0,66	Illita	0,94	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P14	97	23	41,25	54,33	37,66	16,67	0,22	Medio	0,72	Illita	0,76	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	<30
P17	49	13	31	36	24	12	0,58	Medio	0,92	Illita	0,86	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P18	97,7	57	40	91	38	53	0,04	Muy Alto	0,93	Illita	0,44	Muy Alto	Alto	Alto	Extra Alto	Muy Alto	30-125
P19	83,5	17,5	40	45	31,75	13,25	0,62	Medio	0,76	Illita	0,89	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P20	97	53	46	68	38	30	0,27	Alto	0,57	Illita	0,68	Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	<30
P22	99	50	40	75	39	36	0,03	Alto	0,72	Illita	0,53	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	<30
P30	89	16	43	63	41	22	0,09	Alto	1,38	Montmorillonita	0,68	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto	<30

POTENCIAL DE HINCHAMIENTO																	
Pozo	% Finos	$\frac{\text{part}}{<0,002\text{mm}}$	w%	LL	LP	IP	IL	Plasticidad	Ac	Tipo de Arcillas	IS	A	B	C	D	E	SP (kPa)
P02	37	6	24	0	0	0		No plástico	0,00	Caolinita		Bajo	Bajo	Bajo	Sin Hinchamiento	Bajo	<30
P04	80	15	35	44	29	15	0,40	Medio	1,00	Illita	0,80	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	<30
P05	100	53	50	83	49	34	0,03	Alto	0,64	Illita	0,60	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	<30
P06	78	23	36	39	12	27	0,89	Alto	1,17	Illita	0,92	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	<30
P10	96,7	57	46	63	37	26	0,35	Alto	0,46	Caolinita	0,73	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio	<30
P11	94,667	29	41	78	43,333	34,667	- 0,07	Alto	1,20	Illita	0,53	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	<30
P12	21	10	30	0	0	0		No plástico	0,00	Caolinita		Bajo	Bajo	Bajo	Sin Hinchamiento	Bajo	<30
P14	82,6667	38	39,33	73	37,333	35,667	0,06	Alto	0,94	Illita	0,54	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	<30
P17	41	7	26	57	34	23	- 0,35	Alto	3,29	Montmorillonita	0,46	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto	30-125
P18	72,5	26	28	75	28	47	0,00	Muy Alto	1,81	Montmorillonita	0,37	Muy Alto	Alto	Alto	Muy Alto	Alto	125-130
P19	88,667	24,667	39	46,667	28	18,667	0,59	Medio	0,76	Illita	0,84	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Medio	<30
P20	97	53	35	70	30	40	0,13	Muy Alto	0,75	Illita	0,50	Alto	Medio	Medio	Muy Alto	Alto	<30
P30	95	23	42	55	40	15	0,13	Medio	0,65	Illita	0,76	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	<30

#### Simbología

IL Índice de Liquidez

Plasticity Basado en el IP (Burmister *et al.*, 1949)

Ac Actividad Basado en el IP (Skempton *et al.*, 1953)

IS Índice de Presión

A Basado en el IP (Seed, 1962)

B Basado en el IP (Krebs & Walker, 1971)

C Basado en el IP (NHBC, 2008)

D Basado en LL (Dakshinamurthy & Raman, 1973)

E Basado en Ac (Seed, 1962)

SP Presión de Hinchamiento (Komornik & David, 1969)

#### Tablas:

a) Profundidad 0-10m

b) Profundidad 10-20m

c) Profundidad 20-30m

**ANEXO No 4**  
**RELACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE ONDA DE**  
**CORTA Y N-SPT CON EL TIPO DE MATERIAL DEL**  
**SUELO**

