

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO BOLÍVAR  
ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL DE LOS ACUÍFEROS SUBYACENTES AL CAMPUS UNIVERSITARIO DE LA ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA EN LA PARROQUIA LA SABANITA, CIUDAD BOLÍVAR, MUNICIPIO ANGOSTURA DEL ORINOCO, ESTADO BOLÍVAR, VENEZUELA**

**TRABAJO DE GRADO  
PRESENTADO POR LAS  
BACHILLERES CALLES H.,  
DIANA Y. Y WILLIAMS C.,  
JUANA M. PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO  
GEÓLOGO.**

**CIUDAD BOLÍVAR, JULIO DE 2023**



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO BOLÍVAR  
ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**HOJA DE APROBACIÓN**

Este trabajo de grado, intitulado “**PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL DE LOS ACUÍFEROS SUBYACENTES AL CAMPUS UNIVERSITARIO DE LA ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA EN LA PARROQUIA LA SABANITA, CIUDAD BOLÍVAR, MUNICIPIO ANGOSTURA DEL ORINOCO, ESTADO BOLÍVAR, VENEZUELA**” presentado por las bachilleres **DIANA YUDDIELY CALLES HERNANDEZ** de cédula de identidad No **26.563.521** y **JUANA MERCEDES WILLIAMS CORDOVA** de cédula de identidad No. **20.079.614** ha sido aprobado de acuerdo a los reglamentos de la Universidad de Oriente, por el jurado integrado por los profesores:

**Nombre y apellido:**

**Firma:**

Prof. Dafnis J. Echeverría D.

(Asesor)

Prof. Juan C.España R.

(Jurado)

Prof(a) Karla A. Padilla F.

(Jurado)

**Prof Francisco Monteverde**

Jefe del Departamento de Ingeniería Geológica

**Prof Francisco Monteverde**

Director de Escuela de Ciencias de la Tierra

**Ciudad Bolívar Julio de 2023**

## **DEDICATORIA**

*Diana Yuddiely Calles Hernandez*

A Dios por abrirme las puertas hacia ésta oportunidad, que me ha permitido llevar a cabo uno de mis deseos como lo es cursar la carrera de Ing. Geológica en la Universidad de Oriente Núcleo Bolívar, por iluminarme los caminos durante la carrera y mantenerme en ello sin desviarme de los objetivos a cumplir, así como también por esa sabiduría, concentración y entendimiento que me obsequio en esta vida para así adquirir toda la información y consejos relacionados a nuestra carrera y con nuestras vidas, emitida por todos los profesionales en la materia Geólogos, Ing. Geólogos, Ing. Minas, entre otros, pertenecientes a la Universidad de Oriente Núcleo Bolívar, para convertirnos en verdaderas profesionales específicamente en Ing. Geólogo

A mis padres por confiar en mis capacidades y apostar por ese " Sé que lo lograras hija", por sus buenos ánimos en esos momentos difíciles, ya que cursar esta carrera es como la vida, un día te levantas y todo va bien pero hay días en los que te levantas y las cosas no marchan tan bien como lo esperabas.

Ésta dedicatoria también va para mí, por el permanecer de pie ante esas luchas constantes contra las adversidades que muchas veces parecían no acabar, por esa satisfacción que resultaba al oír y observar aprobaste o lo hiciste muy bien, luego de una larga preparación durante horas.

## **DEDICATORIA**

*Juana Mercedes Williams Cordova*

El resultado de este trabajo es dedicado a Dios, por iluminar mi camino durante este proceso, también por colocar las herramientas y personas, quienes me ayudarían hacer esto posible, de mismo modo por permitirme llegar a este momento de mi formación profesional

A mis padres Cordova y Juan Williams, hermanos, a mi hija Ana Lucia Valor Williams que la amo con todo mi corazón, quienes con mucho esfuerzo me brindaron su apoyo y me dio ánimos para continuar en los momentos difíciles situación que sirvió para mantenerme de pie y no dudar de mis conocimientos durante la elaboración de este proyecto y sobre todo por acompañarme durante el proyecto estudiantil de mi vida y culminación de mi carrera.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Diana Yuddiely Calles Hernandez*

*Juana Mercedes Williams Cordova*

Agradecemos a Dios

Por esa fortaleza y paciencia concebida que pude mantener durante el desarrollo y preparación académica, por ser ese rayito de luz que me hacía sonreír y armarme de valor cuando las cosas durante la preparación académica iba tanto bien como no tan bien, por esa fe ante él fue la causa que muchas veces me motivó a continuar en este proyecto que hoy escribo.

A nuestros padres por estar al tanto de todo este proceso de preparación académica y profesional, por sus motivaciones al inicio de esta carrera, porque ellos fueron los que muchas veces sugirieron que debíamos convertirnos en esa persona profesional que teníamos como visión ser. Nuestros padres también fueron parte nuestra inspiración a ellos hoy agradecemos, ya que durante todo esta trayectoria académica uno de sus deseos es vernos hacer de este proyecto una realidad y nuestro objetivo fue hacer de ello una realidad, ellos también han trabajado y se han esforzado en facilitarnos las herramientas necesarias para llevar a cabo este proyecto, así como su tiempo y ayuda, a ellos hoy agradecemos.

## RESUMEN

Este estudio consiste en proponer la prospección de las aguas subterráneas y estimar la recarga potencial de los acuíferos subyacentes al campus universitario de la Escuela Ciencias de la Tierra en la parroquia La Sabanita en Ciudad Bolívar, municipio Angostura del Orinoco del estado Bolívar. El objetivo primordial radica en determinar las características geohidrológicas de los acuíferos subyacentes al campus universitario y determinar la recarga potencial de los mismos, aplicando el método del balance hídrico de los suelos, que permitirá el aprovechamiento de aguas subterráneas en el proyecto de reconstrucción de las infraestructuras del Campus Universitario. El área de estudio está constituida por sedimentos del Reciente, generalmente arenas gruesas a finas con presencia eventual de arcillas y limos. Hidrogeológicamente, la zona en estudio forma parte de la Formación Mesa, los cuales se caracterizan por la presencia de acuíferos libres con buen rendimiento y buena calidad de agua. La metodología consistió en la búsqueda, revisión y selección de información de la zona de estudio, principalmente de datos aportados por estudios previos en el lugar y por el cálculo de parámetros necesarios tales como la determinación de la infiltración promedio, escorrentía, humedales y evapotranspiración generada por la vegetación, en el análisis del mapa de cuencas hidrográficas y determinación de parámetros morfométricos, así como el análisis del sondeo eléctrico vertical,. De acuerdo a la interpretación de los sondeos eléctricos verticales, se muestra que existe un volumen apreciable de estratos de arena permeable que representan posibilidades de localización de agua subterránea. Una vez determinados los parámetros necesarios se procedió a calcular la recarga potencial al acuífero por infiltración de la precipitación, el cual corresponde a 83 mm en este lote de terreno, la cual equivale a 107900 m<sup>3</sup> anuales en el área total de estudio correspondiente Campus Universitario de la Escuela Ciencias de la Tierra.

# CONTENIDO

	Página
<b>HOJA DE APROBACIÓN</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	v
<b>RESUMEN</b> .....	vi
<b>CONTENIDO</b> .....	vii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE APÉNDICES</b> .....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	4
<b>SITUACIÓN A INVESTIGAR</b> .....	4
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Objetivos de la investigación.....	8
1.2.1 Objetivo general.....	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
1.3 Justificación de la investigación.....	9
1.4 Alcances de la investigación.....	11
1.5 Limitaciones de la investigación.....	12
<b>CAPÍTULO II</b> .....	13
<b>GENERALIDADES</b> .....	13
2.1. Descripción del área de estudio.....	13
2.1.1 Ubicación y acceso al área de estudio.....	13
2.2 Razón social de la Escuela de Ciencias de la Tierra.....	15
2.3 Visión de la organización.....	16
2.4 Valores de la organización.....	16
2.5 Objetivos de la organización.....	17
2.6 Reseña histórica de la organización.....	17
2.7 Estructura organizativa de la Escuela de Ciencias de la Tierra.....	18
2.8 Geología.....	19
2.9 Geomorfología local.....	19
2.9.1 Mesas inclinadas.....	19
2.9.2 Mesa moderadamente conservada.....	19

2.9.3 Mesas fuertemente disectadas .....	20
2.9.4 Colinas y lomas .....	20
2.10 Suelos.....	20
2.10.1 Suelos de las mesas inclinadas y moderadamente conservadas.....	20
2.10.2 Suelos de la mesa fuertemente disectada .....	21
2.10.3 Suelos presentes en las colinas y lomas .....	21
2.11 Vegetación del área de estudio y sus alrededores.....	21
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>24</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
3.1. Antecedentes.....	24
3.2. Bases teóricas.....	25
3.2.1 Acuíferos .....	25
3.2.2 Estructura de un acuífero .....	25
3.2.3. Tipos de acuíferos .....	26
3.2.4 Balance hídrico.....	31
3.2.5 Balance de suelos .....	31
3.2.6 Infiltración.....	31
3.2.7 Coeficiente de infiltración.....	32
3.2.8 Precipitación.....	32
3.2.9 Condensación .....	33
3.2.10 Evaporación.....	34
3.2.11 Transpiración.....	34
3.2.12 Evapotranspiración.....	34
3.2.13 Fracción de lluvia interceptada por el follaje .....	36
3.2.14 Escorrentía.....	36
3.2.15 Escorrentía superficial.....	36
3.2.16 Escorrentía directa.....	37
3.2.17 Escorrentía subterránea .....	37
3.2.18 Escurrimiento .....	37
3.2.19 Tiempo de concentración .....	37
3.2.20 Tipos de aguas.....	38
3.2.21 Humedad del suelo.....	41
3.2.22 Humedad equivalente.....	42
3.2.23 Capacidad de campo .....	42
3.2.24 Punto de marchitez permanente .....	43
3.2.25 Nivel freático.....	43
3.2.26 Polígonos de Thiessen.....	44
3.2.27 Aguas subterráneas.....	45
3.2.28 Movimiento del agua Subterránea .....	47
3.2.29 Modificaciones del sistema de agua subterránea y sus efectos.....	48
3.2.30 Caracterización de sistemas de agua subterránea.....	48

3.2.31 ¿Cómo fluye el agua subterránea? .....	49
3.2.32 Calidad de las Aguas Subterráneas .....	50
3.2.33 Relación entre agua subterránea y agua superficial .....	51
3.2.34 Recarga al acuífero.....	52
3.2.35 Contaminación de los acuíferos .....	53
3.2.36 Cálculo de recarga potencial al acuífero .....	54
3.2.37 Tasa promedio de recarga de un acuífero .....	55
3.2.38 Importancia de estimar la reposición de un acuífero .....	57
3.2.39 Caracterización geológica de los yacimientos .....	57
3.2.40 Correlación.....	59
3.2.41 Terminología general en las medidas de los registros .....	60
3.2.42 Mapas geológicos.....	61
3.2.43 Cuenca hidrográfica .....	63
3.2.44 Sondeos eléctricos verticales.....	69
3.2.45 Sondaje eléctrico vertical .....	71
3.2.46 Configuración Schlumberger .....	73
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>74</b>
<b>METODOLOGÍA DEL TRABAJO .....</b>	<b>74</b>
4.1 Tipos de investigación .....	74
4.2 Diseño de la investigación .....	74
4.3 Población de la investigación .....	75
4.4 Muestra de la investigación .....	75
4.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	75
4.5.1 Observación directa.....	76
4.5.2 Revisión Bibliográfica .....	76
4.5.3 Instrumentos utilizados .....	76
4.6 Flujograma de la investigación.....	77
4.6.1 Búsqueda y revisión de información.....	78
4.6.2 Delimitación del área de estudio.....	79
4.6.3 Determinación de parámetros .....	79
4.6.4 Caracterización del mapa de cuencas hidrográficas.....	97
4.6.5 Ubicación de pozos con SEV.....	98
4.6.6 Elaboración y correlación de columnas lito-estratigráficas y de SEV .....	99
4.6.7 Elaboración de mapas .....	99
4.7 Cálculo de recarga potencial al acuífero.....	100
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>101</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
5.1 Caracterización pluviométrica de la zona de estudio .....	101
5.1.1 Precipitación.....	101

5.2 Distribución superficial de los tipos de vegetación presentes en el área de estudio.....	103
5.3 Características de la infiltración en el área de estudio.....	105
5.4 Relación entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas del área ..	110
5.4.1 Sub-cuenca del río San Rafael .....	111
5.4.2 Sub-cuenca del río Buena Vista .....	113
5.5 Construcción y análisis del mapa de isolíneas piezométricas .....	115
5.5.1 Patrones preferenciales de flujo de agua subterránea en el área de estudio.....	118
5.6 Análisis del resultado del sondeo eléctrico vertical.....	119
5.7. Construcción del modelo geo-resistivo de la columna estratigráfica del acuífero .....	122
5.8 Estimación de la recarga potencial al acuífero .....	123
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>128</b>
Conclusiones.....	128
Recomendaciones .....	130
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>131</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>136</b>

## LISTA DE FIGURAS

		Página
2.1	Ubicación relativa nacional del área de estudio.....	14
2.2	Imagen de satélite mostrando el área de estudio (modificado de Google Earth, 2023).....	14
2.3	Plano de un sector de la parroquia La Sabanita incluyendo el área de estudio.....	15
2.4	Estructura organizativa de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente.....	18
3.1	Tipos de acuíferos y niveles piezométricos. (Custodio y Llamas, 1996).....	30
3.2	Aguas termales de Moisés Venezuela. (CORPOVEN, 1991).....	41
3.3	Fuentes Puntuales y Difusas de Contaminación de las Aguas Subterráneas (Echarri, L., 1988).....	54
3.4	Diagrama que muestra la terminología general de medidas de registros. (PDVSA-CIED, 1997).....	61
3.5	A medida que A y B se separan va penetrando en las capas más profundas (Orellana, 1982).....	72
3.6	Configuración Schlumberger (Auge, 2008).....	73
4.1	Flujograma de la investigación.....	78
5.1	Distribución anual de la precipitación (mm). Estación Ciudad Bolívar-Aeropuerto. Período 1987 - 2007 (INAMEH, 2015).....	103
5.2	Detalle de área de captación.....	104
5.3	Ubicación de ensayos de infiltración.....	106
5.4	Gráficas de lámina infiltrada y velocidad de infiltración de los ensayos I-1 e I-2.....	107
5.5	Gráficas de lámina infiltrada y velocidad de infiltración de los ensayos I-3 e I-4.....	108
5.6	Ríos San Rafael (línea azul al este) y Buena Vista (línea azul al oeste) y línea divisoria de cuencas en color marrón. Nótese que el área de estudio se encuentra ubicada en la vertiente este (Modificado de imagen de satélite Landsat de Google Earth, 2023).....	111
5.7	Parámetros morfométricos de la Cuenca del río San Rafael.....	113
5.8	Perfil transversal entre las cuencas hidrográficas adyacentes.....	114
5.9	Ubicación relativa del Campus Universitario UDO (polígono línea azul) en La Sabanita y su relación con las cuencas de los ríos San Rafael y Buena Vista.....	115
5.10	Ubicación relativa de los pozos inventariados (Modificado de imagen de satélite Landsat de Google Earth, 2023).....	116

5.11	Plano piezométrico del área de estudio.....	117
5.12	Mapa de patrones flujo de agua subterráneo (flechas segmentadas azules).....	118
5.13	Equipo para realizar el Sondeo Eléctrico Vertical.....	119
5.14	Proceso de hincado de electrodos.....	120
5.15	Curvas de resistividades de campo y teóricas.....	121
5.16	Posible zona generadora de recarga del acuífero adyacente hacia el sur del área de estudio.....	126

## LISTA DE TABLAS

	Página	
2.1	Coordenadas UTM del área de estudio.....	13
3.1	Componentes del coeficiente de infiltración (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).....	32
3.2	Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Grassi, 1976), en (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).....	36
3.3	Clasificación cualitativa de la porosidad. (Schlumberger, 1999).....	47
4.1	Componentes del coeficiente de infiltración (Schosinsky y Losilla, 2000).....	85
4.2	Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelo (Schosinsky y Losilla, 2000).....	87
4.3	Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Grassi, 1976).....	89
5.1	Precipitación media mensual en (mm). Estación Ciudad Bolívar-Aeropuerto. Edo. Bolívar. Período 1.987 - 2.007. (INAMEH, 2015)	102
5.2	Distribución de áreas del campus universitario según uso de la tierra	103
5.3	Distribución superficial de los tipos de vegetación.....	104
5.4	Resumen de resultados de pruebas de infiltración.....	106
5.5	Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal.....	109
5.6	Parámetros morfométricos de la cuenca del río San Rafael.....	112
5.7	Inventario de pozos de agua existentes en el entorno del área de estudio.....	116
5.8	Registros de resistividad en campo.....	120
5.9	Resultados del Sondeo Eléctrico Vertical.....	121
5.10	Resistividades típicas para varios tipos de materiales térreos (Universidad Nacional, 2000).....	122
5.11	Modelo geo-resistivo de la columna estratigráfica.....	123
5.12	Cálculo de la recarga potencial del acuífero.....	124
5.13	Cálculo de la recarga potencial del acuífero (Continuación).....	125

## LISTA DE APÉNDICES

Página

<b>A</b>	<b>ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	137
	A.1 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-1.....	138
	A.2 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-2.....	139
	A.3 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-3.....	140
	A.4 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-4.....	141
<b>B</b>	<b>FOTOGRAFÍAS DE LOS POZOS INVENTARIADOS.....</b>	142
	B.1 Pozo 3 de Jonny Sarti en Av Sucre, La Sabanita.....	143
	B.2 Pozo 4 de Ovidio Jhonson en Av. Sucre La Sabanita.....	143
	B.3 Pozo 6 Casa #57, Calle San Simón, La Sabanita.....	144
	B.4 Pozo 7, casa # 59, Calle San Simón, La Sabanita.....	144

## INTRODUCCIÓN

Venezuela es un país con una densa red hidrográfica que ha facilitado en gran medida el desarrollo de la mayoría de los centros urbanos existentes; sin embargo, existen extensas áreas hacia la franja central y sur de la nación que no han sido pobladas por diversas razones geográficas, políticas, sociales y culturales, entre otras. Una de estas causas la constituye la ausencia de recursos hídricos superficiales suficientes, permanentes y de calidad, lo cual ha hecho que se estudien y posteriormente se exploten con mucho éxito los acuíferos existentes. Tal es el caso de muchas poblaciones del oriente del país que son abastecidas en su totalidad por agua de origen subterráneo.

El crecimiento poblacional y la necesidad del desarrollo de las actividades de producción de alimentos ha incentivado a los habitantes de la zona a la búsqueda de alternativas sustentables que coadyuven a la independencia alimentaria de la región. Es así como surge la necesidad de efectuar los estudios tendentes a obtener las características hidrogeológicas e hidráulicas de los acuíferos de la zona, ya que al no estar disponible el agua en cantidad y calidad suficiente durante todo el año en el área de asentamiento de las futuras fincas (que se ubicarán al sur del estado Monagas) se requiere de los estudios que permitan corroborar la factibilidad técnica de la captación de agua subterránea en el área de estudio.

En ese orden de ideas, se plantea en este documento una investigación que tendrá como objetivo principal la estimación de las características hidrogeológicas y la recarga potencial de los acuíferos subyacentes al campus universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra ubicado en la parroquia La Sabanita de Ciudad Bolívar, municipio Angostura del Orinoco, estado Bolívar, Venezuela.

La investigación se plantea como de nivel descriptivo siguiendo una estrategia de investigación de tipo documental y de campo. Para ello se caracterizará en forma holística el área de estudio abarcando los aspectos climáticos, geomorfológicos, hidrográficos, geohidrológicos y demográficos. Se realizarán en campo observaciones de los suelos, pruebas de infiltración, mediciones topográficas, determinación de las necesidades de agua que se tienen en el campus universitario, entre otras observaciones de campo. Asimismo, con base a un balance hídrico de suelos se determinará la recarga potencial de los acuíferos de la zona de estudio

El presente documento se encuentra estructurado en capítulos, tal como se describe a continuación:

En el primer capítulo, denominado Situación a investigar, se enuncian los objetivos, justificación, alcance y limitaciones de la investigación.

En el segundo capítulo. Generalidades, se presentan los pormenores físicos, bióticos y demográficos del área de estudio. También se expresan las características organizativas fundamentales de la Universidad de Oriente, en el área de estudio, como institución que recibirá los beneficios de la presente investigación.

El tercer capítulo o Marco Teórico, integra los antecedentes de la investigación, las bases teóricas las bases legales y la definición de los términos básicos

. Posteriormente, se expone en el capítulo IV, llamado Metodología de Trabajo, donde se presenta la metodología de la investigación donde se incluye, entre otras cosas, el nivel y diseño de la investigación, las características y tamaño de la población y de la muestra, las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos en la investigación, se presenta el flujograma la investigación y el procedimiento para el logro de los objetivos específicos formulados.

Casi para finalizar, se presenta el capítulo V, Análisis e interpretación de los resultados, en el cual se presentan los resultados graficados y tabulados correspondientes a las actividades vinculadas a los objetivos específicos formulados y la interpretación de dichos resultados.

Finalmente, se presentan las Conclusiones y recomendaciones como hallazgos relevantes de la investigación. También se muestra la bibliografía utilizada y los apéndices necesarios.

# CAPÍTULO I

## SITUACIÓN A INVESTIGAR

### 1.1 Planteamiento del problema

Extraer agua desde pozos es una práctica milenaria en casi todas las partes de mundo. Sin embargo, para evitar el agotamiento de los acuíferos y su contaminación es necesario adoptar medidas claves, como el establecimiento de un perímetro de protección alrededor de los pozos.

En Suramérica, el área metropolitana de Ciudad Guatemala y las municipalidades de la comunidad de la Gran ciudad del Sur son un caso paradigmático de la importancia de las aguas subterráneas, se estima que más del 65% del agua consumida por la población y la industria de la zona provienen del acuífero que se encuentra bajo un valle de ciudad de Guatemala. Son unos seis (6) millones de personas las que dependen del acuífero y, según las previsiones, la cifra se encuentra en crecimiento. Esto implica que las perforaciones para acceder el agua son cada vez más profundas (Olmedo, 2022).

En el año 2020, el Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento puso en marcha un programa con el objetivo de estudiar las bases técnicas para el futuro establecimiento de una estrategia de seguridad hídrica en la zona. A través de él se pretende ampliar el conocimiento sobre el estado del acuífero – tanto de los niveles de agua como los de contaminación, - identificar posibles fuentes alternativas de agua, - analizar las necesidades reales de la población y aumentar la sensibilización en torno al uso y protección del recurso.

Técnicas de prospección geofísica para encontrar el agua:

Por otra parte, en cuanto a técnicas de prospección geofísica para prospectar agua en Esquíputas – Palo Gordo (Guatemala), se llevó a cabo una campaña de prospección geofísica, para localizar el lugar donde perforar el pozo y así garantizar el acceso al agua a los pobladores. Esto se realiza induciendo electricidad en el suelo y midiendo la resistencia del terreno a su transmisión para determinar el sitio que ofrece mayor probabilidad de encontrar agua.

América Latina y del Caribe es una región rica en recursos de agua superficiales; no obstante, esa agua no está homogéneamente distribuida y hay muchas zonas que dependen de las aguas subterráneas. Las aguas subterráneas proveen entre el 40% y el 60% de la demanda hídrica en la región, lo que incluye el uso agrícola y el urbano. De hecho, en capitales como Ciudad de México, Puerto príncipe o Ciudad Guatemala, constituyen ahora la principal fuente de suministro. (Olmedo & González, 2022).

En ese sentido, uno de los estudios se centra en el acuífero Patiño (Paraguay), que es la principal fuente para el servicio de agua potable y el uso agrícola e industrial en el área Metropolitana de Asunción. Éstos análisis comprenden el diagnóstico, un modelo matemático e hidrológico, un plan de monitoreo y medidas para las zonas donde debería ejercerse mayor control a fin de prevenir la contaminación o agotamiento del acuífero.

Otro proyecto a destacar es el desarrollo de la plataforma de monitoreo de las aguas subterráneas para América Latina. Basada en los principios del monitoreo participativo, se obtiene la información de dos fuentes: a partir de imágenes satelitales y de información ya existente. Es una plataforma abierta donde los profesionales pueden también subir información y así contribuir al desarrollo de las líneas de base actualizadas de los principales acuíferos de América Latina. PASAL pone foco especial

en los acuíferos transfronterizos. La plataforma permite hacer análisis sobre los aspectos esenciales para una gestión regional: dimensiones reales, características geológicas, reservas de agua y tasas de explotación. (Olmedo, M & González. 2022).

Olmedo & González. (2022) afirma que Uruguay tiene una de las mayores coberturas de agua potable de la región, pero los suministros de agua en las zonas rurales continúa siendo un reto. Teniendo en cuenta esta situación, a través del programa de agua potable y saneamiento rural del fondo, se dió acceso a agua y saneamiento de 325 comunidades rurales en los 18 departamentos del país.

Gracias a la instalación de los pozos, miles de estudiantes de comunidades rurales dispersas acceden a educación en escuelas con condiciones higiénicas adecuadas

En Venezuela, el estudio de las aguas subterráneas se basa en métodos de prospección y utiliza medios de exploración. El estudio regional de la valoración de los recursos hídricos en cualquier estudio hidrológico, reposa en la ejecución de inventario especializado que acompaña a la prospección geológica.

La obtención de los inventarios recursos hídricos se basa en tres (3) principios generales, esto es el caso de Venezuela:

1. Búsqueda y clasificación metódica del conjunto de datos hidrológicos de base concerniente a las aguas superficiales y subterráneas que presente a zona de estudio.
2. Prospección y estudio sistemático de todos los puntos de agua, estaciones de medida, obra de captación entre otros; que afecten el área de interés.
3. Precisión máxima de la totalidad de los datos de base reunidos.

Posterior a ello, es práctica general en Venezuela, realizar el análisis previo de la zona: lo cual consiste en analizar la información existente sobre condiciones geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas del área de interés para lograr una mejor caracterización de las capas permeables y de posibles acuíferos.

En nuestro país la prospección geofísica a través de sondeos eléctricos verticales (SEV) los cuales son ampliamente utilizados y se constituyen en un estudio geohidrológico detallado sobre el terreno, cuya utilización es eficaz y rápida. Acompañadas y seguidas de estudios geológicos y sondeos mecánicos. Este estudio permite determinar la naturaleza, morfología y profundidad del estrato así como la litología de las capas acuíferas.

Una vez avanzado el proyecto hasta esta etapa, será el momento para definir la posibilidad o no de una perforación, ya que dependiendo de los resultados obtenidos en la geofísica eléctrica, permitirá el avance en la siguiente etapa del Proyecto:

Para la prospección de aguas subterráneas en el campo Universitario Escuela Ciencias De La Tierra se utilizará un método geofísico para la búsqueda del agua subterránea y la estimación de la recarga potencial de los acuíferos subyacentes al campus universitario de la Escuela Ciencias de la Tierra en la parroquia La Sabanita, Ciudad Bolívar, municipio Angostura del Orinoco, estado Bolívar, Venezuela, el cual comienza con la recopilación de la información tanto geológica, geofísica e hidrológica del lugar.

