

X
GR/220
1328

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
MERIDA-VENEZUELA.



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES

**EVALUACIÓN DE ACUÍFEROS MEDIANTE LA
INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y USO DE
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.
EL CUJÍ (MUNICIPIO IRIBARREN) – EL ENEAL (MUNICIPIO
CRESPO) ESTADO LARA.**

**TRABAJO FINAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO.**

Autor:

Br. Héctor José Lucena Palacio

Tutor:

Dr. Hervé Jegat

Noviembre,
2008.

DONACION

SERBIULA
Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso, por darme la fuerza necesaria en los momentos difíciles y estar a mi lado cuando más lo he necesitado.

A mi familia por apoyarme en todo momento.

A la Ilustre Universidad de Los Andes, especialmente a la Escuela de Ingeniería Geológica, por formarme y por permitirme adquirir los conocimientos necesarios para lograr esta meta.

Al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

A mi tutor académico Dr. Hervé Jegat y al profesor Oscar Odreman, por su ayuda, colaboración y guía durante el desarrollo de este trabajo.

Al personal del Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales de Barquisimeto estado Lara.

A la Empresa Hidrolara por su apoyo y colaboración.

Al Ingeniero Miguel Castro, por su valiosa colaboración.

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT), Por la ayuda económica aportada para el desarrollo de este trabajo final de grado.

A todas aquellas personas que de una manera estuvieron apoyándome durante la realización de éste trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
Agradecimientos.....	iii
Índice General.....	iv
Índice de Figuras.....	xiv
Índice de Tablas.....	xix
Resumen.....	xx
Introducción.....	xxi

CAPITULO I. GENERALIDADES

1.1 Objetivo General.....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Justificación e Importancia.....	2
1.4 Alcance y Limitaciones.....	4
1.5 Antecedentes.....	5

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1 Hidrología.....	10
2.2 Ciclo Hidrológico.....	11
2.3 Fases del Ciclo Hidrológico.....	13

2.3.1 Precipitación.....	13
2.3.2 Evapotranspiración.....	14
2.3.3 Escorrentía.....	15
2.3.4 Infiltración.....	16
2.4 Balance hídrico.....	16
2.5 Movimiento subterráneo del agua.....	17
2.5.1 Zona de humedad.....	17
2.5.2 Zona intermedia.....	18
2.5.3 Franja capilar.....	19
2.5.4 Superficie freática.....	19
2.5.5 Zona de saturación.....	20
2.6 Características físicas y químicas del agua subterránea.....	21
2.6.1 Temperatura.....	21
2.6.2 Turbidez y sabor.....	21
2.6.3 Salinidad.....	22
2.6.4 Relación agua dulce-agua salada.....	22
2.7 Acuíferos y sus clasificaciones.....	23
2.8 Tipos de acuíferos.....	24

2.9 Acuíferos según el material litológico que lo conforma.....	25
2.10 Acuíferos según su comportamiento hidrogeológico.....	27
2.11 Características hidrogeológicas.....	28
2.11.1 Porosidad.....	28
2.11.2 Porosidad eficaz.....	29
2.11.3 Permeabilidad.....	31
2.11.4 Transmisividad.....	33
2.11.5 Coeficiente de almacenamiento.....	34
2.12 Teledetección.....	35
2.13 Elementos de un proceso de teledetección.....	37
2.15 Principios físicos de la teledetección.....	38
2.15.1 La radiación electromagnética.....	39
2.15.2 El espectro electromagnético.....	40
2.15.3 Signaturas espectrales.....	42
2.15.4 Espectrometría de minerales.....	44
2.15.5 Espectrometría de las plantas.....	45
2.15.6 Espectrometría de las Rocas.....	47
2.15.7 Espectrometría de los Suelos.....	47

2.15.8 Espectrometría del agua.....	49
2.16 Satélite de recursos naturales.....	49
2.16.1 Landsat.....	50
2.17 Descripción de cada una de las bandas que componen las imágenes Landsat.....	51
2.18 Imágenes SPOT.....	52
2.19 Resolución de un sistema sensor.....	54
2.20 Teledetección en hidrogeología.....	55
2.21 Puntos de partida para la selección de imágenes.....	56
2.22 Escala y resolución de las imágenes.....	57
2.23 Tipos de imágenes.....	57
2.24 Fechas de registro de las imágenes.....	58
2.25 Criterios para la interpretación visual.....	58
2.25.1 Brillo.....	58
2.25.2 Color.....	59
2.26 Composición en verdadero color o color natural.....	59
2.27 Composición en falso color.....	59
2.28 Clasificación supervisada.....	61
2.29 Clasificación no supervisada.....	62

2.30 Correcciones radiométricas y geométricas.....	63
2.31 Sistema de Información Geográfica.....	63
2.32 Ventaja de usar los Sistemas de Información Geográfica.....	64
2.33 Los SIG como apoyo a la teledetección.....	65
2.34 Integración de imágenes en un SIG.....	65
2.35 Modelo digital del terreno (MDT).....	66
2.36 Modelo digital de elevación (MDE).....	66
2.37 Calculo de variables topográficas.....	67
2.37.1 La pendiente.....	67
2.37.2 La orientación.....	67
2.37.3 La curvatura.....	67
2.37.4 Modelo hidrológicos.....	68

CAPITULO III. MARCO REFERENCIAL

3.1 Ubicación y extensión del área de estudio.....	70
3.1.1 Vías de acceso al área en estudio.....	72
3.2 Evaluación del Medio Físico – Geográfico.....	73
3.2.1 Fisiografía.....	73

3.2.2 Geomorfología.....	74
3.2.3 Relieve.....	75
3.2.4 Hidrografía.....	77
3.2.5 Clima.....	79
3.2.6 Vegetación.....	80
3.2.7 Suelos.....	82
3.3 Geología.....	83
3.3.1 Geología Regional.....	85
3.3.2 Geología Local.....	104

CAPITULO IV. METODOLOGÍA APLICADA A LA EVALUACIÓN DE ACUÍFEROS MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y EL USO DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

4.1 Explicación de la metodología.....	107
4.2 Organización de los datos.....	109
4.3 Información de Imágenes Satelitales Landsat y Spot 5.....	109
4.4 Imágenes Landsat TM y ETM+.....	110
4.5 Imagen Spot 5.....	110

4.6 Procesamiento Digital e interpretación visual de las imágenes	
Landsat y Epot.....	110
4.6.1 Delimitación del área.....	113
4.6.2 Realces y Mejoramientos de las Imágenes.....	116
4.7 Vectorización a través de las imágenes Landsat y Spot.....	118
4.8 Clasificación Supervisada de las Imágenes.....	120
4.9 Fusión de datos de la imagen Landsat a Spot.....	123
4.10 Mapas existentes.....	125
4.11 Datos Auxiliares.....	126
4.12 Normalización e integración en el Sistema de Información Geográfica (SIG).....	127
4.13 Digitalización.....	128
4.13.1 Topografía.....	128
4.13.2 Geología.....	129
4.14 Datos Auxiliares.....	129
4.14.1 Ubicación de las estaciones climáticas y pozos existentes en el área de estudio.....	130
4.14.2 Datos de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	130
4.15 Información Obtenida a partir de la integración en el Sistema	

de Información Geográfica.....	132
4.15.1 Preparación de mapas.....	132
4.15.2 Mapa Topográfico Actualizado.....	133
4.15.3 Elaboración del Modelo digital de Elevación del Terreno y el Mapa de pendientes.....	133
4.15.4 Hipsometría o Fisiografía.....	142
4.15.5 Geomorfología.....	142
4.15.6 Cobertura Vegetal.....	144
4.15.7 Mapa de Suelos.....	145
4.15.8 Geología.....	145
4.15.9 Hidrografía y Cuerpos de Aguas superficiales.....	147
4.15.10 Mapa de ubicación de Pozos y SEV.....	148
4.15.11 Cartografía Hidrogeológica.....	149
4.16 Integración y Modelado.....	149
4.16.1 Disponibilidad de agua en suelos superficiales por Pluviometría.....	150
4.16.2 Elaboración de las Isoyetas.....	151

4.16.3 Mapa de Temperatura.....	153
4.17 Índice de Infiltración superficial.....	154
4.17.1 Densidad de drenaje y Texturas topográficas.....	156
4.17.2 Mapa de Escurrimiento.....	160
4.18 Índice Potencial de existencia de Acuífero.....	165
4.18.1 Parámetros Hidrogeológicos.....	172
4.19 Zonas potenciales de agua subterráneas.....	178

CAPITULO V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 Ordenación de la información Base.....	183
5.2 Interpretación de las Imágenes de Satélites.....	183
5.3 Mapa Geológico.....	186
5.4 Cartografía de disponibilidad de agua en suelos superficiales por Pluviometría.....	187
5.5 Índice de Infiltración Superficial.....	188
5.6 Ubicación de Sondeos Eléctrico Vertical y Pozos existente en el área de estudio.....	189
5.7 Secciones Estratigráfica.....	190

5.8 Índice Potencial de existencia de Acuífero.....	202
5.9 Mapa de Caudales.....	202
5.10 Niveles estáticos y líneas de flujo.....	203
5.11 Zonas Potenciales de acumulación de Agua subterráneas.....	204
5.12 Análisis General.....	208

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.....	213
Recomendaciones.....	216
Referencias Bibliográficas.....	217
Anexos.....	220

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Ciclo Hidrológico.....	13
Figura 2.2. Zonas presentes en un acuífero.....	21
Figura 2.3. Acuífero kárstico o fisurado.....	26
Figura 2.4. Acuífero intergranular o detrítico.....	27
Figura 2.5. Acuífero kárstico y poroso.....	27
Figura 2.6 Tipos de Acuíferos en función de la presión Hidrostática.....	28
Figura 2.7. Coeficiente de almacenamiento Modificado de Apelo y Potsma (1993).....	34
Figura 2.8. Elemento de teledetección.....	38
Figura 2.9. Radiación Electromagnética.....	40
Figura 2.10. Spectrum Electromagnético.....	42

Figura 2.11. Firmas Espectrales.....	44
Figura 2.12. Firmas Espectrales de algunos minerales.....	45
Figura 2.13. Firmas espectrales de las Plantas.....	46
Figura 2.14. Firmas Espectrales de las Rocas.....	47
Figura 2.15. Satelite Landsat.....	50
Figura 2.16. Principales funciones de los elementos de un SIG.....	64
Figura 3.1. Ubicación del Área de Estudio.....	71
Figura 3.2. Vías de Comunicación.....	73
Figura 3.3. Relieve El Cují – Cordero.....	76
Figura 3.4. Relieve Duaca – Eneal.....	77
Figura 3.5. Quebrada Nonavana.....	79
Figura 3.6. Suelos arcillosos El Cují – Sábila.....	82
Figura 3.7. Columna Estratigráfica del Estado Lara.....	103
Figura 3.8. Filitas de la Formación Mamey.....	104
Figura 3.9. Sedimentos Cuaternarios en la Población de Tamaca.....	105
Figura 4.1. Esquema General de la Metodología Aplicada.....	108
Figura 4.2. Georreferenciación Imagen a Imagen por puntos de control.....	112

Figura 4.3 Selección del Área de Estudio.....	114
Figura 4.4. Imagen Spot del área de estudio.....	115
Figura 4.5. Diferencia de realces de la imagen Spot en diferentes filtros.....	117
Figura 4.6. Proceso de Vectorización en la Imagen Spot.....	119
Figura 4.7. Asignación de las diferentes clases a los pixeles correspondientes.....	121
Figura 4.8. Mapa de suelo con la clasificación supervisada.....	122
Figura 4.9. Fusión de la Imagen Landsat a través de la Spot.....	124
Figura 4.10: Proceso de Digitalización en ArcGis 9.1.....	134
Figura 4.11. Establecimiento de los parámetros en la generación del Variograma.....	136
Figura 4.12. Variograma Experimental y Teórico sin ajustar.....	137
Figura 4.13. Ajuste de las propiedades del variograma Teórico.....	138
Figura 4.14. Variograma Teórico y Experimental Ajustado.....	138
Figura 4.15. Modelo 3D del mapa de errores.....	139
Figura 4.16. Modelo tridimensional del área de estudio.....	140
Figura 4.17. Proceso de digitalización de la cartografía Geológica.....	147

Figura 4.18. Metodología para la disponibilidad de agua por Pluviometría.....	150
Figura 4.19. Elaboración del mapa de Isoyetas.....	152
Figura 4.20. Zonas con Disponibilidad de agua por Pluviometría.....	154
Figura 4.21 Metodología Aplicada para la obtención del índice de Infiltración.....	155
Figura 4.22. Digitalización de las Subcuenta para obtener área y longitud total de los cauces.....	159
Figura 4.23. Mapa de Infiltración Superficial.....	164
Figura 4.24. Metodología de Índice Potencial de Existencia de Acuíferos.....	165
Figura 4.25. Pozo artesanal a los alrededores del caserío Cordero.....	167
Figura 4.26. Pozo artesanal donde se aprecian la disposición de las capas litológicas.....	168
Figura 4.27. Correlación 1 de perfiles correspondiente al sector Barro Negro.....	170
Figura 4.28. Correlación 2 en el sector Barro Negro.....	171
Figura 4.29. Mapa de Caudales.....	173
Figura 4.30. Mapa de Niveles Estáticos.....	174

Figura 4.31. Modelo en 3D de las Líneas de Flujo.....	175
Figura 4.32. Mapa de Índices Potenciales de Existencia de Acuífero....	177
Figura Esquema General de la Metodología Aplicada.....	179
Figura 4.33. Mapa de Zonas Potenciales de Agua Subterráneas.....	180
Figura 4.34. Modelo en tres dimensiones de Imagen Landsat en falso color 4,5,3.....	181
Figura 5.1 Correlación 1 Sector Eneal.....	193
Figura 5.2 Correlación 2 Sector el Eneal.....	194
Figura 5.3. Correlación 1 Sector La Parapara.....	195
Figura 5.4. Correlación 2 Sector La Parapara.....	196
Figura 5.5. Correlación 1 Sector La Sábila.....	197
Figura 5.6. Correlación 2 sector La Sábila.....	198
Figura 5.7 Correlación 1 Sector Yucatán.....	199
Figura 5.8. Correlación 2 Sector Yucatán.....	200
Figura 5.9. Sección Transversal Sector Nonavana.....	201
Figura 5.10. Zonas potenciales de agua subterráneas.....	206
Figura 5.11. Modelo digital de elevación en verdadero color con las zonas potenciales de agua subterráneas.....	207

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales según Johnson (1967), Schoeller (1962) y Ward (1967).....	30
Tabla 2.2. Clasificación de terrenos por la permeabilidad según Johnson (1967), Schoeller, (1962) y Ward, (1967).....	32
Tabla 3.1. Ubicación Geográfica del Área de estudio.....	68
Tabla 4.1. Estación el Cují.....	157

RESUMEN

En el presente trabajo se plasman los resultados obtenidos de la combinación de las técnicas de interpretación de imágenes de Satélite Landsat ETM+ y Spot y las técnicas de los Sistemas de Información Geográfica que permiten el planteamiento de una metodología general en la cual se dividen en varios esquemas explicativos, aplicada para estudios de reconocimiento de zonas potenciales para la acumulación de agua subterránea. Para la aplicación de la metodología se ha seleccionado la zona comprendida entre el Cuji y El Eneal con una extensión de 195Km², en el cual se ubican acuíferos de importancia a los alrededores del Eneal llegando hasta Duaca en depósitos aluviales. El estudio abarca la recopilación y análisis de 4 tipos de datos principales: datos de sensores remotos (imágenes de Satélite Landsat TM y Spot), mapas existentes (material cartográfico) datos de Prospecciones Geofísica y información de campo (puntos de apoyo terrestre, datos de pozos y datos climatológicos) con el objeto de actualizar la información mediante la incorporación de técnicas modernas de análisis que incluyen la interpretación de imágenes satelitales y usos de Programas avanzados como ENVI, ERDAS y ArcGIS. Esto complementado con una verificación de campo a través de visitas al área de estudio, donde se caracterizaron las diferentes Formaciones geológicas presentes, así como algunos rasgos fisiográficos generales. Los resultados obtenidos son representados en mapas temáticos que acompañan al presente trabajo.

Capítulo I

- Introducción
 - Objetivos
 - Justificación e Importancia
 - Alcance y Limitaciones
 - Antecedentes
-

INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de agua dulce por parte del hombre, acelerada en las últimas décadas, ha llevado a un desequilibrio en los balances hidrogeológicos en muchos puntos del planeta, produciendo graves alteraciones medioambientales de muy difícil solución.

El agua subterránea es la que circula en la zona saturada de los acuíferos las cuales son formaciones geológicas porosas y permeables que forman grandes depósitos que en muchos lugares constituyen la única fuente de agua potable disponible y que es posible de captar por obras de ingeniería.

Las aguas subterráneas emanan, en gran parte, de la infiltración de las precipitaciones, de los ríos, lagos y agua marítima costeras. La infiltración depende de las características físicas de las rocas, precisamente en función de la capacidad de las rocas para permitir la infiltración en el sustrato, se distinguen rocas permeables e impermeables.

Abastecer de agua potable a la población, es la gestión principal de cualquier empresa operadora de acueducto. Hoy en día el mundo apunta sus metas al uso eficiente del agua con fines de preservar el recurso, ya que existen sectores donde el agua es un bien escaso y las dotaciones están por debajo de lo que establecen las normas más rigurosas.

Tal caso ocurre en las parroquias El Cují, Tamaca y los centros poblados como lo son Cordero, Nonavana, Valle Hondo y Rastrojitos del municipio Iribarren y El Eneal perteneciendo este al municipio Crespo, y siendo el menos afectado. Estas poblaciones presentan uno de los racionamientos mas severos de todo el estado Lara, con horarios de servicio de 15

horas semanales en promedio, siendo así una de las zonas más deprimidas en lo que a agua potable se refiere.

Estos centros poblados están ubicada a unos 5 a 7 kilómetros y El Eneal a unos 30 kilómetros al norte de la capital del estado, en la zona conocida como depresión Barquisimeto; dicha zona ha presentado uno de los crecimientos demográficos más altos de la región. La parroquia el Cují incremento su población de 15.560 habitantes en el año de 1990 a 41.248 para el año 2000 y la parroquia Tamaca elevo sus pobladores de 23.975 en 1990 a 39.338 en al año 2000, sin incluir que en al año 1998 el gobierno nacional elaboró y ejecutó un urbanismo al norte de la parroquia en los límites con el Municipio Crespo, conocido como la Urbanización La Sábila que hoy alberga 46.500 habitantes, lo que en total engloba unos 130.000 habitantes en lo que hoy se conoce como el Norte extra urbano de Barquisimeto.

Esta zona representa hoy en día una de las zonas más codiciadas por los inversionistas y el gobierno para desarrollar viviendas en la región capital del estado Lara, debido al gran atractivo que presenta por su cercanía a la capital del estado, la topografía de los terrenos, sus vías de acceso y el bajo costo de la tierra comparado con el otro extremo de crecimiento, como lo es Cabudare. El incremento de la población generado en los últimos 10 años, ocurrió de forma anárquica y desorganizada; la explosión demográfica que se manifestó en toda la zona colapso todos los servicios públicos, siendo el servicio de agua potable el más deteriorado de todos; en la actualidad la zona es dotada de un caudal de 155 l/s a través de un sistema de aducción que viene desde el embalse José Félix de Los Ríos en la población del Tocuyo a unos 135 kilómetros de la zona, atravesando la red de la ciudad de

Barquisimeto; del cual ingresan 120 l/s y un campo de pozos en el municipio Crespo que produce 70 l/s; de los cuales, 35 se destinan al norte extra urbano de Iribarren. Con lo cual para la actualidad, tomando en cuenta todos los urbanismos desarrollados hasta el tercer trimestre del 2002, y con una disponibilidad de 155 l/s, se estima un déficit en las fuentes de suministro de unos 220 l/s, tomando como base una población de 130.000 habitantes, sin considerar las propuestas de expansión existentes.

Para cubrir parte del déficit en el suministro de agua, se han obtenido convenios con la alcaldía de los municipios y la gobernación del estado; en la actualidad se destinan a la zona unos 1.045 camiones cisternas semanales que generan un costo aproximado de 40 mil bolívares fuerte mensuales y no son un medio muy seguro de suministro de agua desde el punto de vista de disponibilidad, higiene y salubridad.

Todo esto ha llevado a la necesidad de explorar fuentes de abastecimiento que se enmarquen dentro de las características geográficas y climatológicas de la zona, para así mejorar la calidad de vida de la población existente y afrontar las demandas de los desarrollos futuros que se perfilan en el sector.

Los estudios hidrogeológicos requiere el manejo de una gran cantidad de información y datos de diversos tipos, así como de parámetros, formatos y modo de representación. Una forma de enfrentar esta situación es recopilando los datos hidrogeológicos y almacenándolos en un Sistema de Información Geográfica bajo formatos digitales, georeferenciando esta información para luego procesarlo en un software SIG que faciliten su procesamiento, constituyendo de esta manera una herramienta fundamental para el análisis espacial de los factores

geológicos, geomorfológicos e hidrológicos que poseen relación con la formación de acuíferos.

En los últimos años se han encontrado diferentes investigaciones que muestran gran interés en el uso de tecnología de Sensores Remotos y Sistemas de información Geográfica para el estudio hidrogeológico, donde se pueden apreciar aplicaciones para generar mapa integrado de los recursos de agua subterránea, estudios para seleccionar sitios convenientes para la recarga, elaboración e integración de mapas temáticos para determinar las zonas potenciales acuíferas. Es por tal motivo, que la teledetección, se puede aplicar como un método indirecto de estimación de una mejor cartografía de las características físicas de interés hidrogeológico.

El objetivo principal de este trabajo, tiene especial interés en obtener información sobre áreas potenciales en las que podrían existir acuíferos, implementando la combinación de las técnicas de teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, que permitan el desarrollo de una metodología operativa para generar información relevante sobre geomorfología, climatología, geología, drenaje, pendiente y cuerpos de aguas superficiales para luego integrarlo y así poder cuantificar la extracción de agua subterránea para consumo humano y riego agrícola.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología que contemple las técnicas y procedimientos de análisis de Imágenes de Satélite y el uso de Sistemas de Información Geográfica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Plantear una metodología para el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica que sea de respaldo a los estudios hidrogeológicos de acuíferos usando la interpretación de una imagen LANDSAT y SPOT
- Unificar los rasgos útiles hidrogeológicos a través del análisis visual de imágenes de Satélites y uso de la cartografía que permitan construir mapas temáticos.
- Ordenar y estructurar la documentación hidrogeológica de acuíferos más importantes para la facilitación de su uso e interpretación.
- Describir las bases y conclusiones para la realización de la metodología con herramientas de programas adecuados e integrarlos con el Sistema de Información Geográfica.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Actualmente el recurso hídrico es de gran importancia para el crecimiento de las poblaciones, el desarrollo del sector agropecuario y el abastecimiento doméstico. El agua subterránea adquiere gran importancia y mucho más cuando observamos la contaminación indiscriminada de los recursos hídricos superficiales y la insuficiencia de los mismos en áreas donde se cuenta con largos períodos de intensa sequía, tal caso es la zona Norte de Barquisimeto debido a que esta área es afectada por largos períodos de intensa sequías, por lo tanto es muy importante localizar nuevas fuentes de aguas subterráneas, es por tal motivo que este estudio se convierte en un tema de gran prioridad e importancia.

La importancia de la evaluación de acuíferos en esta área, esta orientada a determinar la disponibilidad en zonas potenciales donde podrían existir aguas subterráneas y ha su vez la rentabilidad de las mismas, con la finalidad de estimar el aprovechamiento de este recurso natural, de tal modo que se evite el uso irracional y dar así un uso óptimo frente a la demanda de consumo y contribuir con el desarrollo de la zona en estudio, ya que representa hoy en día una de las zonas más apetecidas por los inversionistas y el gobierno para desarrollar viviendas en la región capital del estado Lara, debido al gran atractivo que presenta por su cercanía a la capital del estado y el bajo costo de las tierras en comparación con otros puntos del centro de la ciudad o de sus alrededores.

Este estudio fundamentalmente es realizado en principio por la ausencia de agua potable del sector que comprende el Cují-Eneal de Sur a Norte y El Cují-Nonavana de Oeste a Este, por lo tanto se intenta ubicar las posibles acumulaciones de aguas subterráneas para solventar esta

problemática y facilitar la disponibilidad de agua potable en la zona de estudio, y así garantizar un aprovechamiento óptimo del preciado líquido a los centros poblados.

1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES

La realización de este estudio beneficiará al área que comprende El Cují-Eneal, zona que cuenta con un largo período de sequía y carece de suficientes recursos hídricos superficiales por lo que requiere de la extracción de agua a partir de acumulaciones subterráneas, para satisfacer la creciente demanda de la población y el sector agropecuario.