	SONDEO	SUELO	Vs (m/s)	N	N <sub>60</sub>	N <sub>1(60)</sub>
PRIMER ESTRATO (0-5m)	2	MH	127	2,3	2,7	3,0
	4	MH	102	5,5	6,4	7,0
	5	MH	138	2,7	3,2	3,5
		ML	138	2,4	2,8	3,1
	6	MH	158	3,6	4,2	4,6
	9	ML	143	5,9	6,9	7,6
	10	MH	154	8,4	9,8	9,8
	11	ML	158	4,3	5,0	5,5
	12	ML	127	2,9	3,3	3,6
	14	MH	182	9,0	10,5	11,6
	18	ML-CH	125	7,6	8,9	9,8
	19	MH	135	7,0	8,2	9,0
		ML	135	4,0	4,7	5,2
	20	ML-CL	217	11,1	12,9	14,2
	22	CL	158	7,2	8,4	9,2
MH		158	5,6	6,5	7,2	
27	MH	157	8,1	9,4	10,3	
30	MH	140	5,0	5,8	6,4	
SEGUNDO ESTRATO (5-10m)	2	ML	127	1,3	1,5	1,2
		MH	127	1,2	1,4	1,1
	4	ML	168	0,8	0,9	0,7
		MH	168	5,4	6,3	5,0
	5	SM	182	4,3	5,0	4,0
	6	MH	158	3,8	4,4	3,5
	9	MH	168	2,2	2,6	2,1
		ML	168	2,6	3,1	2,5
	10	MH	145	10,5	12,2	9,8
	11	MH	175	1,2	1,4	1,1
		ML	175	2,1	2,5	2,0
	12	ML	132	2,7	3,2	2,6
		MH	132	4,3	5,0	4,0
	14	SM	127	7,6	8,9	7,1
		MH	127	7,1	8,3	5,8
	17	ML	152	8,4	9,8	7,8
	18	MH	165	3,0	3,5	2,8
		ML	165	4,7	5,5	4,4
	19	ML	167	9,2	10,8	8,6
	20	SM	138	8,4	9,8	7,8
22	MH	175	8,7	10,2	8,2	
27	MH	214	5,3	6,1	4,9	
30	MH	140	5,0	5,8	4,6	

	POZO	SUELO	VS	N	N60	N1(60)
TERCER ESTRATO (10-20m)	2	MH	215	3,6	4,2	2,5
		ML	215	9,5	11,1	6,7
	4	MH	189	5,4	6,3	3,8
		ML	189	8,6	10,0	6,0
	5	SM-MH	234	11,9	13,8	8,3
	6	MH	267	4,9	5,7	3,4
		SM	267	11,9	13,9	8,3
	9	ML	198	8,9	10,3	6,2
		SM-MH	198	22,9	26,8	16,1
	10	MH	196	8,2	9,6	5,8
	11	MH	221	12,5	14,6	8,8
	12	ML	179	10,3	12,0	7,2
	14	MH	164	10,4	12,2	7,3
	17	ML	270	11,0	12,9	7,7
		SM	270	23,3	27,2	16,3
	18	MH	192	13,4	15,6	9,4
	19	ML	222	11,2	13,1	7,9
	20	CH	157	7,8	9,1	5,5
		MH	157	14,3	16,6	10,0
	22	MH	238	18,4	21,5	12,9
27	MH	280	4,3	5,1	3,1	
30	MH-ML	241	9,8	11,5	6,9	
CUARTO ESTRATO (20 A 30m)	2	ML	266	16,7	19,5	9,8
	4	ML	287	9,7	11,4	5,7
	5	SM-MH	318	9,8	11,4	5,7
	6	MH	391	15,6	18,2	9,1
	9	SM-MH	297	5,1	6,0	3,0
	10	MH	273	16,5	19,3	9,7
	11	MH	300	23,3	27,2	13,6
	12	MH-SM	287	17,6	20,6	10,3
	14	MH-SM	273	13,0	15,2	7,6
	17	SM-MH	417	21,0	24,5	12,3
	18	MH	342	17,1	20,0	10,0
	19	ML-SM	275	14,3	16,7	8,4
	20	CH-ML	249	22,6	26,4	13,2
	30	ML	371	25,3	29,5	14,8



**ANEXO No 5**  
**COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS-GEOTÉCNICAS DE**  
**LOS SONDEOS DE PERFORACIÓN DE LA CIUDAD DE**  
**PORTOVIEJO**