Visto el planteamiento expuesto en el presente documento, cabe plantearse las siguientes interrogantes de investigación:

¿Cuál es la provincia geológica, a la cual pertenece el área de estudio?

¿Cómo sería el modelo hidrológico conceptual de los acuíferos que subyacen al área del campus universitario?

¿Cuál es la definición de cada una de las cuencas hidrogeológicas contribuyentes a los acuíferos del área de estudio?

¿Cuáles serían los patrones preferenciales de flujo de agua subterránea en el área de estudio?

¿Cómo sería la distribución espacial y límites de los estratos acuíferos infrayacentes al campus universitario?

¿Cuáles son las posibles relaciones entre los acuíferos y la hidrografía superficial del área de estudio?

¿Cómo serían las isolíneas piezométricas basadas en los niveles estáticos de los pozos ubicados en el área de estudio?

¿Cuál es la magnitud de la recarga potencial de los acuíferos infrayacentes al campus universitario?

## **1.2 Objetivos de la investigación**

### **1.2.1 Objetivo general**

Realizar la prospección de aguas subterráneas y la estimación de la recarga potencial de los acuíferos subyacentes al Campus Universitario de la Escuela de

Ciencias de la Tierra en la parroquia La Sabanita, Ciudad Bolívar, municipio Angostura del Orinoco, estado Bolívar, Venezuela.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Caracterizar las condiciones climáticas del área de estudio.
2. Establecer la distribución superficial de los tipos de vegetación presentes en el área de estudio.
3. Determinar la infiltración promedio y escurrimiento de los suelos.
4. Analizar las características del mapa de cuencas hidrográficas de la zona.
5. Construir y analizar un mapa de isolíneas piezométricas
6. Correlacionar y analizar los resultados de los sondeos eléctricos verticales.
7. Construir el modelo geológico conceptual del acuífero.
8. Determinar la recarga potencial al acuífero.

### **1.3 Justificación de la investigación**

La ejecución de éste proyecto de investigación proporcionará conocimiento sobre las características de los estratos infrayacentes al campus universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra en la parroquia La Sabanita. Uno de los métodos de prospección geofísica que se utilizan es la medición de la resistividad del suelo, lo cual

permitirá interpretar la naturaleza (resistividad de los estratos y su espesor) de los estratos subyacentes.

Por otro lado, se realizará una estimación de la recarga potencial de los acuíferos subyacentes al campus universitario de la Escuela Ciencias de la Tierra, lo cual es de mucha importancia ya que mediante esta propuesta se realizará una evaluación preliminar de la cantidad de agua almacenada en dichos acuíferos y cuanto es el tiempo aproximado requerido para su recarga potencial. Este volumen de agua estimado, se comparará con las necesidades de agua que tendrán las infraestructuras del campo y sus servicios varios.

Cabe destacar que el desconocimiento de las potencialidades reales del suministro de agua subterránea podrían generar negativas consecuencias para los proyectos de obras civiles que se desarrollarán en el Campus universitario y entre ellas podríamos mencionar:

- a) Inestabilidad social para los usuarios del campus
- b) Dificultad para la realización de las actividades de limpieza y aseo de las infraestructuras del campus universitario.
- c) Dificultad extrema para la preparación de las comidas en el comedor estudiantil.
- d) Elevados costos para la adquisición de camiones cisternas del agua potable requerida por los usuarios del campus universitario.

e) Riesgo elevado al imposibilitarse la ejecución de las prácticas de laboratorio y así incumplir por los contenidos de las diversas asignaturas de las cinco (5) carreras que se dictan en la Escuela de Ciencias de la Tierra.

f) Dificultaría mantener condiciones sanitarias adecuadas en los baños de las diferentes edificaciones que se ha programado construir en el campus universitario de

#### **1.4 Alcances de la investigación**

Esta investigación permitirá obtener información de la geología local del área de estudio, así como la información de las cuencas hidrogeológicas contribuyentes a los acuíferos del mismo. De esta forma se logrará establecer las posibles relaciones entre los acuíferos y la hidrografía del área de estudio, todo esto proporcionará un análisis detallado de las condiciones hidrogeológicas de dicha área de estudio.

Se elaborará un modelo hidrogeológico conceptual para representar de manera simplificada la realidad, el cual permite, en términos generales, resolver el comportamiento de los flujos de agua subterráneos. En esta etapa se representan los elementos más importantes del sistema físico y su comportamiento, basándose en todos los antecedentes técnicos disponibles (geología, hidrología, hidrogeoquímica e hidrogeología).

Se determinarán los patrones preferenciales de flujo de agua subterránea en el área del estudio generados por las diferencias del nivel freático, en sistemas locales, intermedios y regionales, modificados por las heterogeneidades de la superficie y del subsuelo.

Finalmente, tal como se indicó anteriormente se realizará una estimación de la recarga potencial de agua de los acuíferos del área de estudio.

### **1.5 Limitaciones de la investigación**

Durante el proceso de investigación de las características geohidrológicas del área de estudio se realizó un inventario de los pozos perforados existentes en los alrededores del campus universitario; sin embargo, durante esa experticia se detectó que la mayoría de los pozos no poseían bocas o aberturas de registros para introducir la sonda para la medición del nivel estático del agua dentro de los pozos. Asimismo, las personas que fungían como dueños de las infraestructuras de los pozos se mostraban temerosos de suministrar información sobre los mismos por lo que se presume que no poseían los registros y permisos que establece el marco legal vigente que regula la explotación de agua subterránea y la abertura y administración de las mismas.

También es necesario acotar que se realizó en esta investigación sólo un sondeo eléctrico vertical lo cual dificultará la elaboración de interpretaciones correlacionables de las medidas de resistividad de los estratos subyacentes.

No se encontraron inconvenientes adicionales que se convirtieran en obstáculos para el desarrollo de la investigación.

## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES**

#### **2.1. Descripción del área de estudio**

El área de estudio está constituida por el Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente. Cabe destacar que la búsqueda o prospección de aguas subterráneas en el área de estudio se encuentra justificada en las deficiencias que presenta la red de abastecimiento de agua potable, motivo por el cual se intenta realizar un estudio que permita definir la real posibilidad de explotación futura del agua subterránea mediante su extracción a través de pozos perforados.

##### **2.1.1 Ubicación y acceso al área de estudio**

El área de estudio se encuentra ubicada en Ciudad Bolívar, capital del estado Bolívar, la cual se encuentra ubicada al norte del estado, en la ribera sur del río Orinoco. Específicamente, el Campus Universitario de la Escuela Ciencias de la Tierra se encuentra en la parroquia La Sabanita de Ciudad Bolívar, en el municipio Angostura del Orinoco, estado Bolívar, Venezuela. La posición del área de estudio se encuentra insertada dentro de un rectángulo conformado por los paralelos y meridianos que se mencionan a continuación en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Coordenadas UTM del área de estudio.

COORDENADAS NORTE	COORDENADAS ESTE
897532	438770
897084	438970



Figura 2.1 Ubicación relativa nacional del área de estudio.



Figura 2.2 Imagen de satélite mostrando el área de estudio (modificado de Google Earth, 2023).



de campo de las diferentes dependencias universitarias que lo requieran. Eventualmente presta servicios a terceros y genera fuentes de ingresos a la Universidad.

La Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente funcionaba en las instalaciones del Campus universitario ubicado en la parroquia La Sabanita, entre las calles San Simón y la calle Sucre., en el municipio Angostura del Orinoco del estado Bolívar.

“La Escuela de Ciencias de la Tierra tiene la pretensión de consolidarse como centro de estudios de referencia de formación e investigación en el campo de las cinco (5) carreras que dicta en el Núcleo Bolívar de la Universidad de Oriente”

### **2.3 Visión de la organización**

“Ser una unidad referente, en la prestación del servicio de formación, adiestramiento, consultoría a estudiantes, profesores y empresas particulares, reconocida por su servicio de calidad, haciendo uso de los avances tecnológicos y brindando un servicio integral de la mejor calidad, honestidad y responsables junto con trabajadores eficaces de sacar la unidad adelante”

### **2.4 Valores de la organización**

1. Cultura de servicio
2. Responsabilidad
3. Trabajo en equipo
4. Solidaridad
5. Honestidad

## **2.5 Objetivos de la organización**

Los objetivos de la unidad pueden esbozarse en los siguientes aspectos:

1. Contribuir a formar profesionales altamente cualificados en Geomática y las Tecnologías de la Información Geoespacial (TIG).
2. Contribuir a fomentar la investigación y difusión de los resultados en Geomática, TIG y disciplinas asociadas.
3. Proporcionar instalaciones y experiencia para la formación e investigación en Geomática, Teledetección, Fotogrametría, Topografía, TIG y resto de tecnologías geográficas asociadas a otros departamentos académicos universitarios.
4. Establecer mecanismos para generar ingresos a través de la formación y la investigación
5. Promover el conocimiento y las tecnologías, y sus aplicaciones en el desarrollo y situaciones prácticas de la vida en el sector de la Geoinformación.
6. Aplicar las técnicas básicas de representación topográfica, entendiendo como tales la obtención de información en el campo para elaborar los planos del terreno (levantamiento topográfico)
7. Manejar los diferentes instrumentos y/o equipos más utilizados en topografía.

## **2.6 Reseña histórica de la organización**

La Universidad De Oriente, Núcleo Bolívar (UDO Bolívar) es una institución pública venezolana de educación superior, que inició sus labores el 20 de febrero de 1960 por Resolución del Consejo Universitario, convirtiéndose desde entonces en la más importante referencia universitaria del sur-oriente del país. Este núcleo universitario inicia sus actividades académicas el 8 de enero de 1962 con las Escuelas de Medicina y la de Geología y Minas. En agosto de 1968 el Ministerio de Educación

aprueba la creación de los Cursos Básicos, y ya para enero de 1969, da comienzo a sus actividades académicas y administrativas. En la actualidad, este núcleo de la UDO cuenta con la Unidad de Cursos Básicos, la Escuela de Ciencias de la Salud “Dr. Francisco Battistini Casalta” y la Escuela de Ciencias de la Tierra, posee además la Unidad Experimental Puerto Ordaz ubicada en Ciudad Guayana.

Entre las carreras que dicta la Escuela de Ciencias de la Tierra están: Geología, Ingeniería Geológica, Ingeniería Industrial, Ingeniería Civil e Ingeniería de Minas.

## 2.7 Estructura organizativa de la Escuela de Ciencias de la Tierra

La estructura organizativa de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente está diseñada de acuerdo a las funciones que tiene que ejecutar. Se describe la estructura interna de la Escuela de Ciencias de la Tierra Servicio de Topografía y muestra visualmente las relaciones jerárquicas entre las distintas funciones y cargos de una organización. En ese orden de ideas en la figura 2.4 se muestra la estructura de la organización.



Figura 2.4 Estructura organizativa de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente.

## **2.8 Geología**

El área de estudio se encuentra sobre sedimentos del Reciente constituida por arenas medias a finas generalmente mal gradadas, también se encuentran lentes de materiales finos como limos y arcillas.

## **2.9 Geomorfología local**

En esta zona de Ciudad Bolívar, específicamente el Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra se ubica en las adyacencias ribereñas del río San Rafael y allí se pueden observar las siguientes formas de relieve:

### **2.9.1 Mesas inclinadas**

La unidad está constituida por formas de mesa de moderada a baja elevación que han sufrido basculamiento, sus altitudes varían entre 78 y 121 msnm. Además, presenta bajo grado de pendiente (<3%). excepcionalmente en los núcleos de relieve colinoso las pendientes llegan al 6%. No se observa erosión profunda en surcos o cárcavas, pero por su grado de inclinación predomina el transporte de sedimentos desde las partes más altas. Localmente se observan colinas aisladas o pequeños promontorios con afloramientos de material ferruginoso.

### **2.9.2 Mesa moderadamente conservada**

Las mesas moderadamente conservadas son extensas geoformas semi planas a suavemente onduladas que han sufrido un proceso geológico de denudación, presenta valores de altitud que van de 80 a 144 m y bajos pendientes 0 y 2%. Localmente, se presentan colinas redondeadas que presentan mayor contenido de material ferruginoso.

En otros casos, se encuentran vegas coluvio-aluviales principales o laterales de configuración alargada y de perfil transversal cóncavo.

### **2.9.3 Mesas fuertemente disectadas**

Las mesas fuertemente disectadas son unidades de forma tabular, de relieve plano a ondulado, con irregularidades topográficas moderadas, cuya principal característica son los significativos desniveles altimétricos y de pendiente. La morfodinámica de este sector va de muy activa en los taludes de las mesas con pendientes entre 60 y 90%, a medianamente activa en los sectores de tope y glacis con pendientes entre 19 y 25%. Las altitudes van de 140 a 160 msnm.

### **2.9.4 Colinas y lomas**

Las colinas están constituidas por geoformas que resultan del proceso de degradación y disección de los materiales menos consolidados de la Formación Mesa y Las Piedras, por ello quedan expuestos sectores que exhiben mayor resistencia a la erosión. Son excesivamente drenadas y tienen un perfil inclinado. Sus altitudes llegan a 200 msnm y tienen pendientes de un 34%. (INAMEH, 2014)

## **2.10 Suelos**

### **2.10.1 Suelos de las mesas inclinadas y moderadamente conservadas**

Presentan suelos profundos, de texturas medias y arenosas con subsuelos de arcilla arenosa, de buen drenaje; aunque en pequeños sectores se presentan suelos arenosos con pedregosidad superficial y suelos franco-arenosos con subsuelos arcillosos. Son suelos ácidos, de baja fertilidad natural y de moderada susceptibilidad a la erosión y en algunos sectores, con mayor potencial erosivo. Desde el punto de vista

taxonómico, gran parte de estos suelos son del grupo Typic paleudults, Typic paleustults, Typic Ustipsamments y Oxic dystrustepts, caracterizados por tener buen drenaje, moderada permeabilidad, de textura arenosa o franco arenosa en el Horizonte A y franco arcillo arenosa a franco arcillosa o arcillosa en su Horizonte B.

### **2.10.2 Suelos de la mesa fuertemente disectada**

Se presentan mayormente suelos poco estables y susceptibles a la erosión concentrada, de drenaje interno moderado y externo rápido. Son predominantemente arcillosos, aunque en las vegas coluvio aluviales provienen de aportes laterales y longitudinales, por lo que en este caso son de texturas arenosas en todo el perfil. Desde el punto de vista taxonómico, gran parte de estos suelos son del grupo Typic quartzipsamments, Typic ustorthents, Arenic haplustults, Typic plinthustults y Ultic haplustox.

### **2.10.3 Suelos presentes en las colinas y lomas**

Los suelos se caracterizan por presentar en general un alto desarrollo pedogenético con presencia de un horizonte de acumulación de arcillas a los 30-40 cm de profundidad. El drenaje externo rápido, interno moderado y permeabilidad moderada. En otros casos, el suelo presenta un horizonte óxido indicador de un alto desarrollo. Las saturaciones con bases son bajas (35%), baja capacidad de intercambio catiónico y pH ácidos (5). Gran parte de estos suelos son del grupo Typic paleustults, Ultic haplustox y Oxic dystrustepts. (INAMEH, 2014)

## **2.11 Vegetación del área de estudio y sus alrededores**

La región en estudio según el Atlas de vegetación de Venezuela pertenece a la zona de vida Bosque Seco Tropical (BST), ubicada al Norte del río Orinoco,

principalmente en los llanos centrales. De acuerdo con el mapa de vegetación de Huber y Alarcón 1886, la vegetación está representada por las sabanas características de *Trachipogon sp*, localizadas en posiciones geomorfológicas de toques y glacis cubriendo una amplia extensión de la Formación Mesa.

Estas sabanas a su vez se encuentran asociadas a un componente leñoso constituido por las especies chaparro (*Curatella americana*), alcornoque (*Bowdichia virgilioides*) y chaparro manteco (*Byrsonima crassifolia*).

En zonas de vegas de los ríos se encuentran los denominados matorrales que es un tipo de vegetación secundaria asociada con el abandono de actividades agrícolas de subsistencia, dentro de las especies comunes se encuentran: *Piptadenia sp* (yopo) y normalmente asociadas con mejores condiciones de fertilidad edáfica como *Panicum maximun* (guinea), *Hiparrhenia rufa* (yaraguá), *Rinchelytrum repens*, o *Salanum sp*. (bola de gato).

Hacia el este del área estudiada dentro de la matriz de sabana se puede diferenciar herbazales gramínoideas, periódicamente inundables dominados por *Leersia hexandra* e *Hymenachne amplexicaulis*, *Paspalum fasciculatum*, así como también, en menor proporción la especie flotante de *Paspalum repens*.

Los bosques de galería en el área estudiada se localizan en las márgenes de los cauces de los ríos Buena Vista, San Rafael (casi adyacente al Campus universitarios), Cañafistola y Marhuanta los cuales presentan un dosel de porte bajo a medio (> a 12 m), de cobertura semidensa a densa, dentro de las especies más características en esta cobertura se encuentran *Copaifera officinalis* (aceite), *Lonchocarpus punctatus* (aco), *Zanthoxylum fagara*, *Bourreria cumanensis* (guatacaro), *Protium guianensis* (currucay), *Mauritia flexuosa* (moriche), *Hymenea courbaril* (algarrobo), *Spondias mubin* (jobo), *Tapirira guianensis*, *Lecthys ollaria* (coco de mono), *Guazuma ulmifolia*

(guacimo) *Tapirira guianensis* (jobillo), *Simphonia globulifera*, *Duguetia riberensis*, *Sclerolobium aureum*, *Copaifera pubiflora* (copaiba), *Trichilia singulares*, *Coccoloba caracassana*, *Licania apetala*.

En las partes más abiertas, se pueden ubicar *Montrichardia arborecens* (rábano de agua) y *Achrosticum aureum* (helecho de agua), mientras que en el sotobosque se encuentran *Randia aculeta* (cruceño), *Jatropha ureans* (guaritoto), *Casearia silvestris* (tortolito), *Fagara caribea* (mapurite blanco).

En cuanto al uso de la tierra, es preponderantemente de uso urbano con escasos episodios agrícolas (conucos) en las llanuras de inundación de los ríos mencionados, principalmente en el río Marhuanta. (INAMEH, 2014).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Antecedentes**

Acacio, Cancino y Molina (2018), elaboraron la investigación denominada “CARACTERIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL MUNICIPIO BUCHIVACOA (VENEZUELA) CON FINES DE TRATAMIENTO” cuyo objetivo principal era clasificar las aguas subterráneas de tres zonas del municipio Buchivacoa con el fin de proponer un esquema de tratamiento. Se realizaron muestreos por bombeo en 32 pozos y análisis de laboratorio para determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua, que se compararon con las normas vigentes para agua potable. Esta investigación se convierte en un apoyo metodológico en alguno de sus aspectos.

Montiel, Morales, Silva, Baez, Portillo, Reales y Montiel (2021) presentaron un estudio titulado “CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO EN UNA POBLACIÓN INSULAR: UN APORTE AL DESARROLLO DE LA COMUNIDAD DE SAN BERNARDO – VENEZUELA”, el cual tiene como objetivo principal caracterizar el recurso hídrico subterráneo, a través de los pozos ubicados en la isla San Bernardo, como un aporte al desarrollo de la comunidad y la prevención de enfermedades de transmisión hídrica. Al igual que la anterior investigación citada, este estudio servirá de apoyo metodológico para la presente investigación

García (2021) elaboró en la Universidad Católica de la Santísima Concepción en Chile una investigación titulada “PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS A TRAVÉS DEL MÉTODO GEOELÉCTRICO SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

EN EL PREDIO EL PARRÓN, COMUNA DE FLORIDA, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE”, el cual tenía como objetivo principal determinar la presencia de agua subterránea en el predio El Parrón ubicado en la Comuna de Florida, Región del Biobío y obtener así el modelo del subsuelo en base a medidas de resistividad aparente. El predio está compuesto en su totalidad por un intrusivo granítico del Paleozoico, altamente meteorizado. Se aplicó prospección geofísica, en particular, el método de sondeos eléctricos verticales (SEV), se llevaron a cabo 9 SEV utilizando la configuración Schlumberger para determinar las resistividades, cuya data obtenida fue analizada utilizando el software IPI2WIN y en donde se identificaron dos (2) capas geo-eléctricas. El presente estudio permitirá utilizar su metodología de interpretación de sondeos eléctricos verticales

### **3.2. Bases teóricas**

#### **3.2.1 Acuíferos**

Son aquellas formaciones geológicas capaces de contener agua y permitir su movimiento a través de sus poros, cumpliendo dos funciones importantes; almacenar agua y conducirla. Este movimiento del agua a través de un acuífero no se realiza necesariamente en forma idéntica en toda su extensión, ya que ello es dependiente de las propiedades y características del acuífero. Esto conduce a considerar la isotropía y anisotropía de los acuíferos. Así cabe indicar que existe una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

#### **3.2.2 Estructura de un acuífero**

Un acuífero es un terreno rocoso permeable dispuesto bajo la superficie, en donde se acumula y por donde circula el agua subterránea. En un acuífero "libre" se

distinguen: una zona de saturación, que es la situada encima de la capa impermeable, donde el agua rellena completamente los poros de las rocas. El límite superior de esta zona, que lo separa de la zona de aireación, es el nivel freático y varía según las circunstancias, descendiendo en épocas secas, cuando el acuífero no se recarga o lo hace a un ritmo más lento que su descarga, y asciende en épocas húmedas. Extendiéndose hacia arriba desde el nivel freático se encuentra la franja capilar, en la cual, el agua subterránea es mantenida por la tensión superficial en los poros de la roca. El área situada por encima del nivel freático que abarca la franja capilar y el cinturón de humedad del suelo se denomina Zona de Aireación. (Custodio y Llamas, 1976).

### **3.2.3. Tipos de acuíferos**

Para hacer una clasificación más exhaustiva de los tipos de acuíferos se toman los aportes realizados por Edward E. (1975) en Barrios, R. (2010), los cuales señalan al respecto los siguientes:

La clasificación de los acuíferos varía según el factor que se tome en cuenta para hacerlas. Atendiendo al grado de confinamiento, es decir, a la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos, distinguimos los siguientes tipos:

#### **3.2.3.1 Acuífero libre, freático o no confinado**

Es aquel que presenta una superficie libre de agua sujeta a la presión atmosférica. Esa superficie freática se encuentra a un nivel denominado freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no. Está formado en general por un estrato permeable o relativamente impermeable. En los pozos que atraviesan total o parcialmente este tipo de acuífero el agua alcanza el mismo nivel que tendría dentro de la formación geológica, es decir, el nivel freático (nivel real) coincide con el nivel piezométrico (nivel ideal para alcanzar el agua a presión atmosférica). En algunos acuíferos libres

formados por partículas finas, el drenaje por gravedad no es instantáneo y el acuífero entrega el agua con cierto retraso después que desciende el nivel freático. Estos acuíferos se conocen como libres con entrega retardada. (Barrios, R., 2010).

### **3.2.3.2 Acuífero confinado, cautivo o a presión**

Se trata de una formación geológica completamente saturada de agua que se encuentra confinada entre dos estratos impermeables o prácticamente impermeables (uno inferior y otro superior). El agua contenida en este tipo de acuíferos se encuentra a una presión superior a la atmosférica, de manera que en aquellos pozos que asciende rápidamente hasta que se estabiliza a un nivel denominado piezométrico. Así, al imaginar una serie de pozos atravesando un acuífero confinado, y unimos los niveles que alcanza el agua en cada uno de ellos, obtendríamos una superficie piezométrica que no coincide con la superficie freática que tenía el acuífero en estado natural. Si el nivel piezométrico queda por encima de la cota del terreno, se habla de pozos surgentes, mientras que si queda por debajo de esta se denomina pozo artesiano. (Barrios, R., 2010).

### **3.2.3.3 Acuífero semiconfinado**

Son una variante de los acuíferos confinados, y se caracterizan porque están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuicierre o acuífugo) o también por otro acuitardo. En este tipo de acuíferos, la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo por ejemplo, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el acuitardo, que actuara como recarga de acuífero. (Barrios, R., 2010).

#### **3.2.3.4 Acuífero semilibre**

Supone una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso, la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que la componente horizontal del flujo no puede ignorarse. Es el caso de un acuífero formado por granos gruesos, limitado en la parte inferior por una formación impermeable y en la parte superior por una formación de granos finos con conductividad hidráulica saturada inferior a la del acuífero, pero no tan baja como para considerarla semipermeable. (Barrios, R., 2010).

#### **3.2.3.5 Acuífero colgado**

Este tipo se da en aquellas ocasiones en las que existe una capa de material más o menos impermeable por encima del nivel freático. El agua que se infiltra queda por tanto atrapada en esta capa formando una “bolsa de agua” o lentejón, que normalmente tiene una extensión limitada. Los acuíferos colgados se dan con más frecuencia de lo que se pueda suponer, aunque a veces solo ocupan unos pocos centímetros de espesor, o sólo se limitan después de una recarga muy excepcional. No supone un recurso muy fiable, ya que si se perfora del todo, puede ocurrir que el pozo construido actúe facilitando el drenaje del agua contenida en el lentejón hacia la zona saturada. (Barrios, R., 2010).

#### **3.2.3.6 Acuíferos formados por depósitos no consolidados**

Los acuíferos formados por depósitos no consolidados están constituidos por materiales sueltos, fundamentalmente arenas, gravas o mezclas de ambas, de origen geológico muy diverso. Según algunos autores el 90% de los acuíferos en explotación en el mundo caen bajo esta categoría. (Barrios, R., 2010).

### **3.2.3.7 Acuíferos formados por depósitos consolidados**

Están constituidos por rocas consolidadas, cuyo origen puede ser diverso:

1. Calizas y dolomitas (fisuras, fracturadas y karstificadas).
2. Conglomerados o areniscas (disueltas y con algunas partes cementadas).
3. Rocas volcánicas alteradas (escoriáceas). Las características de los acuíferos en rocas volcánicas son variables dependiendo de las propiedades físicas y químicas de la erupción que las originó, así como de su edad. Las zonas más permeables están relacionadas con fracturas y materiales piroclásticos.
4. Algunas rocas cristalinas (p.el. Granitos fracturados). (Barrios, R., 2010).

### **3.2.3.8 Acuícluido**

Del latín "claudere" que significa encerrar o cerrar, se define como aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Dentro de este grupo pueden incluirse los cienos y légamos (arcillas por lo general) de origen deltaico y/o de estuario, que a pesar de poseer grandes cantidades de agua (superior a 50% en volumen) no son hidrogeológicamente aptos para la construcción de captaciones de aguas subterráneas. (Aguasuelos Ingeniería, 1993).

### **3.2.3.9 Acuitardo**

Del latín "tardare" que significa retardar, hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la

transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos. Por ejemplo, un nivel de arcillas limosas o arenosas puede comportarse como acuitardo, si está dispuesto por encima o debajo de un acuífero más importante, al cual puede recargar, o incluso recibir agua del mismo. (Aguasuelos Ingeniería, 1993).