Este trabajo de investigación que presentaré a continuación propone una metodología para la captura de datos de campo, datos de cartografía existente, datos de pozos perforados en la zona y datos obtenidos de imágenes de satélite y fotografías aéreas que permita generar la delimitación de zonas potenciales de agua subterránea a través de la integración de diversos mapas temáticos llevándose este término mediante un Sistema de Información Geográfica.

Se estructuran y organizan los datos hidrogeológicos de los pozos perforados del caso de estudio, como lo será la información litológica de los perfiles, valores de caudal de bombeo, también se incluirán los datos de cada una de las características que constituyen los mapas temáticos, tal cual como lo son, los mapas: geomorfológico, geológico, de pendiente e hidrogeológicos y topográficos, con la finalidad de facilitar su manejo y procesamiento mediante un software SIG adecuado para tal estudio y luego con esta integración de todos los datos encontrados y procesados, puedan ser utilizados en un futuro, en el desarrollo de un sistema de información geográfica.

Se consideran las limitaciones en cuanto a la poca información de los pozos dentro del área, en descripción de perfiles litológicos, datos de niveles estáticos, caudales, que permitan realizar un modelo más preciso.

- La confiabilidad de la información existente, debido a que se desconoce bajo que condiciones fue definida la misma; en consecuencia se hace necesaria evaluar y corregir dichos datos.
- El acceso a los pozos perforados en propiedad privada fue una gran limitación ya que varios de los dueños no colaboraron en facilitar información.

1.5 ANTECEDENTES

- En 1995, FABREGAT V. V., realiza un estudio titulado: **Fundamentos teóricos para la extracción de agua subterránea mediante teledetección**. Este estudio pretende enfocar los pasos que se deben seguir para estimar áreas propensas a acumular aguas subterráneas, con la recopilación de informaciones hidrogeológica, Litológica, y geológica de cualquier área que se tenga sospecha de poseer grandes acuíferos.
- En 1998, SARAF, A. K. Y CHOUDHARY P. R., realizan un estudio titulado: **Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploración and identificación of artificial recharge sistes**. En el presente estudio trata de elegir los sitios adecuados para la recarga de las aguas subterráneas a través de cuenca o embalses, utilizando un enfoque integrado de la teledetección y los SIG.

- En 1999, RAMALINGAM, M. Y SANTHAKUMAR A. R., realizan una investigación denominada **Case study on artificial recharge using remote sensing and GIS**.

Consiste en la elaboración de diferentes mapas temáticos usando la teledetección y el SIG, los mapas elaborados fueron: Geomorfológico, geológico, uso de los suelos, pendiente y drenaje los cuales se realizaron usando datos de campo y del satélite IRSS, con el fin de identificar las áreas convenientes para la recarga artificial.

- En el 2000, SHAHID, S. NATH, K. Y ROY J. Publican un estudio titulado: **Groundwater potential modelling in a soft rock area using a GIS**. Proponen una integración con el uso de los Sistema de Información Geográfico para demarcar las zonas potenciales de agua subterráneas usando datos de: Hidrogeología, litología, geomorfología, suelo, red de recarga, densidad del drenaje, pendiente y cuerpos del agua superficial, usando datos de teledetección para la elaboración de mapas actualizados.
- En el 2002, MUSA, K. AKHIR, J. Y ABDULLAH. realizo un estudio titulado: **Groundwater prediction potencial zone in langat basing the integration of remote sensing and GIS**. En este estudio, la integración de la teledetección y los SIG, fueron utilizados para elaborar un mapa de clasificación de las zonas potenciales de aguas subterráneas.
- En el 2003, JAISWAL, R. K., MUKHERJEE, S., KRISSHNAMURTY, J. Y SAXENA, R. Realizaron un estudio titulado: **Role of remote**

sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development an approach, investigan poblaciones con zonas de perspectiva de agua subterráneas.

Se realiza un acercamiento, extrayendo información de litología, estructuras geológicas, cubierta de la tierra, usos de los suelos y formas del terreno, de redes de drenaje detectadas por métodos convencionales de sensores remotos, de característica del suelo, de la pendiente del terreno, y estudian todos estos de una manera integrada en un ambiente de SIG.

- 2005, RAMIREZ, I., VELA, D. Realizaron un estudio **Hidrogeológico Interpretando Imágenes Satelitales y datos Geoespacial.** Proponen una metodología que permiten realizar una integración de mapas actualizados previamente con una imagen satelital y así obtener posibles zonas de acumulación de agua.
- 2005, ANEIKA PÉREZ y TIBISAY RODRÍGUEZ. Realizaron un estudio titulado **Evaluación de la disponibilidad del recurso de agua subterránea en la población de Duaca estado Lara.** En la cual realiza un modelo hidrogeológico del acuífero de Duaca y sus alrededores usando como parámetros datos de pozos perforados por Hidrolara.

Capítulo II

- Marco Teórico
-

MARCO TEÓRICO

La investigación hidrogeológica, es la disciplina que se encarga de los métodos y procedimientos de estudio de las condiciones hidrogeológicas, del descubrimiento de yacimientos de aguas subterráneas y de la evaluación de sus recursos, reservas, calidad y particularidades de movimiento de dichas aguas, con el propósito de resolver diversas tareas de la economía nacional. Esta disciplina es una de los principales mecanismos de la ciencia hidrogeológica contemporánea que estudia las aguas subterráneas como una sustancia natural peculiar de la Tierra y también como uno de los recursos naturales más valiosos.

Las aguas subterráneas, consideradas en la hidrogeología inseparablemente y en relación con otros tipos de aguas naturales y de rocas, es una de las variedades más importantes y activas de materia geológica, que influyen mucho sobre el curso de los procesos geológicos de la corteza terrestre y las condiciones de su formación.

La forma más evidente de reconocer estas aguas, es a través de manantiales u observando su extracción por medio de pozos o galerías de infiltración.

Uno de los métodos de investigación más importantes para conocer y evaluar los acuíferos, es obviamente la perforación de pozos y la información que se deriva de ellos.

Es imposible concebir el desarrollo de cualquier rama de la economía nacional sin el consumo apreciable de recursos hidráulicos. Por eso el estudio de las aguas subterráneas reviste una gran importancia no solo, desde el punto de vista práctico, sino también en el aspecto

cognoscitivo, constituyendo un factor importantísimo para la concepción materialista correcta de la historia del desarrollo de la tierra.

2.1 Hidrogeología

La hidrogeología es la parte de la geología que estudia las aguas subterráneas.

De manera general puede decirse que la hidrogeología es un área de la ciencia que aumenta el conocimiento humano del universo por medio de observaciones, análisis y la formulación de conceptos generalizados, denominados leyes, cuya validez puede ser comprobada estadísticamente. Es también un instrumento con el que cuenta el hombre para controlar y utilizar el agua y, como tal, constituye un elemento esencial de la tecnología de recursos naturales (Custodio, op cit).

Como todos sabemos, el vapor del agua de la atmósfera cuando se condensa produce la lluvia. Esta agua al caer, una parte discurre por la superficie, dando lugar a los ríos, lagos y océano y otra se infiltra. El agua se infiltra en el terreno, discurriendo por el subsuelo y reapareciendo en la superficie a través de manantiales, ríos o el mar.

El agua subterránea es uno de los recursos más importantes y más ampliamente distribuido de la tierra.

El agua subterránea existe, donde el agua penetra bajo la superficie y las rocas son lo suficientemente permeables para trasportarla. Ella se puede almacenar en los poros, las fisuras, fracturas y cavernas. La cantidad de agua que se infiltra debe ser suficiente para saturar un espesor de roca apreciable, y pasa a ser un recurso aprovechable.

La zona del subsuelo en la que los intersticios están llenos de agua se llama zona saturada. La capa o zona límite de la superficie de saturación de agua se llama nivel freático, el cual puede encontrarse a diferentes profundidades, dependiendo de las circunstancias geológicas y climáticas, desde solo unos centímetros hasta centenas de metros por debajo de la superficie. En la mayoría de los casos la profundidad varía con las circunstancias meteorológicas de las que depende la recarga de los acuíferos. El nivel freático no es horizontal, a diferencia del nivel superior de los mares o lagos, sino que es irregular, con pendiente periódicamente decreciente desde el nivel fijo superior, al nivel fijo inferior. Sobre este nivel se encuentra la zona de aireación, cuya capa más inmediata al nivel freático se denomina franja capilar, ya que en ella el agua se mueve por capilaridad, de forma que existen movimientos ascendentes de agua en sentido contrario a la fuerza de la gravedad. Sobre la franja capilar, en la zona de aireación, se encuentra la zona intermedia, no saturada o de agua vadosa, en la que la circulación es primariamente vertical, representada principalmente por la percolación, la circulación movida por la gravedad del agua de infiltración.

Las aguas subterráneas representan el mayor depósito de agua dulce que resulta fácilmente asequible a los seres humanos (Blyth, 2000).

2.2 Ciclo Hidrológico

La explicación de este enigma tan elemental actualmente está tan inconscientemente divulgada y nos parece tan natural que difícilmente podemos hacernos cargo de que el verdadero papel desempeñado por la precipitación y la evaporación atmosférica, en este aparente misterio no haya sido descubierto hasta la llegada de los tiempos modernos.

El origen y circulación del agua subterránea fue aún más misterioso y confuso a lo largo de la historia. Hoy día asociamos ya casi instintivamente cualquier variación en las precipitaciones, en las aguas superficiales y subterráneas, como oscilaciones parciales de un sistema complejo en el que todas las aguas circulantes de la tierra se encuentran incluidas interrelacionadas. Este sistema complejo es conocido universalmente bajo el calificativo de **ciclo hidrológico**. Los océanos son los inmensos depósitos de los cuales procede toda el agua del ciclo hidrológico y a los cuales retorna.

Esta definición es naturalmente un tanto simplista, pues no todas las partículas de agua recorren el ciclo hidrológico de una manera completa; este sería, por ejemplo, el caso de las partículas de agua que se evaporan sobre la superficie de la tierra y vuelven a la tierra en forma de lluvia, desde donde se evaporan de nuevo, y así indefinidamente, sin llegar nunca a alcanzar el océano. En el caso más complejo del ciclo hidrológico del agua, esta se evapora desde el océano, formando las nubes, las cuales son transportadas hacia los continentes donde se condensan y caen en forma de precipitaciones, las cuales, a su vez, son conducidas por medio de los ríos y del flujo subterráneo hasta el océano.

Desde el punto de vista geológico, parece evidente que el volumen de agua de los océanos ha permanecido aproximadamente constante durante los últimos quinientos millones de años, de donde se deduce que la cantidad total de agua del ciclo hidrológico ha permanecido también prácticamente constante (Blyth, 2000).



Fig. 2.1 Ciclo Hidrológico

Fuente:

http://ciencia.nasa.gov/headlines/Images/Soil_Hydro_Story/hydrocycle1_sm_span.jpg

2.2 Fases del Ciclo Hidrológico

2.2.1 Precipitación

Los cambios de presión y temperatura del aire, junto con los desplazamientos de las masas atmosféricas, originan los fenómenos de saturación del vapor de agua contenida en la atmósfera. Este vapor de agua se condensa en torno a diminutos núcleos de material sólido presentes en la atmósfera en estado de suspensión. La mayor parte de estos núcleos de condensación están constituidos por pequeñas partículas de materia orgánica tales como esporas y polen, cenizas volcánicas, diminutos granos de sal procedentes de la espuma del mar y finísimos granos de diversos minerales pertenecientes principalmente al grupo de las arcillas.

Cuando el vapor de agua se condense en torno a estos núcleos, lo hace en forma de pequeñísimas gotas de diámetro inferior a 0,04 mm. Estas gotitas se mantienen en el aire debido a que la velocidad de caída

correspondiente a su peso es prácticamente despreciable. Las nubes pueden ser consideradas como auténticas suspensiones coloidales de estas pequeñas partículas de agua condensada. Luego debido al desplazamiento sobre regiones de masa de aire frío se origina un enfriamiento de las masas de partículas condensadas aumentando su tamaño por una mayor condensación, luego caen por gravedad generando las precipitaciones (Stanley, 1971).

2.2.2 Evapotranspiración

Los fenómenos de evaporación y de transpiración, que se reúnen bajo el término común de evapotranspiración, desempeñan un papel primordial en el ciclo del agua.

- ➔ **La evaporación** es el proceso mediante el cual las moléculas de agua de una superficie libre o de un suelo humedecido adhieren, mediante la radiación solar, la energía suficiente para escapar del estado líquido y pasar al estado gaseoso. Desempeña un papel capital en hidrología ya que interviene en todas las fases del ciclo del agua.
- ➔ **La transpiración** es un fenómeno biológico ligado a la cobertura vegetal. El consumo de agua por parte de las plantas constituye un medio de descarga del agua subterránea mucho más importante que la evaporación directa de los acuíferos.

Una gran parte del agua que se precipita sobre la superficie de la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de los dos fenómenos descritos anteriormente, esto se debe a la acción de la energía solar, que es la que mantiene el ciclo hidrológico en marcha (Stanley, 1971).

2.2.3 Escorrentía

Este término es generalmente considerado como un sinónimo de aportación de un río, en este sentido representa la suma de la escorrentía superficial y del flujo subterráneo captado por los cauces de los ríos.

La escorrentía superficial suele referirse al volumen del conjunto de las precipitaciones que caen sobre una cuenca, menos la retención superficial y menos la infiltración, es decir, el agua que llega a atravesar la superficie del suelo.

La escorrentía superficial es función de la intensidad de la precipitación, de la permeabilidad de la superficie del suelo, de la duración de la precipitación, del tipo de vegetación, de la extensión de la cuenca hidrográfica considerada, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente de la superficie del suelo.

El estudio de la escorrentía de los ríos, como parte del ciclo hidrológico, incluye el de la distribución del agua y el de su trayectoria, desde que esta se precipita sobre la tierra hasta que alcanza la red hidrográfica o vuelve directamente a la atmósfera a través de la evapotranspiración. Para que el agua llegue a infiltrarse, la superficie del suelo debe presentar una serie de condiciones adecuadas.

Cuando a lo largo de una precipitación, el poder de intercepción y de almacenamiento en la superficie del suelo han sido ya agotados, y cuando la precipitación es tal, que su intensidad excede la capacidad de infiltración del suelo, comienza ya la escorrentía superficial propiamente dicha. La superficie del suelo se cubre en ese momento con una fina película de agua, llamada película de retención superficial. Una vez que

la misma corre sobre la superficie del suelo y alcanza los cauces de la red hidrográfica, comienza a aparecer la escorrentía superficial en los cauces (Stanley, 1971).

2.2.4 Infiltración

Se efectúa con más facilidad a través de fracturas abiertas como en las juntas observadas en las rocas aflorantes y en grietas profundas. Los depósitos superficiales que cubren muchas áreas también permiten la infiltración a través de sus poros. Los depósitos de grava y arena, y los taludes detríticos son adecuados para la infiltración del agua, la cual se efectúa sin ninguna dificultad mientras las cubiertas ricas en arcilla retardan la entrada de agua, aparte de retener la humedad en épocas de lluvia. La vegetación protege la delicada estructura porosa de muchos depósitos superficiales. Al faltar protección, el impacto de las gotas de lluvia, durante períodos de lluvia intensas, puede perturbar la estructura del suelo haciendo que su superficie sea impermeable (Blyth 2000).

La infiltración cesa una vez que los poros internos del terreno se llenen de agua, de manera que si el ritmo al cual se suministra el agua a la superficie excede el ritmo al cual puede percolar, el volumen que puede infiltrarse disminuirá gradualmente. Horton (1933) definió el ritmo máximo al cual el agua de lluvia puede ser absorbida por el suelo como su capacidad de infiltración, y la lluvia que cae a un ritmo que excede esta capacidad puede convertirse en una inundación (Blyth op cit).

2.3 Balance hídrico

Desde el punto de vista hidrogeológico, el balance hídrico tiene como finalidad, determinar el volumen de agua proveniente de la precipitación, la cual recarga a los acuíferos por efecto de la infiltración directa. Los factores que juegan un importante papel en el balance hídrico, son

aquellos que constituyen los gastos y las entradas del fluido. De acuerdo a esto se tiene la ecuación:

$$P = ETR + Esc + I$$

Donde:

P = precipitación media anual (mm)

ETR = evapotranspiración real media anual (mm)

Esc = escorrentía superficial media anual (mm)

I = infiltración eficaz al manto acuífero (mm) (Custodio, 1976).

2.4 Movimiento subterráneo del agua

2.4.1 Zona de humedad

En el subsuelo, el agua se puede encontrar bajo una amplia gama de condiciones que se extienden desde el agua que circula libremente hasta el agua que se encuentra firmemente fija en el interior de las estructuras cristalinas.

El agua del suelo esta diferenciada del agua de las zonas más profundas no saturadas, únicamente por el hecho de que aquella, esta sujeta a grandes fluctuaciones, en cantidad y calidad, debidas al fenómeno de la evaporación y transpiración que sobre ella actúa. Las fluctuaciones de humedad producidas por el efecto evapotranspirante de las plantas disminuye gradualmente en profundidad; de hecho, en la zonas de bosque normal, solo algunas raíces llegan ha alcanzar profundidades superiores a los diez metros.

En las zonas más altas del suelo, hasta una profundidad de unos pocos centímetros, el contenido de humedad varía en función de las

fluctuaciones de las temperaturas y de la tensión del vapor, causadas por las variaciones de temperatura del aire y del suelo. En las noches en las que el suelo pierde gran cantidad de calor por efecto de una fuerte radiación, tiene lugar, como consecuencia, una gran condensación de vapor de agua de la atmósfera sobre la superficie del suelo en forma de rocío; este fenómeno puede llegar a humedecer muy considerablemente los tres primeros centímetros del suelo. Durante los días cálidos, el agua es transportada hasta la superficie del suelo por la acción de las fuerzas capilares desde donde puede ser evaporada a la atmósfera (Stanley, 1971).

2.4.2 Zona intermedia

Esta zona separa la superficie superior de la zona de saturación de la zona de humedad del suelo. Esta agua se desplaza únicamente bajo la acción de la fuerza de la gravedad, por lo que también ha sido denominada por algunos autores con el calificativo de agua gravitacional.

La zona intermedia puede llegar a no existir en el caso de medios muy húmedos o, por el contrario, puede poseer un espesor superior a los 300 m en el caso de las regiones áridas. Si el material de esta zona es isótropo y existe además una importante recarga de agua, su contenido de humedad estará generalmente comprendido entre un punto próximo a la saturación y un punto próximo al índice de retención específica del material en cuestión.

Sin embargo, el terreno natural no suele ser homogéneo, con lo que la recarga se verifica de manera desigual, no uniforme, de unas zonas a otras. Esto se da particularmente en las regiones áridas, donde las precipitaciones son pocas veces suficientes como para satisfacer la capacidad de almacenamiento del suelo. En estas regiones, la principal

recarga tiene lugar a través del lecho de los cauces de los ríos, donde se concentra la escorrentía directa y donde los depósitos permeables de arenas y gravas suelen ser más abundantes (Stanley, 1971).

2.4.3 Franja capilar

Es la zona de saturación arriba del nivel freático. La transición es brusca en el caso de sedimentos de grano grueso, contrariamente puede llegar a ser prácticamente imperceptible en los limos y en las arcillas.

En el caso de suelos de grano fino, si la recarga es activa, la diferencia del contenido de humedad entre la zona intermedia y la franja capilar puede llegar a ser muy pequeña. La parte superior de la franja capilar contiene numerosas bolsas de aire que pueden constituir un freno al movimiento descendente del agua. En la parte inferior de la franja capilar, el terreno alcanza justamente el punto de saturación total.

En áreas calientes y áridas la franja capilar puede extenderse muchos metros y alcanzar la superficie del terreno, en un terreno bajo. En dichas áreas la superficie subterránea se eleva desde la superficie freática hasta la superficie del terreno y sus componentes disueltos se precipitan ahí para formar, con un cemento mineral, una costra también mineral que llena los poros cercanos a la superficie del terreno (Stanley, 1971).

2.4.5 Superficie freática

Es la superficie que separa la franja capilar de la zona de saturación, o bien como la superficie definida por los niveles de agua en los pozos que alcanzan un terreno saturado en condiciones de no confinamiento sobre la cual la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica.

Esta es una superficie teórica que viene determinada de manera muy aproximada por el nivel de la superficie del agua en el interior de los pozos que justamente penetran en el interior de la zona de saturación.

Si el flujo del agua subterránea es horizontal, los niveles del agua en el interior de los pozos corresponden exactamente a la superficie freática (Stanley, 1971).

2.4.6 Zona de saturación

Es la zona situada por debajo de la superficie freática. Esta zona limita en su parte inferior con una zona donde la compacidad del terreno hace que este contenga muy pocos poros, no conectados entre sí, con lo que el agua no puede emigrar en profundidad.

La profundidad de este sustrato compacto, varía con el medio geológico; en zonas de rocas intrusivas y metamórficas, esta zona totalmente impermeable puede comenzar a profundidades superiores a los 3000 m, en regiones de potentes depósitos sedimentarios, la profundidad en la que puede encontrarse este manto impermeable puede llegar a ser hasta de 15000 m. (Stanley, 1971).

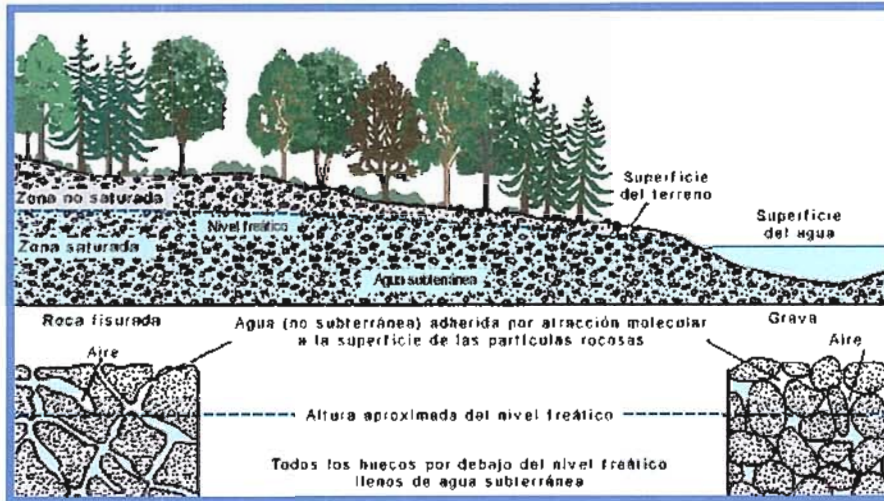


Fig: 2.2. Zonas presentes en un acuífero

Tomado de: <http://www.fortunecity.com/campus/carthage/1033/Pag3/porosidad.gif>

2.5 Características físicas y químicas del agua subterránea

2.5.1 Temperatura

El agua profunda suele moverse muy lentamente, en comparación con algunas aguas superficiales que se escurren mucho más rápido. Es por eso, que la temperatura juega un papel muy importante para su utilidad hidrogeológica e hidroquímica. Estudios realizados han demostrado que cerca de 100 m de profundidad, es aproximadamente desde 1 °C a 1,5 °C por encima de la temperatura media del aire de la localidad. A mayores profundidades su incremento acompaña al gradiente geotérmico.

2.5.2 Turbidez y sabor

La turbidez se presenta en el agua subterránea cuando presenta dificultad de transmisión de luz. Tiene la propiedad de indicar el contenido coloidal y material que se encuentra en suspensión muy fina y difícil de

sedimentar. El sabor que caracteriza al agua establece la variedad en el líquido ya que si se presenta en el agua potable cantidades excesivas de algunas sustancias como por ejemplo: iones de cloruro (genera un gusto salado), o de CO_2 (sabor picante).

2.5.3 Salinidad

Representa la presencia de minerales solubles en el agua. Los iones que dan la salinidad pueden ser arrastrados por el agua que llega desde los continentes, los que traen los magmas que surgen en las dorsales oceánicas y las intrusiones salinas.

La intrusión salina, es el proceso de movimiento temporal o permanente del agua salada tierra adentro desplazando al agua dulce, cuando este proceso es consecuencia de la disminución del flujo de agua dulce hacia el mar, debido a la intervención humana, es decir, a la intensa explotación del acuífero por bombeos. Es un proceso esencialmente contaminante y que deteriora grandes volúmenes de agua, que experimentan un notable incremento de la salinidad. La calidad del agua subterránea se deteriora con el incremento de la salinidad (Tomado de: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ23.pdf>).

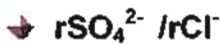
2.5.4 Relación agua dulce-agua salada

El proceso de intrusión marina produce un incremento de la concentración de determinados iones en el agua, cuya concentración en el agua de mar es muy superior a la que habitualmente se encuentra en el agua dulce. El mejor indicador de la contaminación marina es el ión cloruro (Cl^-) que no es alterado por la circulación del terreno. Su concentración es una guía excelente para conocer el porcentaje de agua de mar en la mezcla de agua dulce-agua salado.