### 3.2.3.10 Acuífugo

Del latín "fugere" que significa huir, a aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo, un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación. (Aguasuelos Ingeniería, 1993).

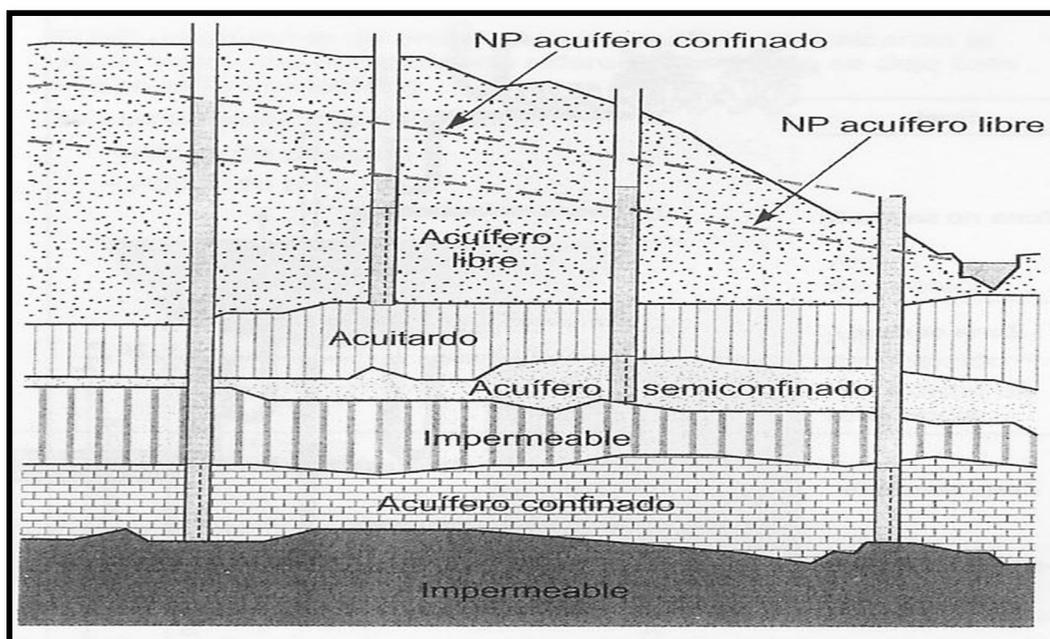


Figura 3.1 Tipos de acuíferos y niveles piezométricos. (Custodio y Llamas, 1996).

### **3.2.4 Balance hídrico**

Los balances hídricos se suelen realizar de forma periódica (diaria, mensual) en la zona más superficial del terreno donde tienen lugar los procesos de evapotranspiración (suelo edáfico generalmente), aunque también se han aplicado en la zona no saturada y en el propio acuífero, variando en esta escala temporal y espacial de la recarga. El balance de agua en un acuífero se plantea entre dos flechas entre las que se observa la variación del nivel freático. El volumen almacenado por encima del nivel freático original se iguala a la recarga, considerando otros posibles flujos de entrada o de salida desde otros acuíferos o por bombeos. (Aguilera, G., 2009).

### **3.2.5 Balance de suelos**

El potencial de las aguas subterráneas de un acuífero, representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero, para que no sea sobreexplotado. Dicho potencial se estima mediante la recarga al acuífero, que se determina conociendo en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo. (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).

### **3.2.6 Infiltración**

Es el proceso bajo el cual un flujo de agua penetra al suelo por su superficie. La tasa de infiltración  $f$  medida en mm/hr, está influenciada por muchos factores, tales como la densidad y el tipo de cobertura vegetal, humedad inicial, pendiente del terreno, porosidad y permeabilidad del suelo, calidad del agua e intensidad de precipitación. (Pravia, J., 1995).

### 3.2.7 Coeficiente de infiltración

Es el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración. (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).

Los valores sugeridos de estos componentes, que conforman el coeficiente de infiltración se muestran en la siguiente Tabla 3.1.

Tabla 3.1

<b>Por pendiente</b>	<b>Pendiente</b>	<b>kp</b>
Muy plana	0.02%-0.06%	0.30
Plana	0.3%-0.4%	0.20
Algo plana	1%-2%	0.15
Promedio	2%-7%	0.10
Fuerte	Mayor de 7%	0.06
<b>Por cobertura vegetal</b>		<b>kv</b>
Cobertura con zacate menos del 50%		0.09
Terrenos cultivados		0.10
Cobertura con pastizal		0.18
Bosques		0.20
Cobertura con zacate menos del 75%		0.21

### 3.2.8 Precipitación

Son el resultado de la condensación del vapor de agua, y bajo ese término se engloban todas las aguas meteóricas que caen en la superficie de la tierra bajo diversas formas: en forma líquida (lluvia), sólida (nieve y granizo) u oculta (rocío o helada blanca). (Benítez, A., 1963).

Según Benítez, A., (1963), podemos distinguir tres tipos de precipitación:

1. Convectiva: es típica de las zonas tropicales y se lleva a cabo por el calentamiento de aire cerca de la superficie terrestre, este aire caliente se expande y asciende por la disminución de densidad. En este proceso de aire caliente ascendente toma vapor del ambiente y asciende a gran velocidad. En las capas superiores toma lugar un enfriamiento dinámico causando condensación y posteriormente precipitación.
2. Orográfica: ocurre cuando las barreras montañosas obligan a las corrientes de aire (vientos) a elevarse. Las lluvias de las zonas de barlovento son de este tipo.
3. Ciclónica: esta asociada con el movimiento de masas de aire de centros de alta presión a centros de baja presión. Esta diferencia de presión es causada por el calentamiento irregular de la superficie terrestre.

### **3.2.9 Condensación**

Es el primer paso en el mecanismo de la precipitación y esta puede producirse por una de las siguientes causas:

1. Por enfriamiento dinámico o diabático de la masa de aire
2. Por la mezcla de masas de aire con que están a diferentes temperaturas
3. Por enfriamiento ocurrido en una de ellas por dos masas de aire en contacto
4. Enfriamiento por radiación. (Benítez, A., 1963).

### **3.2.10 Evaporación**

Es el proceso bajo el cual la masa de agua de la tierra, lagos y mares regresa a la atmósfera, en forma de vapor. Debido a que hay un constante intercambio de moléculas de agua entre la superficie evaporante y la parte atmosférica inmediatamente sobre ella. La evaporación es función de la radiación solar, de la diferencia en presión de vapor entre la superficie del agua y el aire circundante, de la velocidad del viento, de la presión de vapor y de la calidad del agua evaporante. (Benítez, A., 1963).

### **3.2.11 Transpiración**

Este ocurre entre el suelo, las plantas y la atmósfera. El suelo actúa como un reservorio de agua, del cual las plantas extraen el agua para transportarlas en el sistema de raíces, tronco y ramas, por un sistema de conducción de baja resistencia llamado xilema. Las hojas contienen células mesofilicas esponjosas en su superficie desde la cual se produce la evaporación, estos son los llamados orificios estomatales por donde se escapa el vapor de agua hacia la atmósfera. La razón de transpiración se determina dividiendo el peso de agua transpirado por una planta durante su crecimiento y el peso de material producido por la misma. (Benítez, A., 1963).

### **3.2.12 Evapotranspiración**

Es el resultado del proceso por el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso, y directamente, o a través de las plantas, vuelve a la atmósfera en forma de vapor, es decir, la evapotranspiración es la suma de la transpiración más la evaporación, y el término, sólo es aplicable correctamente a una determinada área de terreno cubierta por vegetación. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando los estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua. Cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).

Cada planta tiene una evapotranspiración diferente y va a depender de la temperatura de ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento y grado de desarrollo de la planta, la misma se muestra en la Tabla 3.2 (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).

Tabla 3.2 Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Grassi, 1976), en (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).

<b>PROFUNDIDAD DE RAÍCES</b>	
<b>Cultivo</b>	<b>Metros</b>
Alfalfa (pastos)	1-2
Algodón	1-1,7
Banano	0,5-0,8
Caña de azúcar	1,20-2
Frijol	0,5-0,7
Cebolla	0,3-0,5
Cítricos	1,20-2,0
Zacate	0,3-0,5
Bosques	2,0-3,0

En una cuenca o en una zona arbitraria de la cuenca, es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación, debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de las plantas existentes en una cuenca o en una zona de la misma. Por

este motivo, es conveniente asumir una evapotranspiración, que se estime como promedio de la cuenca. Esta evapotranspiración promedio de la cuenca, la asumiremos que es igual a la evapotranspiración potencial (ETP). (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).

### **3.2.13 Fracción de lluvia interceptada por el follaje**

Se define como coeficiente de follaje ( $C_{fo}$ ) el porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno. Para el 12% de retención  $C_{fo} = 0.12$ . Para el 20 de retención  $C_{fo} = 0.20$ . (Schosinsky, G. 2006)

### **3.2.14 Escorrentía**

Es la parte de lluvia que ni se infiltra en el terreno ni se pierde por evaporación, y que por consiguiente, discurre libremente sobre la superficie del suelo formando cursos de agua superficial. (Benítez, A., 1963).

### **3.2.15 Escorrentía superficial**

Es aquella que alcanza el punto considerado, habiendo circulado siempre sobre la superficie del terreno, esta es asimilable a la escorrentía directa. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración. (Schosinsky, G., y Losilla, M., 2000).

### **3.2.16 Escorrentía directa**

Es aquella que pasa poco tiempo sobre la superficie del terreno después de haber llovido o de haberse fundido las nieves. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

### **3.2.17 Escorrentía subterránea**

Es aquella que llega al punto después de haber circulado un trayecto más o menos largo dentro de un acuífero o embalse subterráneo. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

### **3.2.18 Escurrimiento**

Se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. El flujo superficial se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos, una vez que llega a este se convierte en escurrimiento en corrientes (Bolinaga, J., 1999).

### **3.2.19 Tiempo de concentración**

En el caso del método racional, el tiempo de concentración es igual al tiempo que se tarda una gota de agua en recorrer el trayecto desde el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio en cuestión. (Bolinaga, J., 1.999):

### **3.2.20 Tipos de aguas**

#### **3.2.20.1 Magmáticas**

Son primitivas, brotan en relación con los filones metálicos o eruptivos, poseen temperaturas elevadas de más de 50° C., tienen un caudal, composición y temperaturas constantes, las sales de calcio, magnesio y los nitritos son raros o no existen. (CORPOVEN, 1991).

#### **3.2.20.2 Telúricas**

Son aguas de filtraciones, que brotan de cualquier terreno, es decir, sin relación directa con los filones metálicos o eruptivos; su caudal es variable según el régimen de lluvias y estaciones, la temperatura no es demasiado elevada (de menos de 50° C.), la mineralización es tenue y su concentración está en relación inversa al caudal, no tiene elementos con características de emanaciones metálicas o de metaloides profundos (boro, flúor, cobre, nitrógeno, etc.) sino en presencia de oxígeno. (CORPOVEN, 1991).

#### **3.2.20.3 Aguas potables**

El término se aplica al agua que ha sido tratada para su consumo humano según unas normas de calidad promulgadas por las autoridades locales e internacionales. (CORPOVEN, 1991).

#### **3.2.20.4 Agua pura**

Se obtiene por destilación en los laboratorios, de esta manera se separan los gases y sales en disolución. (CORPOVEN, 1991)

#### **3.2.20.5 Agua dura**

Es aquella que contiene un alto nivel de minerales, en particular sales de magnesio y calcio, son éstas las causantes de la dureza del agua, y el grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de sales metálicas. (CORPOVEN, 1991).

#### **3.2.20.6 Aguas connatas**

Las aguas connatas son aquellas que han estado encerradas en sistemas hidráulicos cerrados y no han formado parte del ciclo geológico por una cantidad considerable de tiempo geológico; aguas formadas al mismo tiempo que las rocas que las contienen. Estas aguas no circulan, pero se mueven a través de los sedimentos como parte del proceso de compactación y migración. Las aguas connatas generalmente son saladas, contienen de 20000 a 25000 mg/l de sólidos disueltos y se caracterizan por presentar altas concentraciones de sulfatos y carbonatos. (CORPOVEN, 1991).

Es importante resaltar que por su naturaleza las aguas connatas van desde agua fresca en ambientes sedimentarios continentales hasta salinas en ambientes marinos, pudiendo ser modificadas por las reacciones químicas que ocurren en el subsuelo durante la compactación y diagénesis o al mezclarse con aguas meteóricas. (CORPOVEN, 1991).

### **3.2.20.7 Aguas meteóricas**

Geológicamente las aguas meteóricas son aquellas de reciente contacto con el ciclo hidrológico, su edad es menor que la de las rocas que la contienen. Aquí se incluyen el agua de lluvia y nieve, aguas superficiales y aguas subterráneas en movimiento. Químicamente las aguas meteóricas se caracterizan por presentar bajas concentraciones de sólidos disueltos, su valor por lo general, es menor de 10000 mg/l y normalmente presenta cantidades considerables del ion carbonato.

El agua meteórica es menos salada que el agua connata y tiene un rango más amplio de composición química. No hay un incremento sistemático de la concentración con la profundidad. Usualmente contienen cantidades considerables del ión carbonato y escasamente contienen calcio y magnesio. (CORPOVEN, 1991).

### **3.2.20.8 Aguas termales**

Estas pueden ser magmáticas, que proceden de las profundidades de la tierra y que contienen iones metálicos, o bien radiactivos, junto a su elevada temperatura. También pueden ser juveniles, que son aguas de fuentes resurgentes de la circulación subterráneas de aguas infiltradas por fisuras de las capas rocosas o especiales terrenos porosos, se forma así el agua geotermal. Cada tipo de agua termal depende de la profundidad y de los terrenos por los cuales atraviesa y de las características del terreno donde surja. (CORPOVEN, 1991). (Figura 3.2)



Figura 3.2 Aguas termales de Moisés  
Venezuela. (CORPOVEN, 1991).

#### **3.2.20.9 Aguas juveniles**

Las aguas juveniles son aquellas que ascienden desde el manto de la tierra y nunca han formado parte del Ciclo Hidrológico, son difíciles de identificar con precisión. (Soto, C. 1977).

#### **3.2.21 Humedad del suelo**

Se emplea para referirse al agua retenida por el suelo, y así distinguirla del agua subterránea propiamente dicha. Los procedimientos más exactos para medirla son los de laboratorio, siempre que la muestra del suelo se extraiga y transporte con las debidas precauciones para conservar íntegra su humedad. Pero en la práctica, es útil y rápido el determinar (in situ), la humedad del suelo y para ello se emplea diversos métodos y aparatos, que deben ser previamente calibrados con medidas de laboratorio. Algunos son:

1. Bloques porosos absorbentes

2. Tensiómetros
3. Métodos que relacionan conductividad eléctrica del suelo con su contenido de humedad
4. Métodos geofísicos. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

### **3.2.22 Humedad equivalente**

Es el grado de humedad, determinado en el laboratorio, de una muestra que se ha sometido a una fuerza centrífuga 1000 veces superior a la de la gravedad (presión de 10 atmósferas aproximadamente) durante un tiempo de unos 40 minutos. El hecho de esta determinación se debe a que la humedad equivalente es un valor muy próximo al de capacidad de campo y sustituye su determinación. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

### **3.2.23 Capacidad de campo**

Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica. Este concepto es de gran importancia en agricultura ya que en la zona de acción de las plantas representa el agua que, transcurrido un tiempo generalmente unos tres (3) días, después de un riego o de una lluvia, queda en el terreno, parte de la cual podrá ser aprovechada por la vegetación para sus funciones biológicas. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

### **3.2.24 Punto de marchitez permanente**

Es el grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que la de retención del agua por el terreno y en consecuencia las plantas no pueden extraerla. Al igual que la capacidad de campo es un concepto eminente agronómico, pero que juega un importante papel en fenómenos como la evapotranspiración de indiscutible influencia sobre el ciclo hidrológico. Su determinación en laboratorio, sigue un método similar al empleado para determinar la humedad equivalente, sometiendo la muestra a presión centrífuga del orden de 15 atmósferas y hallando después su grado de humedad. Naturalmente su valor real depende del tipo de vegetación que exista sobre el suelo, y solo a partir de experiencias de marchitamiento de plantas podrá obtenerse en cada caso. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

### **3.2.25 Nivel freático**

Cuando la precipitación cae en el continente, una parte se evapora, otra parte se escapa por escurrimiento en las corrientes, la otra satura el suelo. A medida que esta agua baja hacia la superficie, alguna cantidad se adhiere al material por el cual se mueve y detiene su descenso, esta región se conoce con el nombre de zona de aeración y el agua que se queda en su interior se le denomina agua suspendida. Por lo tanto, los espacios porosos de esta zona contienen tanto aire como agua. (Wicander y Monroe, 1999 en Barrios, R., 2010).

Debajo de la zona de aeración, se encuentra la zona de saturación, donde todos los poros están llenos de agua subterránea. La base de la zona de saturación varía de un lugar a otro, pero regularmente se extiende a la profundidad en la que se halla una capa impermeable o hasta donde la presión confinada cierra todos los espacios abiertos. La franja capilar se extiende irregularmente hacia arriba algunos centímetros

a varios metros, a partir de la zona de saturación. En esta región el agua asciende a causa de la tensión superficial, en forma muy parecida a como asciende el agua en una toalla de papel.

La superficie que separa la zona de aeración de la zona inferior de saturación se le conoce con el nombre de nivel freático. En general la configuración del nivel freático es una copia menor del terreno superficial; es decir sus mayores elevaciones están debajo de las colinas y las menores en los valles. Sin embargo, en la mayoría de las regiones áridas y semiáridas el nivel freático es bastante plano y está por debajo del nivel de los valles fluviales.

Varios factores contribuyen a la configuración superficial del nivel freático de una determinada región, entre los cuales se pueden mencionar. Las diferencias regionales en la cantidad de lluvias, permeabilidad y la velocidad del movimiento del agua subterránea. (Wicander y Monroe, 1999 en Barrios, R., 2010).

### **3.2.26 Polígonos de Thiessen**

El fundamento teórico de este método, consiste en atribuir a cada pluviómetro una zona de influencia determinada. Estas zonas quedan delimitadas de forma que un punto situado dentro de ellas este siempre más cercano, en distancia horizontal, del pluviómetro cuyos datos se consideran que de cualquier otro pluviómetro. (Benítez, A., 1963).

### **3.2.27 Aguas subterráneas**

Las aguas subterráneas se pueden definir como el agua almacenada en los espacios abiertos de las rocas y el material sin consolidar del subsuelo, es decir son las que se filtran por las fisuras de las rocas , o por las grietas , para penetrar en el subsuelo para formar corrientes , manto y empapar las rocas porosas..

Sobre las aguas subterráneas Wicander y Monroe (1999), en Barrios, R., (2010), en señalan los siguientes aspectos:

#### **3.2.27.1 Porosidad, permeabilidad y transmisibilidad**

La porosidad y la permeabilidad son propiedades físicas importantes de los materiales terrestres, además, de que son, en gran parte, la causa de la cantidad, disponibilidad y movimiento del agua subterránea. El agua se infiltra en la tierra porque el suelo, los sedimentos y las rocas tienen espacios abiertos o poros.

“La porosidad es el porcentaje del volumen total de un material que es un espacio poroso o intersticial. La mayoría de las veces la porosidad consiste en los espacios entre las partículas del suelo, los sedimentos y las rocas sedimentarias; también hay otro tipo de porosidad formado por grietas, fracturas, fallas y vesículas de las rocas volcánicas” (Wicander y Monroe, 1999 en Barrios, R., 2010).

Por consiguiente, la porosidad varía entre los distintos tipos de rocas y depende del tamaño, la forma y la disposición del material que compone la roca. Por lo tanto, todas las rocas ígneas y metamórficas, así como muchas calizas y dolomías, poseen una porosidad muy baja porque están compuestas de cristales firmemente unidos, no obstante, su porosidad aumenta si fracturan o disuelve el agua subterránea. (Wicander y Monroe, 1.999 en Barrios, R., 2010).

Aunque la porosidad determina la cantidad de agua subterránea que puede retener una roca, no garantiza que se pueda extraer el agua, por cuanto la capacidad de un material para transmitir los fluidos es su permeabilidad, ésta depende no solo de la porosidad, sino también del tamaño de los poros o fracturas y sus interconexiones. (Wicander y Monroe, 1.999 en Barrios, R., 2010).

- Porosidad: Es el volumen poroso por unidad de la formación. Es la fracción del volumen total de una muestra que está ocupada por poros o espacios vacíos. La porosidad está representada por la letra griega  $\phi$ . (Schlumberger, 1999).

La porosidad de las formaciones del subsuelo puede cambiar considerablemente. Los carbonatos densos (calizas, y dolomitas) y las evaporitas (sales, anhidritas y yeso) pueden tener cero porosidad, para todos los efectos prácticos. Por su parte, las areniscas bien consolidadas pueden tener de 10% a 15% de porosidad, mientras que las no consolidadas pueden tener un 30% más de porosidad; mientras que las lutitas o arcillas pueden tener una porosidad mayor de 40% llena de agua pero generalmente estos poros individualmente considerados, son por lo general tan pequeños, que la roca es impermeable al flujo de los fluidos. (Schlumberger, 1999). (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Clasificación cualitativa de la porosidad.  
(Schlumberger, 1999).

<b>Clasificación</b>	<b><math>\Phi</math> (%)</b>
Despreciable	<5
Baja	$5 < \Phi < 10$
Buena	$10 < \Phi < 20$
Excelente	>20

La porosidad depende principalmente de los siguientes factores:

- a. El empaque geométrico,
- b. El escogimiento,
- c. La cementación,
- d. La angularidad y el grado de redondez,
- e. La granulación y
- f. La solución de minerales a través de aguas circulantes (aumenta la porosidad). (Schlumberger, 1999).

### **3.2.28 Movimiento del agua subterránea**

La velocidad del agua subterránea varía enormemente y depende de muchos factores. La velocidad va de 250 m por día en algunos materiales extremadamente permeables, a menos de algunos centímetros por años en los materiales casi

impermeables. En la mayoría de los acuíferos ordinarios la velocidad promedio del agua subterránea es de algunos centímetros por día. (Wicander y Monroe, 1.999 en Barrios, R., 2010).

La gravedad proporciona la energía para el movimiento descendente del agua. Por consiguiente, el agua que penetra en el suelo pasa por la zona de aeración y la de saturación. Cuando llega al nivel freático, el líquido continúa su movimiento por la zona de saturación, desde las áreas en las que este nivel está más elevado hacia aquellas donde es más bajo, como en las corrientes, lagos y lagunas. (Wicander y Monroe, 1.999 en Barrios, R., 2010).

### **3.2.29 Modificaciones del sistema de agua subterránea y sus efectos**

La densidad demográfica y la superpoblación han conllevado al uso irracional del agua subterránea en la mayoría de los países del mundo, por consiguiente sino se hace uso de la misma con más prudencia, en el futuro no habrá una provisión suficiente de agua subterránea pura, por cuanto se han producido grandes modificaciones en el sistema de producción de este recurso natural valioso, lo cual puede traer muchas consecuencias, entre las que se destacan: 1) Descenso del nivel freático, lo cual hace que los pozos se sequen; 2) pérdida de presión hidrostática, causante de que los pozos que tenía flujo libre deben ser bombeados; 3) intrusión de agua salada; 4) hundimientos, y 5) contaminación del suministro de agua subterránea. (Wicander y Monroe, 1.999 en Barrios, R., 2010).

### **3.2.30 Caracterización de sistemas de agua subterránea**

Un acuífero es una formación geológica capaz de suministrar agua subterránea útil a pozos y manantiales. (Banco Mundial, 2011).

Todos los acuíferos tienen dos características fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de permitir el flujo del agua subterránea. Pero el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra y su magnitud puede variar con la estructura geológica, de unos cuantos km<sup>2</sup> a muchos miles de km<sup>2</sup>. (Banco Mundial, 2011).

Los elementos más importantes de la diversidad hidrogeológica son: gran variación de la capacidad de almacenamiento de la unidad acuífera (almacenaje), entre sedimentos granulares no consolidados y rocas fracturadas muy consolidadas gran variación del espesor saturado del acuífero entre diferentes tipos de depósitos, lo que da como resultado un amplio rango de potencial de flujo de agua subterránea (transmisibilidad), (Banco Mundial, 2011).

### **3.2.31 ¿Cómo fluye el agua subterránea?**

El vasto almacenamiento de muchos sistemas de agua subterránea (mucho mayor que el de los embalses más grandes hechos por el hombre) es su característica más distintiva. Como consecuencia, la mayor parte del agua subterránea está en movimiento lento continuo desde áreas de recarga natural (producto de la precipitación que excede los requerimientos de las plantas) hacia las áreas de descarga de los acuíferos (como manantiales e infiltración hacia cursos de agua, humedales y zonas costeras). (Banco Mundial, 2011).

Se pueden encontrar formaciones de agua dulce más profundas, pero la extracción de este recurso frecuentemente da como resultado una infiltración inducida de los acuíferos suprayacentes y no la intercepción de un flujo importante de agua subterránea profundo e independiente. El almacenamiento de un acuífero transforma regímenes de recarga natural muy variables en regímenes de descarga natural más estables. También da como resultado tiempos de residencia de agua subterránea que

por lo general se calculan en décadas o siglos y en ocasiones incluso en milenios, con grandes volúmenes de la llamada ‘agua subterránea fósil’ (reliquia de episodios pasados de clima diferente) que aún permanecen almacenados. (Banco Mundial, 2011).

En sitios en los que los acuíferos se encuentran bajo estratos mucho menos permeables, las capas suprayacentes de estos últimos confinan (en diverso grado) las aguas subterráneas de los acuíferos. Esto da como resultado cierto grado de aislamiento de la superficie del terreno inmediatamente suprayacente, pero no del sistema de agua subterránea en general. El abatimiento del manto freático inducido por el bombeo de la sección confinada de un acuífero a menudo se propaga rápidamente a la sección no confinada. En diversos escenarios hidrogeológicos, se pueden superponer capas de acuíferos no profundos no confinados y profundos confinados con infiltraciones hacia abajo y hacia arriba entre capas, según las condiciones locales, (Banco Mundial, 2011).

### **3.2.32 Calidad de las Aguas Subterráneas**

Las características físicas y químicas de las aguas subterráneas dependen de varios factores. Los tres principales son: ambiente climático, ambiente geológico y acción del hombre o contaminación. El agua subterránea tiende a ser dulce (es decir, de muy baja salinidad) y potable (puede ser bebida sin riesgo). Sin embargo en ocasiones las capas freáticas son demasiado ricas en sales disueltas como para ser consumida, y eso mismo puede resultar inconveniente también para otros usos determinados. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

La circulación subterránea tiende a depurar el agua de partículas y microorganismos, pero en ocasiones éstos llegan al acuífero por contaminación debida a los usos humanos, como fosas sépticas o residuos agrícolas. El agua subterránea puede contaminarse por otras causas antropogénicas, como la infiltración de nitratos y otros abonos químicos muy solubles usados en la agricultura, que suele ser una causa

grave de contaminación de los suministros en llanuras de elevada productividad agrícola y densa población. Algunos contaminantes se originan de la erosión natural de las formaciones rocosas. Otros contaminantes provienen de descargas de fábricas, productos agrícolas, o químicos utilizados por las personas en sus hogares y patios. Otras causas la forman los abonos químicos minerales, especialmente los nitratos, que son el contaminante inorgánico más conocido y quizás uno de los que genera mayor preocupación. (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

### **3.2.33 Relación entre agua subterránea y agua superficial**

Diagnosticar la relación entre el agua superficial con un acuífero subyacente es un componente importante de la caracterización de sistemas de agua subterránea. Es importante distinguir entre: arroyos y ríos de los que depende un acuífero como fuentes significativas de su recarga total ríos que a su vez dependen significativamente de la descarga de un acuífero para mantener su flujo en estiaje. Se debe resaltar que en algunos casos los ríos pueden fluctuar, según la estación, entre dos (2) de las condiciones descritas. (Banco Mundial, 2011).

Este paradigma aceptado comúnmente puede ser falso y llevar a una seria ‘doble contabilización de recursos’ en las regiones más áridas – las tasas de recarga varían con la derivación o el control del caudal del río, modificaciones a la irrigación con agua superficial, cambios en la vegetación natural o tipo de cultivos en las zonas de recarga, reducción de las fugas de redes urbanas de abastecimiento de agua y de la filtración de aguas residuales in-situ, descenso del manto freático, etc. (Banco Mundial, 2011).

Se pueden hacer las siguientes observaciones genéricas sobre los procesos de recarga de los acuíferos: las áreas con aridez creciente tienen una tasa más baja y menos frecuente de flujo descendente hacia el manto freático y, por lo general, la recarga por precipitación directa se vuelve progresivamente menos importante que la

recarga indirecta por escurrimiento superficial y la recarga artificial incidental que proviene de la actividad humana las estimaciones del componente directo de recarga por precipitación casi siempre resultan más confiables que las del componente indirecto de recarga por escurrimiento. (Banco Mundial, 2011).

### **3.2.34 Recarga al acuífero**

El agua de las precipitaciones ( lluvia, nieve,...) puede tener distintos destinos una vez alcanza el suelo. Se reparte en tres fracciones. Se llama escorrentía a la parte que se desliza por la superficie del terreno, primero como arroyada difusa y luego como agua encauzada, formando arroyos y ríos. Otra parte del agua se evapora desde las capas superficiales del suelo o pasa a la atmósfera con la transpiración de los organismos, especialmente las plantas; nos referimos a esta parte como evapotranspiración. Por último, otra parte se infiltra en el terreno y pasa a ser agua subterránea. (Franco, M., 1985).

La proporción de infiltración respecto al total de las precipitaciones depende de varios factores. La litología (la naturaleza del material geológico que aflora en la superficie) influye a través de su permeabilidad, la cual depende de la porosidad, del diaclasamiento (agrietamiento) y de la mineralogía del substrato. Por ejemplo, los minerales arcillosos se hidratan fácilmente, hinchándose siempre en algún grado, lo que da lugar a una reducción de la porosidad que termina por hacer al substrato impermeable. Otro factor desfavorable para la infiltración es una pendiente marcada. La presencia de vegetación densa influye de forma compleja, porque reduce el agua que llega al suelo (interceptación), pero extiende en el tiempo el efecto de las precipitaciones, desprendiendo poco a poco el agua que moja el follaje, reduciendo así la fracción de escorrentía y aumentando la de infiltración. Otro efecto favorable de la vegetación tiene que ver con las raíces, especialmente las raíces densas y superficiales

de muchas plantas herbáceas, y con la formación de suelo, generalmente más permeable que la mayoría de las rocas frescas. (Franco, M., 1985).

### **3.2.35 Contaminación de los acuíferos**

Se suelen distinguir dos tipos de procesos contaminantes de las aguas subterráneas: los "puntuales" que afectan a zonas muy localizadas, y los "difusos" que provocan contaminación dispersa en zonas amplias, en las que no es fácil identificar un foco principal. (Echarri, L., 1988).

Actividades que suelen provocar contaminación puntual son:

- a. Lixiviados de vertederos de residuos urbanos y fugas de aguas residuales que se infiltran en el terreno.
- b. Lixiviados de vertederos industriales, derrubios de minas, depósitos de residuos radiactivos o tóxicos mal aislados, gasolineras con fugas en sus depósitos de combustible, entre otras.
- c. Pozos sépticos y acumulaciones de excrementos líquidos procedentes de las granjas.

Este tipo de contaminación suele ser más intensa junto al lugar de origen y se va diluyendo al alejarnos. La dirección que sigue el flujo del agua del subsuelo influye de forma muy importante en determinar en qué lugares los pozos tendrán agua contaminada y en cuáles no. Puede suceder que un lugar relativamente cercano al foco contaminante tenga agua limpia, porque la corriente subterránea aleja el contaminante de ese lugar, y al revés. (Echarri, L., 1988).

La contaminación difusa suele estar provocada por:

- a. Uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura o en las prácticas forestales.
- b. Explotación excesiva de los acuíferos que facilita el que las aguas salinas invadan la zona de aguas dulces, por desplazamiento de la interface entre los dos tipos de aguas.

Este tipo de contaminación puede provocar situaciones especialmente preocupantes con el paso del tiempo, al ir cargándose de contaminación, lenta pero continuamente, zonas muy extensas. (Echarri, L., 1988).



Figura 3.3. Fuentes Puntuales y Difusas de Contaminación de las Aguas Subterráneas (Echarri, L., 1988).

### 3.2.36 Cálculo de recarga potencial al acuífero

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la recarga al acuífero. (Banco Mundial, 2011).

### **3.2.37 Tasa promedio de recarga de un acuífero**

Esta ‘fantasía algo persistente’ no considera la necesidad de mantener la descarga o el nivel de agua de los acuíferos en beneficio de otros usuarios de agua, ecosistemas acuáticos/terrestres y/o la prevención de intrusión salina costera, y la expresión ‘rendimiento seguro’ a menudo se interpreta demasiado simplistamente. (Banco Mundial, 2011).

Todo el flujo de agua subterránea tiene que descargar en alguna parte, y la extracción reducirá estas descargas, pero la fuente del agua subterránea que se bombea puede ser compleja. El llamado ‘rendimiento seguro’ está claramente acotado por la tasa promedio de recarga actual a largo plazo de los acuíferos, aunque también debe considerarse: juicios de valor sobre la importancia de mantener (por lo menos una proporción de) algunas de las descargas naturales del sistema acuífero el uso consuntivo y la exportación a otras cuencas, a diferencia de usos locales no consuntivos que generan un efluente a nivel local. (Banco Mundial, 2011).

Sin embargo, se necesita definir las tasas máximas tolerables de extracción, por lo que la evaluación de recursos debe distinguir entre: descarga a sistemas de agua dulce requerida para sustentar el suministro de agua o los ecosistemas fluviales aguas abajo descarga por medio de vegetación natural, que incluye la que sustenta humedales de agua dulce y lagunas de agua salobre con valor ecológico y/o económico descarga a zonas salinas, que incluyen aguas costeras, lagos salados y suelos endurecidos a causa de evaporación directa y tener en cuenta aquellas partes de estas descargas que es necesario conservar. (Banco Mundial, 2011).

El término ‘sobreexplotación de acuíferos’ es una expresión emotiva que no representa una definición científica rigurosa, pero también es un término que los gerentes de recursos hídricos deben seguir usando, pues es ampliamente conocido a

nivel público y político. Algunos consideran que un acuífero está sobreexplotado cuando sus niveles de agua subterránea muestran pruebas de descenso ‘continuo a largo plazo. Existe el problema de especificar en qué periodo y en qué área se debe evaluar el equilibrio de agua subterránea, sobre todo en climas más áridos donde ocurren episodios importantes de recarga una vez en décadas y en los que los efectos del bombeo también pueden estar distribuidos de manera muy irregular hay incertidumbre sobre los mecanismos y las tasas de recarga de los acuíferos, como resultado de la complejidad hidrogeológica y datos de campo inadecuados pueden presentarse variaciones temporales importantes en los componentes de recarga de los acuíferos, como las asociadas con mantos freáticos descendentes, tendencias climáticas a largo plazo y actividades humanas. (Banco Mundial, 2011).

En la práctica, cuando se habla de sobreexplotación de un acuífero, invariablemente nos preocupa mucho más las consecuencias de la extracción intensa de agua subterránea (que el valor de la extracción). Es importante resaltar que, en este contexto, algunas de estas consecuencias pueden surgir mucho antes de que la tasa de extracción de agua subterránea exceda la recarga media a largo plazo. Por lo tanto, variará la manera en la que se interprete una situación específica, de acuerdo con el tipo de sistema acuífero de que se trate; es decir, con el volumen de almacenamiento explotable y la susceptibilidad a efectos secundarios irreversibles durante la extracción excesiva a corto plazo. (Banco Mundial, 2011).

Entre los impactos potenciales más críticos de la explotación intensa de acuíferos (se encuentra la salinización del agua subterránea, puesto que cancelará la posibilidad de seguirlos usando para suministro de agua potable y riego agrícola. Sin embargo, es importante diagnosticar la causa de la salinización del agua subterránea, ya que puede ser ocasionada por varios mecanismos de los cuales sólo algunos están relacionados con el bombeo de los acuíferos. (Banco Mundial, 2011).

### **3.2.38 Importancia de estimar la reposición de un acuífero**

El conocimiento de las tasas contemporáneas de recarga de los acuíferos es fundamental para la sustentabilidad del aprovechamiento de los recursos de agua subterránea. Además, es esencial para la gestión integrada de los recursos hídricos comprender los mecanismos de recarga de los acuíferos y su interacción con el uso del suelo. (Banco Mundial, 2011).

No obstante, la cuantificación de la recarga natural está sujeta a dificultades metodológicas, deficiencias de datos e incertidumbres resultantes significativas debido a: la gran variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación y escurrimiento la importante variación horizontal de los perfiles del suelo y de las condiciones hidrogeológicas. (Banco Mundial, 2011).

Sin embargo, para efectos prácticos, es suficiente hacer estimaciones y afinarlas posteriormente por medio del monitoreo y el análisis de la respuesta de los acuíferos a la extracción a mediano plazo. (Banco Mundial, 2011).

### **3.2.39 Caracterización geológica de los yacimientos**

#### **3.2.39.1 Modelo estratigráfico**

El objetivo básico del modelo estratigráfico es demostrar la arquitectura de las unidades de flujo presentes en el área determinada y su incidencia en la generación del modelo sedimentológico. (PDVSA-CIED, 1997).

El primer paso para la construcción de éste consiste en realizar una correlación regional con perfiles o registro eléctricos de pozos y a la vez una correlación detallada del horizonte estratigráfico prospectivo basándose en marcadores litológicos confiables

en el área, tales como lutitas marinas y lignitos, que muestran buena continuidad lateral en la secuencia sedimentaria y que se aprecian en los registros. (PDVSA-CIED, 1997).

### **3.2.39.2 Modelo estructural**

El objetivo de este proceso es definir la orientación y geometría de los elementos estructurales del área de estudio que pudieran intervenir en el entrapamiento del yacimiento de interés y permiten determinar la posición exacta del yacimiento en el subsuelo. La estructura a diferencia de la sedimentación, es un aspecto geológica de gran consistencia a lo largo de la secuencia estratigráfica, y de importancia al momento de definir eventos tectónicos. (Holmes, A., 1962).

La construcción del modelo estructural se basa en la sísmica y registros de pozos con el objeto de demostrar la profundidad de las estructuras a través de mapas estructurales de topes marcadores y planos de fallas. (PDVSA-CIED, 1997).

El Datum en las secciones estructurales es un valor numérico de profundidad desde el cual se cuelgan los perfiles de los pozos que se estudien. La dirección o rumbo de este tipo de secciones depende del objetivo para la cual se realiza; si el objetivo es mostrar las mayores prominencias estructurales, las secciones se realizan en dos direcciones, paralela al eje de la estructura y perpendiculares a la misma, en esta última se muestra el buzamiento real de la estructura como fallas existentes. (Holmes, A., 1962).

### **3.2.39.3 Modelo sedimentológico**

La caracterización sedimentológica de un yacimiento comprende una serie de procesos cuya finalidad es establecer la geometría, orientación, distribución y calidad física de los depósitos. Esta información es posteriormente integrada con la proveniente

de otras disciplinas permitiendo establecer la arquitectura de unidades de flujos y los yacimientos presentes en el área. (Holmes, A., 1962).

### **3.2.40 Correlación**

La correlación puede ser definida como la determinación de unidades estratigráficas o estructurales equivalentes en tiempo, edad, o posición estratigráfica. Con el propósito de preparar secciones y mapas del subsuelo, las dos fuentes principales de data de correlación son las secciones sísmicas y los perfiles eléctricos de pozos. Fundamentalmente, las curvas de registros de pozos eléctricos son usadas para delinear los límites de las unidades del subsuelo. (Rivadulla, R., 2004).

Una correlación precisa es sumamente necesaria para una interpretación geológica confiable. La data presentada por un registro de pozo es representativa de las formaciones del subsuelo encontradas en una perforación. Un registro correlacionado proporciona información del subsuelo, como los topes y bases de las formaciones, profundidad y tamaño de fallas, la litología, profundidad y espesor de las zonas productivas, porosidad y permeabilidad de zonas productivas y profundidad a las disconformidades. La información obtenida de los registros correlacionados es la materia prima usada para la preparación de mapas del subsuelo. Estos incluyen fallas, estructuras, saltos, discordancias y una variedad de mapas Isópaco o de espesor. En general, la correlación consiste en comparar la información existente entre diferentes pozos, para establecer un corte geológico de un área, lo cual requiere conocer los siguientes datos básicos de un pozo: la profundidad del horizonte seleccionado (tope y base), la altura de la mesa rotaria con referencia al nivel del mar (E.M.R) y la profundidad vertical verdadera (TVD). (Rivadulla, R., 2004).

Para el trabajo de correlación, es mejor correlacionar registros de pozos que tienen el mismo tipo de curvas; sin embargo, esto no siempre es posible. (Rivadulla, R., 2004).

### **3.2.41 Terminología general en las medidas de los registros**

El conocimiento de varias medidas de profundidad en los registros es importante para convertir las profundidades de los registros a profundidades usadas para el mapeo. La siguiente es una lista de medida, sus abreviaciones, y definiciones de términos en profundidad. (Rivadulla, R., 2004). (Figura 3.4).

1. KB: distancia desde la mesa rotatoria al nivel del mar.
2. MD (Profundidad medida): distancia medida a lo largo de la senda de un pozo taladrado desde el KB al TD (profundidad total del pozo) o cualquier punto de correlación entre ellos.
3. TVD (Profundidad vertical verdadera): distancia vertical desde el KB a cualquier punto del subsuelo.
4. SSTVD (Profundidad vertical verdadera del nivel del mar): distancia vertical desde el nivel del mar a cualquier punto del subsuelo.
5. Pozo vertical: pozo perforado con  $90^\circ$  respecto a la horizontal, usualmente el nivel del mar.

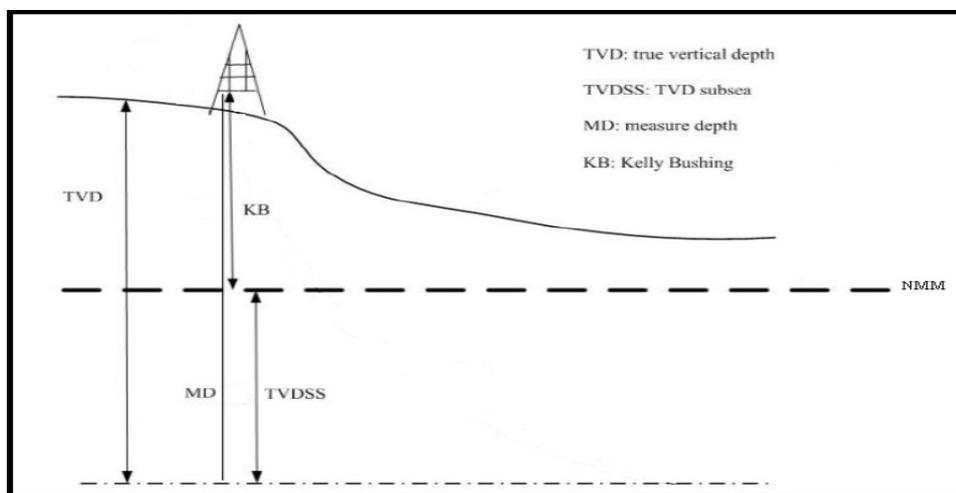


Figura 3.4 Diagrama que muestra la terminología general de medidas de registros. (PDVSA-CIED, 1997)

La medida SSTVD es la única medida de profundidad desde un datum común de referencia, el nivel del mar. Por lo tanto, SSTVD es la profundidad más frecuentemente usada para el mapeo. El registro de las medidas de profundidad de un pozo vertical o direccional para el mapeo son usualmente corregidas para SSTVD. Para pozos verticales el  $SSTVD = KB - TVD$ . (Rivadulla, R., 2004).

### 3.2.42 Mapas geológicos

Se definen de una manera muy general como aquellos que muestran la distribución de las rocas y la forma o distribución de las estructuras geológicas, bien sean de la superficie o del subsuelo. (Rivadulla, R., 2004).

Los mapas más utilizados en geología de yacimientos es el mapa estructural, el mapa isópaco, mapa de facies, el mapa de superficie de fallas, los mapas de isopropiedades, los mapas de geoquímica y geofísicos entre otros que contemplan con su información el modelo geológico establecido. (Rivadulla, R., 2004).

### **3.2.42.1 Mapas estructurales**

Los mapas estructurales del subsuelo por lo general son construidos para horizontes estratigráficos específicos, con el fin de mostrar en una forma plana las formas geométricas tridimensionales de estos horizontes. Dichos mapas son elaborados a partir de la correlación de datos obtenidos de registros de pozos e interpretaciones de secciones sísmicas. Por lo tanto, uno de los parámetros primarios a considerar en el desarrollo de una interpretación estructural razonable es la correcta elaboración de las correlaciones. (Rivadulla, R., 2004).

Está conformado por los contornos o curvas estructurales; estas son curvas que conectan puntos de igual valor con respecto a un nivel de referencia (generalmente el nivel del mar, por lo que a cada profundidad le sustrae el valor correspondiente a la mesa rotatoria). Estos no se cruzan ellos mismos, ni se cruzan a otros. Pasan entre puntos que tienen mayor o menos valor que el del contorno. Los intervalos deben ser constantes para todo el mapa. Su trazado da información sobre el rumbo del estrato mapeado, el buzamiento del mismo, la morfología de la estructura (pliegues, anticlinales, homoclinales, entre otros.), el desplazamiento y trazas de fallas. (Rivadulla, R., 2004).

### **3.2.42.2 Mapas de electrofacies**

Son mapas que representan las condiciones paleográficas reinantes durante el tiempo de depositación de las arenas, haciendo uso de las electrofacies. Las electrofacies son las respuestas del perfil de pozo ante una determinada litología saturada de fluidos, que permite establecer una columna litológica vertical, para identificar secuencias sedimentarias y correlacionar secciones de un pozo a otro. Los perfiles más utilizados con esta finalidad son potencial espontáneo y rayos gamma. (Rivadulla, R., 2004).

El mapa de electrofacies tiene como finalidad mostrar la naturaleza y la dirección de las gradaciones que puede sufrir un horizonte en particular, podemos visualizar la distribución de las distintas facies identificadas en cada pozo, lo que permite compararla con otros atributos de las arenas, para así complementar la evaluación de las condiciones de estas con respecto a la posición estructural, geometría, extensión y características de producción. (Rivadulla, R., 2004).

### **3.2.42.3 Mapas isópacos**

Es la representación cartográfica de las variaciones en espesor de cuerpos o de entidades en el subsuelo. Un mapa isópaco es extremadamente útil debido a que proporciona información directa sobre el lugar de máximo espesor, o de la terminación lateral de las formaciones porosas o permeables que pueden coincidir con trampas estratigráficas; además de proporcionar las bases para la interpretación de la historia geológica de una región durante la sedimentación de las formaciones consideradas, la forma de la cuenca, la posición de la línea de costa, áreas de levantamiento, entre otras. (PDVSA-CIED, 1997).

### **3.2.42.4 Mapas isópacos de arena neta**

Son representaciones en un plano horizontal del espesor permeable de un cuerpo de arena. (PDVSA-CIED, 1997).

### **3.2.43 Cuenca hidrográfica**

Es una zona de la superficie de la terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el

punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar. (Aparicio, F., 1992).

### **3.2.43.1 Características morfométricas de la cuenca**

La morfometría de cuencas hidrográficas y de drenajes, es una herramienta que permite determinar características importantes de forma y comportamientos en el entorno y en el flujo hídrico, que más adelante se convierten en base para el análisis de particularidades de cada una de las cuencas y para la posterior formulación de líneas de manejo prioritarias, relativas a la red hídrica. (Aparicio, F., 1992).

➤ El parteaguas: es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas. (Aparicio, F., 1992).

➤ El área de la cuenca (Km<sup>2</sup>): es define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas. (Aparicio, F., 1992). Esta área corresponde a toda la superficie drenada por la microcuenca, la cual intercepta el cauce principal en un producto de interés. (CVG-TECMIN, 2009).

➤ La corriente principal de una cuenca: es la corriente que pasa por la salida de la misma, esta se aplica solo a las cuencas exorreicas, las demás corrientes de una cuenca se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida, son llamadas cuencas tributarias o sub-cuenca. Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, es decir, entre mayor sea el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su respuesta a la precipitación. Por ello, se han propuesto un cierto número de indicadores de dicho grado de bifurcación, algunos de los cuales son los siguientes:

1. El orden de corrientes: este orden es el mismo que el orden de una cuenca. Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 tiene sólo tributarios de primer orden, dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, pero, una corriente de orden 2 y una de orden 3 forman otra de orden 3.
2. La densidad de corrientes ( $D_s$ ): definida como el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área.
3. La densidad de drenaje ( $D_d$ ): definida como la longitud de corrientes por unidad de área.  $D_s = \frac{N_s}{A}$ ,  $D_d = \frac{L_s}{A}$ , donde  $N_s$ : número de corrientes perennes e intermitentes.  $L_s$ : longitud total de las corrientes y  $A$ : área de la cuenca. (Aparicio, F., 1992).

➤ Patrón de drenaje: la distribución espacial de los drenajes en una cuenca se denomina patrón. Esta distribución está directamente relacionada con aspectos físicos de la cuenca como material parental, presencia de fallas, topografía, etc. En líneas generales, la determinación del patrón de drenaje en una cuenca, permite describir la relación de la red hídrica con las características fisiográficas del espacio en que se desarrolla. (Aparicio, F., 1992).

➤ Régimen: el régimen de un drenaje está definido por la disponibilidad de agua en su cauce, en función de las épocas de lluvia, y de grados de alteración del terreno. De esta forma se clasifican los drenajes en permanentes, si el flujo de agua por su cauce es continuo en cualquier época del año y a lo largo de todo el curso, semi-permanentes si el flujo hídrico está influenciado directamente tanto por las épocas de lluvia como por los cambios presentes a lo largo del cauce por uso del suelo principalmente, que hacen profundizar el flujo y presentar discontinuidad superficial, y finalmente

intermitentes cuando se presenta flujo superficial de agua solo en épocas de invierno. (Aparicio, F., 1992).

➤ Pendiente media del cauce principal ( $S_m$ ): establece la inclinación promedio que tiene los cauces desde el nacimiento hasta su desembocadura. La pendiente se determina usando la siguiente ecuación:

$$S_m = \frac{D_v}{L}$$

Donde:

$S_m$ : Pendiente media del cauce principal

$D_v$ : Desnivel del cauce. (Diferencia de cotas desde la naciente y la desembocadura).

$L$ : Longitud del cauce principal.

➤ Perímetro: Corresponde a la medida longitudinal en Km de la línea divisoria o parteaguas. (CVG-TECMIN, 2009).

➤ Longitud axial ( $L_{ax}$ ): Se expresa en Km y es la distancia en línea recta medida desde la desembocadura del colector principal hasta el punto más alejado de la microcuenca. (CVG-TECMIN, 2009).

➤ Longitud del cauce principal ( $L$ ): Se refiere al recorrido en Km del cauce principal de la microcuenca, desde su nacimiento hasta el punto de cierre. En el caso

de las cabeceras del cauce estén fuera del área de estudio, esta longitud se referirá únicamente al recorrido localizado dentro del área. (CVG-TECMIN, 2009).

➤ Tiempo de concentración (Tc): Es el tiempo requerido por un volumen unitario de escurrimiento superficial, para trasladarse desde el punto más remoto en la divisoria de la cuenca hasta la salida,  $T_c = \left( \frac{0,886 \times L^3}{H} \right)^{0,385}$  en horas.

Donde:

L: es la longitud del cauce principal (Km).

H: es la diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal (m). (CVG-TECMIN, 2009).

➤ Factor de Forma (Ff): Es un índice que permite establecer la tendencia morfológica general en función de la longitud axial de la cuenca, y de su ancho promedio. Una cuenca tiende a ser alargada si el factor de forma tiende a cero, mientras que su forma es redonda, en la medida que el factor forma tiende a uno. (Aparicio, F., 1992). Aquellas que poseen un del factor forma cercana a 0.875, valor ideal de una cuenca estrictamente circular, diremos que estamos en presencia de cuencas hidrográficas productoras de crecientes. Dos cuencas que tengan igual área y semejantes características fisiográficas e iguales condiciones de precipitaciones, pero factores de formas diferentes, presentarán diferentes crecientes. El factor forma se determina usando la siguiente ecuación:

$$Ff = \frac{A}{Lax^2}$$

Donde:

Ff: Factor forma.

Ac: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

Lax: Longitud axial de la cuenca (Km). (Aparicio, F., 1992).

➤ Coeficiente de compacidad (Kc): Es una relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia con la misma superficie de la cuenca. Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la similaridad con formas redondas, dentro de rangos que se muestran a continuación (FAO, 1985):

- a. Clase Kc1: Rango entre 1 y 1.25. Corresponde a forma redonda a oval redonda
- b. Clase Kc2: Rango entre 1.25 y 1.5 Corresponde a forma oval redonda a oval oblonga
- c. Clase Kc3: Rango entre 1.5 y 1.75 Corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

Kc será siempre mayor que 1, mientras mayor sea su valor, mayor será la irregularidad de la forma circular. El coeficiente de compacidad se determina usando la siguiente ecuación:

$$Kc = 0,285 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

Kc: Coeficiente de compacidad

P: perímetro de la cuenca Km

A: área de la cuenca Km<sup>2</sup>. (Aparicio, F., 1992).