Para establecer la existencia de un proceso de salinización por intrusión marina se utilizan algunas relaciones iónicas, entre las que destaca la relación:



Dado que el cloruro prevalece en el agua de mar y que el bicarbonato caracteriza a la mayor parte de las aguas dulces, siendo muy baja su concentración en el agua de mar, el rápido incremento de esta relación es un excelente trazador de la invasión marina. En el agua de mar sus valores oscilan entre 20 y 50, mientras que en las aguas dulces varían en el rango entre 0.1 y 5.0, también la relación:



Es de gran interés para identificar el proceso de intrusión marina ya que tiene un valor característico (0.1) en el agua de mar (Tomado de: http://www.agua.uji.es/pdf/leccionH_Q23.pdf).

2.6 Acuíferos y sus clasificaciones

Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir el agua. Así, cabe indicar que existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua; En los acuíferos hay que distinguir, normalmente, una zona de recarga, por donde entra agua al acuífero, y otra zona de descarga, por donde sale el agua del acuífero, pudiendo localizarse estas zonas en superficie o en otros acuíferos subterráneos.

Los acuíferos típicos están compuestos por gravas, arenas, calizas y las rocas ígneas y metamórficas fracturadas, mientras que los materiales

confinantes típicos son las arcillas, las dolomías, las lutitas, las evaporitas y las rocas ígneas y metamórficas no fracturadas (Custodio, 1976).

2.7 Tipos de acuíferos

- ◆ **Acuíferos:** Se define como el reservorio del cual se pueden extraer cantidades significativas de agua. Es aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros y/o grietas. Dentro de estas formaciones se pueden encontrar materiales muy variados como gravas de río, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas, entre otros (Custodio, 1976).
- ◆ **Acuíferos libres:** Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es el agua que tienen almacenada; este volumen de agua es alto en comparación con los acuíferos que se citan a continuación, y por ello tienen bastante inercia (González de Vallejo, 2002).
- ◆ **Acuíferos cautivos o confinados:** Son aquellos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo del material acuífero; en realidad, están a presión o en carga, debido al peso de los materiales superiores. El agua que ceden procede de la descompresión de estos niveles superiores, cuando se produce la depresión en el acuífero. En rigor, no existen en la naturaleza acuíferos cautivos puros, dado que no existen materiales absolutamente impermeables capaces de aislarlos, aunque a efectos prácticos muchos se pueden

considerar como tales, entre otros aquellas formaciones permeables que permanecen cautivas en una gran extensión y afloran en superficie por alguno de sus extremos (González de Vallejo, 2002).

- ◆ **Acuíferos semi-confinados:** Los materiales que los rodean no son todos impermeables; así, el paquete superior o semi-confinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semi-confinado (González de Vallejo, 2002).
- ◆ **Acuífero colgado:** Algunas veces se da una capa de material más o menos impermeable por encima del nivel freático. El agua que se infiltra queda atrapada en esta capa para formar un lentejón, que normalmente tiene una extensión limitada sobre la zona saturada más próxima. Los acuíferos colgados son más comunes de lo que se pueda suponer, aunque quizás sólo ocupan unos pocos centímetros de espesor, o sólo se alimenten después de una recarga muy excepcional. No suponen un recurso muy fiable, ya que a veces se puede perforar del todo y el pozo construido facilita el drenaje del agua contenida en el lentejón hacia la zona saturada (Custodio 1976).

2.8 Acuíferos según el material litológico que lo conforma

- ◆ **Kársticos o fisurados:** Están agrupado por las calizas, dolomías, basaltos y granitos. Este tipo de acuífero se debe a grietas o fisuras (ver Figuras) (Wilson, 1995).



Fig 2.4: Acuífero kárstico o fisurado.

Tomado de

http://aguas.igme.es/igme/educacion_ambiental/libro_aguas_sub/PAGINAS%20HTML.html

- ◆ **Porosos intergranulares o detríticos:** Compuestos por gravas y arenas. El flujo de agua es debido a la permeabilidad intergranular (ver Figura 2.5).

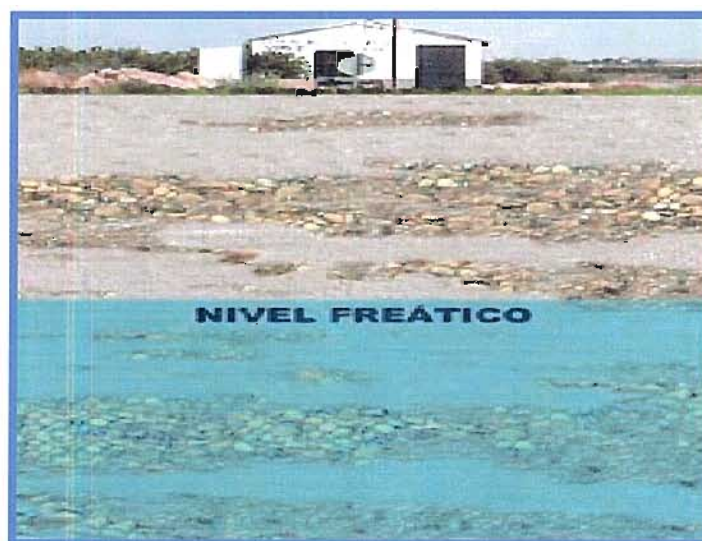


Fig 2.5: Acuífero intergranular o detrítico.

Tomado de

http://aguas.igme.es/igme/educacion_ambiental/libro_aguas_sub/PAGINAS%20HTML.html

- ◆ **Kárstico y poroso:** Son típico de calcarenitas marinas del terciario. Los estratos solubles como las calizas y las evaporitas pueden tener vacíos creados o agrandados por la disolución para formar túneles y cavernas, también en las rocas volcánicas pueden existir túneles. La mayoría de los suelos transmiten el agua a través de sus poros, mientras que la transmisión en las rocas es por poros y fracturas. Las fracturas normalmente transmiten más aguas que los poros (Wilson, op cit).

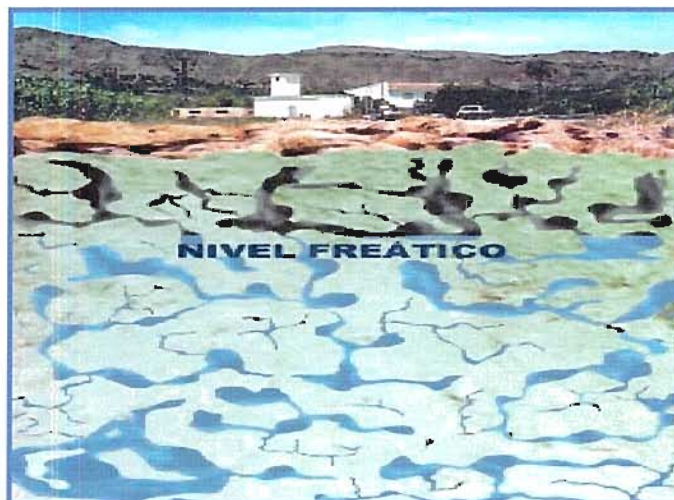


Fig 2.6: Acuífero kárstico o fisurado.
Tomado de

http://aguas.igme.es/igme/educacion_ambiental/libro_aguas_sub/PAGINAS%20HTML.html

2.9 Acuíferos según su comportamiento hidrogeológico

- ◆ **Acuicludos:** Pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.); en hidrogeología clásica, se asumen como impermeables, pero en ingeniería geológica, este concepto se

hace menos preciso, pues drenajes muy limitados pueden presentar problemas en determinadas obras.

- ◆ **Acuífugos:** Formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin calcificar; se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos (González de Vallejo, 2002).
- ◆ **Acuitardos:** Capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.), y su capacidad de drenaje es media a baja; no son de interés para la obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel muy importante como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.

En la Figura 2.3 podemos observar los diferentes tipos de acuíferos según su presión hidrostática y comportamiento hidrogeológico.



Fig: 2.3. Tipos de acuíferos en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos y según su comportamiento hidrogeológico.

Tomado de <http://images.google.co.ve/imgres?imgurl=http://aguas.igme.es/>

2.10 Características hidrogeológicas

2.10.1 Porosidad

La porosidad es una de las características esenciales de las rocas en lo que se refiere a sus propiedades acuíferas y se define como el porcentaje de vacíos contenido en un volumen total dado. Es la relación entre el volumen de vacíos contenido en la estructura sólida de un material y su volumen total. La porosidad depende del tamaño, de la forma y gradación de las partículas sólidas que componen un sedimento y del tamaño, forma y distribución de las grietas, fisuras, vesículas y/o canales en las rocas. Esta propiedad indica cuanta agua puede almacenar un acuífero (Custodio, 1976).

$$n(\%) = (Vv/Vt)*100$$

Donde:

n = Porosidad

Vv = Volumen de vacíos

Vt = Volumen total

2.10.2 Porosidad eficaz

Tiene discrepancia con la anterior, porque su valor se expresa en términos porcentuales del volumen de agua drenable o movable a través de los espacios que se encuentran interconectados en la roca almacén. En resumen, la porosidad eficaz nos indica el porcentaje de la porosidad total que puede ser extraída como líquido del acuífero (Custodio, op cit). De esta manera, la ecuación de la porosidad eficaz es la siguiente:

$$ne = (Val/Vt)*100$$

Donde:

n_e = Porosidad eficaz

V_{al} = Volumen de agua libre

V_t = Volumen total

A continuación se presentan los valores de porosidades eficaces de algunos materiales (ver Tabla # 2.1)

Tabla 2.1: Porosidades totales y eficaces de diversos materiales según Johnson (1967), Schoeller (1962) y Ward (1967). Tomada de: Guerrero (2000). En Grisolia y Rojas 2005.

Tipo	Material Descripción	Porosidad Total (%)			Porosidad Eficaz (%)		
		Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.
Rocas Masivas	Granito	0,3	4	0,2	<0,2	0,5	0
	Caliza masiva	8	15	0,5	<0,5	1	0
	Dolomía	5	10	2	<0,5	1	0
	Areniscas	15	25	3	10	20	0
Rocas metamórficas		0,5	5	0,2	<0,5	2	0
Rocas Volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	<5	20	0
	Escorias	25	80	10	20	50	1
	Pumitas	85	90	50	<5	20	0
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1	<1	2	0,1
	Basaltos vacuolares	12	30	5	5	10	1
	Aluviones	25	40	20	20	35	5
Rocas Sedimentarias Seltas	Dunas	35	40	30	25	30	10
	Gravas	30	40	25	20	35	10
	Loess	45	55	40	<5	10	0,1
	Arenas	35	45	20	25	35	10
	Depósitos glaciares	25	35	15	15	30	5
	Limos	40	50	35	10	20	2
	Arcillas sin compactar	45	60	40	2	10	0
	Suelos superiores	50	60	30	10	20	1

2.10.3 Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad que indica la capacidad que tiene una roca para conducir un fluido a través de sus poros interconectados. Una de las posibles formas para determinarla, es utilizando correlaciones entre porosidad y permeabilidad, a pesar de que esos resultados son muchas veces cuestionados en rocas poco o nada consolidadas. La relación estadística compleja entre porosidad y permeabilidad puede decirse, en general, que consiste en que las rocas más porosas (grano de tamaño uniforme) tienen una mayor permeabilidad que las menos porosas, y aunque la porosidad puede ser alta en algunas rocas de grano fino, la reducción en el tamaño de los poros trae como resultado una disminución en la capacidad de flujo dentro de la roca. En consecuencia, la permeabilidad disminuye. De igual manera, en otras formaciones como las calizas las cuales se componen de roca densa interrumpidas por fisuras muy pequeñas o por fracturas de gran extensión, la porosidad en tales formaciones puede ser baja, pero la permeabilidad de una fractura puede ser muy grande. En consecuencia, las calizas fracturadas pueden exhibir una porosidad baja conjuntamente con una permeabilidad extremadamente alta.

Técnicamente, el coeficiente de permeabilidad de Darcy, K , es el volumen de agua libre que percola durante la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de una sección total del acuífero bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad, a la temperatura de 20°C (Castany, 1975). Evidentemente, la permeabilidad K depende de las condiciones del suelo y de las características del fluido tales como:

- ✓ Forma, tamaño y disposición de los granos
- ✓ Viscosidad y densidad del fluido

Según la fórmula de Darcy, la permeabilidad viene dada por:

$$K=Q/(I \cdot A)$$

Donde:

K = Permeabilidad (m / día)

Q = Caudal (m³ / día)

I = Gradiente Hidráulico (Adimensional)

A = Superficie de la sección flujo (m²)

Tabla 2.2 Clasificación de terrenos por la permeabilidad según Johnson (1967), Schoeller, (1962) y Ward, (1967). Tomado de: Guerrero, (2000).

Permeabilidad en m/día	10 ⁻⁴ 10 ⁻³	10 ⁻² 10	1 10 ⁻¹	10 ⁻² 10 ⁻³	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶
Clasificación geológica	Gravas limpias	Gravas y arenas o arenas gruesas	Arenas finas o con mezcla de limos	Limos o arcillas arenosas	Arcillas compactas
Clasificación hidrogeológica	Buen acuífero		Acuífero pobre	Acuitardo	Prácticamente impermeable

2.10.4 Transmisividad

Se define como el producto de la permeabilidad por el espesor del acuífero. Por tanto, la transmisividad es el caudal del flujo de agua bajo un gradiente hidráulico unitario a través de una sección de anchura unitaria y altura igual al espesor del acuífero. Se define como T y tiene dimensiones de L² / t que indica longitud al cuadrado sobre el tiempo (m² / día) (Custodio, 1976).

Se expresa como:

$$T = K * e$$

Donde:

T = Transmisividad.

K = Permeabilidad o Conductividad Hidráulica

e = espesor saturado del acuífero.

2.10.5 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento se expresa como el volumen de agua de una columna vertical del acuífero, que tiene como base la unidad de área y como altura el espesor medio del acuífero (Figura 3.5), libera por expansión el agua y compactación de la matriz sólida cuando la carga hidráulica disminuye en una unidad. Amisial y Jegat, (1984), citado por Moreno y Carrero, 2005.

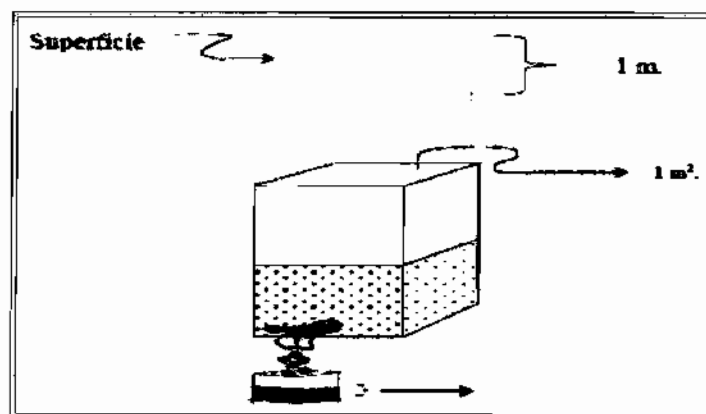


Figura 2.7. Coeficiente de almacenamiento. Modificado de Apelo y Potsma (1993). Tomada de Rojas 2003. En Moreno y Carrero 2005.

El coeficiente de almacenamiento es, como la porosidad eficaz, adimensional (volumen / volumen), y los valores que presenta son mucho

más bajos en los confinados perfectos que en los semiconfinados. Se tendrá que los valores típicos son:

- ✓ Acuíferos libres: 0,3 a 0,01 (3.10⁻¹ a 10⁻²)
- ✓ Acuíferos semiconfinados: 10⁻³ a 10⁻⁴
- ✓ Acuíferos confinados: 10⁻⁴ a 10⁻⁵

El coeficiente de almacenamiento está relacionado con el almacenamiento específico (SS) y es un número adimensional.

$$S = e * Ss$$

Donde:

S = Coeficiente de Almacenamiento

e = Espesor medio del acuífero

Ss = Almacenamiento Específico.

2.11 TELEDETECCIÓN

Es una técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre e información de objetos o fenómenos sin mantener contacto físico con ellos situados en la Tierra, desde sensores instalados en plataforma espaciales, asumiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética.

Los elementos que constituyen la corteza terrestre, rocas, suelo, vegetación y agua, así como objetos que la recubren, absorben, reflejan o emiten una cantidad de energía que depende:

- ◆ De la longitud de ondas
- ◆ De la intensidad de la radiación incidente
- ◆ De la características de los objetos y elementos y, en particular de las características de absorción.
- ◆ De la orientación de estos objetos y elementos con respecto al sol o a la fuente de iluminación.

En geología es de amplia difusión y tradicional el uso de la fotografía aérea. Sin embargo, la aparición de la teledetección espacial, aportando nuevas tecnologías que permiten detectar rasgos ocultos al ojo humano, abre unas perspectivas esperanzadoras para la observación e interpretación de los hechos geológicos.

Actualmente, las técnicas de teledetección son cuatro:

- ◆ La fotografía aérea o espacial
- ◆ La teledetección multispectral visible
- ◆ La teledetección térmica
- ◆ La radargrafía

La difieren por el tipo de sensores empleados, cámara, radiómetro y radar, y por el modo de adquisición, activo o pasivo. Las tres primeras técnicas se llevan a cabo en modo pasivo, la última en modo activo.

2.12 El análisis de los datos de teledetección se funda en cuatro principios generales:

- ◆ La imagen obtenida es una representación objetiva de un paisaje en un instante dado.
- ◆ Este paisaje esta compuesto de elementos, reflejo de ciertos acontecimientos, de los que la imagen registra los aspectos físicos y biológicos.
- ◆ Condiciones semejantes, en un mismo ambiente, originan un paisaje idéntico, y condiciones diferentes reflejan un paisaje diferente.
- ◆ La calidad y cantidad de la información que es posible extraer de los datos de teledetección, esta en función del grado de conocimiento, experiencia e interés del analista, así como de los métodos utilizados. No obstante, un buen analista debe conocer y tener en cuenta los límites de la técnica que suministra los datos que sirven de base a su interpretación.

2.13 Elementos de un proceso de teledetección

Un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos:

1. *Fuente de energía:* Supone el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse de un foco externo a este, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva o de un haz energético emitido por el sensor (teledetección activa). La fuente de energía más importante es el sol.
2. *Cubierta terrestre:* Formada por distintas masas de vegetación, suelo, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de (1), y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

3. *Sistema sensor*: Compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla, y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
4. *Sistema de recepción-comercialización*: Es aquí donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los interesados.
5. *Interprete*: Es el que convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, de cara a facilitar la evaluación del problema en estudio.
6. *Usuario final*: Es el encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven (Chuvieco, 2002).

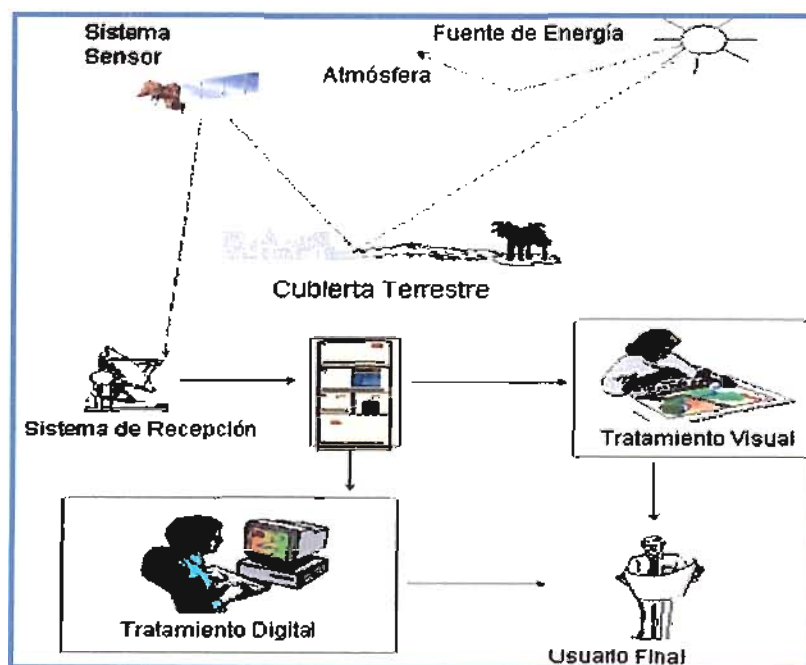


Fig 2.8: Elemento de teledetección
Tomado de Chuvieco, 2002, pag.19

2.14 Principios físicos de la teledetección

2.14.1 La radiación electromagnética

Dada la importancia que la radiación electromagnética tiene como transmisor de información en toda la forma de teledetección, es necesario hacer un estudio de la misma.

La radiación es una de las tres formas de transmisión de energía en la naturaleza (conducción, convección y radiación), siendo la única que se trasmite sin contacto material entre el emisor y el receptor. Esta puede ser explicada a partir de la teoría ondulatoria.

La teoría ondulatoria trata de que la energía electromagnética se transmita de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz. Se asume que la radiación se produce como resultado de oscilaciones en los campos eléctricos y magnéticos en las inmediaciones de los objetos. Estas oscilaciones generan ondas que contienen dos (02) campos de fuerzas ortogonales entre sí, eléctrico y magnético transmiten la energía. Al ser ondas pueden definirse por una serie de parámetros:

- Longitud (λ) o distancia entre dos picos de ondas se mide en μm .
- Frecuencia (ν) o tiempo transcurrido entre el paso de dos picos de onda, se mide en hercios. Una onda que pasa una cresta por segundo se dice que tiene una frecuencia de un ciclo por segundo.

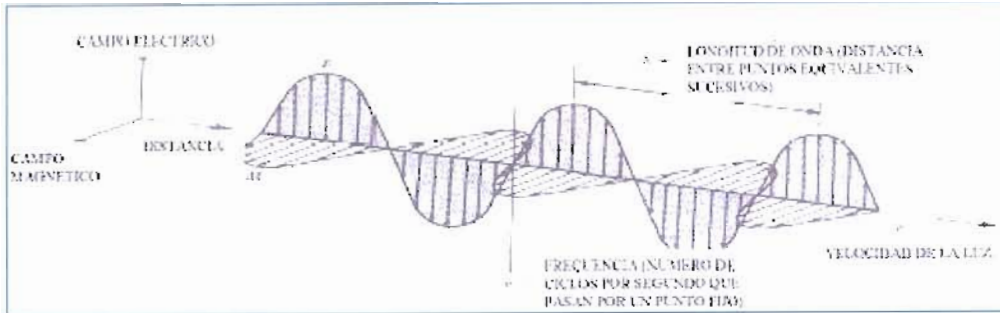


Fig 2.9 Radiación Electromagnética

<http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm>

El producto de ambos es la velocidad de la luz $C = \lambda * \nu = 3 \times 10^8$

2.14.2 El espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Cuando se refiere a un objeto se denomina espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar.

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

Suelen establecerse una serie de regiones o bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. Los límites que se han fijado a esas regiones son aproximados. Cada una de estas regiones se divide además en categorías adicionales. La luz visible

suele dividirse en azul (0.4-0.5 μm) y rojo (0.6-0.7 μm) aunque en la realidad se presenta un continuo de colores. La radiación infrarroja se divide en infrarroja próxima (0.7-1.3 μm), infrarrojo medio (1.3-8 μm) e infrarrojo térmico (8-14 μm).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual.

- **Espectro visible** (0.4 a 0.7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de ondas en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denomina azul, verde y rojo, en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.
- **Infrarrojo cercano** (0.7 a 1.3 μm). También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de el puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales.

Esta banda espectral resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- **Infrarrojo medio** (1.3 a 8 μm). Esta región se entremezcla los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. La primera banda se sitúa entre 1.3 y 2.5 μm , y se denomina de onda corta, que resulta idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o en los suelos. La segunda, comprendida principalmente en torno a 3.7 μm ,

se conoce propiamente como infrarrojo medio (IRM). Siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).

- **Infrarrojo lejano o térmico (IRT, 8 a 14 μm)**, que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- **Micro-ondas (M, por encima de 1mm)**, con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubes.

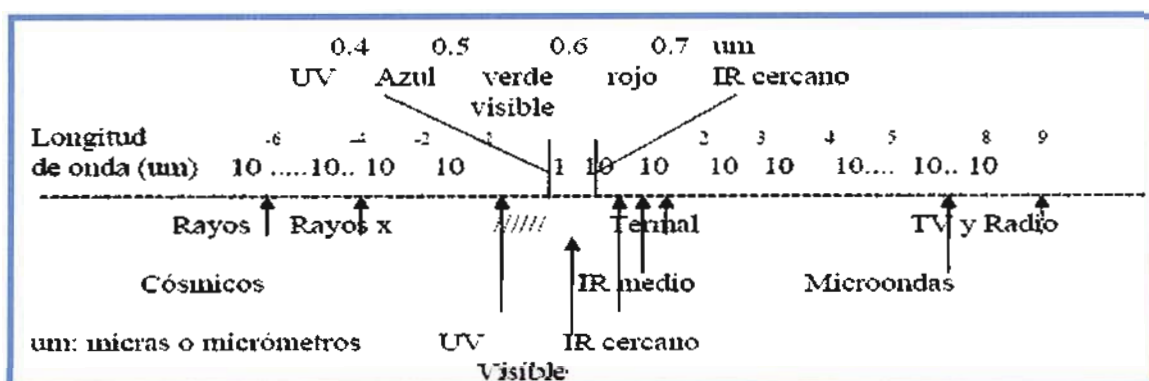


Fig. 2.10: Spectrum Electromagnetico

<http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm>

2.14.3 Signaturas espectrales

De cara a la identificación de objetos y procesos de la superficie terrestre, lo que nos interesa es la reflectividad de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidentes de forma diferente, lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada. A partir de medidas de laboratorio puede obtenerse unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas

terrestres, que suelen denominarse *signaturas* o *firmas espectrales*. Algunas cubiertas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de ondas, mientras otras ofrecen un comportamiento más selectivo. Por ejemplo, la nieve presenta una reflectividad alta, pues refleja la mayor parte de la energía incidente en esas longitudes de onda. Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe (Chuvienco, 2002).

Estas variaciones de reflectancia son evidentes cuando comparamos las curvas de reflectancia espectral (gráficos de reflectancia versus longitud de onda) para diferentes materiales, como en la ilustración de abajo. Las desviaciones pronunciadas hacia abajo de las curvas espectrales marcan los rangos de longitud de onda en los cuales los materiales selectivamente absorben la energía incidente.

Estas características son comúnmente llamadas: *bandas de absorción*. La forma general de una curva espectral y la posición y fuerza de las bandas de absorción en muchos casos puede ser usada para identificar y discriminar materiales diferentes. Por ejemplo, la vegetación tiene reflectancias más altas en el rango del infrarrojo cercano y más baja reflectancia en la luz roja que los suelos.

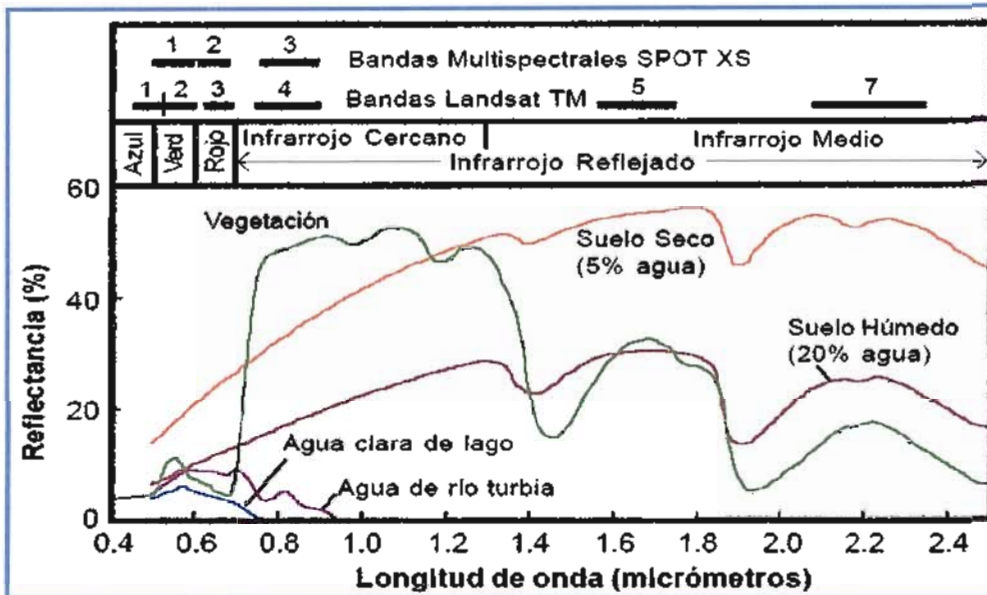


Fig 2.11: Firmas Espectrales

<http://www.um.es/geograf/sigmur/presentaciones/tema10.pdf>

Curvas representativas de reflectancia espectral para varios materiales terrestres comunes desde los rangos de luz visible hasta el espectro reflejado infrarrojo. Las bandas espectrales usadas en varios sensores remotos de satélites multispectrales, son mostradas arriba para compararlas. La reflectancia, es una cantidad sin unidades con valores de rango entre 0 a 1.0, o puede ser expresada como un porcentaje, como en este gráfico.

2.14.4 Espectrometría de minerales

En materiales inorgánicos tales como minerales, composiciones químicas y estructuras cristalinas, éstos controlan la forma de la curva espectral y la presencia y posiciones de bandas de absorción específicas. Las longitudes de onda de absorción específicas pueden ser usadas para la presencia particular de elementos químicos e iones, la carga iónica de ciertos elementos, y la geometría de las cadenas químicas entre elementos, lo cual es gobernado en parte por la estructura cristalina.

La ilustración de abajo muestra la espectrometría de algunos minerales comunes representativos (compuestos de ocurrencia química natural que son los mayores componentes de rocas y suelos), que proveen ejemplos para estos efectos.

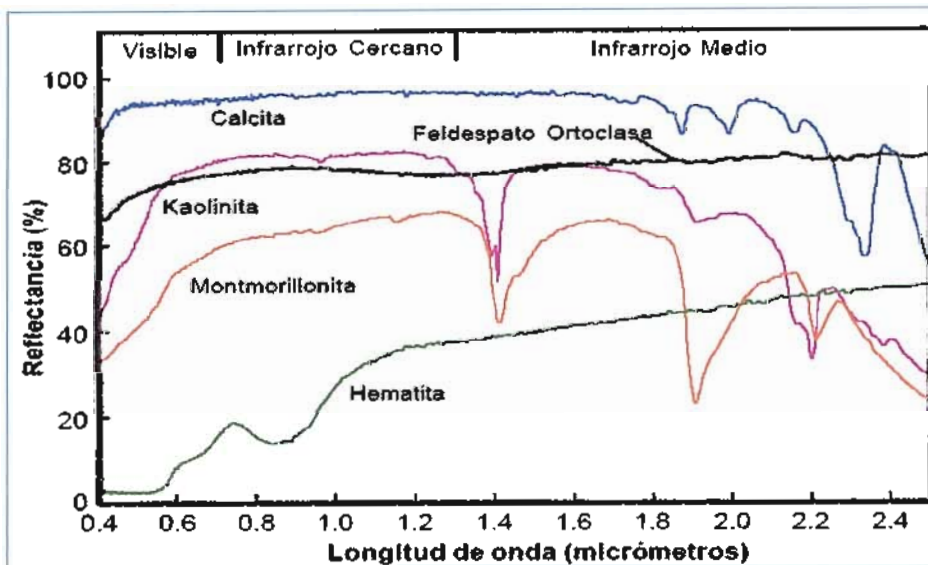


Fig 2.12: Firmas Espectrales de algunos minerales

<http://www.um.es/geograf/sigmur/presentaciones/tema10.pdf>

2.14.5 Espectrometría de las plantas

Las curvas de reflectancia espectral de las plantas verdes sanas tienen también una forma característica que es dictada por varios atributos de las plantas. En la porción del visible del espectro, la forma de la curva es gobernada por los efectos de absorción de la clorofila y otros pigmentos de las hojas. La clorofila absorbe la luz visible muy efectivamente pero absorbe las longitudes de onda azules y rojas más fuertemente que el verde, produciendo una pequeña cima de reflectancia dentro del rango de la longitud de onda del verde. Como consecuencia, las plantas sanas no aparecen verdes en color. La reflectancia aumenta abruptamente a lo largo del borde entre las longitudes de onda del rojo y el infrarrojo cercano (a veces referido como el borde rojo) a valores cercanos de 40-50% para

la mayoría de las plantas. Esta alta reflectancia en el infrarrojo cercano es debida primariamente a las interacciones con las estructuras celulares internas de las hojas. La mayoría de la energía remanente es transmitida, y puede interactuar con otras hojas más abajo en el follaje. La estructura de las hojas varía significativamente entre las especies de plantas, y también puede cambiar como resultado del estrés de las plantas. Así, el tipo de especie, el estrés de las plantas, y el estado del follaje todo pueden afectar las mediciones de reflectancia en el infrarrojo cercano. Más allá de 1.3 μm la reflectancia decrece a medida que aumenta la longitud de onda, con la excepción de dos pronunciadas bandas de absorción de agua cerca de los 1.4 y 1.9 μm .

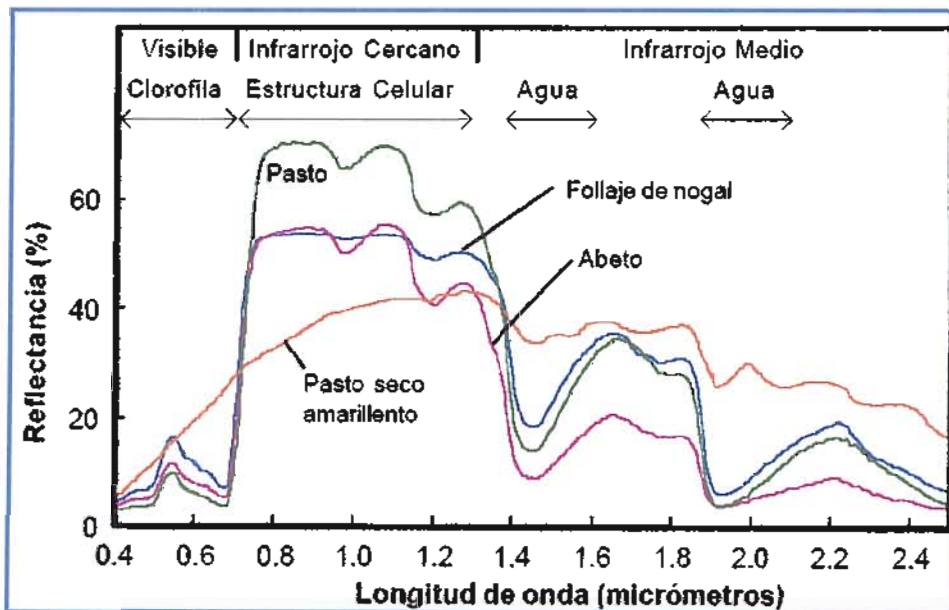


Fig 2.13: Firmas espectrales de las Plantas

<http://www.um.es/geograf/sigmur/presentaciones/tema10.pdf>

Reflectancia espectral de diferentes tipos de vegetación verde comparados con una curva espectral de hojas senescentes (secas, amarillentas). Las diferentes porciones de las curvas espectrales para la

vegetación verde son formadas por los diferentes componentes de las plantas, como es mostrado arriba.

2.14.6 Espectrometría de las Rocas

La reflectancia de las rocas varía según su composición en minerales básicos. Por esta razón, las rocas oscuras, como las peridotitas, poseen una reflectancia más débil que las rocas claras de los tipos de los granitos y granodioritas. En cuanto a las rocas coloreadas, tienen una dominancia espectral en su propio color, pero sobre todo en el infrarrojo.

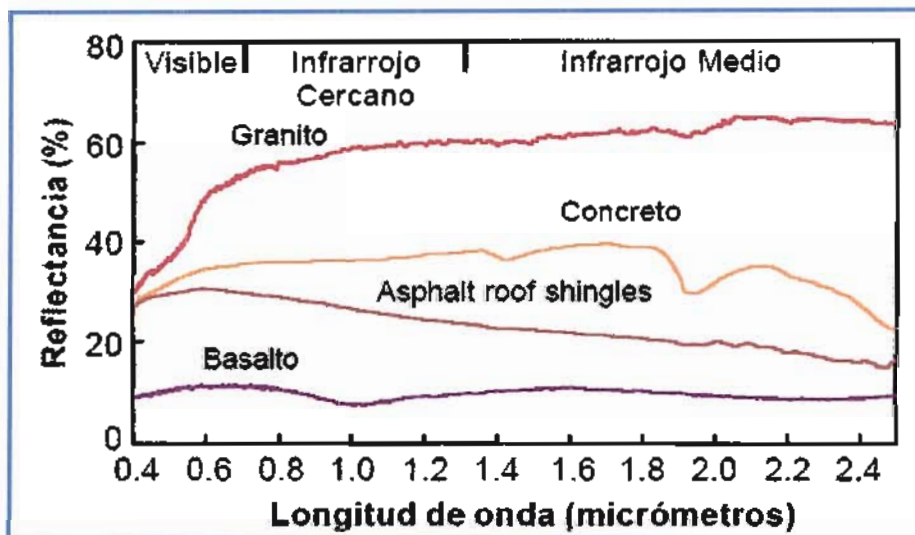


Fig 2.14: Firmas Espectrales de las Rocas

<http://www.um.es/geograf/sigmur/presentaciones/tema10.pdf>

2.14.7 Espectrometría de los Suelos

Las propiedades espectrales del suelo son relativamente simples. La transmisión es nula por tanto, la energía se absorbe o refleja. En términos generales, la reflectividad es relativamente baja para todas las bandas aunque aumentando hacia el infrarrojo.

Como consecuencia del efecto de pantalla provocado por la cubierta vegetal no resulta sencillo obtener información del sustrato geológico a partir de sensores espaciales. Sin embargo, pueden obtenerse algunos datos indirectos sobre las características del suelo/litología gracias a las anomalías que puedan detectarse en esa cubierta vegetal. Ejemplo de este tipo de modificaciones son: distribución peculiar de especies, crecimiento o densidad irregular, alteraciones de la pigmentación o del ciclo fenológico. Si bien no todos estos fenómenos pueden ser imputados al sustrato geológico, algunos estudios han demostrado la posibilidad de inferir valiosa información de este a partir de la vegetación.

En lo que atañe a los suelos desnudos, su comportamiento espectral es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva espectral más plana. Los principales factores que intervienen en este caso son la composición química del suelo, su textura, estructura, y contenido de humedad.

La composición química es la causa de el color dominante con el que percibimos el suelo, los de origen calcáreo tienden al color blanco, indicando una alta reflectividad en todas las bandas visible, por su parte, los suelos arcilloso ofrecen una mayor reflectividad en el rojo, como consecuencia de su alto contenido en óxido de hierro.

El contenido de humedad es uno de los elementos más destacados en la reflectividad del suelo para estas longitudes de ondas, como consecuencia de la alta absorción del agua en estas bandas influye inversamente en la reflectividad de el visible e infrarrojo.

2.14.7 Espectrometría del agua

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación óptica que reciben, siendo mayor su absorción, cuando mayor

sea la longitud de ondas. La curva espectral, por tanto, es similar a la del suelo, aunque de sentido contrario, la mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde ya es prácticamente nula.

La variabilidad del agua es mas fácilmente detectable en las longitudes de ondas mas cortas (azul y verde), y se relaciona con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, sedimento y nutrientes), y rugosidad de la superficie. La turbidez del agua, relacionadas con su contenido de sedimentos, implica aumento de la reflectividad en todas las bandas del visible, para distintos diámetros de partículas.

2.15 Satélite de recursos naturales

Son satélites de orbita polar, con mayor resolución espacial y que fueron diseñados para la observación de la Tierra y la evaluación de sus recursos naturales. Uno de los mas importantes es el del programa Landsat y Spot (Chuvico, 2002).

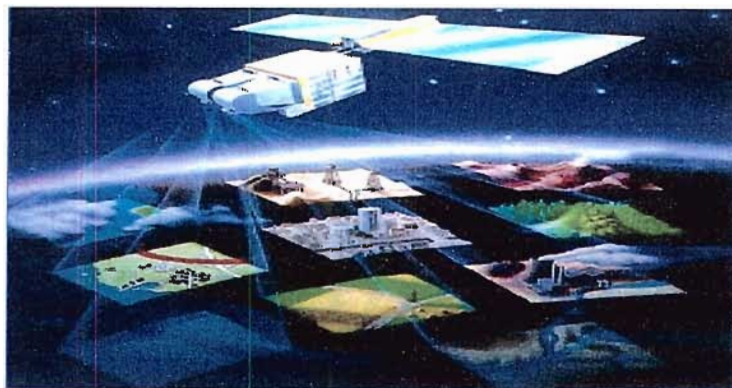


Fig 2.15 Satélite Landsat
www.southpor.jpl.nasa.gov/GRFM

2.15.1 Landsat

Este se inicio en 1972 con el lanzamiento del Landsat-1, en 1999 se lanzo el Landsat-7. Todos tienen una orbita casi polar, heliosíncrona, a una altura de 917 km (Landsat 1, 2 y 3) y 705 km (Landsat 4,5 y 7) y un ciclo de 18 días (Landsat 1,2 y 3) y 16 días (Landsat 4, 5 y 7). El Landsat 6 no logro su órbita durante su lanzamiento (Chuvieco, 2002).

Landsat-TM (1972):

Se encuentra clasificado dentro de los sensores pasivos, que se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior como puede ser la energía solar reflejada por la vegetación. Estas imágenes comprenden 7 bandas y cada una de ellas tiene aplicaciones específicas. Este fue diseñado para la cartografía temática ya que cuenta con una resolución espacial de 30m. (Chuvieco, 2002).

Landsat-ETM+ (1999):

Es el último satélite lanzado el cual incorpora una banda adicional pancromática número 8 con una resolución espacial de 15 m, las demás bandas son las mismas que posee el TM. La banda pancromática esta siendo de gran utilidad para obtener productos cartográficos de mayor Calidad (Chuvieco, 2002).

2.16 Descripción de cada una de las bandas que componen las imágenes Landsat

- **Banda 1:** Provee incrementos de penetración en los cuerpos de agua, análisis en el uso de los suelos y características de vegetación.

- **Banda 2:** se extiende entre los límites azul y rojo de absorción de clorofila y por lo tanto corresponde a la reflexión verde de la vegetación viva.
- **Banda 3:** absorción de clorofila en rojo de la vegetación verde viva.
- **Banda 4:** Es sensible a la cantidad de biomasa vegetativa presente. Es útil para la clasificación de cultivo, contraste suelo-cultivo y tierra-agua.
- **Banda 5:** Es útil en estudio de cultivos en zonas secas y vigor de las plantas.
- **Banda 6:** Mide la cantidad de energía radiante emitida de la superficie. Útil en estudio de actividades geotermales, mapeo para la clasificación geológica y estudio de humedad del suelo.
- **Banda 7:** Útil para la discriminación de formaciones geológicas, particularmente en la identificación de las zonas hidrotermal en las rocas.
- **Banda 8:** Pancromática ideal para cartografía (mapas con alta precisión).

2.17 Imágenes SPOT

El primer satélite SPOT (*Systeme Pour l'Observation de la Terre*) se lanzó en 1986. Desde entonces se han lanzado otros tres satélites en 1990, 1993 y 1998. Todos ellos se han desarrollado en el CNES francés, en colaboración con Bélgica y Suecia. El SPOT orbita a una altitud de unos 822 km, con una inclinación de 98° y un periodo orbital de 101 min. Cuenta con una órbita heliosíncrona y la duración del ciclo es de 26 días.

Entre las novedades mas interesantes de este satélite se contaba la incorporación de dos equipos de exploración por empuje denominados HRV (*Haute Resolution Visible*). Estos dos sensores permiten obtener imágenes en dos modalidades: pancromático y multibanda (V, R, IRC), con una resolución espacial de 10 y 20 m, respectivamente. El área cubierta en cada escena es de 60 km de lado, por lo que estos sensores necesitan incorporar 3.000 detectores en modo multi-espectral y 6.000 en modo pancromático.

Otra importante novedad que incluyo el satélite SPOT era la capacidad del sensor HRV para variar su campo de visión, gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico que facilita observaciones no verticales, de hasta 27° a ambos lados del nadir. Esto le permite observar la misma zona en orbitas sucesivas, reduciendo la frecuencia temporal de las imágenes si es necesario (de 26 días a 2-3 días según las latitudes). Además, con esa misma aptitud, el HRV puede adquirir imágenes estereoscópicas, lo que añade a su potencial temático una clara capacidad topográfica. Las experiencias realizadas hasta el momento han permitido obtener modelos digitales del terreno con escalas de hasta 1:50,000, a partir de imágenes SPOT (Toutin y Beaudoin, 1995). En definitiva, la flexibilidad del sistema le facilita adaptar su orbita a las necesidades del usuario (Chevrel *et al.*, 1981; Kayser *et al.*, 1992).

Además del sensor HRV, los siguientes satélites SPOT han incorporado dos equipos de apoyo, el DORIS, que proporciona un seguimiento muy preciso de la posición del satélite, y el POAM (*Polar Ozone and Aerosol Measurement*), incorporado en el SPOT-3, que mide el contenido de ozono, aerosoles, nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Poseía 9 canales comprendidos entre el ultravioleta e infrarrojo cercano (Kramer, 1994).

El lanzamiento del SPOT-4 en 1998 supuso una mejora notable en la carga útil del satélite. El sensor de alta resolución paso a denominarse HRVIR, incorporando una nueva banda en el SWIR. Además, la orientación de las dos cámaras es ahora independiente, lo que permite tomar simultáneamente imágenes verticales y oblicuas. Se ha ampliado también la autonomía de grabación. Este satélite también incorpora los equipos DORIS y POAM. Sin embargo, la principal novedad es la inclusión de un nuevo sensor idóneo para estudios globales. Se denomina *Vegetation*, y cuenta con una resolución espacial de 1 km, en 4 bandas espectrales (A, R, IRC, SWIR), cubriendo un área de 2.250 km, lo que facilita una adquisición diaria sobre todo el planeta (Eastwood *et al.*, 2000). Si bien este sensor cuenta con una radiometría más estable y unas condiciones geométricas de adquisición mucho más favorables.

El proyecto SPOT pretende continuarse con un nuevo lanzamiento que incorpore mejoras en la resolución espacial (de 10 a 5 o 2,5 m en el pancromático, y de 20 a 10 m en el multiespectral, salvo el SWIR, que seguirá con 20 m).

2.18 Resolución de un sistema sensor

- **Resolución espacial:** Este término designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. La resolución espacial de los sensores de observación terrestre en funcionamiento, recoge un rango bastante amplio. Los sensores que cuenta con mayor resolución ofrecen un detalle entre 0.61 y 4 metros, mientras los de recursos naturales diseñado para adquirir información sobre áreas muy heterogéneas, suelen contar con resoluciones comprendidas entre los 6x6 metros del sensor pancromático, hasta 120x120 metros del canal térmico del Landsat.

Esta resolución tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen, por cuanto marca de alguna forma el nivel de detalle que esta ofrece (Chuvico, 2002).

- **Resolución espectral:** La resolución espectral indica el número y anchura de las bandas en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. En principio cuanta más bandas incluya un sensor, mejor, ya que cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada. Por otro lado, es preferible que estas bandas sean estrechas para que su poder discriminante se incremente. Si las bandas son muy anchas van a recoger valores promediados que ocultaran elementos de diferenciación. La elección del número, anchura y su localización en el espectro de las bandas que incluye el sensor va depender de los objetivos que se pretendan cubrir con la puesta en funcionamiento del sensor (Chuvico, 2002).
- **Resolución radiométrica:** Esta indica la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada pixel. Para los óptico-electrónicos, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, por lo que la resolución radiométrica suele identificarse con el rango de valores que codifica el sensor (Chuvico, 2002).
- **Resolución temporal:** Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, se refiere a la periodicidad con la que este adquiere imágenes de

la misma proporción de la superficie terrestre. Conviene tener en cuenta que la resolución temporal dependerá también de las condiciones atmosféricas, ya que con sensores ópticos o térmicos no podremos observar áreas cubiertas por nubes, por lo que en algunas zonas la cadencia de imágenes útiles puede ser notablemente mas baja que el ciclo de adquisición del sensor (Chuvico, 2002).

2.19 Teledetección en hidrogeología.

Las imágenes captadas por los satélites suministran una gran ayuda para evaluar superficie terrestre. A pesar de ciertas limitaciones, esta técnica se ha consolidado como una herramienta valida para el control de las extracciones de agua subterránea.

Para realizar este estudio, se requieren características específicas de los sistemas de teledetección más utilizados en recursos naturales, así como los programas avanzados para el tratamiento e interpretación de las imágenes.

2.20 Puntos de partida para la selección de imágenes

Cuando el objetivo es un estudio de aguas subterráneas, hay que preguntarse si la utilización de esta técnica puede aportar ventajas, y tener en cuenta que su sola aplicación no será suficiente.

Son ya muchos los estudios en los que la teledetección espacial ha sido eficazmente utilizada como fuente de información: cartografía de usos del suelo, estudio de topo-clima, estadística agraria, exploración minera, estudio del medio marino, evaluación de impactos ambientales y recursos hidrológicos.

En resumen, pueden agruparse en tres los tipos de productos derivables de una imagen digital:

- Cartografía temática
- Medida de variables continuas
- Vigilancia ambiental

La elaboración de cartografía temática a partir de información espectral esta basada en la clasificación y/o segmentación de imágenes. El resultado es la división del territorio en categorías homogéneas, información muy útil en la elaboración de inventario y estudio de recursos naturales.