➤ Índice de alargamiento (Ia): es otro parámetro que muestra el comportamiento de forma de la cuenca, pero esta vez no respecto a su redondez, sino a su tendencia a ser de forma alargada, en relación a su longitud axial, y al ancho máximo de la cuenca. (Aparicio, F., 1992). Aquellas cuencas que presentan valores mayores a uno, presentan un área más larga que ancha, obedeciendo a una forma más alargada, que la de aquellas donde la proporción entre largo y ancho de la cuenca, está inclinada hacia la segunda dimensión, directamente relacionada con la forma redondeada, determinada en los índices anteriores. Igualmente, este índice permite cuencas haciendo referencia a la dinámica rápida o lenta del agua en los drenajes y su potencial erosivo o de arrastre. El índice de alargamiento se determina usando la siguiente ecuación:

$$Ia = \frac{L_{max}}{A_{max}}$$

Donde:

Ia: Índice de alargamiento.

Lmax: Longitud máxima de la cuenca.

Amax: Ancho máximo de la cuenca. (Aparicio, F., 1992).

### **3.2.44 Sondeos eléctricos verticales**

Un sondeo eléctrico consiste en establecer la curva de variación con la profundidad de la resistividad aparente de un terreno a través de medidas en superficie realizadas con ayuda de un dispositivo de cuatro electrodos AMNB. La profundidad de investigación puede regularse variando la distancia entre los electrodos A, B de

corriente. Corrientemente se emplean las S.E.V. o S.E. para designar los sondeos eléctricos. (Astier, J., 1975).

Los dispositivos electródicos más empleados son el Schlumberger y el Wenner, ambos son rectilíneos y simétricos. Durante largo tiempo, algunos prospectores han preferido el dispositivo Wenner ya que con él, la medida de la diferencia de potencial  $\Delta V$  resulta más fácil al ser mayor la distancia MN. Sin embargo, con el instrumental disponible actualmente, esta ventaja ha perdido su razón de ser y el dispositivo Schlumberger es cada día más empleado por las razones siguientes:

a. En general, entre dos medidas sucesivas sólo se desplazan dos electrodos, lo que supone un ahorro de tiempo.

b. Las perturbaciones debidas a heterogeneidades locales en la proximidad de los electrodos MN, o AB, son limitadas y fácilmente comprobables por lo que no supone ninguna dificultad la eliminación de su influencia. (Astier, J., 1975).

La escuela Schlumberger, que es la seguida por la mayoría de los geofísicos, expresa la resistividad aparente  $\rho_a$  en función de la distancia  $AB/2$  y la representación grafica se hace en coordenadas logarítmicas. El que en abscisas se representen los valores de  $AB/2$  o una fracción constante de  $AB/2$ . La adopción de coordenadas logarítmicas está justificado para las dos (2), razones siguientes:

a. Poner de manifiesto que en prospección eléctrica la influencia de una capa disminuye con su profundidad.

b. Dar el mismo valor a las variaciones de resistividad de las capas conductoras y de las resistivas. (Astier, J., 1975).

### 3.2.44.1 Interpretación de los sondeos eléctricos

➤ **Primera fase:** consiste en individualizar las diferentes capas resistivas y conductoras que lo componen y calcular la resistencia transversal y calcular la resistencia transversal de las primeras y la conductancia longitudinal de las segundas. Generalmente, este trabajo se realiza por superposición a ábacos trazados en coordenadas logarítmicas. (Astier, J., 1975).

➤ **Segunda fase:** es la obtención de los espesores de las capas a partir de su conductancia o resistencia. Esto permite la identificación geológica de las capas y el conocimiento de su resistividad a escala regional. La identificación geológica de las capas resulta tanto más fácil cuanto menor es su número y más débil su buzamiento. Cuando la estratigrafía es más compleja y los buzamientos mayores, dicha identificación se ve facilitada por la disposición de los sondeos eléctricos en perfiles, lo que resalta la evolución de las curvas y facilita el seguir las capas de referencia. La columna de resistividades puede establecerse con ayuda de sondeos eléctricos sobre afloramientos, de testificaciones eléctrica o, lo que es preferible, de sondeos eléctricos de calibrado al lado de perforaciones. Estos últimos permiten determinar las resistividades verdaderas de las capas. En ausencia de afloramientos y perforaciones se realiza una estimación aproximada de las resistividades teniendo en cuenta la probable naturaleza geológica de las capas y los valores límites compatibles con la forma de las curvas de sondeos eléctricos. (Astier, J., 1975).

### 3.2.45 Sondaje eléctrico vertical

El método geoelectrico empleado en este estudio, consiste en la realización de sondajes eléctricos verticales (SEV) en su modalidad Schlumberger. El método consiste en registrar, a partir de mediciones realizadas en superficie, la distribución

vertical de resistividades aparentes bajo un punto central de una geometría usada. El dispositivo usado para aplicar el sondeo eléctrico vertical consiste en un conjunto de electrodos impolarizables los cuales se incrustan en el terreno como puntos de inyección (A y B) y puntos de medición (M y N), (Figura 2). Para generar y registrar un SEV se requiere de un circuito de emisión y uno de recepción.

El circuito de emisión está compuesto por una fuente de energía, un amperímetro para medir la intensidad de corriente, los electrodos de emisión (A y B) y cables de transmisión. El circuito de recepción está compuesto por un milivoltímetro electrónico de alta impedancia y dos electrodos para la medición del potencial (M y N) impolarizables (Auge, 2008) (Figura 3). La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia AB, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas (Auge, 2008).

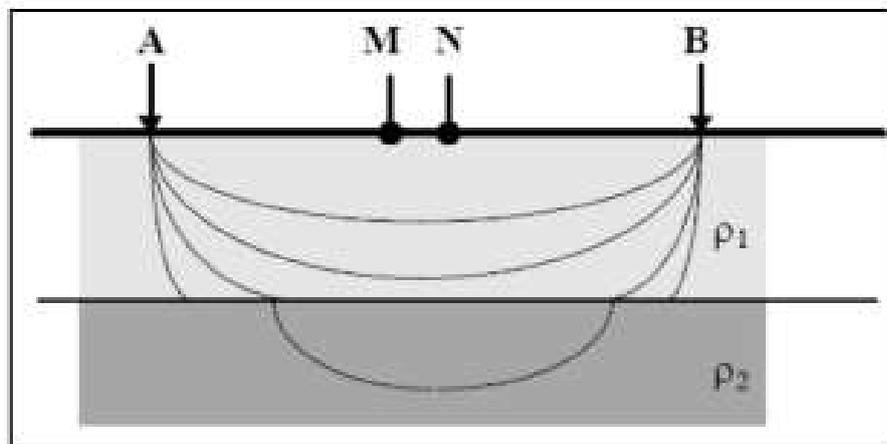


Figura 3.5 A medida que A y B se separan va penetrando en las capas más profundas (Orellana, 1982).

### 3.2.46 Configuración Schlumberger

La configuración Schlumberger es una geometría simétrica que debe cumplir con la condición de que la distancia que separa a A y B debe ser mayor o igual a 5 veces la distancia entre M y N (Auge, 2008), (Figura 3.6).

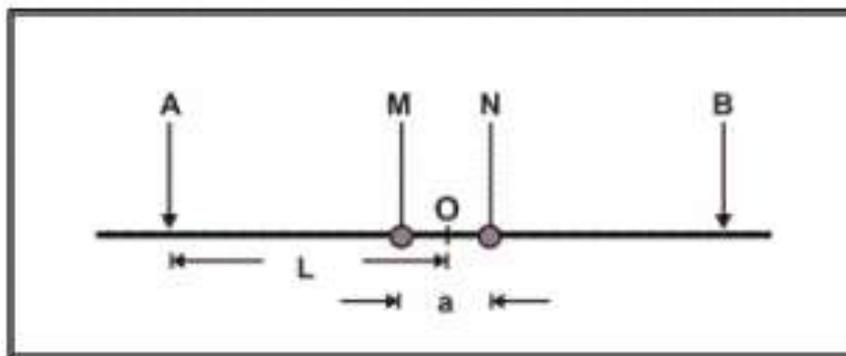


Figura 3.6 Configuración Schlumberger (Auge, 2008).

Los valores de resistividad aparente se representan en función de  $AB/2$  y su constante geométrica está dada por:

$$K = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2) \approx \frac{\pi L^2}{a}$$

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA DEL TRABAJO**

#### **4.1 Tipos de investigación**

La investigación a realizarse es de tipo descriptivo ya que la investigación descriptiva comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de las condiciones existentes en el momento. Suele implicar algún tipo de comparación o contraste, y puede intentar descubrir relaciones causa-efecto presentes entre variables no manipuladas, pero reales. (Ortiz, F., 2004).

Esta investigación se orientará hacia un nivel descriptivo ya que consistirá en generar información útil, la cual nos permitirá conocer el potencial de aguas subterráneas para ser explotadas para un fin de abastecimiento urbano en el Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra en la parroquia La Sabanita de Ciudad Bolívar.

#### **4.2 Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación es documental y de campo, ya que una investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos y una investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador

obtiene la información pero no altera las condiciones existentes. De allí su carácter de investigación no experimental. (Arias, F., 2006).

En este proyecto, el diseño de la investigación es de tipo documental ya que se recopilarán datos de precipitación, insolación media mensual y evaporación, y de campo debido a que se realizará una inspección del tipo de vegetación que existe en el área de estudio y se efectuarán mediciones de infiltración.

#### **4.3 Población de la investigación**

Según Ortiz, F., (2004), la población es un conjunto formado por todos los elementos que poseen una serie de características comunes a todos ellos y en este caso la población está constituida por los acuíferos que se encuentran en el subsuelo del área de estudio es decir, subyacentes al Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra.

#### **4.4 Muestra de la investigación**

Según Ortiz, F., (2004), la muestra es una parte o fracción representativa de una población, universo o colectividad que ha sido obtenida con el fin de investigar ciertas características del mismo. Por consiguiente, en esta investigación la muestra tiene las mismas dimensiones que la población.

#### **4.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Una investigación no tiene sentido sin la aplicación de técnicas para la recolección de información, estas conducen a la verificación del problema planteado, mientras que los instrumentos empleados llevan a la obtención de los datos de la realidad.

A continuación, se describen las técnicas e instrumentos a utilizar para la recolección de los datos de esta investigación.

#### **4.5.1 Observación directa**

Según Ortiz, F., (2004), la observación es participante directa cuando el investigador forma parte activa y asume comportamiento del grupo observado obteniendo así, los datos más importantes que estén en relación directa con el problema de investigación. Bajo esta técnica se realizó el inventario de pozos perforados de la zona, las mediciones topográficas, las pruebas de infiltración del terreno, el registro de detalles del medio biótico, entre otras.

#### **4.5.2 Revisión Bibliográfica**

Para llevar a cabo este trabajo resulta necesario acudir a fuentes bibliográficas que permitan ampliar los conocimientos acerca del tema en estudio. Esta técnica se basa en la obtención de información mediante la revisión de material bibliográfico tales como: textos, manuales de la organización, tesis e informes. Se utilizó esta técnica durante el acopio de información climatológica y cartográfica de la zona de estudio.

#### **4.5.3 Instrumentos utilizados**

1. Computadora
2. Escáner
3. Impresoras
4. Fotocopiadoras
5. Mapas de cuencas hidrográficas de la zona
6. Software computarizados

7. Calculadoras científicas
8. Resmas de papel bond tamaño carta
9. Estación de trabajo
10. Infiltrómetro de anillo simple
11. Cronómetro
12. GPS

#### **4.6 Flujograma de la investigación**

Para el desarrollo de este trabajo se realizó una metodología general, que abarca la integración de varias actividades a fin de estimar la recarga al acuífero, mediante técnicas y herramientas utilizadas, las cuales se pueden observar en detalle en el siguiente esquema. (Figura 4.1)

El desarrollo de esta investigación estuvo regido por el cumplimiento de las siguientes etapas:

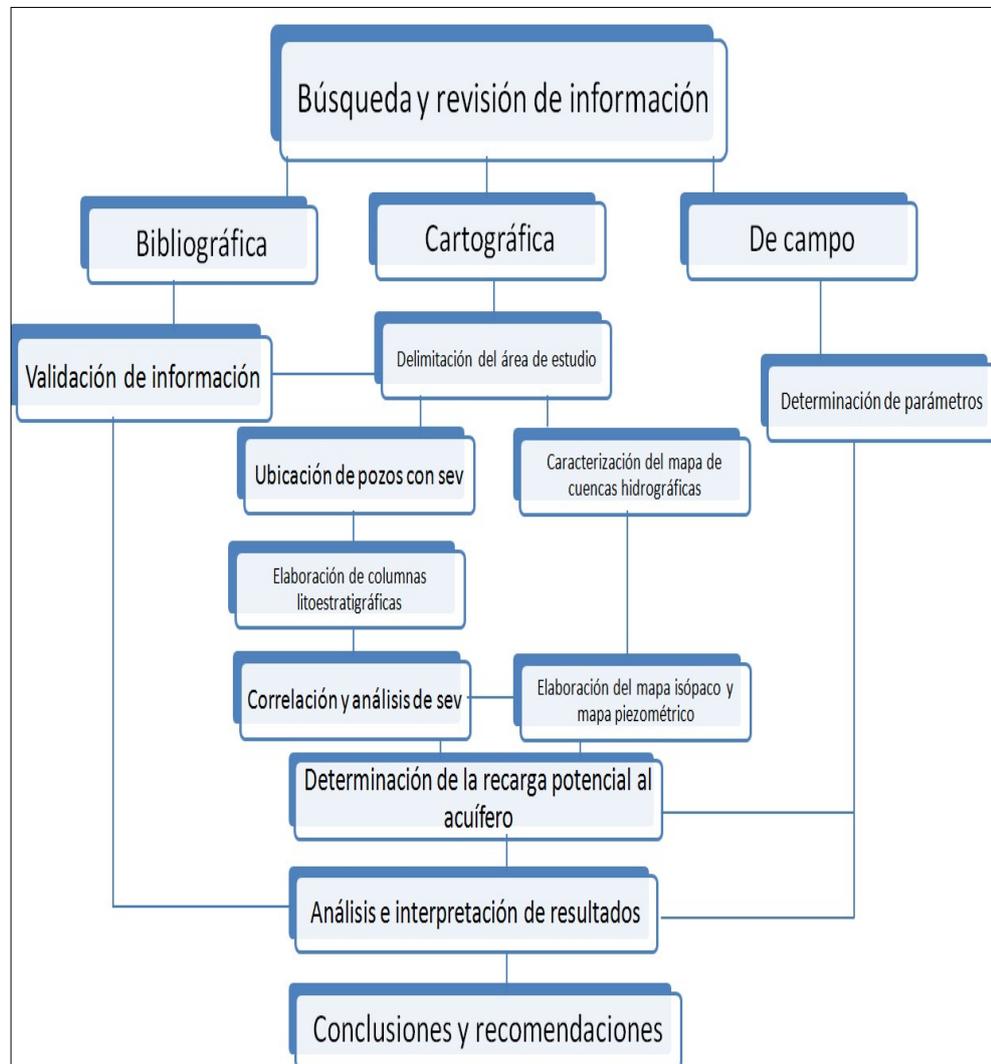


Figura 4.1. Flujograma de la investigación.

#### 4.6.1 Búsqueda y revisión de información

Esta etapa inicial se basó en la búsqueda de material bibliográfico cartográfico y obtención de datos de campo, a fin de validar la información necesaria y revisar referencias originales y actuales del campo para dar cumplimiento con el objetivo de este estudio.

#### **4.6.2 Delimitación del área de estudio**

El área objeto de estudio, ha sido previamente ensayada por los miembros de la cohorte II 2022 del Servicio Comunitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra, es por ello que se realizó la compilación y búsqueda de material y mapas que delimitan la zona de trabajo.

#### **4.6.3 Determinación de parámetros**

El potencial de las aguas subterráneas de un acuífero, representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero, para que no sea sobreexplotado. Dicho potencial se estima mediante la recarga al acuífero, que se determina conociendo en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo.

##### **4.6.3.1 Fracción de lluvia interceptada en el follaje**

Lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración ya que se considera que en un mes con lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky y Losilla, 2000). Además, se considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12% de la precipitación mensual. Sin embargo, en bosques muy densos, la retención de la lluvia se considera en un 20% (Linsley et al., 1958). Definiremos como coeficiente de follaje (Cfo) el porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno. Para el 12% de retención  $Cfo = 0.12$ . Para el 20 de retención  $Cfo = 0.20$ .

Para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplicará la siguiente ecuación:

- a. Ecuación para el cálculo de la retención mensual de lluvia por follaje.
- b. Si  $P$  es menor o igual a 5 mm/mes,  $Ret = P$  (Ec.4.1)
- c. Si el producto  $(P)(Cfo)$  es mayor o igual de 5 mm/mes,  $Ret = (P)(Cfo)$  menor de 5,  $Ret = 5$ .

Donde:

$P$  = Precipitación mensual del mes (mm/mes).

$Ret$  = Retención de lluvia en el follaje (mm/mes).

$Cfo$  = Coeficiente de retención del follaje, para bosques muy densos  $Cfo = 0.20$ , otros  $Cfo = 0.12$  (adimensional).

#### **4.6.3.2 Pruebas de infiltración**

De acuerdo a los conocimientos adquiridos durante la carrera, en el área se realizaron los ensayos de infiltración, con los cuales se obtuvieron los datos necesarios de infiltración del suelo para así determinar el promedio de la misma.

En esta etapa se tomaron puntos de interés para realizar los ensayos de infiltración, a fin de obtener una serie de datos para la elaboración de gráficos de descenso y velocidad en función del tiempo, todo esto con el objetivo de determinar la infiltración promedio y la escorrentía de los suelos.

Para la realización del ensayo de infiltración se hizo un reconocimiento correspondiente de la zona en estudio, posterior a ello se ubicaron los puntos donde se requería ejecutar dicho ensayo.

Se realizaron varias infiltraciones, las cuales se ejecutaron en los puntos previamente ubicados, la elaboración de las mismas se realizó con la utilización de un infiltrómetro de anillo simple, agua y un cronómetro.

Básicamente, para el desarrollo de esta experiencia hay que enterrar el cilindro unos pocos centímetros en el suelo. Luego, se agregó agua hasta una altura no mayor a diez (10.0) cm a modo de que ejerza una carga hidráulica. Finalmente, con la regla y el cronómetro, se mide la variación de la altura del agua en el tiempo. Al principio, esta variación será mayor y luego tenderá a estabilizarse. El tiempo de estabilización dependerá del tipo de suelo en el cual se esté haciendo la prueba.

Luego se tomaron las lecturas de tiempo cada vez que el nivel de agua descendía un (1) cm., hasta completar las lecturas necesarias.

Uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo ( $K_{fc}$ ), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación (Schosinsky y Losilla, 2000):

$$K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154 fc - 0.723 \quad (\text{Ec.4.2})$$

Donde:

$K_{fc}$  = coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura de suelo)  
(adimensional)

$f_c$  = Infiltración básica del suelo (mm/día)

Para aplicar esta ecuación, el rango de  $f_c$  ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día.

Para valores de  $f_c$  menores a 16 mm/día,  $K_{fc} = 0.0148 f_c/16$ .

Para valores de  $f_c$  mayor a 1568 mm/día,  $K_{fc} = 1$ .

Con las observaciones mencionadas en el párrafo anterior, el cálculo del coeficiente de infiltración por textura del suelo, se representa en la siguiente ecuación: (Schosinsky y Losilla, 2000):

Ecuación para calcular el coeficiente de infiltración por textura de suelo ( $K_{fc}$ ):

- a. -Si  $f_c$  se encuentra entre 16 y 1568 mm/día,  $K_{fc} = 0.267 \ln (f_c) - 0.000154 f_c - 0.723$ .
- b. -Si  $f_c$  es menor a 16 mm/día  $K_{fc} = 0.0148 f_c/16$
- c. -Si  $f_c$  es mayor de 1568 mm/día  $K_{fc} = 1$

El valor de  $f_c$  corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad, por considerar que este es el espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia. Dicho valor se obtiene en el campo, con la

prueba de anillos aplicada en la superficie del terreno. También se puede obtener con el permeámetro de Guelph o con la prueba de Porchet, ambas aplicadas a una profundidad no mayor de 30 cm. Sin embargo, pueden existir diferencias entre los métodos utilizadas.

El valor de  $K_{fc}$ , fue derivado para los valores de lluvia mensual. Por lo tanto, la fracción que infiltra debido a la textura del suelo, nos permite obtener la infiltración mensual debido a este concepto. Además del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, influye la pendiente del terreno y la vegetación. Estos coeficientes, vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo ( $C_i$ ), basado en la siguiente ecuación:

Ecuación para el cálculo del coeficiente de infiltración del suelo:

- a. Si  $K_p + K_v + K_{fc}$  es mayor de 1,  $C_i = 1$
- b. Si  $K_p + K_v + K_{fc}$  es menor o igual a 1,  $C_i = K_p + K_v + K_{fc}$  (4.3)

Donde:

$C_i$  = coeficiente de infiltración (adimensional)

$K_p$  = fracción que infiltra por efecto de pendiente (adimensional)

$K_{fc}$  = fracción que infiltra por textura del suelo (adimensional).

El coeficiente de infiltración es el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura

vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración. Los valores sugeridos de estos componentes, que conforman el coeficiente de infiltración se muestran en la Tabla 4.1.

#### 4.6.3.3 Cálculo de infiltración pluvial mensual

En el cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente, se han de considerar los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje (ecuación 4.1) y el coeficiente de infiltración (ecuación 4.3).

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente ( $P_i$ ) al suelo, está dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i)(P - Ret) \quad (4.4)$$

Donde:

$P_i$  = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en (mm/mes).

$C_i$  = Coeficiente de infiltración (adimensional) (ecuación 4.3).

$P$  = Precipitación mensual en (mm/mes) (dato meteorológico).

$Ret$  = Retención de lluvia mensual por follaje en (mm/mes) (ecuación 4.1).

En ningún caso el coeficiente de infiltración ( $C_i$ ) ha de ser mayor de 1, si así fuese, se le asigna a  $C_i$  el valor de 1.

Tabla 4.1. Componentes del coeficiente de infiltración (Schosinsky y Losilla, 2000).

<b>Por pendiente</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Kp</b>
Muy plana	0.02%-0.06%	0.30
Plana	0.3%-0.4%	0.20
Algo plana	1%-2%	0.15
Promedio	2%-7%	0.10
Fuerte	Mayor de 7%	0.06
<b>Por cobertura vegetal</b>		<b>Kv</b>
Cobertura con zacate menos del 50%		0.09
Terrenos cultivados		0.10
Cobertura con pastizal		0.18
Bosques		0.20
Cobertura con zacate menos del 75%		0.21

#### 4.6.3.4 Cálculo de la escorrentía superficial

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración. La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - P_i \quad (Ec.4.5)$$

Donde:

ESC = Escorrentía superficial en mm/mes.

P = Precipitación en mm/mes (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes (ecuación 4.1)

Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes (ecuación 4.4).  
(Schosinsky y Losilla, 2000).

#### **4.6.3.5 Balance del suelo**

Para el balance del suelo, en primera instancia se requiere la infiltración mensual al suelo, generada por la lluvia. Dicho cálculo se obtiene de acuerdo con el apartado de “Infiltración” descrito anteriormente. Posteriormente, es necesario conocer la capacidad de campo y el punto de marchitez del suelo. Estos valores, se obtienen directamente del laboratorio de suelos o se estiman mediante la Tabla 4.2. También es necesario conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua, en la zona donde se ha de realizar el balance. O sea, el balance se realizará en un prisma rectangular, que tiene en la cara superior un cuadrado de 1 metro de lado y de profundidad, la de las raíces, con capacidad de absorción del agua en el suelo. La Tabla 4.3 muestra la profundidad mencionada de raíces de algunas plantas. (Schosinsky y Losilla, 2000)

La forma natural de extracción de agua del suelo es mediante la transpiración de las plantas. Dicha extracción se realiza mediante las raíces; por lo tanto, la extracción de agua se realizará en una franja de suelo que tiene una profundidad igual a la mostrada en la Tabla 4.2. (Schosinsky y Losilla, 2000).

Tabla 4.2. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelo (Schosinsky y Losilla, 2000).

TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP%	CC%	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Arenoso	2-6	6-12	1,55-1,80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1,40-1,60
Franco	8-12	18-26	1,35-1,50
Franco-arcilloso	11-15	23-31	1,30-1,40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1,25-1,35
Arcilloso	15-19	31-39	1,20-1,30

La máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado, es igual a la capacidad de campo, es entonces cuando la planta tiene la máxima capacidad de transpiración. La mínima humedad que puede tener un suelo es aproximadamente igual al punto de marchitez, pues con humedades menores la planta muere. De lo anterior se deduce que un suelo, no saturado, a profundidades mayores que la profundidad de raíces se encuentra a capacidad de campo.

#### 4.6.3.6 Cálculo de la evapotranspiración

La evapotranspiración en una zona de cultivo se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando los estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua. Cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere. En ese sentido,

asumiremos que la evapotranspiración potencial real va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Esto es, si una planta a capacidad de campo evapotranspira 3 mm por día, siendo la capacidad de campo del suelo 12%, el punto de marchitez permanente de 2% y el suelo se encuentra a una humedad de 6%, la evapotranspiración potencial real (ETPR) de la planta será de:

$$ETPR = (HS - PM)(ET) / (CC - PM) \quad (4.6)$$

$$ETPR = ((6 - 2) / (12 - 2)) * 3 = 1.2 \text{ mm/d}$$

Donde:

ETPR (mm/día) = Evapotranspiración potencial real.

HS (%) = Humedad del suelo

ET (mm/día) = Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo.

CC (%) = Capacidad de campo.

PM (%) = Punto de marchitez permanente. (Schosinsky y Losilla, 2000).

Tabla 4.3. Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Grassi, 1976).

<b>PROFUNDIDAD DE RAÍCES</b>	
Cultivo	Metros
Alfalfa (pastos)	1-2
Algodón	1-1,7
Banano	0,5-0,8
Caña de azúcar	1,20-2
Frijol	0,5-0,7
Cebolla	0,3-0,5
Cítricos	1,20-2,0
Zacate	0,3-0,5
Bosques	2,0-3,0

Cada planta tiene una evapotranspiración diferente y va a depender de la temperatura de ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento y grado de desarrollo de la planta. (Schosinsky y Losilla, 2000).