La vigilancia ambiental se basa en la cobertura cíclica de la superficie terrestre, lo que proporciona información muy útil en el seguimiento de proceso ambiental dinámico como el crecimiento urbano o la erosión.

2.21 Escala y resolución de las imágenes

Teniendo en cuenta que para este tipo de aplicación la información mas utilizada es la de los satélites Landsat y Spot, hay que considerar las limitaciones que plantean. Para el sensor ETM+, la escala limite comúnmente aceptada para esta imágenes es de 1:50.000; los tamaños de pixel en imágenes representadas a esta escala, serian de 0,4mm (resolución de 80m), 0,6mm (resolución de 30 m) y 0,5mm (resolución de 10 m).

La resolución condiciona las categorías que pueden discriminarse en una imagen; a mayor resolución mejor será el grado de detección de las distintas categorías, así de su relación y distribución espacial. Este factor es crítico al plantear un trabajo, pues en función de la

resolución espacial del sensor, se debe considerar cual será la unidad mínima a identificar, las categorías a discriminar y si esta unidad mínima es acorde con la realidad que presenta la zona de estudio.

2.22 Tipos de imágenes

La elección de las imágenes esta condicionadas por la escala de trabajo, la resolución espacial y la capacidad de discriminación espectral. Otro factor que influye en la elección del tipo de imagen, es la extensión de la zona de estudio, que se traduce en un criterio económico según la relación costo-superficie. En general, las imágenes Landsat son más adecuadas cuando se trata de estudiar grandes superficies.

2.23 Fechas de registro de las imágenes

La elección de las fechas dependerá del objetivo del estudio; así, en el caso de las aguas subterráneas se necesitara conocer previamente la superficie histórica, actual y el proceso climático y enlazarla a la dinámica de las aguas superficiales sobre acuífero en regiones clave.

También se puede tomar en cuenta el calendario de cultivos de la zona, ya que en el caso de los cultivos permanentes, las fechas más adecuadas para conseguir una mejor discriminación son aquellas en las que existe un mayor contraste entre estos cultivos y otro tipo de vegetación presente en la escena generalmente en verano y después de un periodo seco, sin que se hayan producido precipitaciones en los días anteriores a la fecha de registro.

2.24 Criterios para la interpretación visual

Entre las pautas visuales manejadas en teledetección espacial, algunas son comunes con la fotografía aérea; tono, textura,

estructura, sombras, contexto, otras, son más propias de las imágenes espaciales, principalmente, en lo que atañe a la dimensión multi-espectral y multi-temporal, de las observaciones, severamente limitada en fotografía aérea.

El brillo y color serian los criterios más elementales, pues caracterizan espectralmente a una cubierta. La forma, tamaño y textura tiene que ver con las propiedades espaciales de los objetos.

2.24.1 Brillo

El brillo hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. El brillo se relaciona estrechamente con el comportamiento espectral de las distintas cubiertas, para la banda particular del espectro sobre la que se trabaje.

2.24.2 Color

Como es de saber, el color que aprecian nuestros ojos es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de ondas. Aquellas superficies con alta reflectividad en el azul, y baja en el resto, aparecen con ese color, mientras ofrecen un tinte rojo si absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. Nuestros ojos, sólo perciben las longitudes de ondas comprendidas entre 0.4 y 0.7 μm , separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, estos tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensores. Estos tres componentes son los denominados colores primarios: rojo, verde y azul, a partir de los cuales pueden reconstruirse cualquier otro color del arcoíris.

2.25 Composición en verdadero color o color natural

RGB:3,2,1

Esta combinación suele llamarse: "color natural", pues, involucra a las tres bandas, visibles y se le asigna a cada una de ellas su verdadero color, resultando una combinación que se aproxima a los colores naturales de la escena. La vegetación aparece en diversos tonos de verde y los suelos en colores marrones o tostados. Además, las bandas visibles tienen buena penetración en los cuerpos de agua y esta combinación permite observar detalles en agua poco profundas (turbidez, corrientes, batimetría, plumas de sedimentos, etc.).

2.26 Composición en falso color

- **RGB:4,3,2**

Esta combinación suele llamarse "falso color infrarrojo" ya que los colores resultantes en la imagen son similares a los de las fotografías obtenidas con film infrarrojo color. Al asignar el rojo a la bandas 4 (NIR) resultará que todos los tonos de rojo, desde el rojo muy oscuro al rosado pálido corresponden a vegetación, los tonos más oscuros se relacionan con la presencia de vegetación arbórea densa, como bosques, montes, entre otros, pudiéndose identificar algunas especies como pinos y eucaliptos. Rojos claros indican cultivos y praderas vigorosas. Los rosados corresponden a vegetación poco densa como pasturas naturales. El celeste corresponde a suelo desnudo, seco o áreas rocosas. El azul-celeste puede corresponder a zonas urbanas. El azul oscuro a negro se relaciona con agua clara en cursos o cuerpos de agua. Si éstos presentan partículas en suspensión aparecerán con

tonalidades azul-verdosas (cian). Los colores verdes a verde azulado corresponden a parcelas aradas o suelos descubiertos con mayor o menor contenido de humedad.

- **RGB:4,5,3**

Al asignarle el color rojo a la banda 4 (infrarroja cercana) esta banda va a tener ciertas similitudes con la combinación RGB 4,3,2. Sin embargo, al dar más peso a la región infrarroja (bandas 4 y 5) se ve realzada la diferencia de humedad en suelos y vegetales. Generalmente cuanto mayor es la humedad del suelo más oscuro aparecerá éste.

- **Textura**

Hace referencia a la heterogeneidad espacial de una determinada cubierta, en definitiva el contraste espacial entre los elementos que la componen. Visualmente se manifiesta con la rugosidad o suavidad de los tonos de gris. Cuanto más similares sean, la tonalidad será más homogénea en el interior de la cubierta, y la textura será más lisa. Por el contrario, si existe una alta heterogeneidad en los niveles de gris de esa cubierta aparecerá como muy rugosa, con textura grosera.

- **Contraste**

Los procesos de ajuste del contraste tienden a adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad del monitor de visualización, cada sensor codifica la radiancia recibida en un número determinado de niveles digitales (ND), de acuerdo a las características de su diseño. Ese rango digital puede no corresponder con el número de niveles visuales (NV), que facilita la memoria gráfica, por lo que resulta preciso ajustar,

por algún procedimiento, ambos parámetros. En este sentido caben dos situaciones:

- 1) Que el rango de ND de la imagen sea menor que el de NV facilitado por el sistema de visualización.
- 2) Que la imagen presente un mayor número de ND que posibles NV.

En el primer caso se deberá aplicar una expansión del contraste original, mientras que en el segundo, una reducción o compresión del mismo.

2.27 Clasificación supervisada

Podemos definir esta clasificación como un proceso en que pixeles de identidad conocida, ubicados dentro de las áreas de entrenamiento, se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida. La clasificación supervisada involucra las siguientes etapas:

- Etapa de entrenamiento
- Selección del algoritmo de clasificación adecuado y clasificación
- Operaciones de post clasificación

En la etapa de entrenamiento el analista selecciona áreas de identidad conocida de la cubierta terrestre de interés (cultivos, forestaciones, suelos, etc.) delineándolas sobre la imagen digital bajo formas de rectángulos o polígonos, cuyos datos numéricos quedan archivados en la computadora como regiones de interés constituyendo los “datos de entrenamiento”. Para realizar la selección el analista debe tener un conocimiento previo del área de estudio, sea por reconocimientos de campo, por consulta de mapas o fotografías aéreas.

2.28 Clasificación no supervisada

Este método está orientado a definir clases espectrales presentes en la imagen. No implica un conocimiento del área de estudio. En esta técnica se asume que los niveles digitales de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo.

El método para definir los agrupamientos espectrales se basa en tres parámetros:

- 1) Variables que intervienen en el análisis (banda espectral)
- 2) Criterio para medir la similitud o distancia entre casos (píxeles de la imagen)
- 3) Criterio para agrupar los casos similares (K-means, ISODATA)

2.29 Correcciones radiométricas y geométricas

Las correcciones radiométricas, tienen por objeto eliminar y compensar errores radiométricos, distorsiones y ruido producidos por deficiencias del sensor. En parte, estas correcciones se realizan en los centros de distribución de datos. Las correcciones geométricas se realizan para eliminar las distorsiones presentes en las imágenes y transformarlas a un sistema de proyecciones cartográfico. De esta forma es posible la superposición de imágenes y la integración de la imagen con otros tipos de información cartográfica mediante la utilización de un SIG.

2.30 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un SIG, es un conjunto de programas y aplicaciones de programas y aplicaciones informáticas que permite la gestión de datos organizados en base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas. En esta amplia definición caben muchos sistemas y programas que no se suelen clasificar como SIG, tales como, los de sistemas de dibujo y diseño asistido por ordenador (CAD), los sistemas de diseño y cálculo de ingeniería civil (CAE), los gestores de base de datos en entorno gráfico. Sin embargo, estos últimos no pueden ser considerados como auténticos SIG dado que no poseen los elementos que caracterizan los Sistemas de Información Geográfico.

Los SIG constituyen una potente herramienta en diferentes campos, de modo que muchas operaciones que antes se desarrollaban manualmente, de forma tediosa y con muchos errores, hoy se lleva a cabo automáticamente mediante tales sistemas, que frecuentemente facilitan información para la toma de decisiones.

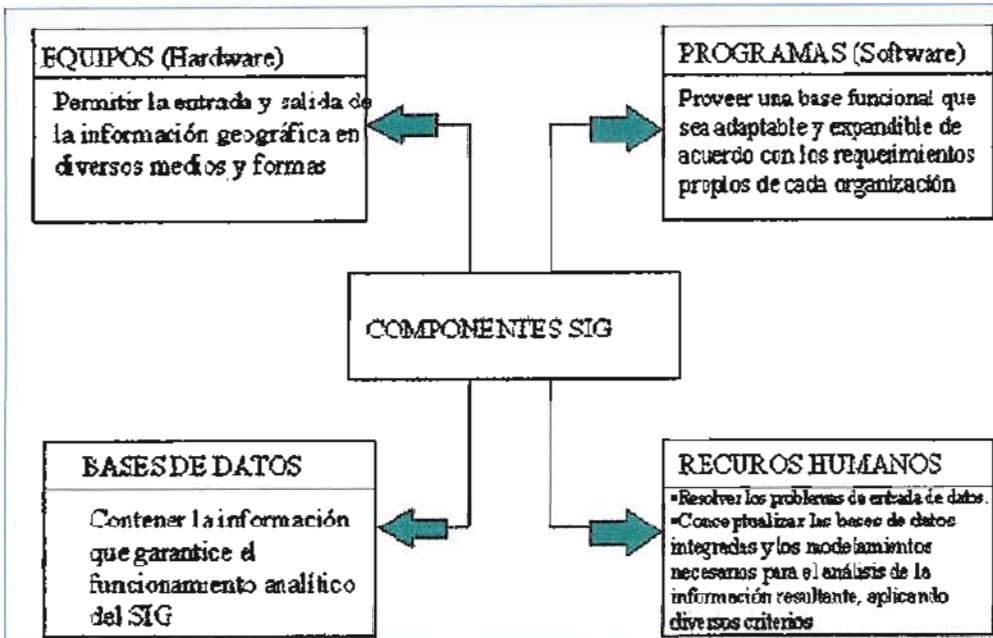


Fig 2.16: Principales funciones de los elementos de un SIG

2.31 Ventaja de usar los Sistemas de Información Geográfica

Una ventaja importante es que permiten descomponer la realidad en distintos temas, es decir, en distintas capas o estratos de información de la zona que se desea estudiar: Relieve, la litología, los suelos, los ríos, los asentamientos, las carreteras, los límites administrativos. El analista puede trabajar sobre cualquiera de esas capas según las necesidades del momento y pueden relacionar las distintas capas entre sí, lo que concede a estos sistemas una sorprendente capacidad de análisis. Los mapas almacenados en el ordenador pueden ser objeto de peticiones muy complejas o pueden ser combinados algebraicamente para producir mapas derivados, que representen situaciones reales o hipotéticas.

2.32 Los SIG como apoyo a la teledetección

La importancia de contar con información auxiliar para corregir algunos errores incluidos en las imágenes, así, como para refinar la clasificación de diversas categorías. Modelos digitales de elevación (MDE), mapas de suelo o climáticos, límites administrativos, regiones ecológicas o parcelas catastrales, son ejemplo de variables cartográficas que pueden enriquecer notablemente el análisis digital de las imágenes.

Lo más común, en la actualidad, es que esta información auxiliar provenga de un SIG, cuyos datos estén previamente georreferenciados a las imágenes o viceversa, mediante los oportunos procesos de corrección.

2.33 Integración de imágenes en un SIG

Si bien las imágenes espaciales se adquieren en formato digital, también es posible abordar una interpretación visual de la misma, por lo que la integración de imágenes espaciales en un SIG, puede realizarse de distintas formas:

- 1) Digitalizando un mapa temático obtenido a partir de la interpretación visual de la imagen.
- 2) Digitalizando un mapa temático en papel obtenido a partir de la clasificación digital de la imagen.
- 3) Superponiendo visualmente la información de un SIG vectorial sobre una imagen de satélite, digitalizando sobre la imagen los sectores que hayan cambiado.
- 4) Incorporando directamente el fichero generado por la clasificación digital de la imagen.

- 5) Integrando en el SIG los valores digitales originales o los obtenidos a partir de una transformación de la imagen (índice de vectores, estimación de la temperatura).

2.34 Modelo digital del terreno (MDT)

Un modelo en sentido genérico, es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades. Es decir, la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda representado por otro objeto o sistema de menor complejidad. Los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real.

Un modelo digital del terreno, es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Toman la forma de estructuras de datos. Lo que significa que no son sólo una acumulación o listado de cifra, sino, que su construcción debe realizarse de acuerdo con una estructura interna. Esta estructura se refleja en la forma lógica, en el sentido informático de almacenar y vincular las unidades de información de datos entre sí, que debe presentar de alguna forma las relaciones espaciales entre los datos.

2.35 Modelo digital de elevación (MDE)

En la cartografía convencional la descripción de la elevación a través del mapa topográfico, constituye la infraestructura básica del resto de los mapas. El papel equivalente en los MDT lo desempeña el modelo digital de elevaciones o MDE.

Un modelo digital de elevación es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

2.36 Cálculo de variables topográficas

2.36.1 La pendiente

La pendiente en un punto del terreno, que se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto vertical. Su estimación es sencilla a partir del MDE y se basa en el cálculo de la pendiente de un plano de ajuste en cada punto o celda del modelo.

2.36.2 La orientación

La orientación en un punto que puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto. Como en el caso de la pendiente, el valor de orientación se estima directamente a partir del MDE.

2.36.3 La curvatura

Puede definirse como la tasa de cambio en la pendiente, y por tanto, depende de las derivadas de segundo grado de la altitud, es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto. La curvatura tiene especial interés como variable influyente, en fenómenos como la escorrentía superficial, canalización de aludes, erosión y flujo en general.

2.36.4 Modelo hidrológicos

Los aspectos de mayor interés de los modelos digitales del terreno es la posibilidad de realizar simulación de procesos, con la que se accede a la capacidad de experimentar independientemente del sistema real. La simulación permite obviar los riesgos inherentes a la experimentación, alcanzar una compleja independencia temporal.

Las características topográficas de una ladera determinan las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. El modelo digital de elevación contiene información suficiente para definir, al menos en una primera aproximación, las propiedades de la red de drenaje superficial y por extensión de la cuenca hidrográfica.

Capítulo III

Marco Referencial

- Ubicación
 - fisiografía
 - Geomorfología
 - Relieve
 - Hidrografía
 - Clima
 - Vegetación
 - Suelos
 - Geología
 - Estratigrafía
 - Geología Local
-

Marco Referencial

3.1 Ubicación y extensión del área de estudio

El área del estudio hidrogeológico que comprende El Cují-Eneal se encuentra ubicado al Norte de Barquisimeto capital del estado Lara, entre los municipios Iribarren y Crespo, pero en su mayor extensión dentro del municipio Iribarren, este limita al Norte con el municipio Urdaneta, al Sur con el municipio Andrés Eloy Blanco, al Este con los municipios Crespo y Palavecino, y así el Oeste con los municipios Jiménez y Torres. Esta área corresponde a un valle con una pendiente de 0 a 5% y ubicada a unos 500 m.s.n.m con relieve ondulado, afectado por proceso de erosión.

Las coordenadas Geográficas y Planas (UTM) se expresa a continuación:

Tabla 3.1 Ubicación Geográfica del Área de estudio

Coordenadas Geográficas	Coordenadas UTM
Latitud Norte: 10° 08'— 10° 16'	1120000 N — 1135000 N
Latitud Oeste: 69° 18'— 69° 11'	467000 E — 480000 E

El área tiene una superficie de aproximadamente 195 Km², los límites internos de la zona son los siguientes:

En dirección de Norte a Sur, se ubica la población El Eneal-Pedreman con una longitud de 13 Km, y de Oeste a Este El Cují-Nonavana con un ancho de 15 Km.

Su ubicación geográfica corresponde a la hoja cartográfica Barquisimeto numero 6346 a escala 1:100.000 y a escala 1:25.000 corresponden a la

hoja 6346-III-NE, 6346-II-NO, 6346-I-NO, 6346-I-SO, 6346-IV-NE y 6346-IV-SE.

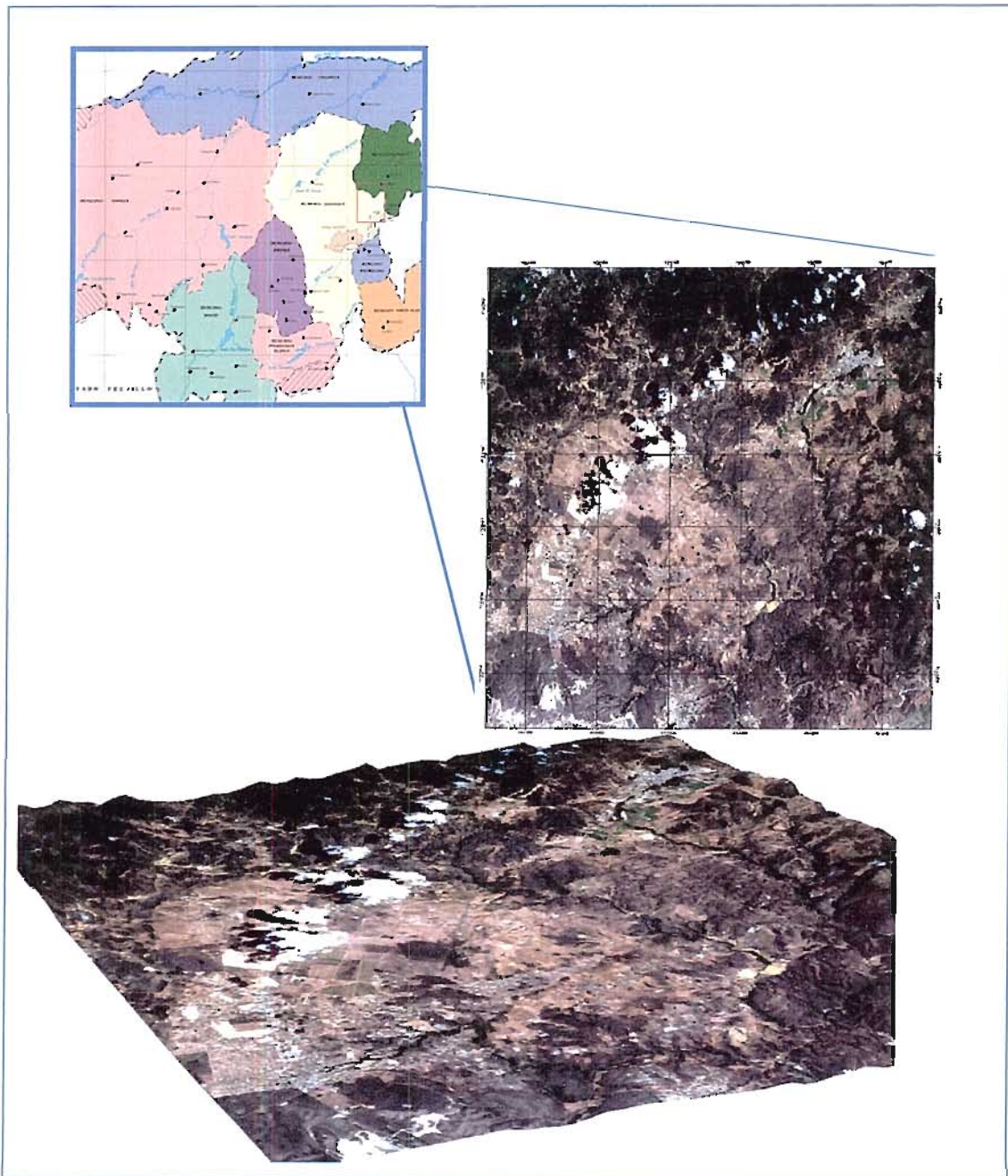


Fig 3.1: Ubicación del Área de Estudio

3.1.1 Vías de acceso al área en estudio

Para acceder al área de estudio se toma la autopista principal Barquisimeto – Duaca, la cual atraviesa centros poblados como lo son El Cují, Sabana Grande, Los Robles, Tamaca, Yucatán, La Sábila, El Pampero, Los Rastrojitos, Malecón, El Pegón, El Carrizal y El Eneal; en dirección Norte. De esta autopista se desprenden tres vías secundarias que comunican así el este del área en estudio la cual atraviesa varios caseríos, la primera vía principal parte del Cují en sentido Oeste- Este la cual pasa por caseríos como lo son El Jayo, Las Nieves, Las Cabruja, El Roble, Cante Vista, Las Veritas, La Funcia y Pedreman.

La segunda vía también en sentido Oeste – Este, comienza en la entrada del caserío Valle Lindo pasando por El Trapiche, Las Tunas, Patio Colorado, El Potrero, Cordero y Nonavana.

La tercera Vía comienza en la entrada del centro poblado de Tamaca en sentido Oeste – Este, la cual pasa por el caserío Tamaquita, para luego unirse con la segunda vía a la altura del caserío Las Tunas y seguir pasando todos los caseríos antes mencionados hasta llegar a Nonavana.

Por último encontramos gran cantidad de Carreteras Engranzonadas y de Tierra a lo largo y ancho del área de estudio que dan acceso a pequeños Caseríos, granjas, fincas y haciendas constituyendo una red vial bastante amplia.

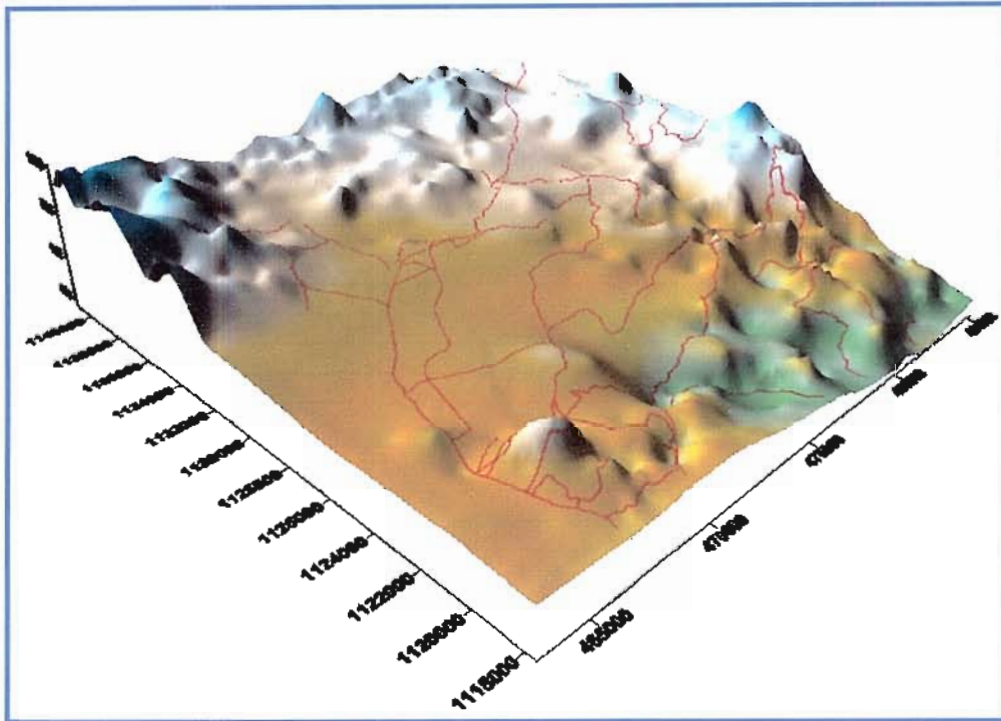


Fig 3.2: Vías de Comunicación

3.2 Evaluación del Medio Físico – Geográfico

3.2.1 Fisiografía

El Estado Lara está constituido con paisajes montañosos, interrumpidos por las depresiones de Lara, de Turbio, Yaracuy y de Moroturo. Las estribaciones de Los Andes, localizadas al Sur y Suroeste, registran la mayor altitud del estado en el Pico Cendé (3585 metros). La Sierras de Baragua, Bobare – Matatere y Jirajara – Zaruma, al Norte y Noroeste, forman parte del Sistema Coriano, mientras que una porción terminal del Sistema de la Costa, ingresa a la entidad por el centro – oriental, para alcanzar su máxima elevación en el Cerro Palo de Agua, con 2500 m.s.n.m. Las sabanas de Carora son un sector compuesto por valles y

ondulaciones, mientras la altiplanicie de Barquisimeto está conformado por áreas planas, con un conjunto de colinas en su parte central.

El área en estudio representa llanuras suavemente onduladas, con algunas pequeñas alturas aisladas que llegan a los 700 m.s.n.m afectadas por los procesos erosivos ya que las verdaderas características del paisaje están dadas por potentes depósitos aluvionales del Cuaternario reciente.

3.2.2 Geomorfología

En El Cují, Tamaca y Cordero; Municipio Iribarren. De acuerdo a la metodología utilizada por la Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (COPLANRH), la geomorfología de la región en estudio presenta un medio de la ablación L_{7-3} y un medio de acumulación: A_{3-5} / b .

Lo anterior significa:

Tipo de relieve (L): Colina.

Litología (7-3): Rocas arcillo – calcáreas (margas) y calizas.

Tipo de medio deposicional (A): Piedemonte.

Forma de acumulación (3-5): Abanico y glacis de explayamiento.

Disección (b): Fuertemente disectado (numerosas cárcavas Bad-Lands)

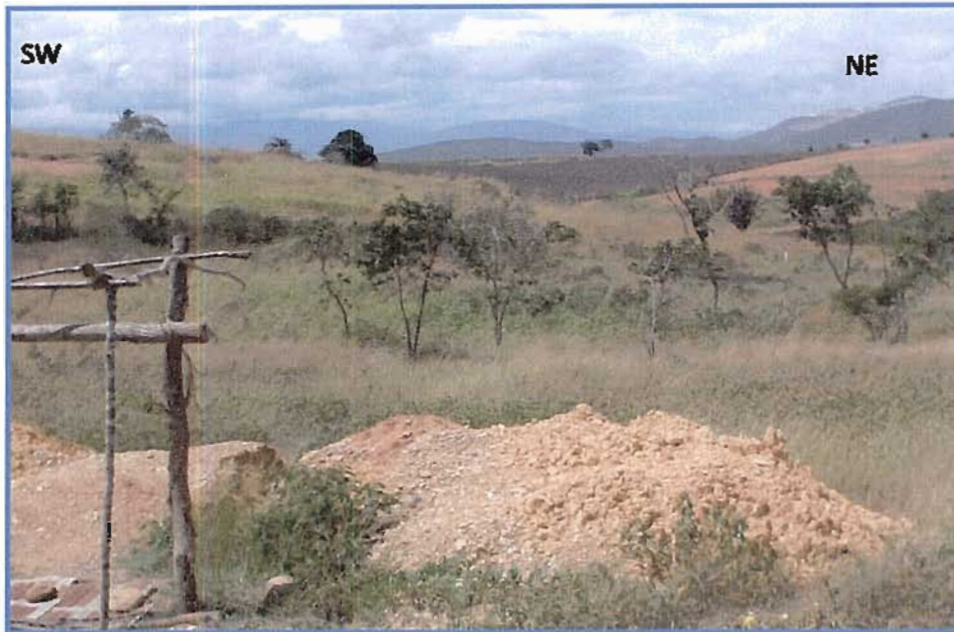
El rasgo geomorfológico predominante en esta zona del Municipio es de valle intramontano, de transición entre la planicie el Cují, Tamaca y el sistema de la serranía de Aroa cercano a El Eneal Municipio Crespo.

Duaca la cual es la capital del Municipio Crespo cercana al Eneal, surgió de la existencia de un surco intramontano que forman las Sierras de Aroa y Bobare, ocupando una zona relativamente llana que sirve de divisoria de aguas entre las cuencas de los ríos Aroa y Turbio.

En definitiva, la zona en estudio es de valle intramontano, de transición entre la planicie El Cují–Tamaca (al Sur del Eneal) y el sistema de la Serranía de Aroa (al Este y Noreste del Eneal).

3.2.3 Relieve

El área en estudio posee diversos tipos de relieve, en El Cují (Municipio Iribarren), esta comprendida por colinas bajas que interrumpen un sistema de terrazas y al Suroeste un gran glacis con relictos de sistema colinosos. Las tierras con relieve plano, apropiada para usos agrícolas, están ubicadas en su mayor parte en el valle del Cují, presentando el 6% de la superficie del distrito con una pendiente que va desde 0% a 10% y ubicadas a unos 500 m.s.n.m en esta superficie se incluye un pequeño sector con tierras de relieve ondulado, afectados por proceso de erosión y suelos poco aprovechables. El resto de las tierras, que presentan el 4%, corresponden a un valle muy estrecho.



Fotografía 3.1: Relieve El Cují - Cordero

Por otra parte el centro poblado El Eneal (Municipio Crespo), esta región posee diversos tipos de relieve, desde el accidentado formado por el sistema de cordilleras que conforma la sierra de Aroa, con alturas de 500 a 1000 m.s.n.m, pasando por el relieve quebrado, constituido por sistema de colinas bajas con laderas redondeadas y pendientes que van de 16% hasta el 30% formando pequeño valles estrecho al suroeste de El Eneal hasta llegar a conformaciones planas como el valle de El Cují.

Sus alrededores son zonas de piedemonte, la forma de acumulación se corresponde a un abanico de explayamiento de topografía no muy inclinada, con gran número de escurrimiento y la topografía original ha desaparecido totalmente.



Fotografía 3.2: Relieve Duaca - Eneal

3.2.4 Hidrografía

La red hidrográfica del estado Lara esta representada por la cuenca del río Turbio, Morere, Yacambu, Sarare y Tocuyo, siendo este ultimo el mas importante del estado, el cual nace en las cercanías del paramo cende y atraviesa todo el territorio estatal, convirtiéndose en el gran recolector del mismo. En el se encuentra los embalses más importantes del estado: Dos Cerritos y Atarigua. Otros ríos de importancia son el Misoa, El Riecito y Portuguesa.

El Estado Lara presenta escasez de agua. Los recursos de su red hidrográfica se concentran al sur, y drenan hacia otras entidades, con excepción de los originados en la cuenca del Río Tocuyo, con un recorrido de 220 kilómetros por territorio Larense, éste recolecta las aguas

de afluentes como el Morere, el Baragua, el Urama y el Curarigua, que pertenece a la vertiente del Mar Caribe. Las cuencas de otros cursos importantes, como el Turbio, el Yacambú y el Sarare, descargan en la vertiente del Atlántico, a través del Orinoco; mientras que los ríos Misoa y Riecito son tributarios de la cuenca del Lago de Maracaibo.

En el área de estudio, asía la parte Norte, presenta una quebrada principal llamada Barro Negro, que drena de norte a sur, desembocando hacia la cuenca del Río Tocuyo. La quebrada Tumaque nace en la zona montañosa en el sector noreste y desemboca en la quebrada Barro Negro; la quebrada Agua Salada nace en la zona montañosa del sector Noroeste y pasa por la población de El Eneal, desembocando hacia el Sureste en la quebrada El Toro. La localidad de Eneal ocupa una zona relativamente llana que sirve de divisoria de aguas entre las cuencas del Río Aroa, ubicada al Norte y el Río Turbio al Sur.

El patrón general de drenaje es de tipo dendrítico, formado por arroyos que se van ramificando de forma arborescente y el escurrimiento es de carácter torrencial en el frente montañoso (Serranía de Aroa) y rápido en el sector transicional (Sector Los Caracoles) para infiltrarse en el sector del valle (Poblado de Duaca) a llenar los acuíferos de Barro Negro.

También se encuentran otras quebradas en los alrededores del centro poblado El Cují como lo son las Quebradas Nonavana, Tacarigua y El Tural.

la hidrografía aquí presente es fiel reflejo del clima general de la zona, distinguiéndose una gran cantidad de ríos y quebradas que lo cruzan, dibujando un diseño de drenaje dendrítico **mal desarrollado, debido al**

régimen irregular de los ríos, con fuertes crecidas en épocas de lluvias y totalmente seco durante el resto del año, a excepción de la quebrada Tacarigua y sus afluentes; durante la época de lluvias, todo los ríos y quebrada presente en el área producen verdaderas avenidas de fango y arcillas en forma de mantos, los cuales recubren nuevamente los ya pocos permeables suelos, aumentando así su impermeabilidad.



Fotografía 3.3: Quebrada Nonavana

3.2.5 Clima

En el Estado Lara predominan dos tipos de clima: El tropical seco y muy seco, y el pre-montano, también seco y muy seco, seguidos por el pre-montano húmedo. La sequedad del ambiente es característica, ya que la evaporación supera a las precipitaciones.

De la primera edición del atlas del estado Lara, elaborado por el servicio Autónomo de conservación de suelos y Cuencas Hidrográfica, se tiene que El Cují, Tamaca, Cordero (Municipio Iribarren), las precipitaciones media anual es de 425 mm, presentando dos periodos lluviosos, uno de dos meses, Octubre y Noviembre, donde puede ocurrir lluvias torrenciales, con intensidad máxima de 80 mm para tres horas de duración; y el otro caracterizado por cuatro meses de lluvias Mayo, Junio, Julio y Agosto en la mayoría de los años, con intensidades máximas para tres horas de duración de 86 mm la temperatura media anual es de 28.5 °C y la clasificación climática semiárido cálido.

En el caso del Eneal (Municipio Crespo), las precipitaciones media anual son muy variado, desde 740 mm anuales en el Oeste del Eneal hasta los 350 mm en el extremo Este. El periodo de lluvias cubre gran parte del año desde los meses de Abril y Noviembre, siendo lo de mayor intensidad los de Junio, Julio y Noviembre, el ciclo de sequia se concentra entre los meses de Diciembre a Marzo, la temperatura promedio fluctúa desde 22.9 °C hasta 24 °C, los vientos dominante son los alisios del Noreste, la evapotranspiración media anual es del orden de 2150 mm, clasificando el clima como semiárido templado.

3.2.6 Vegetación

En el estado Lara se identifican diferentes formaciones vegetales como consecuencia de la combinación de las distintas variables ambientales dentro de un espacio tropical.

Desde el punto de vista de la vegetación, los centros poblados que se encuentran dentro del Municipio Iribarren como lo son El Cují, Tamaca,

Cordero y Nonavana se caracteriza por la falta de una densa cobertura vegetal que se va siendo menos densa hacia las colinas, lo cual obedece a la semi-aridez del clima; predominando la vegetación de algunos árboles pequeños xerófila representada por cujíes, tunas, espinares y cardonales.

Mas hacia el Norte que comprende El Eneal (Municipio Crespo), la variación va desde matorrales y arbustales hasta bosques siempre verdes. Las formaciones boscosas se ubican en las zonas montañosas en los alrededores del Eneal donde cumple funciones protectoras, a excepción de los bosques deciduos que crecen en las tierras del Norte y Noreste. Es notoria la presencia de áreas intervenidas en los alrededores de la población El Eneal.

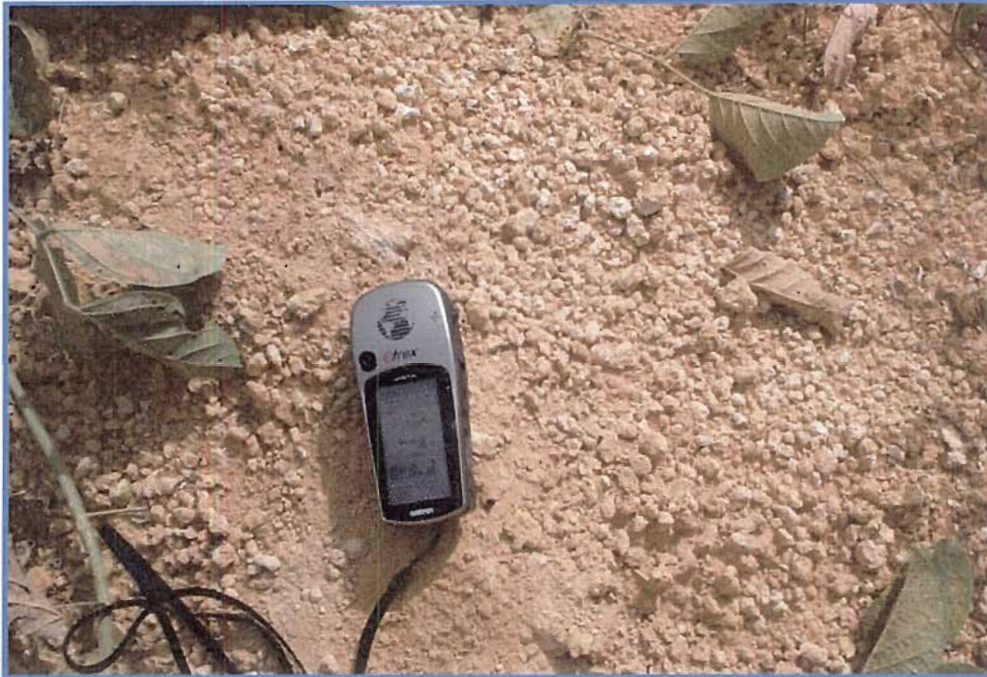
En esta zona (Municipio Crespo) en estudio está representada por matorral perennifolio, que guardan algunas hojas durante todo el año y matorral caducifolio, que pierden todas sus hojas en la sequía. También se encuentran pastos y cultivos que muestran evidencia del uso de machetes y maquinaria pesada, donde se incluyen todos los tipos de vegetación reconocidos como secundarios debidos directamente a la acción del hombre.

Existen también, selvas tropicales en las laderas de la Sierra de Aroa que esta ubicada muy cerca del Eneal con imponentes árboles grandes, como ceibas, caobos, cedros, jabillos, samanes, apamates, mijaos, bucares, etc.

3.2.7 Suelos

La topografía y el clima son los factores formadores de los suelos en el Estado Lara. Los suelos de la región semiárida tienen poco recubrimiento, evidencian procesos intensivos de erosión laminar y presentan surcos y cárcavas, en su mayoría son pedregosos.

Los suelos en estudio, dentro del Municipio Iribarren, son suelos que ocupan Terrazas altas de erosión en la zona de colinas que bordea la autopista Barquisimeto – Duaca. Poseen color pardo amarillento en superficie y amarillo rojizo en el subsuelo. Están principalmente cubiertos por una vegetación característica de zonas áridas y semiáridas. Son suelos de aluviones viejos, con horizonte A, B, C. Poseen **epipedones** o chric y horizontes argílico en el subsuelo con gravas subyacente a profundidades variables. Su textura dominante es franco Arcillo Arenoso, hasta Arcillosa, con consistencia friable. Son medianamente ácidos, con baja cantidad de materia orgánica y bajos en saturación en la bases.



Fotografía 3.4: Suelos arcillosos El Cuji - Sábila

Los suelos en los alrededores del Eneal Municipio Crespo, son superficies más recientes, están influenciados por materiales provenientes de las cuencas de ablación y por el sistema deposicional, principalmente de explayamiento, lo cual origina un mayor desarrollo de estructuras, redistribución de carbonatos y, en casos aislados, la formación de un horizonte sálico.

Los suelos predominantes en esta área de estudio son específicamente kastanozems, ricos en materia orgánica, muy bien humificada, muy espesos, tipo suelos de las estepas y praderas. Las tierras con relieve plano son apropiadas para el uso agrícola, de cultivos como: sisal, caña de azúcar, café, maíz, aguacate, ají, papa y otros cultivos hortícolas. Estos suelos representan el 6% del Distrito Crespo. En esta superficie se

incluyen un pequeño sector con tierras de relieve ondulado afectados por procesos erosivos y suelos poco aprovechables.

3.3 GEOLOGÍA

✓ Geología Histórica

A comienzos del Cretáceo, la zona ocupada en la actualidad por el Estado Lara, así como todo el occidente y norte de Venezuela, estaba cubierta por un mar de poca profundidad que se inició en el Caribe y fue avanzando en sentido sur. A los sedimentos de tipo costanero sucedieron los depósitos de materiales francamente marinos. El avance del mar continuó en el Cretáceo Superior (Vila 1996).

Entre el Cretáceo Superior y el Paleoceno, en la zona situada al este de Barquisimeto se tornó de gran inestabilidad con fuertes recurrentes movimientos diastróficos, los cuales fueron acompañados de actividad ígnea. Esta zona constituía un geosinclinal que se extendía hasta más allá de la Isla de Trinidad. En realidad, las tierras de Lara no parecen haber estado supeditadas a dicho geosinclinal; a no ser su sector más oriental (Vila pop cit).

En el Eoceno Inferior el mar que se había retirado de la mayor parte de Venezuela, seguía cubriendo las tierras larenses. Los Andes no se habían aún levantado. En el Eoceno Medio no se notaron mayores cambios en la zona. Entre el Eoceno Superior y el Oligoceno, en el sector norte y occidental de Lara se originaron facies de la Formación Paují, integradas por areniscas, arrecifes de ostras y calizas. Se trataba del paso de una

deposición marina a una deposición continental; pasó que se hizo con lentitud y en forma gradual. El resto de las actuales tierras del estado se mantuvieron bajo un mar de cierta profundidad (Vila op cit).

En el Oligoceno Inferior, el mar había dejado de cubrir la zona larense y por el suroeste tuvieron lugar depositaciones de tipo continental. Las tierras que desde los actuales límites entre los estados Lara y Trujillo se dirigen hacia el Norte, se encontraban sometidas a fuertes convulsiones que originaron plegamientos y elevación de montañas (Vila op cit).

Durante el Oligo-Mioceno, un canal marino que comunicaba el Caribe con el Norte del actual Lago de Maracaibo, entraba en contacto con el Norte de las tierras larenses. Los depósitos marinos en este canal dieron lugar a que se originara la Formación La Rosa (Vila op cit).

Los movimientos del Mio-Plioceno cambiaron la fisonomía no sólo de Lara, también del Oeste del país. Las actuales Formaciones orográficas típicas de Lara y Falcón se originaron en esta época; mientras que por el Sur alcanzaba su máxima altitud la Cordillera de Mérida. Por consiguiente y dentro de Lara, se elevaron las actuales estribaciones Andinas que penetran con rumbo Sur-Norte en el estado. Es en esta época que se fijan los rasgos básicos del relieve Larense. La erosión y la depositación de los materiales erosionados en las tierras bajas dotaron a dicho relieve de sus aspectos secundarios. Pero los resultados de estos efectos secundarios, fueron el de proporcionar a Lara unos suelos propicios a la agricultura, siempre que cuenten con agua suficiente. Los movimientos orogénicos prosiguieron en el Plioceno y en el Pleistoceno en el sentido de que los suelos seguían elevándose lo cual originó, por el proceso de

seccionamiento fluvial, la formación de las terrazas que aparecen en la actual topografía (Vila op cit).

3.3.1 Geología regional

✓ Estratigrafía

El estudio geológico del Estado Lara ha sido de gran interés por ser éste la zona de convergencia de los sistemas orogénicos de la Cordillera de Los Andes y del Sistema Montañoso del Caribe. A esta circunstancia, junto con la gran influencia de la tectónica de deslizamientos submarinos durante el Cretáceo Superior-Paleoceno-Eoceno y la ausencia de fósiles en algunas de sus unidades, se deben en gran parte a la complejidad estratigráfica y tectónica de la región (Bellizia y Rodríguez 1967).

❖ Pre-Cretáceo

La unidad más antigua de las rocas metamórficas afloran en la región de Yaritagua y se compone de gneises porfiroblásticos, augen-gneises, gneises anfibólico-granatíferos y esquistos cuarzo-micáceo-feldespáticos, conocidos en la literatura como Formación Yaritagua, por cuyas características petrológicas y posición estratigráfica sería equivalente a las Formaciones Peña de Mora y Las Brisas de la región central de la Cordillera de la Costa (Bellizia y Rodríguez 1967).

La localidad tipo se ubica en la colina al sur de Yaritagua, Estado Yaracuy. El espesor mínimo es de 50 m. La unidad carece de fósiles, Bellizia y Rodríguez consideran esta unidad como la unidad más antigua en su cuadro de Formaciones de la región de Barquisimeto-Bobare y Duaca-Yaritagua. Se atribuye al Precámbrico por correlación (Bellizia y Rodríguez op cit).

Esta unidad constituye la base de la secuencia metamórfica en la mayor parte de los Estados Yaracuy y Lara, y debido a la gran variabilidad petrológica y a la ocurrencia de rocas graníticas, **es más adecuado utilizar el término de Complejo de Yaritagua** que Formación Yaritagua, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, Tercera Edición, 1997.

Suprayacente al Complejo Yaritagua y en posición estratigráfica normal, reposa una secuencia de calizas cristalinas, mármoles, esquistos cuarzo-micáceo-feldespáticos, esquistos cuarzo-micáceo-feldespático-grafitosos, esquistos gneísico-cuarzo-feldespáticos y anfibolitas granatíferas. Ese conjunto litológico se ha considerado correlacionable con la Formación Antimano de la región de Caracas, pero con un mayor desarrollo en el Estado Yaracuy. Este conjunto ha sido denominado Formación Nirgua que incluye las calizas cristalinas de Río Abajo que afloran en la región de Yaritagua, (Bellizia y Rodríguez 1967).

Como localidad tipo o sección de referencia, se señala la expuesta a lo largo del Río Nirgua, en la serranía del mismo nombre. El espesor mínimo alcanza unos 1000 m en los Estados Yaracuy y Carabobo. Por su posición infrayacente a la Formación Aroa correlacionada con la Formación Las Mercedes, la edad de la unidad se considera Pre-Cretácico (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997).

Bellizia y Rodríguez (1968), señalan la presencia de fósiles (*Tintínidos* o *Calpionelas*) de probable edad Neocomiense.

Concordantemente sobre la Formación Nirgua yace una espesa sección de esquistos calcáreos-grafitosos, filitas grafitosas, calizas cristalinas macizas, calizas laminadas grafitosas, esquistos verdes y esquistos calcáreos-micáceos cuarzosos, denominada Formación Aroa. En la parte

inferior de la unidad predominan los esquistos micáceos y en la parte superior, en la zona de transición con la Formación Mamey, aparecen horizontes de meta-areniscas y meta-conglomerados, muy similares a los de la Formación Mamey suprayacente (Bellizia y Rodríguez 1967).

Según Bellizia y Rodríguez (1969), es muy difícil determinar el espesor de la unidad por su intenso cizallamiento, plegamiento isoclinal y replegamiento; pero estiman un espesor mínimo de 1200 m (Bellizia y Rodríguez op cit).

En su mayor parte, la Formación Aroa consiste originalmente de sedimentos argiláceos; la mayoría de las rocas son calcáreas. La abundancia de grafito y pirita indica condiciones de reducción durante la sedimentación, en un ambiente de circulación restringida de las aguas. Los yacimientos de pirita cuprífera en el Distrito Minero de Aroa se presentan en forma de lentes de dimensiones variables concordantes con la foliación (Bellizia y Rodríguez op cit).

No se han encontrado fósiles *in situ*. Sin embargo, Bermúdez y Rodríguez (1962) identificaron *Calpionellas* o *Tintínidos*, ubicando a la Formación Aroa en el Jurásico tardío-Cretácico temprano (Bellizia y Rodríguez op cit).

En el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997, la Formación Aroa se asigna al Cretácico temprano, por su posición infrayacente a la Formación Mamey del Cretácico (Aptiense-Albiense).

- **Formación Mamey Mesozoico (Cretácico temprano).**

La unidad cubre en aparente concordancia a la Formación Aroa y aflora al norte de Yaritagua y al este de Duaca. Su mejor sección se halla en las

quebradas Mamey y Nonavana. Se compone esencialmente de esquistos cuarzo-micáceo-sericíticos, esquistos calcáreos, filitas grafitosas, meta-conglomerados, meta-areniscas calcáreas y calizas laminadas. En los alrededores de Duaca en la localidad Tumaque, cerca de la base de la Formación se encuentra una espesa sección de calizas macizas puras, cristalinas y de carácter biohermal, que son utilizadas por la Compañía Venezolana de Cementos para la fabricación de cemento blanco (Bellizia y Rodríguez 1967).