En una cuenca o en una zona arbitraria de la cuenca, es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación, debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de las plantas existentes en una cuenca o en una zona de la misma. Por este motivo, es conveniente asumir una evapotranspiración, que se estime como promedio de la cuenca. Esta evapotranspiración promedio de la cuenca, la asumiremos que es igual a la evapotranspiración potencial (ETP).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, existen una serie de ecuaciones, algunas de ellas requieren una serie de datos, que pocas estaciones

meteorológicas los tienen. Por este motivo, se utilizará la ecuación de Blaney y Criddle: (Schosinsky y Losilla, 2000):

$$ETP \text{ (mm/mes)} = (8.10 + 0.46 T) P_s \quad (4.7)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial en (mm/mes)

T = Temperatura media mensual en (grados centígrados) (dato meteorológico)

P<sub>s</sub> = Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año (%)

Existen tablas que tienen los porcentajes de luz solar para las diferentes latitudes, tanto del hemisferio norte como del sur. (Schosinsky y Losilla, 2000)

#### **4.6.3.7 Determinación de la recarga al acuífero**

Para ser consistente con las unidades de los parámetros que se utilizarán en adelante, tal como capacidad de campo, punto de marchitez, humedad del suelo, precipitación y evapotranspiración se utilizarán unidades en milímetros. (Schosinsky y Losilla, 2000).

Para poder convertir la humedad del suelo, punto de marchitez y capacidad de campo a milímetros, los pasaremos de porcentaje por peso de suelo seco, tal como aparece en tablas de laboratorio de suelos, a porcentaje por volumen mediante la siguiente ecuación:

1. % por volumen = (% por peso de suelo seco) (densidad aparente)  
(Ec.4.8)

2. Milímetros de agua = (% de humedad por volumen)(profundidad de raíces en mm)  
(Ec.4.9)

Cuando ocurre la precipitación, el agua que infiltra se acumula en los poros del suelo, para llevarlo a capacidad de campo, que es la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo no saturado. Posteriormente, una vez terminado el aguacero, se lleva a cabo la evapotranspiración, tomando las raíces el agua que se encuentra en los poros del suelo. Si la cantidad de infiltración de la lluvia es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante del agua que infiltra, percola para recargar al acuífero. (Schosinsky y Losilla, 2000).

Al siguiente coeficiente, contenido en la ecuación 4.6, lo designaremos coeficiente de humedad (Ch):  $Ch = (\text{humedad de suelo} - \text{punto de marchitez}) / (\text{capacidad de campo} - \text{punto de marchitez})$ . (Schosinsky y Losilla, 2000).

Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (HSi). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) vendría a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no consideramos la evapotranspiración, el coeficiente de humedad, al final del mes, sería (C1):

$$C1 = (HSi - PM + Pi) / (CC - PM) \quad (4.10)$$

Donde:

C1 = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

HSi = Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en (mm).

PM = Punto de marchitez en (mm)

Pi = Precipitación que infiltra en (mm/mes)

CC = Capacidad de campo en (mm)

Si consideramos que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad, al final del mes sería:

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR) / (CC - PM) \quad (4.11)$$

$$ETR1 = (C1) (ETP)$$

Donde:

C2 = Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.

ETR1 = Evapotranspiración potencial real (mm/mes), considera la humedad correspondiente al coeficiente C1.

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes)

El valor de C1 corresponde al coeficiente de humedad máximo, ya que considera la humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de C2, corresponde al coeficiente de humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad del suelo anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máximo, C1. Por lo tanto, el coeficiente C2 se aproxima al coeficiente de humedad al final del mes.

Como la infiltración y la evapotranspiración ocurre durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2; o sea,  $(C1 + C2)/2$ ; esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado es:

$$ETPR \text{ (mm/mes)} = ((C1+C2)/2) ETP \quad (4.12)$$

Donde:

ETPR = Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona ocurrida durante el mes (mm/mes)

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1.

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes)

Ninguno de los coeficientes de humedad,  $C1$  y  $C2$ , pueden ser superiores a 1, ni menores a 0. En caso que  $C1$  o  $C2$ , sea mayor de 1, se tomará igual a 1. Si  $C1$  o  $C2$  son negativos se tomarán con valor de 0.

Definiremos como humedad disponible (HD), aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar. La humedad disponible está dada por la siguiente ecuación:

$$HD \text{ (mm/mes)} = HSi + Pi - PM \quad (4.13)$$

Donde:

HD = Humedad disponible (mm/mes)

HSi = Humedad de suelo inicial (al inicio del mes) (mm)

Pi = Precipitación que infiltra (mm/mes)

PM = Punto de marchitez (mm)

Si la humedad disponible es menor que la ETPR de la ecuación 4.12, la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad, sino que evapotranspirará únicamente la humedad disponible, debido a que no hay suficiente humedad para evapotranspirar la cantidad de agua indicada en la ecuación 4.12. Sin embargo, si la humedad disponible (HD) es mayor que la cantidad de agua indicada en la ecuación 4.12, la planta evapotranspirará la cantidad expresada en dicha ecuación. Por lo tanto la evapotranspiración real será:

Ecuación para el cálculo de evapotranspiración real (ETR): (Ec.4.14)

- a. -Si  $((C1+C2)/2)$  ETP es menor o igual a HD.  $ETR (mm/mes) = ((C1+C2)/2) ETP$
- b. .Si  $((C1+C2)/2)$  ETP es mayor que HD,  $ETR (mm/mes) = HD$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes (mm/mes).

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración (adimensional)

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1, (adimensional).

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes)

HD = Humedad disponible (mm/mes)

Para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, humedad de suelo final (Hsf), la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo y se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación para el cálculo de Hsf (4.15)

- a. -Si  $(HD+PM-ETR)$  es menor que la capacidad de campo,  $Hsf = HD+PM-ETR$

- b. -Si  $(HD+PM-ETR)$  es mayor o igual que la capacidad de campo,  $HSf = CC$
- c. -La  $HSf$  en ningún momento puede ser mayor a la  $CC$ .

Donde:

$HSf$  = Humedad del suelo al final (final del mes) (mm)

$HD$  = Humedad disponible (mm/mes)

$PM$  = Punto de marchitez (mm)

$ETR$  = Evapotranspiración real (mm/mes)

$CC$  = Capacidad de campo (mm)

Además del cálculo de la ecuación para la humedad del suelo al final del mes, es necesaria la humedad de suelo al inicio del mes, o sea, humedad inicial ( $HSi$ ). La humedad inicial de un mes dado es la siguiente:

$HSi$  = Es igual a la humedad de suelo final del mes anterior ( $HSf$  de ecuación 4.15) (Ec.4.16)

Donde:

$HSi$  = Humedad del suelo inicial (inicio de mes) (mm)

$HSf$  = Humedad del suelo final (final de mes) (mm)

#### 4.6.4 Caracterización del mapa de cuencas hidrográficas

Para la delimitación de las sub-cuencas se interpretó el siguiente material cartográfico:

- a. Ortoimagen de radar del Proyecto Cartosur a escala 1:50.000, hojas 7641-I, 7641-II del año 2003.
- b. Cartas de MARNR-LAGOVEN a escala 1:25.000, hojas 7641-I, 7641-II.

Se elaboró una síntesis a través de agregaciones y desagregaciones de las unidades hidrográficas, en donde se delimitó la principal divisoria del agua (entre las cuencas de los ríos Buena Vista y San Rafael), la cual consistió en la obtención de los parámetros que ayudan a definir el comportamiento hídrico de una sub-cuenca, tales como:

1. Área (A) expresada en Km<sup>2</sup>.
2. Perímetro (P) expresada en Km.
3. Longitud axial (Lax) se expresa en Km.
4. Longitud del cauce principal (L) en Km.
5. Factor forma (Ff): se utilizó la siguiente fórmula,  $Ff=A/(Lax)^2$ , donde: A es el área de la cuenca (Km<sup>2</sup>) y Lax es la longitud axial (Km).

6. Coeficiente de compacidad ( $K_c$ ): este se realizó con la siguiente fórmula  $K_c = 0,282 \frac{P}{A^{1/2}}$ , donde P es el perímetro de la cuenca (Km) y A es el área de la cuenca en  $\text{km}^2$ .

7. Tiempo de concentración ( $T_c$ ): este se calculó con la siguiente fórmula  $T_c = \left( \frac{0,886 \times L^3}{H} \right)^{0,385}$  en horas, donde L es la longitud del cauce principal (Km) y H es la diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal (m).

8. Pendiente media del cauce principal ( $S_m$ ): El cálculo de la pendiente media del cauce principal se realizó utilizando la fórmula para cuenca relativamente llanas,  $\left[ \frac{(H^M - H^m)}{100 \times L} \right]$  (m/Km), donde ( $\Delta H = H^M - H^m$ ) es el desnivel del cauce principal (m) y L es la longitud del cauce principal (Km).

#### 4.6.5 Ubicación de pozos con SEV

La ubicación de los pozos excavados o perforados existentes en las adyacencias del Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra fue llevada a cabo por los responsables de la autoría intelectual de esta investigación, a fin de constatar la presencia de aguas subterráneas en el área de estudio.

Se procedió a realizar una evaluación geofísica mediante un sondeo eléctrico vertical (SEV), específicamente utilizando una disposición de electrodos mediante el criterio o método de Werner, para determinar la conductividad hidráulica de los diferentes estratos, nivel freático y profundidad del tope de roca, con el fin de determinar la posible ocurrencia de acuíferos para el aprovechamiento de agua subterránea, mediante la construcción de pozos profundos para abastecer la demanda del Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra.

#### **4.6.6 Elaboración y correlación de columnas lito-estratigráficas y de SEV**

De acuerdo a la descripción estratigráfica de los horizontes que fueron interceptados o atravesados por cada uno de los pozos perforados en el área de estudio es posible la construcción de un modelo a través del cual se correlacione el estrato acuífero predominante.

#### **4.6.7 Elaboración de mapas**

##### **4.6.7.1 Mapa piezométrico**

El mapa piezométrico se ha planteado con la finalidad de representar la piezometría de la zona y las principales direcciones de flujo subterráneo en un único soporte cartográfico en el entorno de los sistemas de información geográfica.

La elaboración de un mapa de estas características debe apoyarse, como paso previo, en la definición de un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico y en la determinación de las condiciones de contorno que rigen el flujo subterráneo en los distintos acuíferos estudiados. La integración del conocimiento hidrogeológico acerca de la estructura y del funcionamiento de los acuíferos permitirá interpretar, para una fecha y en unas condiciones de flujo determinadas, la información suministrada por las redes de observación de las aguas subterráneas y por los datos hidrológicos complementarios.

El mapa piezométrico se realiza a escala 1:50.000, los contornos fueron trazados cada 1 metro, seguidamente se procede a escanearlo para su digitalización en AutoCAD 2010.

#### 4.7 Cálculo de recarga potencial al acuífero

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la recarga al acuífero, la que se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR \quad (4.17)$$

Donde:

$R_p$  = Recarga potencial mensual en mm/mes.

$P_i$  = Precipitación que infiltra en mm/mes

$H_{Sf}$  = Humedad del suelo al final del mes en mm

$ETR$  = Evapotranspiración real en mm/mes.

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **5.1 Caracterización pluviométrica de la zona de estudio**

Para la caracterización pluviométrica, necesaria en la estimación de la recarga de los acuíferos del área de estudio, se muestran en el apéndice A los parámetros hidroclimáticos requeridos a tal efecto (Precipitación media mensual, Insolación media mensual y Evaporación

El área del proyecto se enmarca en la zona de vida Bosque seco Tropical (Bs-T), según la clasificación climática de Holdridge. Y de acuerdo con esto, el área se clasifica como clima cálido tropical de sabana isotérmico (Awgi), caracterizado por presentar un período de lluvia y otro de sequía, bien definidos, con una oscilación térmica promedio inferior a los 5 °C.

##### **5.1.1 Precipitación**

Para caracterizar pluviométricamente el área de estudio se analizó la información de las lluvias medidas en la estación: Ciudad Bolívar-Aeropuerto, Tipo C1, Serial: 3882, administrada por el componente de Aviación Militar de las Fuerzas Armadas Bolivariana.

Se recabó información de precipitación correspondiente al lapso comprendido 1.987-2007 (20 años). La tabla 5.1, muestra los valores medios (MED), máximos (MÁX) y mínimos (MÍN) de la precipitación medida en la estación Ciudad Bolívar-Aeropuerto. El régimen pluviométrico es de tipo unimodal, es decir, se registra un solo tope de lluvia durante el año. Este ocurre en los meses del verano astronómico (junio, julio y agosto), lo cual corresponde con la época de mayor actividad de la

convergencia intertropical, responsable directa de la distribución temporal de las lluvias en el territorio venezolano

En estos tres (3) meses se recoge más del 54% del volumen total de precipitación anua, donde el valor más bajo de precipitación se registra en los tres (3) primeros meses del año (enero, febrero y marzo).

Tabla 5.1 Precipitación media mensual en (mm). Estación Ciudad Bolívar-Aeropuerto. Edo. Bolívar. Período 1.987 - 2.007. (INAMEH, 2015).

Prec.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANU AL
MED	17.6	11.0	11.3	22.6	102.9	161.2	184.9	159.8	114.3	87.9	72.0	52.1	83.1
MAX	131.0	93.0	120.0	150.0	357.0	376.0	495.0	507.0	332.0	620.0	310.0	420.0	325.9
MIN	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	41.0	31.0	33.0	6.0	13.0	6.0	3.0	11.25

La precipitación media mensual para el período analizado, registrada en la Estación Ciudad Bolívar-Aeropuerto corresponde a 83.13 mm. La Precipitación, responde a un régimen de tipo unimodal, es decir, presenta un valor medio máximo de lluvia mensual promedio espacial para el período de 184.9 mm para el mes de julio y un mínimo de 11.0 mm para el mes de febrero respectivamente. La época de lluvia se inicia en el mes de mayo y se mantiene hasta el mes de diciembre; con una duración de ocho (8) meses, siendo el mes de julio el más lluvioso en promedio para el período climático considerado.

En la figura 5.1 se presenta la Precipitación media anual para el período considerado.

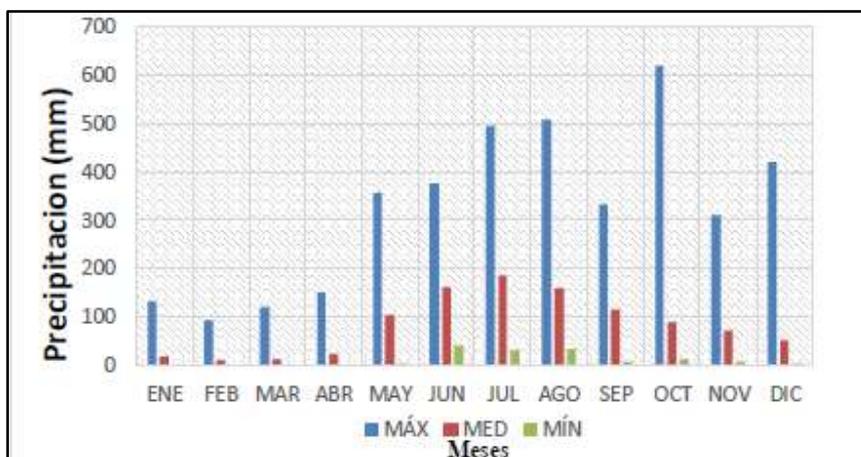


Figura 5.1 Distribución anual de la precipitación (mm). Estación Ciudad Bolívar-Aeropuerto. Período 1987 - 2007 (INAMEH, 2015).

## 5.2 Distribución superficial de los tipos de vegetación presentes en el área de estudio.

El área de captación de la cuenca fue delimitada aproximadamente en 4.81 hectáreas, las cuales están conformadas por 1.50 ha de área edificaciones, 1.51 ha de área pavimentada y 1.80 ha de vegetación (tabla 5.2), dichos límites del área de captación se pueden apreciar en la figura 5.2.

Tabla 5.2 Distribución de áreas del campus universitario según uso de la tierra.

LOTE	Parcela	Tipo de	Area		
		Cobertura	Parcial		
		del Suelo	(m <sup>2</sup> )	(ha)	%
Total cuenca	Edificación	15003,00	1,500	31,19	
	Pavimento	15102,00	1,510	31,40	
	Área verde	17992,00	1,799	37,41	
	Totales	48097,00	4,810	100,00	



Figura 5.2 Detalle de área de captación.

Para el establecimiento de la distribución superficial de los tipos de vegetación presentes en la zona ocupada por Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente, se tomaron datos y características del lote de terreno específico en la imagen de satélite del área de la zona de estudio, tales resultados se muestran en la Tabla 5.3-:

Tabla 5.3. Distribución superficial de los tipos de vegetación

Tipo de Vegetación	Campus universitario	
	(ha)	(%)
Gramíneas	0.510	28.35
Arbustos	0.339	18.84
Arboles	0.950	52.81
<b>Total</b>	<b>1.799</b>	<b>100,00</b>

### 5.3 Características de la infiltración en el área de estudio

Es un hecho conocido que la infiltración de las aguas pluviales y las aportaciones laterales que drenan en un área o cuenca hidrológica, aunado a las extracciones producidas por la evaporación, la evapotranspiración o el bombeo, son procesos cuyos efectos inciden en las variaciones de los niveles del agua en los pozos y, por ende, del almacenamiento subterráneo. La separación y estimación certera de cada uno de estos parámetros, es la meta fundamental cuando se intenta realizar un balance hidrogeológico (Pérez, H., 2010).

También acota Pérez Hernández (2010):

“Las pruebas de infiltración realizadas en los suelos del sur de los estados Anzoátegui y Monagas, han mostrado seguir aceptablemente patrones según el modelo de Philip. La evaluación de la recarga vertical en el sur de Monagas, durante mediciones en pozos dispuestos en una malla rectangular durante el año 1981 en el área actual de Carabobo (Cerro Negro), han conducido a valores de la recarga vertical durante el lapso de seguía del orden de 3 cm/mes y las características hidráulicas de los acuíferos (Transmisibilidad y Pendiente calculadas), no difieren notablemente de los valores obtenidos mediante pruebas de bombeo en otras zonas de la región. Las mediciones de niveles en los campos de pozos en las inmediaciones del río Orinoco, así como los gradientes hidráulicos observados, indican la existencia de un significativo aporte de flujos subterráneos desde las mesas hacia este río, lo que quizás tenga una influencia regional que pueda extenderse más allá de los llanos orientales”.

En el Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la UDO se realizaron cuatro (4) pruebas de infiltración utilizando el método de anillo simple en las ubicaciones mostradas en la Figura 5.3 y los datos de campo y del procesamiento respectivo por el método de Kostiakov se muestran en el Apéndice A.

El valor de infiltración básica obtenido, se muestra en la Tabla 5.3 que se presenta a continuación:



Figura 5.3 Ubicación de ensayos de infiltración.

En la tabla 5.4, en las figuras 5.5 y 5.6 y en los apéndices A.1 hasta A.4 se presentan los resultados de los ensayos de infiltración realizados en el campus universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente en la Sabanita.

Tabla 5.4 Resumen de resultados de pruebas de infiltración.

Prueba de infiltración No	Coordenadas UTM de ubicación de los ensayos		Infiltración básica (mm/min)
	Norte	Este	
I-1	897127	438884	1.04
I-2	897244	438917	1.31
I-3	897298	438867	0.74
I-4	897430	438832	2.41

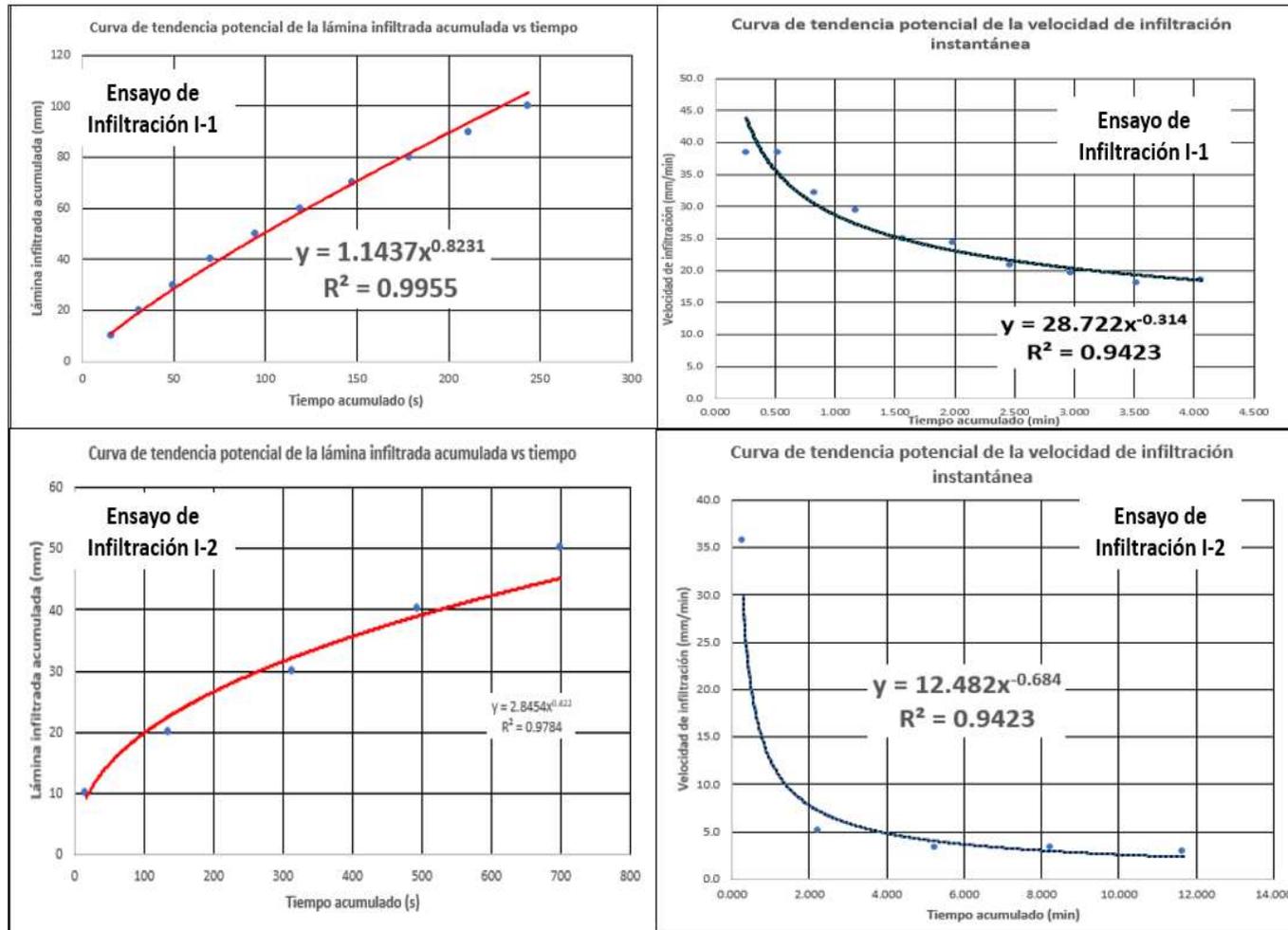


Figura 5.4 Gráficas de lámina infiltrada y velocidad de infiltración de los ensayos I-1 e I-2.

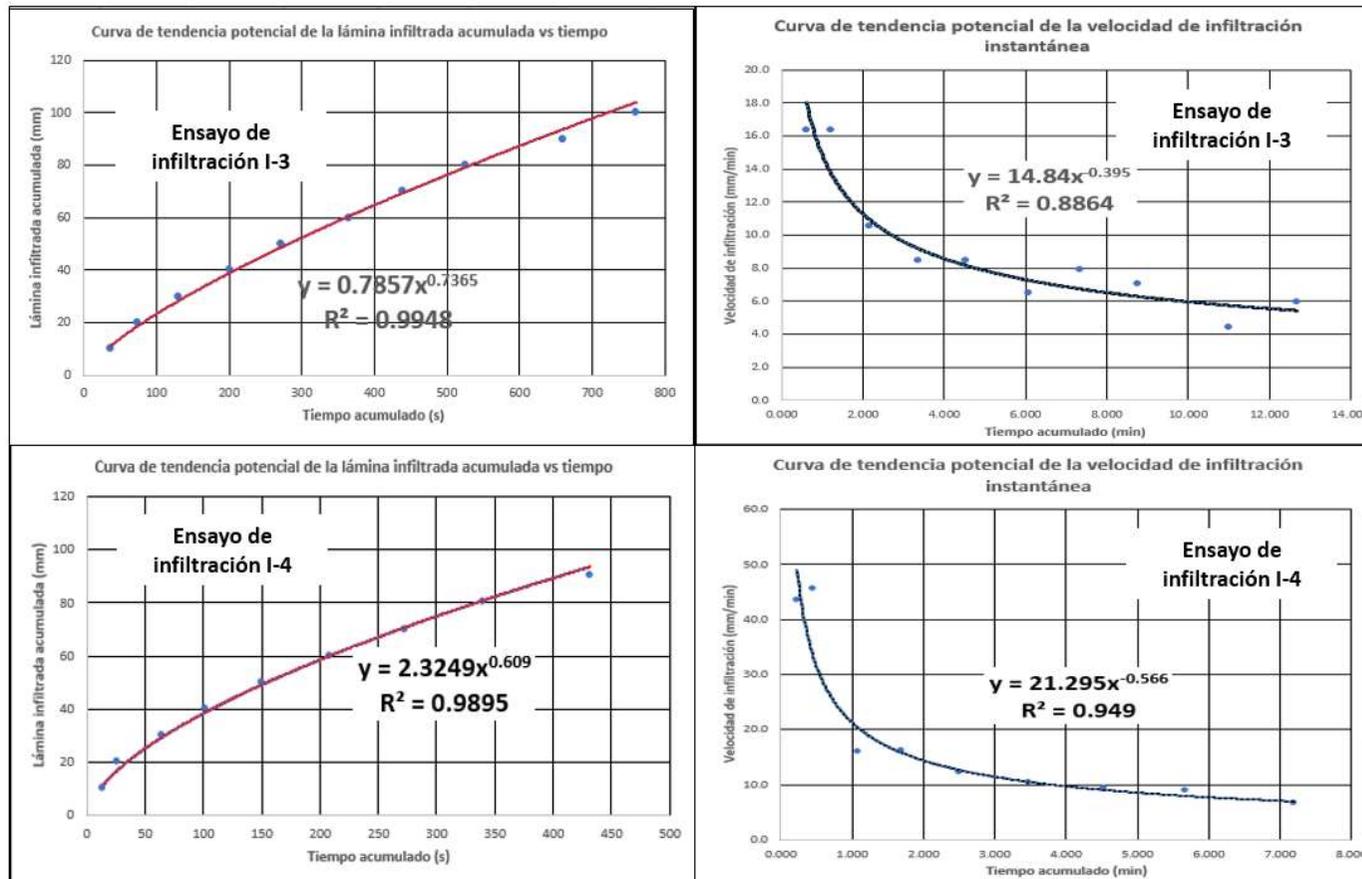


Figura 5.5 Gráficas de lámina infiltrada y velocidad de infiltración de los ensayos I-3 e I-4.

Se considera que un valor de infiltración básica de 12.5 cm/hr es representativo de la zona de estudio.