Las unidades características de la Formación son los esquistos cuarzo-sericíticos y los meta-conglomerados, cuyos fragmentos muestran efectos cataclásticos, de fracturamientos y estiramientos producidos durante el metamorfismo. También se tienen micro y macro-brechas en fragmentos líticos de calizas y filitas en una matriz arcillosa-calcárea. Los componentes principales de la meta-arenisca y los meta-conglomerado son cuarzo y feldespatos esencialmente potásicos en una matriz o cemento arcilloso-calcáreo. La Formación se puede considerar como producto de una sedimentación nerítica relacionada a probable levantamiento epirogénico de la Serranía de Aroa. Estas rocas podrían compararse litológicamente con las Formaciones Chuspita descrita por Seiders (1965) en la región de Caucagua-Guatire, Tucutunemo de la región central de la Cordillera de la Costa (Shagam, 1960) y Araure, Agua Blanca y Cojedes en la región comprendida entre Acarigua y San Carlos, descritos por Renz y Short (1960), (Bellizia y Rodríguez op cit).

Bellizia y Rodríguez (1968), estimaron 1400 m de espesor para la Formación. En algunas localidades se observan fragmentos de amonites, muy semejantes a los descritos en la Formación Carorita; algunas calizas contienen pelecípodos, espinas de equinoideos y corales.

La Formación Mamey se asigna al Cretácico Temprano, a base de su contenido faunal (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997).

La Formación Los Cristales (Bushman, 1959, 1965), correspondería a las formaciones Aroa y Mamey y, debe conservarse su uso para aquellas zonas donde no sea posible separarla en estas dos últimas unidades (Bellizia y Rodríguez 1967).

- **Formación Carorita Mesozoico (Cretácico temprano)**

La Formación Carorita está representada al norte de Barquisimeto por un bloque alóctono, de unos 8 kilómetros de longitud y 3,5 km de anchura, que se extiende desde los alrededores de Carorita Arriba hasta cerca del Kilómetro 8 de la carretera Barquisimeto-Carora (Bellizia y Rodríguez 1967).

La unidad consiste esencialmente de calizas arenosas feldespáticas de grano grueso en capas macizas; los horizontes delgados se presentan bien foliados. Las areniscas y conglomerados calcáreos a veces muestran gradación. Los conglomerados son lenticulares y en ocasiones forman verdaderas brechas intraformacionales con fragmentos de caliza de más de 20 cm de largo (Bellizia y Rodríguez op cit).

Las calizas son de colores gris, gris azulado y gris oscuro, meteorizan en colores gris verdoso o verde oliva y en su superficie se destacan los granos de cuarzo. Las lutitas y margas están bien laminadas, aunque algunas son escamosas y bastante blandas, con colores de meteorización blanquecino, rojizo pardo y amarillento y se confunden fácilmente con las rocas de composición semejante de la Formación Barquisimeto (Bellizia y Rodríguez op cit).

El espesor de la Formación Carorita se estima de unos 500 m según Bushman (1959,1965) y Bellizia y Rodríguez (1967).

Bushman (1959) menciona la presencia de amonites no enrollados en las calizas de la Formación Carorita, identificados por R. Imlay como especímenes de *Idiohamites* y *Pseudohelococeras*, del Albiense Superior. Coronel y Renz (1960) mencionan *Orbitolina* y *Neotrocholina* en las calizas de Carorita que también indican una edad Albiense (Bellizia y Rodríguez 1967).

Debido a que los diferentes afloramientos de la Formación Carorita representan olistostromos y olistolitos, posiblemente de la Formación Los Cristales, sus relaciones estratigráficas son anormales en la región de Carorita Arriba-Barquisimeto. Al norte de Barquisimeto, la unidad está corrida sobre la Formación Barquisimeto (corrimiento de estratificación); su contacto superior con la Formación Bobare aparentemente también es un corrimiento de estratificación (Bellizia y Rodríguez op cit).

La Formación Carorita presenta grandes semejanzas litológicas con la Formación Mamey. Por este motivo, se considera que los diferentes afloramientos en el área de Barquisimeto - Quíbor - Bobare, constituyen bloques alóctonos de la Formación Mamey, en los cuales otros autores también han encontrado amonites no enrollados de tipo Carorita, al este de la población de Duaca (Bellizia y Rodríguez op cit).

- **Calizas de Río Turbio Mesozoico (Cretácico temprano)**

El nombre de Formación Río Turbio fue introducido por Bushman (1958, 1959) para referirse a una secuencia de calizas con estratificación mediana a maciza y calizas arenáceas, interestratificadas con areníscas,

areniscas calcáreas, algunas limolitas y lutitas arenáceas, que afloran al sur de Barquisimeto. Bushman interpreta estos afloramientos como un bloque de falla a lo largo de la Falla de Boconó o Barquisimeto. Estima un espesor de unos 350 m. El conjunto faunal mencionado por Bushman, identificado por A. N. Dusenbury Jr., H. Renz y Carlos Key, corresponde al Grupo Cogollo de Venezuela occidental, específicamente a la Formación Apón (Bellizia y Rodríguez 1967).

Bellizia y Rodríguez (1966, 1967) consideran estas rocas como pertenecientes a la Formación Mamey. Sin embargo, también es posible que esta secuencia represente un bloque alóctono del Cretáceo Inferior andino, como lo indica su conjunto faunal, mencionado por Bushman, semejantes a los de la Formación Apón. Bellizia y Rodríguez (1968) recomiendan el rechazo del nombre Formación Río Turbio, para designar estos bloques aislados de calizas con el término informal de Calizas de Río Turbio (Bellizia y Rodríguez op cit).

- **Formación Bobare Mesozoico (Cretácico: Barremiense-Albiense)**

La Formación Bobare se compone esencialmente de areniscas cuarzosas oscuras, gris claro y crema, de textura variable que va desde grano muy grueso, a veces conglomerático hasta grano fino, predominando las de grano medio. Las areniscas son duras, densas y con textura en parte sacaroide. Los granos poseen bordes sub-angulares y sub-redondeados, constituidos por cuarzo, micas y pequeñas cantidades de feldespatos, el cemento es silíceo y a veces calcáreo o ferruginoso. Algunas poseen algo de matriz arcillosa y es frecuente observar láminas o escamas de lutitas y perdigones de arcilla. Las areniscas se presentan en capas delgadas variando a capas macizas que sobrepasan los tres metros de espesor;

presentan superficies de estratificación generalmente onduladas y algunas exhiben marcas de base no muy bien desarrolladas y gradación incipiente. No se observan marcas de oleaje, estratificación de corrientes, ni estratificación cruzada. Las areniscas cuarzosas frescas son de color gris, gris azulado, gris oscuro y algunas de color crema; en superficies meteorizadas, predominan los tonos rojizo, amarillento y marrón (Bellizia y Rodríguez 1967).

Interestratificadas con las areniscas se encuentran lutitas filíticas y limolitas bien laminadas de color negro. Una característica de la formación es la presencia de lutitas de color gris claro o crema, muy semejantes según Bushman, a las llamadas "lutitas caoliníticas" del Cretáceo Inferior en la localidad de Barbacoas (Bellizia y Rodríguez op cit).

Las rocas de la Formación Bobare constituyen la serranía del mismo nombre en el Estado Lara, que se extiende desde el norte de Barquisimeto hasta la Serranía de Churuguara-Siquisique al norte; hacia el este, el Valle de Duaca la separa de la Serranía de Aroa, y hacia el oeste, enlaza con la Serranía de Matatere. Sus afloramientos no son muy abundantes en las quebradas, las filas y sus laderas se presentan cubiertas por bloques de areniscas. No se han encontrado fósiles ni polen en la Formación Bobare, que permita una determinación de su edad (Bellizia y Rodríguez op cit).

La ausencia de fósiles y marcas de oleaje, así como las características litológicas, gradación en pequeña escala, desarrollo de algunas estructuras o marcas de base, sugieren un ambiente sedimentario de plataforma inestable con transportes esporádicos por corrientes de turbidez (Bellizia y Rodríguez op cit).

Bellizia y Rodríguez (1967), estiman el espesor de la Formación Bobare, en 1700 m.

Es necesario destacar las grandes semejanzas litológicas y petrográficas que existen entre esta unidad y gran parte de la Formación Morán. Ya Bushman en 1959, había observado este hecho y en su informe sobre la región de Barquisimeto no pudo establecer diferencias básicas entre la Formación Morán y la parte arenácea de la Formación Carorita del Cretáceo Inferior (Bellizia y Rodríguez op cit).

Puede afirmarse que las relaciones estratigráficas de la Formación Bobare no son claras, como se anticiparía en una región donde el deslizamiento gravitacional ha jugado un papel primordial. En algunos sitios, como Carorita y Algarí al norte de Barquisimeto, la Formación Bobare cubre a la Formación Barquisimeto con aparente concordancia, contacto que se interpreta como una falla de estratificación. En otras localidades, especialmente en la faja de la Formación Barquisimeto expuesta desde el noroeste de la población de Bobare hasta cerca del puente de la quebrada Urama, la Formación Barquisimeto cubre concordantemente a la Formación Bobare. En esta misma localidad, las rocas calcáreas y lutitas silíceas de la Formación Barquisimeto pasan transicionalmente a las lutitas y areniscas típicas de la Formación Matatere. Al este, hacia la región de Duaca, las rocas de la Formación Bobare pasan transicionalmente a las de la Formación Mamey. Estas relaciones incongruentes de la Formación Bobare con las Formaciones Barquisimeto y Matatere son normales en una zona donde los deslizamientos gravitacionales han jugado un papel de primera magnitud de la tectónica regional (Bellizia y Rodríguez op cit).

Ante lo expuesto, los que suscriben consideran como más probable que los sedimentos de la Formación Bobare pertenezcan al Cretáceo Inferior (Bellizia y Rodríguez op cit).

En conclusión, no hay duda que los esquemas paleotectónicos durante la sedimentación de las Formaciones Morán y Matatere fueron diferentes a los que prevalecieron durante la sedimentación de la Formación Bobare (Bellizia y Rodríguez op cit).

- **Formación Barquisimeto Mesozoico (Cretácico: Cenomaniense-Maestrichtiense)**

La Formación Barquisimeto fue descrita por Bushman (1959, 1965) para designar una espesa sección de calizas, lutitas, margas, lutitas silíceas y chert que aflora en los alrededores de Barquisimeto. Las calizas son más frecuentes en la parte inferior de la Formación y se pueden distinguir dos tipos: uno que se presenta en capas gruesas y el otro que aparece en capas delgadas de carácter lenticular. Las concreciones calcáreas no son tan comunes como en su equivalente la Formación La Luna en la Serranía de Trujillo. Las calizas son carbonáceas y laminadas, presentan un alto porcentaje de arcilla y limo en su composición (Bellizia y Rodríguez 1967).

Las lutitas silíceas y chert meteorizan en color gris claro y crema, son laminadas y se separan en hojas delgadas y quebradizas. Las lutitas calcáreas y las margas meteorizan en tonos rojizos, amarillentos, lavanda, blanquecinos y púrpura. Es notable el contraste entre los afloramientos frescos de la Formación Barquisimeto, en los que predomina el color negro y las rocas meteorizadas, que exhiben gran variabilidad en sus

colores de meteorización. Los cherts y lutitas silíceas son más frecuentes en la parte superior de la Formación (Bellizia y Rodríguez op cit).

Una de las características de esta Formación en los alrededores de Barquisimeto es la presencia de porfiroblastos de pumpellita que sugieren un grado bajo de metamorfismo. La pumpellita necesita para su formación altas presiones confinantes e influencia térmica subordinada. También puede formarse en zonas de fuerte cizallamiento acompañadas de temperaturas bajas. Esta última posibilidad es quizás la más aplicable a la presencia de este mineral en esta región (Bellizia y Rodríguez op cit).

En los alrededores de Barquisimeto, la formación es muy escasa en fósiles. Bushman informa la presencia de *Gumbelina* globulosa (Ehrenberg), *Gumbelina* cretácea y *Globigerina escheri clavata Bronnimann*, que indican una edad equivalente a la de la Formación La Luna. Coronel y Renz, señalan la presencia de un amonita del género *Mamites* y Bermúdez, en muestras recogidas por los autores, informa sobre la presencia de *Globigerina* sp., *Gumbelina* sp., *Globotruncana* sp., radiolarios y restos de microfósiles no identificables. Los conjuntos faunales conocidos hasta ahora en la Formación Barquisimeto indican una edad Cenomaniense-Turonense, que podría incluir parte del Albiense Superior hasta el Maestrichtiense. En el Léxico Estratigráfico de Venezuela, Tercera Edición, 1997, se considera la unidad según el contenido faunístico de edad Cenomaniense-Maestrichtiense (Bellizia y Rodríguez op cit).

La edad de la Formación Barquisimeto es Cenomaniense a Maestrichtiense, con posible extensión al Paleoceno. Las calizas con rudístidos probablemente constituyen bloques exóticos derivados de la

Formación Carorita y de calizas Cretáceo Inferior de la región andina (Bellizia y Rodríguez op cit).

El ambiente sedimentario de la Formación Barquisimeto es de aguas profundas, como lo indica una fauna predominantemente pelágica, ausencia de formas bentónicas y una litología que sugieren condiciones euxínicas de sedimentación (Bellizia y Rodríguez op cit).

- **Formación Matatere** Cenozoico (Terciario: Paleoceno-Eoceno)

Los sedimentos del Paleoceno y Eoceno no se encuentran muy bien representados en los alrededores de Barquisimeto. Los mejores afloramientos se presentan en los ríos y quebradas que disectan la Serranía de Matatere. Existen buenos afloramientos en el Río Urama y en las quebradas Matatere y Cambural, por lo que se han considerado apropiado usar el nombre de Formación Matatere para designar esta espesa secuencia de turbiditas asociada a varios horizontes de capas de peñones. En esta unidad estaría incluida la "capa de Peñones de Pavia" descrita por Bushman, el Terciario no diferenciado en facies de "flysch" de Coronel y Renz (1960) y parte de la Formación Morán de Von Der Osten y Zozaya (1959) y Bushman (1959, 1960). No se incluyen las areniscas cuarcíticas de la Formación Morán (Areniscas de Botucal) por presentar otras condiciones de sedimentación y tener más afinidad con las areniscas del Terciario Inferior Andino (Bellizia y Rodríguez 1967).

La Formación Matatere es la unidad más característica del Surco de Barquisimeto, puede correlacionarse con la Formación Guárico del frente montañoso de la Serranía del Interior y con las capas de Río Guache descritas por Von Der Osten y Zozaya (1957) en el frente montañoso entre Acarigua y Guanare.

Las tres unidades presentan las mismas condiciones de sedimentación y tectonismo (Bellizia y Rodríguez op cit).

La Formación Matatere se compone de una espesa sección de turbiditas representadas por areniscas que varían desde impuras líticas a impuras feldespáticas, con varios horizontes de areniscas conglomeráticas y conglomerados líticos. Las areniscas y conglomerados se componen de cuarzo, feldespatos y micas y fragmentos líticos de composición variable representados por calizas, filitas, esquistos, cuarcitas, lutitas y en menor proporción por rocas volcánicas básicas y gneises. Es interesante destacar que la proporción de fragmentos líticos de volcánicas básicas aumenta hacia el norte, y al sur de Siquisique la formación contiene un porcentaje muy alto de estos fragmentos relativamente frescos. Estas rocas con alto porcentaje de volcánicas básicas son grauvacas típicas. La matriz arcillosa, a veces arcilloso-calcárea, constituye el 10-25% de la roca por volumen (Bellizia y Rodríguez op cit).

Las areniscas se presentan generalmente en capas delgadas, aunque pueden alcanzar espesores de hasta más de 2 m. Son de color gris verdoso o marrón, presentando al meteorizar el típico aspecto de "sal y pimienta". Las areniscas son generalmente de grano medio y muestran pobre escogimiento y predominio de granos sub-angulares y angulares. El porcentaje por volumen de las areniscas varía del 25 al 35% de la secuencia. Las areniscas exhiben buena gradación y marcas de base tales como calcos de flujo, de carga, de deslizamiento, pliegues en voluta, estructuras de desgarre y deslizamiento, típicas de secuencias turbidíticas. También es frecuente encontrar en las areniscas, perdigones de arcillas, láminas y escamas de filitas y lutitas, así mismo característicos de este tipo de sedimentos (Bellizia y Rodríguez op cit).

Las lutitas son generalmente limolíticas o arenáceas, cuando están frescas son de color negro y meteorizadas predomina el color verdoso o marrón. La estratificación de las lutitas es muy irregular y por el escaso espaciamiento de las fracturas y el desarrollo de un clivaje oblicuo, se origina una fragmentación en lápices. Al sur de la carretera Barquisimeto-Quíbor las lutitas de El Tocuyo de la Formación Morán se presentan mejor estratificadas y en la parte inferior desarrollan buena laminación (Bellizia y Rodríguez op cit).

Los bloques deslizados en la Formación Matatere varían en tamaño desde peñones hasta verdaderos bloques montañosos. Los bloques son de la Formación Barquisimeto y del Cretáceo Inferior, de areniscas y rocas graníticas y gneísicas, estas últimas muy abundantes al norte de Bucarito. Al sur del Alto de Siquisique se presentan olistostromos de rocas volcánicas básicas. En la sección Paleoceno-Eoceno se encuentran varios horizontes de capas de bloques (Bellizia y Rodríguez op cit).

Las lutitas no son fosilíferas; esta misma observación fue hecha con anterioridad por Bushman después de haber hecho lavar centenares de muestras con resultados negativos en el área de Barquisimeto. En una de las muestras recogidas por los suscritos, Bermúdez identificó *Cribrostomoides trinitatiensis* Cushman y Jarvis, *Cyclammia elegans* Cushman y Jarvis, *Glomospira* sp. y *Haplophragmoides excavata* Cushman y Waters, que corresponden al Paleoceno (Bellizia y Rodríguez 1967).

Las condiciones sedimentarias de la Formación Matatere son semejantes a la facies de "flysch" europeo y su sedimentación se atribuye en gran parte a corrientes de turbiedad. La presencia de grandes espesores de

turbiditas asociados a fenómenos de deslizamientos submarinos por efectos de gravedad, es una característica del Surco de Barquisimeto y juega un papel de primordial importancia en la tectónica y mecánica de transporte del alóctono (Bellizia y Rodríguez op cit).

La presencia de olistostromos de rocas metamórficas y volcánicas sugiere levantamientos epirogénicos de las áreas limítrofes del surco o una fuerte erosión submarina. El desarrollo de calizas arrecifales es la evidencia de levantamientos en el Paleoceno en el área de El Tocuyo y Carora. En la región estudiada no se encuentran calizas arrecifales, sino delgadas capas esporádicas de calizas pelágicas. Se estima un espesor que sobrepasa los 3000 m para esta formación (Bellizia y Rodríguez op cit).

- **Formación Guamacire Cenozoico (Mioceno superior-Plioceno)**

El nombre de Formación Guamacire fue publicado por Bushman (1959), para designar una secuencia de rocas sedimentarias que aflora al sur de Barquisimeto. Se encuentra representada en pequeños afloramientos al Norte de Yaritagua entre las quebradas El Pegón y Las Animas (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997).

Litológicamente está constituida por areniscas, calizas limosas, margas y lutitas blandas grisáceas. Sus sedimentos son de ambiente continental lacustre y se calcula a la unidad un espesor de aproximadamente 100 m (Léxico Estratigráfico op cit).

Bushman (*op. cit.*), menciona moldes de gasterópodos, pelecípodos y algas, además de ostrácodos entre los cuales identificó *Cytherella* sp (Léxico Estratigráfico op cit).

La unidad es de edad Mioceno – Plioceno; su contacto superior es concordante con sedimentos mas jóvenes (Léxico Estratigráfico op cit).

- **Formación El Pegón** Cenozoico (Terciario: Mioceno tardío-Plioceno)

La unidad aflora entre las quebradas Grande y El Pegón, al norte de Yaritagua, entre esta población y Barquisimeto. Esta formada por gravas aluvionales mal consolidadas, mal estratificadas y mal escogidas, con cantos de fragmentos de cuarzo, esquistos cuarzo-sericíticos y calizas (Bushman, 1965). Se estima que la unidad tiene unos 100 m de espesor (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997).

La unidad es de edad Mioceno- Plioceno, discordante sobre las rocas metamórficas que contribuyeron elementos a las gravas y su tope es discordante por debajo de los aluviones del cuaternario (Léxico Estratigráfico op cit).

❖ **Cuaternario - Reciente**

- **Terrazas**

Una gran parte del estado Lara esta cubierta de sedimentos recientes (compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas) y Pleistocenos (de composición litológica similar), cubriendo la mayoría del área con material de origen fluvial pobremente consolidado formando terrazas aluvionales (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997).

- **Aluviones Cuaternarios**

El área en estudio esta cubierta de material cuaternario que comprende aluvión reciente, antiguo terrazas y deposito piemontinos, compuesto de limos y arcillas con intercalaciones de gravas, peñones y arenas no consolidadas; donde se pueden distinguir grandes depósitos de aluviones, aluviales y coluviales, con terrazas y zonas topográficamente bajas.

Estos sedimentos provienen de la desintegración y erosión de las rocas existentes en las colinas redondeadas que rodean el área y del acarreo del material por la acción fluvial.

La capa superficial esta integrada en general por sedimentos que van de finos (limos y arcillas) en la parte del explayamiento a gruesos a medida que se acercan al pie de monte, frecuentemente con restos vegetales. Los sedimentos muestran colores fuertes (naranja y marrón) con tonos amarillos producto de la meteorización.

En la Figura # 2, se presenta la Columna Estratigráfica Generalizada del Estado Lara, de la parte oriental, basada en los estudios geológicos de Bellizia y Rodríguez (1967) y Bushman (1965).

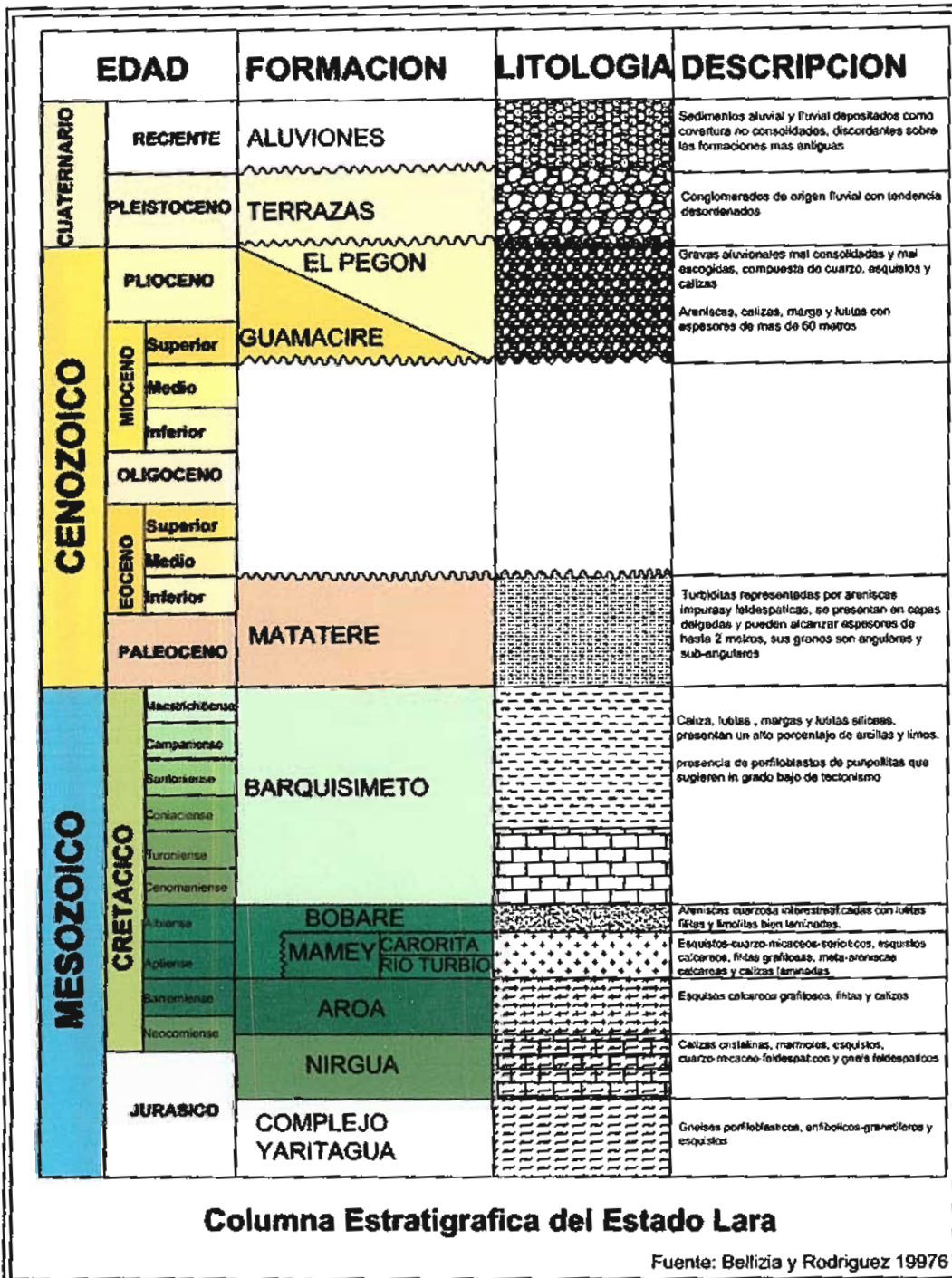


Fig 3.4: Columna Estratigrafica del Estado Lara

3.3.2 Geología Local

↓ Formación Mamey

En un corte de carretera de aproximadamente 125 m de extensión, entre Duaca-El Eneal, se observó esta unidad Cretácica, compuesta esencialmente de esquistos cuarzo-micáceo-sericíticos, esquistos calcáreos, filitas grafitosas y metaareniscas (ver Fotografía 3.5). Los esquistos se ubican en las facies de los esquistos verdes debido a su grado de metamorfismo. Los minerales más resaltantes presentes son: micas biotita y moscovita, ortosa, cuarzo, entre otros. Su textura es talcosa porque el feldespato está caolinizado. El tamaño de los minerales no sobrepasa los 0.5 mm.