De acuerdo al criterio de Schosinsky y Losilla (2000), debido a que la infiltración básica ( $f_c$ ) es de 1.87 mm/min (3000 mm/día) entonces se encuentra por encima del rango (entre 16 mm/día y 1568 mm/día) para aplicar la ecuación 4.1 de donde obtenemos el valor del coeficiente de infiltración por textura del suelo ( $K_{fc}$ ). Por los tanto, se adopta un valor de:

$$K_{fc} = 1.$$

Debido a que el Coeficiente de Infiltración del Suelo ( $C_i$ ) depende de los factores  $K_{fc}$ ,  $K_p$  (fracción que infiltra por efecto de pendiente) y  $K_v$  (fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal), se procede a la estimación de estos dos últimos parámetros de acuerdo a los valores de la Tabla 3.2 de Schosinsky y Losilla (2000) y a las características de cada lote de terreno presentados por CVG- TECMIN, C.A. (2011) en el plano del área, Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal.

Tipo de Vegetación	Kv por tipo de vegetación		
		(ha)	Kv* Área
Árboles adultos (mayor 20 años)	0.20	0.950	0.190
Arbustal	0.19	0.339	0.064
Gramíneas	0.21	0.510	0.107
<b>Total</b>		<b>1.799</b>	
<b>Kv ponderado</b>			<b>0.200</b>

En vista de que el Coeficiente de infiltración del suelo ( $C_i$ ) depende de la sumatoria de  $K_{fc}$ ,  $K_v$  y  $K_p$  y considerando que la misma es mayor de 1 en los tres (3) casos, entonces se tiene que para todo el Campus Universitario de la UDO en la parroquia La Sabanita:

$$C_i = 1$$

Por otro lado, la Infiltración Pluvial Mensual ( $P_i$ ) depende a su vez de  $C_i$ , de la Precipitación mensual ( $P$ ) y de la Retención de lluvia mensual interceptada por el follaje ( $Ret$ ). Se hace necesario calcular estos parámetros para cada lote de terreno significativo del área de estudio para cada mes.

#### **5.4 Relación entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas del área**

El área de estudio drena en su totalidad hacia un afluente directo del río Orinoco, tal como es el río San Rafael y hacia cursos de agua intermitentes que fluyen hacia las planicies de inundación de dicho afluente del río Orinoco. Cabe destacar que hacia el oeste del área de estudio se ubica el río Buena Vista el cual también drena sus aguas hacia la margen derecha del río Orinoco.

El río Orinoco se caracteriza por poseer una planicie de inundación muy amplia a ambos márgenes, donde el área de la planicie de inundación es generalmente mayor en el margen izquierdo, lo cual se atribuye a la mayor cantidad de sedimentos transportados por los ríos tributarios del margen izquierdo, en comparación con los ríos que drenan del Macizo Guayanés en el margen derecho (Hamilton y Lewis, 1990). Sin embargo, en la margen derecha también se encuentran lagunas, las cuales están íntimamente ligadas con la dinámica fluvial del río. Desde el punto de vista hidrológico, el canal del río y su plano de inundación se consideran como una unidad,

ya que el agua y los sedimentos son comunes para ambas áreas. En el margen derecha del río Orinoco, específicamente inserto dentro de la zona urbana de Ciudad Bolívar se encuentra la mayor superficie a ser cubierta por el estudio, por lo que se han delimitado las dos (2) principales unidades hidrográficas que se encuentran en el entorno del área de estudio como son el río San Rafael y el río Buena Vista:



Figura 5.6 Ríos San Rafael (línea azul al este) y Buena Vista (línea azul al oeste) y línea divisoria de cuencas en color marrón. Nótese que el área de estudio se encuentra ubicada en la vertiente este (Modificado de imagen de satélite Landsat de Google Earth, 2023).

#### 5.4.1 Sub-cuenca del río San Rafael

El río San Rafael es de régimen permanente que drena sus aguas directamente hacia el río Orinoco. Esta sub-cuenca se localiza en la parte oriental del área de estudio y se considera que drena la totalidad de la misma. En algunos puntos de su curso, el cauce original ha sido alterado para la ubicación de espacios antrópicos (edificaciones)

que han usurpado una fracción importante de las planicies de inundación del río San Rafael.

En vista de que el área de estudio se encuentra ubicada dentro de la cuenca del río San Rafael, se considera prudente y necesario realizar la caracterización morfométrica de dicha cuenca. En ese sentido, se presenta en la tabla 5.6 y en la figura 5.8 los parámetros morfométricos de dicha cuenca.

Tabla 5.6 Parámetros morfométricos de la cuenca del río San Rafael.

Parámetro	Nomenclatura	Unidad	Fuente o Fórmula	Valor
Área	A	Km <sup>2</sup>	Medido en el Plano	21.0
Perímetro	P	Km	Medido en el Plano	23.5
Longitud axial	Lax	Km	Medido en el plano	9.8
Longitud cauce más largo	Lcp	Km	Medido en el plano	11.9
Desnivel máximo de Lcp	$\Delta H$	m	Medido en el plano	117.0
Factor forma	Ff		$Ff = \text{Área} / Lax$	2.14
Coefficiente de compacidad	Kc		$Kc = 0.282 (P / A^{0.5})$	1.446
Tiempo de concentración	Tc	min	$Tc = (0.886 \times Lcp^3 / H)^{0.385}$	2.66
Pendiente del cauce principal	Scp	m/km	$Sm = (\Delta H / (100 \times Lcp))$	0.09832

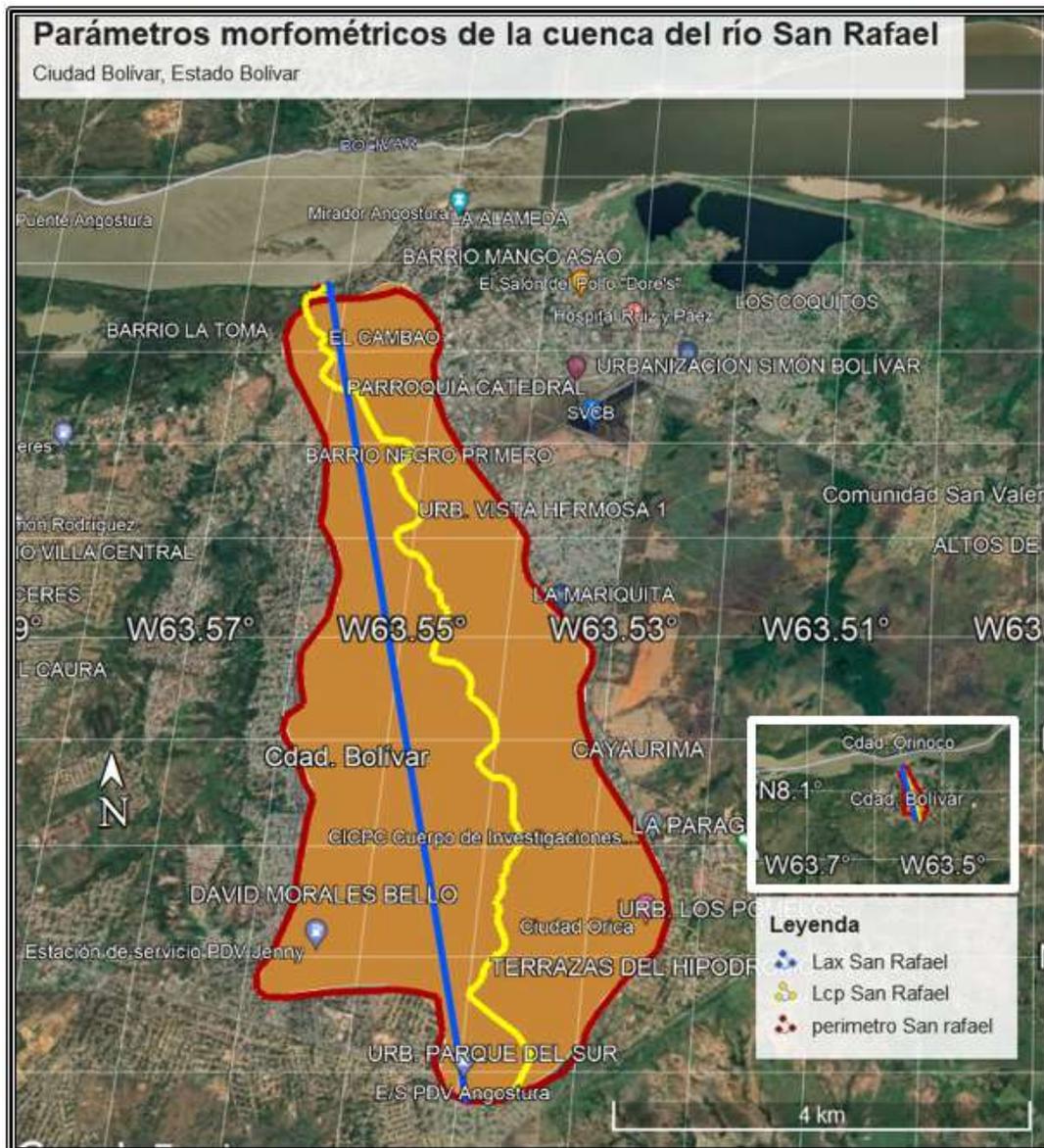


Figura 5.7 Parámetros morfométricos de la Cuenca del río San Rafael.

#### 5.4.2 Sub-cuenca del río Buena Vista

Aun cuando el río Buena Vista es parte importante de la hidrografía superficial de la zona, es necesario acotar que las aguas de escorrentías superficiales que drenan desde el Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra, por encontrarse

al este de la vertiente divisoria de aguas entre las cuencas del río San Rafael y el río Buena Vista, drena las aguas pluviales hacia el río San Rafael. En ese orden de ideas, se puede asumir que el posible acuífero existente o que subyace al área de estudio es alimentado o recargado desde el sur; es decir, desde las zonas más elevadas de la parroquia La Sabanita y a su vez drena las aguas del acuífero, en forma similar a las aguas de escorrentía superficial, en el río San Rafael el cual es afluente del río Orinoco.

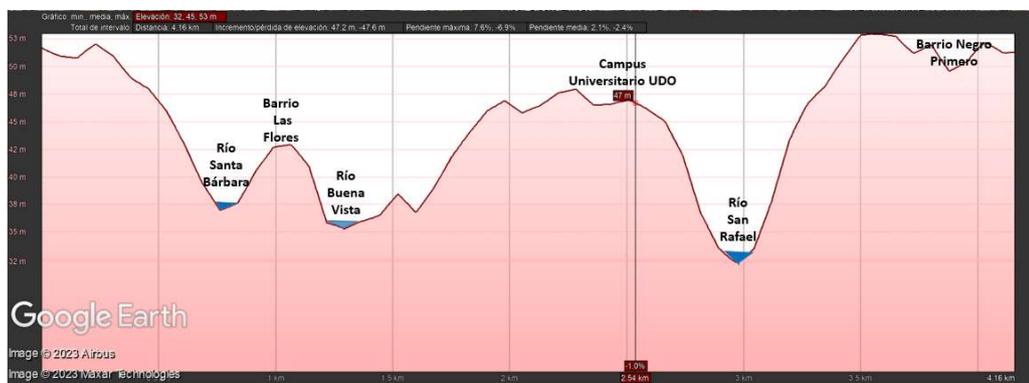


Figura 5.8 Perfil transversal entre las cuencas hidrográficas adyacentes.

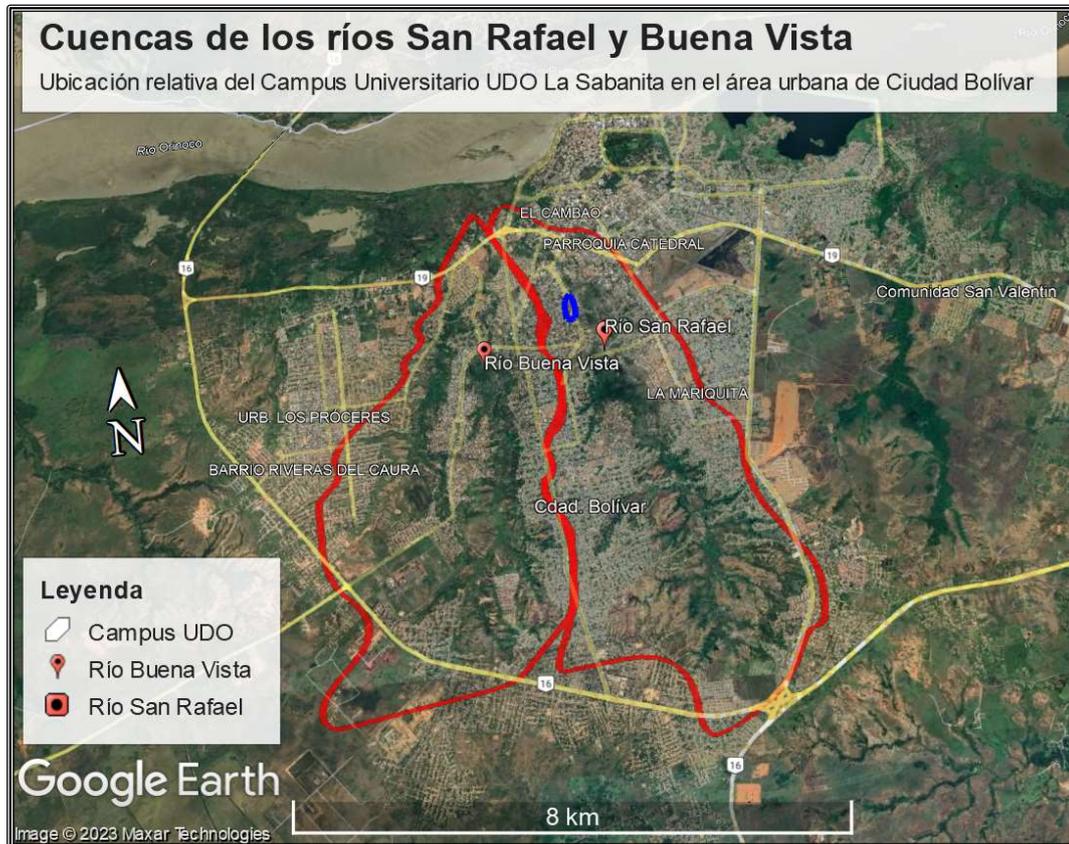


Figura 5.9 Ubicación relativa del Campus Universitario UDO (polígono línea azul) en La Sabanita y su relación con las cuencas de los ríos San Rafael y Buena Vista.

### 5.5 Construcción y análisis del mapa de isolíneas piezométricas

En el proceso de elaboración del mapa piezométrico general, se ha recopilado en el área de estudio, la información referente a las características de las infraestructuras de los pozos de agua perforados o excavados que se ubican en el entorno del Campus Universitario de la Escuela de ciencias de la Tierra en la parroquia La Sabanita.

Tabla 5.7 Inventario de pozos de agua existentes en el entorno del área de estudio.

No del Pozo	Tipo	Estado	Profundidad (m)	Nivel Estático (m)	Propietario del pozo	Ubicación
P1	Perforado	operativo		5.0	Comercial Agua Rocca	Av. Sucre
P2	Perforado	operativo		6.0	Ferretería materiales acueducto y riego	Av. Sucre
P3	Perforado	operativo	15.0	5.0	Jhonny Sarti	Av. Sucre
P4	Perforado	operativo	48.0	6.0	Ovidio Jhonson	Av. Sucre
P5	Excavado	operativo	12.5	5.0	No identificado	Barrio San Simón
P6	Perforado	operativo	12.0	5.0	No identificado	Calle San Simón No 57
P7	Perforado	operativo	17.5	5.0	No identificado	Calle San Simón No 59



Figura 5.10 Ubicación relativa de los pozos inventariados (Modificado de imagen de satélite Landsat de Google Earth, 2023).

La representación cartográfica de las redes de control piezométrico permite comprobar que los datos de nivel piezométrico proceden de puntos de control distribuidos por la zona oeste del área de estudio, con un amplio rango de profundidades de obra. Estos puntos de control se han definido en su totalidad como pozos perforados los cuales se encuentran operativos para el momento de elaboración del presente estudio. Este nivel piezométrico regional representa el nivel de equilibrio resultante de los distintos niveles piezométricos que haya cortado cada sondeo o piezómetro desde su embocadura hasta su base, en función de sus características constructivas, de las características hidrogeológicas de los materiales que haya atravesado, y de las condiciones hidrodinámicas existentes en el momento de efectuar las medidas.



Figura 5.11 Plano piezométrico del área de estudio.

### 5.5.1 Patrones preferenciales de flujo de agua subterránea en el área de estudio.

Tanto las isolíneas piezométricas como la topografía del área de estudio hace notar que los patrones preferenciales de flujo que tienen dirección convergente hacia el Este, alimentan al río San Rafael ubicado del área de estudio. Por otra parte, la recarga de los acuíferos ocurre en dirección de Sur a Norte desde los acuíferos adyacentes en la parte Sur a la zona de estudio. Es de hacer notar, que necesariamente las isolíneas piezométricas deberían delimitar, al igual que las curvas de nivel de la superficie topográfica, un cambio de vertiente o parte aguas de flujos subterráneo hacia el Oeste y hacia el este, sin embargo, dado que el área de estudio se encuentra dentro de la cuenca del río San Rafael, los patrones preferenciales serán hacia ese río.



Figura 5.12 Mapa de patrones flujo de agua subterráneo (flechas segmentadas azules).

## 5.6 Análisis del resultado del sondeo eléctrico vertical

Para la ubicación altimétrica de los acuíferos se efectuó el análisis e interpretación de la información arrojada por el sondeo eléctrico vertical (SEV) realizado durante el mes de Enero 2023 por los autores de este documento con la colaboración de la empresa GeoAmbiente, C.A.



Figura 5.13 Equipo para realizar el Sondeo Eléctrico Vertical

Cabe destacar que se realizó una línea de sondeo eléctrico vertical (SEV) con una separación equidistante entre los electrodos de corriente y los electrodos de potencial. La mínima separación fue de  $a = 1.00$  m y la máxima fue de  $a = 50$  m; es decir, distribuidas en este último caso con distancia total  $AB = 150$  m utilizando el dispositivo Wenner (distancia  $a = \text{dist MA} = \text{dist MN} = \text{dist NB}$ ). En orden a las magnitudes de separación de electrodos presentadas, es posible inferir que la profundidad de auscultación es de  $AB/3 = 50.00$  m.



Figura 5.14 Proceso de hincado de electrodos.

Tabla 5.8 Registros de resistividad en campo.

<b>Distancia</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Resistividad</b>
<b>(m)</b>	<b>(<math>\Omega</math>)</b>	<b>(<math>\rho</math>)</b>
		<b>(<math>\Omega\text{m}</math>)</b>
5	16.7	525
10	4.31	271
15	2.84	268
20	1.45	182
25	0.46	71.8
30	0.26	49.3
35	0.3	66.8
40	0.14	35.7
50	0.14	43.8

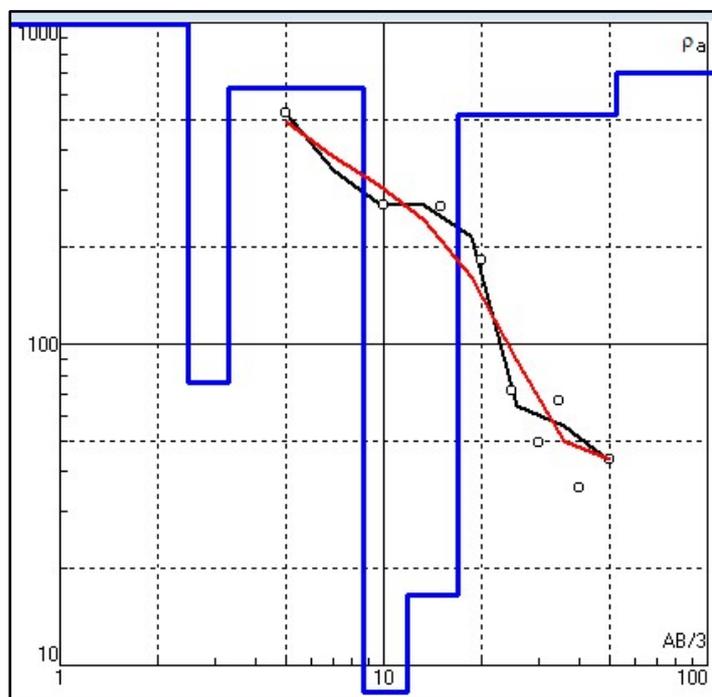


Figura 5.15 Curvas de resistividades de campo y teóricas.

Tabla 5.9 Resultados del Sondeo Eléctrico Vertical.

N	$\rho$	h	d	Alt
1	1116	2.5	2.5	-2.5
2	75.8	0.851	3.35	-3.351
3	660	5.1	8.45	-8.451
4	1.93	2.08	10.5	-10.53
5	12.2	5.82	16.4	-16.35
6	210	33.5	49.9	-49.86
7	700			

### 5.7. Construcción del modelo geo-resistivo de la columna estratigráfica del acuífero

Con base a los resultados del Sondeo Eléctrico Vertical y considerando los valores típicos de resistividad que presentan diversos tipos de suelos y materiales (de acuerdo a la Tabla de resistividades de la Universidad Nacional, 2000):

Tabla 5.10 Resistividades típicas para varios tipos de materiales térreos (Universidad Nacional, 2000).

Material	Resistividad ( $\Omega m$ )
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2500
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	30-50

Se procedió a la descripción estratigráfica de los horizontes que fueron interceptados durante la realización del ensayo geofísico descrito, fue posible la construcción de un modelo georesistivo de la columna estratigráfica como se muestra en la figura siguiente.

Tabla 5.11. Modelo geo-resistivo de la columna estratigráfica.

Espesor del estrato (m)	Profundidad del tope del estrato (m)	Columna Litológica	Descripción de litología interpretada
2.5	0		Arena limosa seca
0.8	2.5		Limo húmedo
5.1	3.3		Arena no saturada
2.1	8.4		Arcillas saturadas
5.8	10.5		
33.5	16.3		Arena saturada

La columna estratigráfica interpretada de la información obtenida del resultado de la resistividad de los estratos subyacentes, permiten delimitar espacialmente los estratos antes descritos en los cuales se observa que a partir de los 10.5 m aproximadamente se encuentra un paquete de arena saturada de aproximadamente 33.5 m de espesor como posible acuífero principal hasta la profundidad investigada de 50 m.

### 5.8 Estimación de la recarga potencial al acuífero

La estimación de la recarga potencial del acuífero subyacente al Campus Universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra se corresponde a las mismas valoraciones planteadas en la Tabla siguiente:

. Tabla 5.12 Cálculo de la recarga potencial del acuífero

Zona de Estudio:		Campus Universitario UDO						
Textura de Suelo:		Franco arenoso						
Parámetros de ingreso	Valor	unidad	Fuente	Parámetros	Por peso	Por volumen		Fuente
Capacidad de infiltración (mm/día) (fc):	>1568	mm/día	De campo		(%)	(%)	(mm)	
Fracción infiltra por pendiente (Kp):	0,25	adimensional	Tabla 4.1	Capacidad de campo (CC):	18	27	540	Tabla 4.2 y Ecuación 4.8 y 4.9
Fracción infiltra por cobertura vegetal (Kv):	0,19	adimensional	Tabla 4.1	Punto de marchitez (PM):	6	9	180	Tabla 4.2 y Ecuación 4.8 y 4.9
Fracción infiltra por textura suelo (Kfc):	1	adimensional	Ecuación 4.2	CC - PM :	12	18	360	
Coefficiente de infiltración (Ci):	1	adimensional	Ecuación 4.3					
Densidad aparente (DS):	1,5	gr/cc	Tabla 4.2					
Profundidad de raíces (PR):	200	cm	Tabla 4.3					
Humedad al inicio del mes (Hsi):	540	mm			5,4		10800	Tabla 4.2 y Ecuación 4.8 y 4.9
Mes con que inicia:	Septiembre							
Coefficiente de follaje (Cfo):	0,12	adimensional	Ecuación 4.1					

Nota: los valores de celdas en color amarillo corresponden a datos de ingreso.





Figura 5.16 Posible zona generadora de recarga del acuífero adyacente hacia el sur del área de estudio.

El volumen de agua que recarga al acuífero por infiltración de la precipitación viene dado por la siguiente ecuación:

$$V = R_p * \text{Área}$$

Ahora, considerando que el área donde se genera la recarga potencial es de 1.300.000 m<sup>2</sup> y que la recarga potencial es de 0.083 mm, entonces, el volumen de agua

que recarga el acuífero por infiltración de la precipitación es de aproximadamente 107900 m<sup>3</sup> anuales.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. El área de estudio presenta una precipitación media mensual que oscila entre 22.7 mm y 220.8 mm para un total anual de 1204.3mm. Mientras que la insolación media mensual varía entre 6.1 hr sol/día y 7.8 hr sol/día. Finalmente, la temperatura media mensual se encuentra alrededor de los 27.3 °C.

2. De acuerdo a las imágenes de satélite Landsat de Google Earth, se obtuvo que en el campus universitario de la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Oriente, la vegetación predominante son gramíneas y árboles predominantemente de mangos, con una superficie de 0.51 ha y 0.95 ha respectivamente, también cabe destacar que posee una vegetación de arbustales pero en menor proporción.

3. Las pruebas de infiltración mediante anillo sencillo arrojó una velocidad de infiltración media aproximada de 125.4 cm/hr. El Coeficiente de infiltración del suelo se asume como 1 ya que la sumatoria de las fracciones o coeficiente de infiltración por textura de suelo ( $K_{fc} = 1$ ), la fracción que infiltra debido a la pendiente ( $K_p = 0.25$ ) y la fracción que infiltra debido a la vegetación ( $K_v = 0.18$  a  $0.20$ ) superan la unidad.

4. La cuenca hidrogeológica contribuyente fundamental para los acuíferos del área de estudio se encuentra ubicada en la parte Sur y drena o aporta sus flujos en dirección hacia el Norte alimentando los acuíferos de la zona de estudio. Cabe destacar que la extensión superficial de la cuenca hidrogeológica contribuyente posiblemente supere en gran medida el área abarcada por los terrenos del Campus Universitario y debido a que geológicamente pertenecen a sedimentos de igual naturaleza y edad, se constituyen también en acuíferos de moderado rendimiento.

5. Los patrones preferenciales de flujo más importantes fluyen en sentido hacia el Este desde el área de estudio; aclarando que existe una divisoria de flujos de aguas subterráneas que drenan o descargan sus aguas en sentido hacia el Noreste, hacia el río San Rafael.

6. La interpretación de los resultados de los SEV, revelan que existe un volumen apreciable de estratos de arena permeable, representados por una variedad de al menos dos (2) tipos de arenas, entre ellas se pueden mencionar, suelos arenosos, arenas finas no saturadas y arenas finas muy saturadas en profundidad.

7. Los SEV ejecutados en la zona estudiada, muestran las posibilidades de localización de agua subterránea, es decir, representan sitios favorables para la perforación de pozos para abastecimiento de agua subterránea, debido a que muestran suelos arenosos, arenas finas no saturadas y arenas finas muy saturadas, que son el soporte de posible agua subterránea.

8. De acuerdo con la interpretación de los resultados, existen estratos permeables, de suelos arenosos, arenas finas no saturadas y arenas finas muy saturadas que permiten el almacenamiento de agua por debajo de los 10.5 metros de profundidad.

9. En el modelo hidrogeológico conceptual descriptivo desarrollado para el área de estudio se advierte la presencia correlacionable de estratos de arena media a gruesa que poseen características suficientes para ser considerada como depósito acuífero y que se encuentra presente en casi todos los lotes de terreno del proyecto.

10. En los pozos ubicados en el área adyacente a la planta de estudio se puede delimitar los acuíferos productores entre los 5.0 m y 6.0 m de nivel estático aproximadamente.

**11.** Existe una clara vinculación entre la presencia de los ríos presentes al Este (San Rafael) y al Oeste (Buena Vista) del área de estudio, ya que estos últimos son alimentados en gran medida por los acuíferos que subyacen al área de estudio. Por otro lado, es importante acotar que estos ríos drenan finalmente hacia el río Orinoco.

**12.** La recarga potencial de agua anual del acuífero por infiltración de la precipitación ( $R_p$ ) para el campus universitario corresponde a 83 mm lo cual equivale a 107900 m<sup>3</sup> anuales en el área de estudio. Sin embargo, es de hacer notar que la recarga más importante que ocurre se debe a la recarga lateral mediante los acuíferos que coliden con la cuenca desde la parte sur.

### **Recomendaciones**

- 1.** Realizar campañas de mediciones de nivel estático del agua de los pozos perforados y excavados adyacentes a la zona de estudio que permitan establecer comparaciones en los patrones preferenciales del flujo de agua subterránea.
- 2.** Se recomienda efectuar aforos diferenciales en los ríos que drenan la zona de estudio con la finalidad de establecer comparaciones de sus niveles con los niveles estáticos de los pozos.

## REFERENCIAS

Aguasuelos Ingeniería, S.C. (1993). **CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS EN EL ÁREA NORTE DE MONAGAS FASE IV**. Informe preparado para CORPOVEN. Monagas.

Aguilera, E. G. (2009). **CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS**. 5 de Diciembre 2011, [<http://es.scribd.com/doc/31134700/Calculo-de-La-Recarga-Potencial-de-Acuiferos>].

Aparicio Francisco J. (1992). **FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE**. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Primera edición. Mexico, D.F. pp 19, 20, 21, 22, 140.

Arias, Fidias G. (2006). **EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**. 5ta Edición. Editorial Episteme, C.A. Caracas-Venezuela. pp 25-31.

Astier Jean L. (1975). **GEOFÍSICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGÍA**. MASSON et Cie., Editeurs, Paris (Francia). Madrid. pp 77, 78, 79, 91.

Auge, M. (2008). **MÉTODOS GEOELÉCTRICOS PARA LA PROSPECCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA**. Área de Hidrogeología. Departamento de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Apuntes de cátedra.

Banco Mundial (2011). **CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**. 22 de Diciembre 2011, [[Http://water.worldbank.org/water/sites/worldbank.org.water/files/GWMATEBN02\\_sp.pdf](http://water.worldbank.org/water/sites/worldbank.org.water/files/GWMATEBN02_sp.pdf)].

Barrios, Roger (2010). **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LAS ARENAS BASALES DE LA FORMACIÓN MESA Y SUPERIORES DE LA FORMACIÓN LAS PIEDRAS EN EL CAMPO EL CARITO-MULATA, DE LA SUBCUENCA DE MATURÍN, CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA, ESTADO MONAGAS, VENEZUELA**. Universidad de Oriente, Escuela de Ciencias de la Tierra, Núcleo de Bolívar, Venezuela; trabajo de grado no publicado, P 198, pp 35-46.

Benítez, A. (1963). **CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, NUEVOS MÉTODOS**. Editorial Dossat. S.A. Madrid. pp 38, 50, 80.

Bolinaga, Juan (1999). **PROYECTOS DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**. Editorial Fundación Polar. Primera Edición Caracas-Venezuela. pp 118, 120.

CORPOVEN S.A. (1991). **CURSO DE PETROFÍSICA PARA GEÓLOGOS E ING. DE EXPLOTACIÓN**. Gerencia general de geología, pp 10-28.

Custodio, E. y Llamas, M. R. (1976). **HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA**. Ediciones Omega, S.A. Primera edición. Barcelona. Tomo I. pp 259, 274, 275, 311, 323.

CVG TECMIN, C.A. (2008). **ESTUDIO GEOTÉCNICO, HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE UN LOTE DE TERRENOS DESTINADO AL COMPLEJO INTEGRAL AVÍCOLA SOCIALISTA (CIAS MONAGAS), MUNICIPIO SOTILLO, ESTADO MONAGAS**. Puerto Ordaz. Pp

CVG TECMIN, C.A. (2009). **ESTUDIO GEOTÉCNICO, HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE UN LOTE DE TERRENOS DESTINADO AL COMPLEJO INTEGRAL AVÍCOLA SOCIALISTA (CIAS MONAGAS), MUNICIPIO SOTILLO, ESTADO MONAGAS**. Puerto Ordaz. Pp.

Echarri, L. (1988). **CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**. Universidad de Navarra. Escuela de Ingenieros de San Sebastián. [<http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto>].

Fajardo, j & Puerta, A (2007). **ESTUDIO BIOESTRATIGRÁFICO (FORAMINÍFEROS Y NANOPLANCTON CALCÁREO) DE LA FORMACIÓN CARAPITA, CAMPO OROCUAL, ESTADO MONAGAS, CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA**. PDVSA Laboratorio Geológico el Chaure, pp35-46.

Franco, M. (1985). **CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO Y LA ESTIMACIÓN DEL ORDEN DE MAGNITUD DE LAS RESERVAS RENOVABLES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**.

Grassi, C. (1976). **“RESUMEN DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO, MÉTODOS DE RIEGO.”** CIDIAT. Mérida. Página 265.

González de Juana, C., Iturralde J., Picard X. (1980) **GEOLOGÍA DE VENEZUELA Y DE SUS CUENCAS PETROLÍFERAS**. Ediciones Foninves, Primera Edición, Caracas, Tomo II, pp 734 – 737.

Holmes Arthur (1962). **GEOLOGÍA FÍSICA**. Ediciones Omega. Barcelona-España. pp 78, 112, 128.

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE TECNOLOGÍA DE CARIPITO (IUDTDC 2011). **CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DEL ESTADO MONAGAS**. 22 de Diciembre 2011, [<http://www.iutcaripito.tec.ve/Ubicacion%20Geografica/caracteristicasgeograficas2.htm>.]

Orellana, E. (1982). **PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA**. Madrid: Paraninfo

Ortiz U. Frida G. (2004). **DICCIONARIO DE METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA**. Editorial Limusa, S.A. México. pp 93-127.

PDVSA-CIED (1997) **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE YACIMIENTOS**. Segunda edición PP 2-30.

Pérez Hernández, D. (2010). “**EL PROCESO DE INFILTRACIÓN Y RECARGA DE LOS ACUÍFEROS EN LOS LLANOS ORIENTALES DE VENEZUELA**”. Revista Geominas, Volumen 38, No 53. Ciudad Bolívar. Página 157 a 159.

Pravia L. José R. (1995). **APUNTES DE HIDROLOGÍA**. Segunda Edición. Universidad De Oriente. Núcleo Bolívar. pp 116.

Pulido F., C. (2011)a. **EVALUACIÓN GEOFÍSICA PARA LA UBICACIÓN DE POSIBLES POZOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA ASIGNADA A GRANJA REPRODUCTORA (LOTES 1, 2, 3 Y 4). PARA EL PROYECTO COMPLEJO INTEGRAL AVÍCOLA SOCIALISTA CIAS MUNICIPIO SOTILLO, ESTADO MONAGAS**. Ciudad Guayana.

Pulido F., C. (2011)b. **EVALUACIÓN GEOFÍSICA PARA LA UBICACIÓN DE POSIBLES POZOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA ASIGNADA A PLAN PILOTO PARA EL PROYECTO COMPLEJO INTEGRAL AVÍCOLA SOCIALISTA CIAS MUNICIPIO SOTILLO, ESTADO MONAGAS**. Ciudad Guayana.

Pulido F., C. (2011)c. **EVALUACIÓN GEOFÍSICA PARA LA UBICACIÓN DE POSIBLES POZOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA ASIGNADA A GRANJAS DE ENGORDE PARA EL PROYECTO COMPLEJO INTEGRAL AVÍCOLA SOCIALISTA CIAS MUNICIPIO SOTILLO, ESTADO MONAGAS**. Ciudad Guayana.

Pulido F., C. (2011)d. **EVALUACIÓN GEOFÍSICA PARA LA UBICACIÓN DE POSIBLES POZOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA ASIGNADA A GRANJA DE INCUBACIÓN PARA EL PROYECTO COMPLEJO INTEGRAL AVÍCOLA SOCIALISTA CIAS MUNICIPIO SOTILLO, ESTADO MONAGAS.** Ciudad Guayana.

Pulido F., C. (2011)e **“EVALUACIÓN GEOFÍSICA PARA LA UBICACIÓN DE POSIBLES POZOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA ASIGNADA A LA PLANTA DE ALIMENTOS BALANCEADOS (ABA) PARA EL PROYECTO COMPLEJO INTEGRAL AVÍCOLA SOCIALISTA CIAS MUNICIPIO SOTILLO, ESTADO MONAGAS.”** Ciudad Guayana.

Rivadulla, Rosario. (2004) **CARTOGRAFÍA DE SUPERFICIE Y SUBSUELO.** FundaGeominas, Ciudad Bolívar, p 417.

Sánchez, J. (2008). **ACUÍFEROS SEMICONFINADOS.** Universidad de Salamanca. Departamento de Geología. [<http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/semiconfinados.pdf>].

Schosinsky, N. Gunther. Y Losilla, M. (2000). **MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN CON BASE EN LA LLUVIA MENSUAL.** Revista Geológica de América Central. No 23. pp 43-55.

Schosinsky, N. Gunther. (2006). **CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS.** Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. Revista Geológica de América Central.

Schlumberger. (1999) **INTERPRETACIÓN DE PERFILES DE POZOS.** CIED-PDVSA. Puerto La Cruz, Venezuela, p 145.

Soto C. (1977). **ORIGEN DE LAS AGUAS DE FORMACIÓN POST-EOCENO EN LA COSTA BOLÍVAR.** V congreso Geológico Venezolano. Caracas.

Yoris F. y Ostos M. (1997) **GEOLOGIA DE VENEZUELA.** Publicado en el W.E.C. de Schlumberger [CD-ROM] Caracas, Venezuela, pp 32-40.

España María E. (2003) **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA EN LOS YACIMIENTOS LCV-4, LCV-5, LCV-7 Y LCV-14, EN LA ARENA ROL LENTE SUPERIOR E INFERIOR UBICADOS EN EL CAMPO LA CEIBITA ÁREA MAYOR DE OFICINA, ESTADO ANZOÁTEGUI, PDVSA Anaco;** Venezuela, pp 45-70.

Subieta, T. Carnevali, J. y Hunter, V. (1988). **EVOLUCIÓN TECTONOESTRATIGRÁFICA DE LA SERRANÍA DEL INTERIOR Y DE LA SUBCUENCA DE MATURÍN**. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos. Vol. 12. N° 1. pp 31- 56.

## **APÉNDICES**

**APÉNDICE A**  
**ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO**

## A.1 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-1.

<b>Estimación de la infiltración básica (Modelo de Kostiakov)</b>							
<b>Proyecto:</b> Prospección de aguas subterráneas Campus Universitario UDO				<b>Ensayo No:</b> I-1			
<b>Ubicación:</b> Campus Universitario UDO, La Sabanita, Ciudad Bolívar, Estado Bolívar							
<b>Coordenadas UTM del punto de infi</b>		N 897132	E 438858	<b>Huso:</b> 20		WGS-84	
<b>Condición antecedente del suelo:</b> 25 min de Lluvia (24 horas antes)							
1	2	3	4	5	6	7	8
Lsmina infiltrada acumulada		Lámina infiltrada Parcial	Lectura del Cronómetro		Tiempo acumulado	Tiempos parciales	Velocidad de Infiltración instantanea
(cm)	(mm)	(mm)	(min,decmin)	(s)	(min)	(min)	(mm/min)
1	10	10	0.26	16	0.260	0.260	38.462
2	20	10	0.52	31	0.520	0.260	38.462
3	30	10	0.83	50	0.830	0.310	32.258
4	40	10	1.17	70	1.170	0.340	29.412
5	50	10	1.57	94	1.570	0.400	25.000
6	60	10	1.98	119	1.980	0.410	24.390
7	70	10	2.46	148	2.460	0.480	20.833
8	80	10	2.97	178	2.970	0.510	19.608
9	90	10	3.52	211	3.520	0.550	18.182
10	100	10	4.06	244	4.060	0.540	18.519
<b>Modelo de Kostiakov</b>			<b><math>i = a t^b</math></b>				
i: velocidad de infiltración (mm/min)							
a y b: parámetros de ajuste							
t: tiempo (min)							
<b>De la Curva de tendencia potencial de la gráfica de infiltración acumulada:</b>			<b><math>y = 1.1437 x^{0.8231}</math></b>				
<b>Ecuación de la lámina de infiltración acumulada (I):</b>			<b><math>I(t) = 1.1437 t^{0.8231}</math></b>				
			<b>A =</b>		<b>1.1437</b>		
			<b>B =</b>		<b>0.8231</b>		
<b>Velocidad de infiltración instantánea (i)</b>			(mm/min)	<b><math>i = a * t^b</math></b>			
			<b>a = A * B</b>		<b>0.941379</b>		
			<b>b = abs(B - 1)</b>		<b>0.176900</b>		
<b>Tiempo (tb) en el cual se alcanza la infiltración básica (ib)</b>			(min)	<b><math>tb = 10 * b</math></b>		<b>1.769</b>	
<b>Infiltración básica (ib)</b>			(mm/min)	<b><math>ib = a * (tb)^b</math></b>		<b>1.041329</b>	

## A.2 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-2.

<b>Estimación de la infiltración básica (Modelo de Kostiakov)</b>							
<b>Proyecto:</b> Prospección de aguas subterráneas Campus Universitario UDO				<b>Ensayo No:</b> I-2			
<b>Ubicación:</b> Campus Universitario UDO, La Sabanita, Ciudad Bolívar, Estado Bolívar							
<b>Coordenadas UTM del punto de infi</b>		N 897251	E 438918	<b>Huso:</b> 20		WGS-84	
<b>Condición antecedente del suelo:</b> 25 min de Lluvia (24 horas antes)							
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Lsmína infiltrada acumulada</b>		<b>Lámina infiltrada Parcial</b>	<b>Lectura del Cronómetro</b>		<b>Tiempo acumulado</b>	<b>Tiempos parciales</b>	<b>Velocidad de Infiltración instantanea</b>
(cm)	(mm)	(mm)	(min,decmin)	(s)	(min)	(min)	(mm/min)
1	10	10	0.28	17	0.280	0.280	35.714
2	20	10	2.25	135	2.250	1.970	5.076
3	30	10	5.25	315	5.250	3.000	3.333
4	40	10	8.25	495	8.250	3.000	3.333
5	50	10	11.67	700	11.670	3.420	2.924
6	60	10					
7	70	10					
8	80	10					
9	90	10					
10	100	10					
<b>Modelo de Kostiakov</b>			<b><math>i = a t^b</math></b>				
i: velocidad de infiltración (mm/min)							
a y b: parámetros de ajuste							
t: tiempo (min)							
<b>De la Curva de tendencia potencial de la gráfica de infiltración acumulada:</b>			<b><math>y = 2.8454 x^{0.422}</math></b>				
<b>Ecuación de la lámina de infiltración acumulada (I):</b>			<b><math>I(t) = 2.8454 t^{0.422}</math></b>				
			A =		2.8454		
			B =		0.4220		
<b>Velocidad de infiltración instantánea (i)</b>			(mm/min)	<b><math>i = a * t^b</math></b>			
			a = A * B		1.200759		
			b = abs(B - 1)		0.578000		
<b>Tiempo (tb) en el cual se alcanza la infiltración básica (ib)</b>			(min)	<b><math>tb = 10 * b</math></b>	5.78		
<b>Infiltración básica (ib)</b>			(mm/min)	<b><math>ib = a * (tb)^b</math></b>	3.310168		

## A.3 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-3.

Estimación de la infiltración básica (Modelo de Kostiakov)							
<b>Project</b> Prospección de aguas subterráneas Campus Universitario UDO						<b>Ensayo No:</b> I-3	
<b>Ubicación</b> Campus Universitario UDO, La Sabanita, Ciudad Bolívar, Estado Bolívar							
<b>Coordenadas UTM del punto</b>		N 897323	E 438821	<b>Huso:</b> 20		WGS-84	
<b>Condición antecedente de</b> 25 min de Lluvia (24 horas antes)							
1	2	3	4	5	6	7	8
Lámina infiltrada acumulada		Lámina infiltrada Parcial	Lectura del Cronómetro		Tiempo acumulado	Tiempos parciales	Velocidad de Infiltración
(cm)	(mm)	(mm)	(min, decmin)	(s)	(min)	(min)	(mm/min)
1	10	10	0.61	37	0.610	0.610	16.393
2	20	10	1.22	73	1.220	0.610	16.393
3	30	10	2.17	130	2.170	0.950	10.526
4	40	10	3.35	201	3.350	1.180	8.475
5	50	10	4.53	272	4.530	1.180	8.475
6	60	10	6.07	364	6.070	1.540	6.494
7	70	10	7.33	440	7.330	1.260	7.937
8	80	10	8.75	525	8.750	1.420	7.042
9	90	10	11	660	11.000	2.250	4.444
10	100	10	12.67	760	12.670	1.670	5.988
<b>Modelo de Kostiakov</b>				$i = a t^b$			
i: velocidad de infiltración (mm/min)							
a y b: parámetros de ajuste							
t: tiempo (min)							
<b>De la Curva de tendencia potencial de la gráfica de infiltración acumulada:</b>				$y = 0,7857 x^{0.7365}$			
<b>Ecuación de la lámina de infiltración acumulada (I):</b>				$I(t) = 0.7857 t^{0.7365}$			
				A =		0.7857	
				B =		0.7365	
<b>Velocidad de infiltración instantánea (i)</b>		(mm/min)	$i = a * t^b$				
				a = A * B		0.578668	
				b = abs( B - 1)		0.263500	
<b>Tiempo (tb) en el cual se alcanza la infiltración básica (ib)</b>		(min)	$tb = 10 * b$		2.635		
<b>Infiltración básica (ib)</b>		(mm/min)	$ib = a * (tb)^b$		0.7469735		

## A.4 Estimación de la infiltración básica. Ensayo No I-4.

Estimación de la infiltración básica (Modelo de Kostiakov)							
<b>Project</b> Prospección de aguas subterráneas Campus Universitario UDO					<b>Ensayo No:</b>		I-4
<b>Ubicación</b> Campus Universitario UDO, La Sabanita, Ciudad Bolívar, Estado Bolívar							
<b>Coordenadas UTM del punto</b> N 897429			E 438837		<b>Huso:</b>		20
<b>Condición antecedente</b> d: 25 min de Lluvia (24 horas antes)							
1	2	3	4	5	6	7	8
Lámina infiltrada acumulada		Lámina infiltrada Parcial	Lectura del Cronómetro		Tiempo acumulado	Tiempos parciales	Velocidad de Infiltración
(cm)	(mm)	(mm)	(min,decmin)	(s)	(min)	(min)	(mm/min)
1	10	10	0.23	14	0.230	0.230	43.478
2	20	10	0.45	27	0.450	0.220	45.455
3	30	10	1.08	65	1.080	0.630	15.873
4	40	10	1.70	102	1.700	0.620	16.129
5	50	10	2.52	151	2.520	0.820	12.195
6	60	10	3.48	209	3.480	0.960	10.417
7	70	10	4.55	273	4.550	1.070	9.346
8	80	10	5.67	340	5.670	1.120	8.929
9	90	10	7.20	432	7.200	1.530	6.536
10	100	10					
<b>Modelo de Kostiakov</b>				$i = a t^b$			
i: velocidad de infiltración (mm/min)							
a y b: parámetros de ajuste							
t: tiempo (min)							
<b>De la Curva de tendencia potencial de la gráfica de infiltración acumulada:</b>				$y = 2.3249 x^{0.609}$			
<b>Ecuación de la lámina de infiltración acumulada (I):</b>				$I(t) = 2.3249t^{0.609}$			
				A =		2.3249	
				B =		0.6090	
<b>Velocidad de infiltración instantánea (i)</b>			(mm/min)	$i = a * t^b$			
				a = A * B		1.415864	
				b = abs( B - 1)		0.391000	
<b>Tiempo (tb) en el cual se alcanza la infiltración básica (ib)</b>			(min)	$tb = 10 * b$			3.91
<b>Infiltración básica (ib)</b>			(mm/min)	$ib = a * (tb)^b$			2.4130298

**APÉNDICE B**  
**FOTOGRAFÍAS DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE LOS POZOS**



B.1 Pozo 3 de Jonny Sarti en Av. Sucre, La Sabanita.



B.2 Pozo 4 de Ovidio Jhonson en Av. Sucre La Sabanita.



B.3 Pozo 6 Casa #57, Calle San Simón, La Sabanita.



B.4 Pozo 7, casa # 59, Calle San Simón, La Sabanita.

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/6

<b>Título</b>	<b>PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL DE LOS ACUÍFEROS SUBYACENTES AL CAMPUS UNIVERSITARIO DE LA ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA EN LA PARROQUIA LA SABANITA, CIUDAD BOLÍVAR, MUNICIPIO ANGOSTURA DEL ORINOCO, ESTADO BOLÍVAR, VENEZUELA</b>
<b>Subtítulo</b>	

### **Autor(es)**

<b>Apellidos y Nombres</b>	<b>Código CVLAC / e-mail</b>	
<b>Calles Hernández, Diana Yuddiely</b>	<b>CVLAC</b>	<b>26.563.521</b>
	<b>e-mail</b>	<b>dianacalles@gmail.com</b>
	<b>e-mail</b>	
<b>Williams Cordova, Juana Mercedes</b>	<b>CVLAC</b>	<b>20.079.614</b>
	<b>e-mail</b>	<b>Mercedes__cristo@hotmail.com</b>
	<b>e-mail</b>	
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	

### **Palabras o frases claves:**

<b>Recarga potencial</b>
<b>Acuíferos</b>
<b>Balance hídrico</b>
<b>Balance de suelos</b>
<b>Campus universitario UDO</b>

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/6

### Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Subárea
<b>Geohidrología</b>	<b>Prospección aguas subterráneas</b>

### Resumen (abstract):

---

Este estudio consiste en proponer la prospección de las aguas subterráneas y estimar la recarga potencial de los acuíferos subyacentes al campus universitario de la Escuela Ciencias de la Tierra en la parroquia La Sabanita en Ciudad Bolívar, municipio Angostura del Orinoco del estado Bolívar. El objetivo primordial radica en determinar las características geohidrológicas de los acuíferos subyacentes al campus universitario y determinar la recarga potencial de los mismos, aplicando el método del balance hídrico de los suelos, que permitirá el aprovechamiento de aguas subterráneas en el proyecto de reconstrucción de las infraestructuras del Campus Universitario. El área de estudio está constituida por sedimentos del Reciente, generalmente arenas gruesas a finas con presencia eventual de arcillas y limos. Hidrogeológicamente, la zona en estudio forma parte de la Formación Mesa, los cuales se caracterizan por la presencia de acuíferos libres con buen rendimiento y buena calidad de agua. La metodología consistió en la búsqueda, revisión y selección de información de la zona de estudio, principalmente de datos aportados por estudios previos en el lugar y por el cálculo de parámetros necesarios tales como la determinación de la infiltración promedio, escorrentía, humedales y evapotranspiración generada por la vegetación, en el análisis del mapa de cuencas hidrográficas y determinación de parámetros morfométricos, así como el análisis del sondeo eléctrico vertical. De acuerdo a la interpretación de los sondeos eléctricos verticales, se muestra que existe un volumen apreciable de estratos de arena permeable que representan posibilidades de localización de agua subterránea. Una vez determinados los parámetros necesarios se procedió a calcular la recarga potencial al acuífero por infiltración de la precipitación, el cual corresponde a 83 mm en este lote de terreno, la cual equivale a 107900 m<sup>3</sup> anuales en el área total de estudio correspondiente Campus Universitario de la Escuela Ciencias de la Tierra.

---

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/6

### Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail	
<b>Echeverría D., Dafnis J.</b>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input checked="" type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	<b>4506408</b>
	<b>e-mail</b>	<b>djed4586@hotmail.com</b>
	<b>e-mail</b>	
<b>España R., Juan C.</b>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	<b>juangeoe@gmail.com</b>
	<b>e-mail</b>	
<b>Padilla F., Karla A.</b>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	<b>Krlpadilla9@gmail.com</b>
	<b>e-mail</b>	

### Fecha de discusión y aprobación:

**Año      Mes      Día**

<b>2023</b>	<b>10</b>	<b>17</b>
-------------	-----------	-----------

**Lenguaje:** Español

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/6

### Archivo(s):

Nombre de archivo
Tesis (prospección aguas subterráneas y recarga potencial de acuíferos en campus universitario UDO, La Sabanita, Ciudad Bolívar).Doc

Caracteres permitidos en los nombres de los archivos: **A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 \_ - .**

### Alcance:

**Espacial :** Campus universitario UDO, La Sabanita, Ciudad Bolívar, estado Bolívar, Venezuela. (Opcional)

**Temporal:** 2023 (Opcional)

**Título o Grado asociado con el trabajo:** Ingeniero Geólogo

**Nivel Asociado con el Trabajo:** Pregrado

**Área de Estudio:** Geohidrología

**Otra(s) Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:**

Universidad de Oriente

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
CONSEJO UNIVERSITARIO  
RECTORADO

CU N° 0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano  
**Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ**  
Vicerrector Académico  
Universidad de Oriente  
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI – 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

**JUAN A. BOLANOS CURVELO**  
Secretario

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
SISTEMA DE BIBLIOTECA  
RECIBIDO POR *Martínez*  
FECHA 05/08/09 HORA 5:30

C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YGC/maruja

**Derechos:**

**De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado**  
**“Los Trabajos de grado son exclusiva propiedad de la**  
**Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizadas a otros**  
**finés con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo,**  
**quien lo participara al Consejo Universitario”**

Condiciones bajo las cuales los autores aceptan que el trabajo sea distribuido. La idea es dar la máxima distribución posible a las ideas contenidas en el trabajo, salvaguardando al mismo tiempo los derechos de propiedad intelectual de los realizadores del trabajo, y los beneficios para los autores y/o la Universidad de Oriente que pudieran derivarse de patentes comerciales o industriales.

<u>MEDINA MAURERA Diana Yuddiely Calles Hernández</u>		<u>Juana Mercedes</u>
<u>Williams Cordova</u>		
..26563521	AUTOR	.. 20.079.614
<b>AUTOR 1</b>		<b>AUTOR 2</b>
<u>DAFNIS ECHEVERRÍA</u>	..	
<b>TUTOR</b>		