Las filitas, que poseen un grado de metamorfismo menor, se encuentran meteorizadas y presentan planos de foliación bien definidos, los minerales presentes más resaltantes, al igual que los esquistos, son: micas biotita y moscovita, ortosa y cuarzo, entre otros. El tamaño de los minerales varían entre 0.1 mm a 0.5 mm. El feldespato está caolinizado, en menor proporción que en los esquistos.



Fotografía 3.5: Filitas de la Formación Mamey.

Hay que resaltar que en los alrededores de Duaca específicamente en la localidad de Tumaque, se observa una espesa sección de calizas macizas puras utilizadas para la obtención de cemento blanco. Debido a la falta de recursos fue imposible llegar al afloramiento de ésta formación, ya que sólo se puede acceder al área en vehículo rústico. Según la información geológica existente, dicho afloramiento también correspondería a la Formación Mamey.

4 Aluviones Cuaternarios

Una gran parte del área está cubierta de sedimentos recientes (compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas) y Pleistocenos (de composición litológica similar), cubriendo la mayoría del área formando terrazas aluviales (ver Fotografía 3.6). Estos sedimentos predominan en la población del Cuji-Tamaca y sus alrededores. El tamaño del grano varía entre 0.1 mm hasta 10 cm.



Fotografía 3.6: Sedimentos Cuaternarios en la Población de Tamaca.

Capitulo IV

- Metodología Aplicada
-

Metodología aplicada a la evaluación de acuíferos mediante la interpretación de imágenes satelitales y el uso de Sistema de Información Geográfica (SIG)

La combinación de las técnicas de Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica permiten el desarrollo de una metodología operativa que resulta ser adecuada para determinar las zonas con mayor probabilidad de existencia de agua subterránea en regiones donde el recurso hídrico es escaso.

4.1 Explicación de la metodología

Se puede indicar que es una metodología aplicada y estructurada, partiendo de un esquema general (Figura 4.1) de el cual parten metodologías específicas en este caso esquemas específicos y con sus detalles de implementación en la zona de estudio.

La metodología adoptada presenta un nivel de estudio detallado por sectores ya que parte de la información es reciente, y generalizando toda el área de estudio, faltaría un poco mas de información para llegar a optimizar toda la zona de estudio y sintetizar los principales factores que intervienen en la evaluación de acuíferos, integrando capas de información y así obtener un mapa final de zonas probable de existencia de agua subterráneas, existen diferentes tipos de análisis y técnicas.

Para el desarrollo de esta metodología descrita a continuación se tomo en cuenta Imágenes Satelitales Landsat y Spot también se tomaron datos de prospecciones geoelectricas reciente realizada en varios sectores del área en estudio.

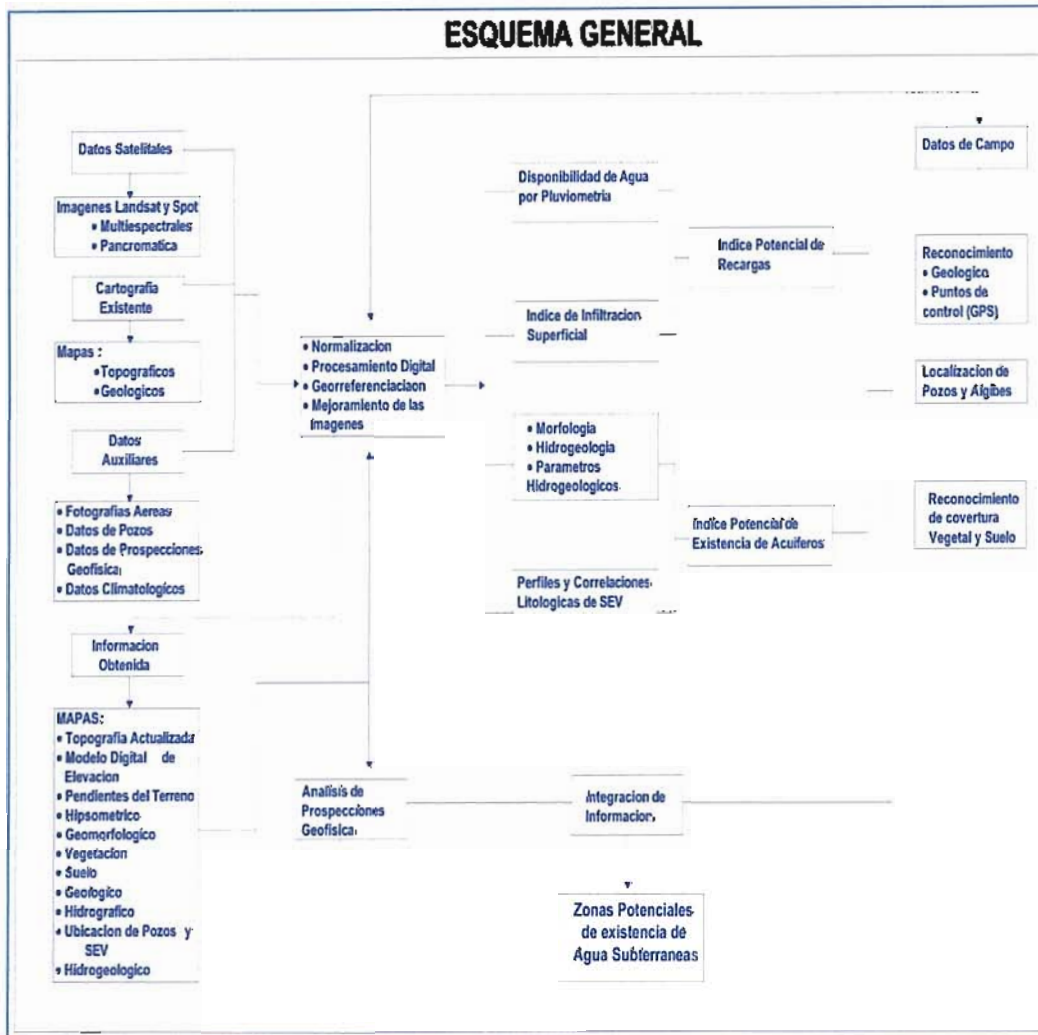


Fig 4.1: Esquema General de la Metodología Aplicada

4.2 Organización de los datos

En esta etapa se organizan todos los datos recopilados de diferentes fuentes de información del área de estudio.

Esta información se debe recopilar tan completa y exactamente como sea posible, ya que conformaran los elementos bases de toda la información geográfica que forma parte de la base de datos espacial del estudio.

4.3 Información de Imágenes Satelitales Landsat y Spot 5

La teledetección se fundamenta en el análisis del espectro electromagnético y consiste en un conjunto de técnicas que permiten detectar a distancia las variaciones en la emisión, reflexión y absorción de las ondas electromagnéticas que constituyen la superficie terrestre.

La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie que se observa y de la longitud de onda a la que sea observado. Para poder caracterizar una determinada cubierta, resulta muy interesante conocer su comportamiento en diversas longitudes de onda, ya que esto permite determinar mejor sus diferencias con respecto a cubiertas espectralmente similares. (CHUVIECO, 2002).

En el caso del espectro visible, ese comportamiento disimilar de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en el color; un objeto es azul si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto, mientras que será verde si su reflectividad se centra en esa banda y es baja en otras. (CHUVIECO, 2002).

4.4 Imágenes Landsat TM y ETM+

La adquisición de las Imágenes se realizó a través de la página de internet <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/>, la cual es de libre acceso,

se adquirieron dos imágenes en formato ***Tiff** que corresponde a la fecha 1990/01/10 del sensor TM y del 2000/03/18 del sensor ETM+, cada una cuenta con una resolución de 28.5 metros, estas imágenes ubican toda el área de estudio.

4.5 Imagen Spot 5

Estas Imágenes Spot fueron solicitadas en el Instituto de Ingeniería para la Investigación y Desarrollo Tecnológico "Centro de Procesamiento Digital de Imágenes", a través del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).

Fueron adquiridas dos tipos de Imágenes una pancromática la cual cuenta con una resolución de 2.5 metros y la otra multiespectral de 10 metros de resolución cada una en formato ***Tiff**, las imágenes corresponden a la fecha 2008/01/28.

4.6 Procesamiento Digital e interpretación visual de las imágenes Landsat y Epot

Este procesamiento incluye la georeferenciación, delimitación del área de estudio para cada imagen, la composición de imágenes en falso color, y la aplicación de realces digitales.

Las imágenes Landsat TM y ETM+ ya están en formato digital y generalmente están disponibles en 3 niveles de corrección geométrica:

- Una corrección sistemática básica de la cual se obtiene la imagen cruda
- Una georeferenciación utilizando las efemérides del satélite, donde el remuestreo se realiza por convulsión cubica.

- **Una georeferenciación que se realiza a partir de puntos de control terrestre que pueden obtenerse de cartografía existente, de otra imagen ya georeferenciada o por medición en el terreno con tecnología GPS. Así se obtiene una imagen rectificadas a una determinada proyección geográfica.**

Para el caso de las imágenes adquiridas del sensor Landsat la que corresponde a la fecha 2000/03/18, esta georeferenciada utilizando la efemérides del satélite, mientras que la de 1990/01/10 no se encuentra georeferenciada.

Para realizar el proceso de georeferenciación con una imagen de referencia se utilizó un programa de procesamiento de imágenes digitales en este caso ERDAS 8.4, siguiendo los siguientes pasos:

Abra los dos **Viewers** desde el menú principal de ERDAS, en el **Viewer 1** despliegue la imagen a ser georeferenciada en este caso la imagen con fecha de 1990/01/10 y en el **Viewer 2** la segunda imagen georeferenciada, desde el **Viewer 1** active **raster/geometric correction... en set geometric model** seleccione **Polynomial** y haga clic en **OK**. Se abrirán las ventanas de **Geo Correction Tools** y **Polynomial model properties**, en la ventana de **gcp tool reference setup**. Acepte por defecto todos los parámetros.

Luego se abre las instrucciones del **viewer selección instructions**, con la pregunta sobre el **Viewer** con coordenadas de referencia. Haga clic en el **Viewer 2**. Se abrirá la ventana de **reference map information**. La información que se presenta, corresponde al sistema de proyección de la imagen georeferenciada, obsérvela y oprima **OK**.

Se desplegarán las siguientes ventanas como se muestra en la figura 4.2:

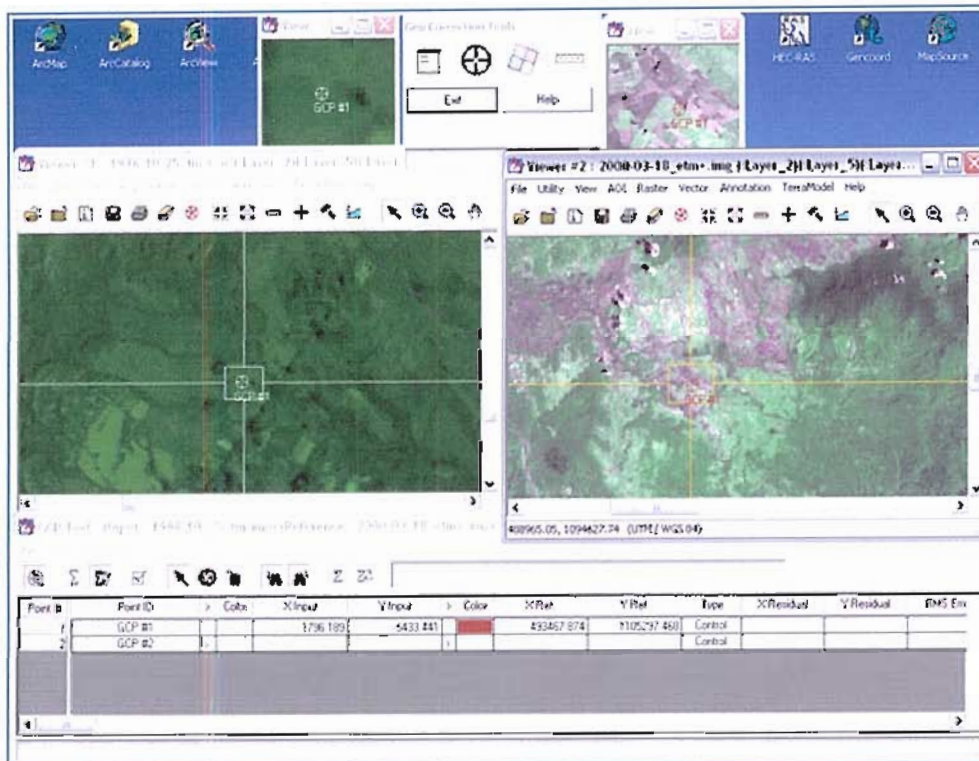


Fig 4.2: Georreferenciación Imagen a Imagen por puntos de control

Inicie con la creación de los puntos de control bien distribuidos por toda la imagen, ubicando estos en cada Viewer, deben ser puntos con ubicación iguales por ejemplo intersección de vías o ríos.

Una vez cumplido con los pasos mencionados anteriormente se visualiza la imagen georreferenciada como se muestra en la siguiente figura 4.3.

Con respecto a las imágenes Spot fueron adquiridas ya georreferenciadas. Todas estas Imágenes deben estar georreferenciadas en un mismo sistema de proyecciones en este caso Datum WGS 84 UTM.

4.6.1 Delimitación del área

Hecho todo el procedimiento anterior se procede a seleccionar el área de estudio mediante el programa ERDAS de la siguiente manera:

Se despliega la imagen georreferenciada anteriormente, sobre la imagen se oprime el botón derecho del maus y se selecciona **Inquiry Box** en el cuadro mostrado se introduce las coordenadas del area en estudio, luego desde el menú principal de ERDAS se activa **Interpreter/Utility/Subset**, se le da un nombre de salida y luego **OK**.

En la siguiente figura se muestra a la izquierda el área seleccionada en la imagen completa y a la derecha el área recortada.

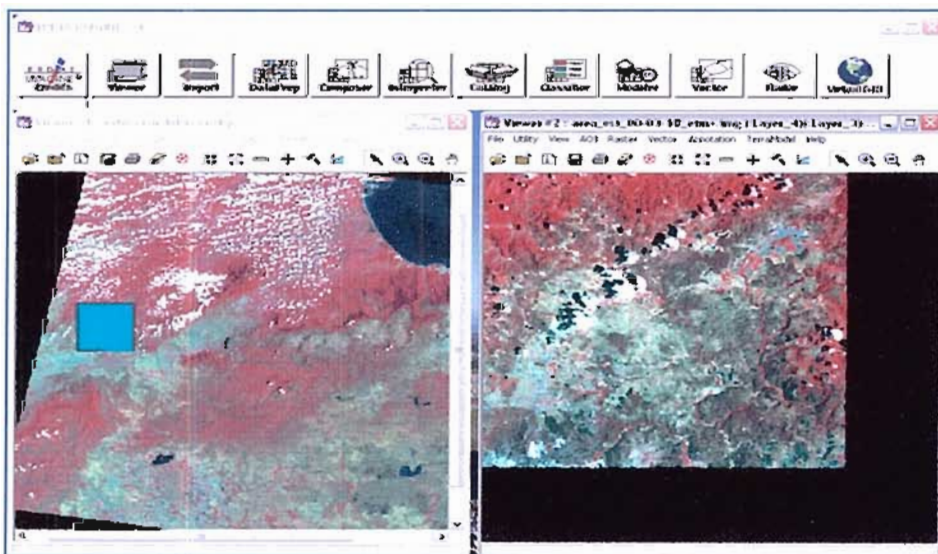


Fig 4.3: Selección del Área de Estudio

Este procedimiento descrito anteriormente es aplicado para todas las imágenes satelitales que se van a utilizar en esta tesis de pregrado.

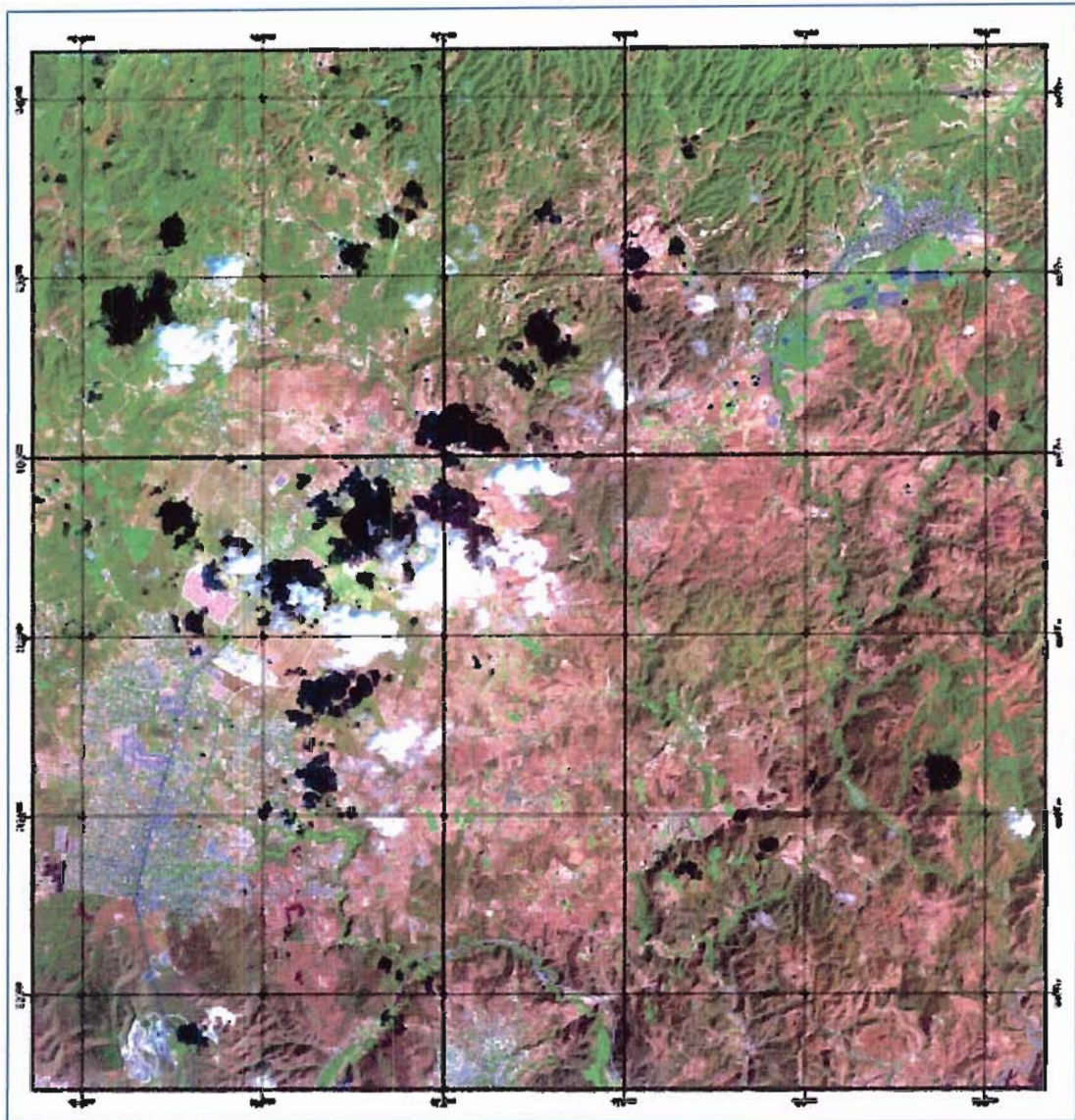


Fig 4.4: Imagen Spot del área de estudio

4.6.2 Realces y Mejoramientos de las Imágenes

Realzar y mejorar el contraste de las imágenes con la finalidad de diferenciar las diferentes coberturas presentes en ella. Los mejoramientos se aplican con el fin de realzar los contrastes y algunas características

particulares de las imágenes, para optimizar el proceso de la interpretación visual. Existen cuatro tipos de mejoramiento **radiométrico, espaciales, geométricos y espectrales**. Su utilización está en directa relación con el tipo de imágenes a procesar, los objetivos del estudio, de las características particulares del paisaje y la experiencia profesional. Siempre debe estar presente la siguiente aclaración: al **“mejorar”** la imagen para un objetivo específico, estamos **alterando sus valores originales**. Los mejoramientos pueden ser aplicados de modo temporal, sobre la imagen desplegada y de modo permanente, sobre la imagen del archivo.

Para el realce de las imágenes se procedió con el programa Envi 4.3 hasta ajustar a un mayor contraste, de la siguiente manera:

Se abre la imagen, en el menú principal de Envi se selecciona **File/Open external file/generic formats/tiff/Geotiff**, luego tenida la imagen desplegada en el menú de la imagen **Enhance/filter/Sharpen 14**, este último se puede cambiar de tal manera de ir ajustando el mejor realce. En la siguiente figura se muestra en el lado izquierdo la imagen original y a la derecha la misma imagen pero aplicándole el realce descrita en el procedimiento anterior.

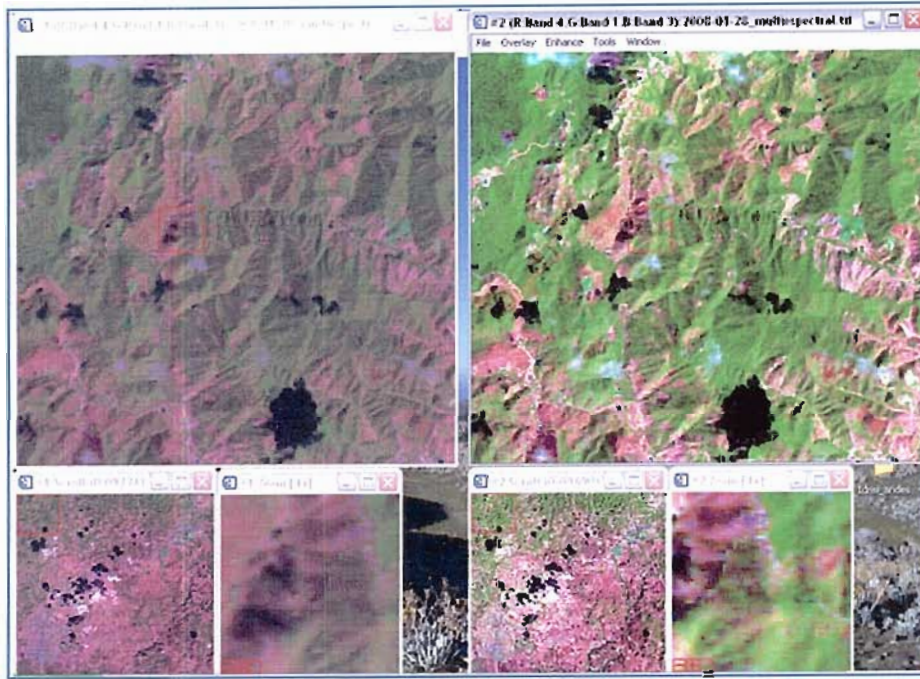


Fig 4.5: Diferencia de realces de la imagen Spot en diferentes filtros

Para realzar las áreas con mayor vigor vegetal y para reducir el efecto de las sombras originado por el relieve se recomienda el use de los índices de vegetación. Existen variadas derivaciones del Índice de vegetación, algunas de las ecuaciones se pueden observar cuando se despliega la ventana del cálculo del Índice. Pero todos se basan en el use de las bandas correspondientes al rango del espectro electro-magnético del rojo y el infrarrojo cercano.

4.7 Vectorización a través de las imágenes Landsat y Spot

Debido a que se quiere el máximo detalle en cuanto a la hidrografía de la zona en estudio se procedió a digitalizar a través de las imágenes Landsat y Spot, pero tomando con mayor precisión la Spot ya que esta

es la mas reciente y nos indican como es la hidrografía actual del área en estudio, las imágenes Landsat nos indicaran como a variado la hidrografía ya que todas las imágenes son de diferentes años.

En el menú principal de Envi 4.3 se activa el menú **Vector/Create New vector layer/Using Raster image file**, se le da un nombre y se comienza a digitalizar toda las redes hidrográficas observadas en la imagen ya desplegada. En la figura se muestra la digitalización de una parte de la hidrografía:

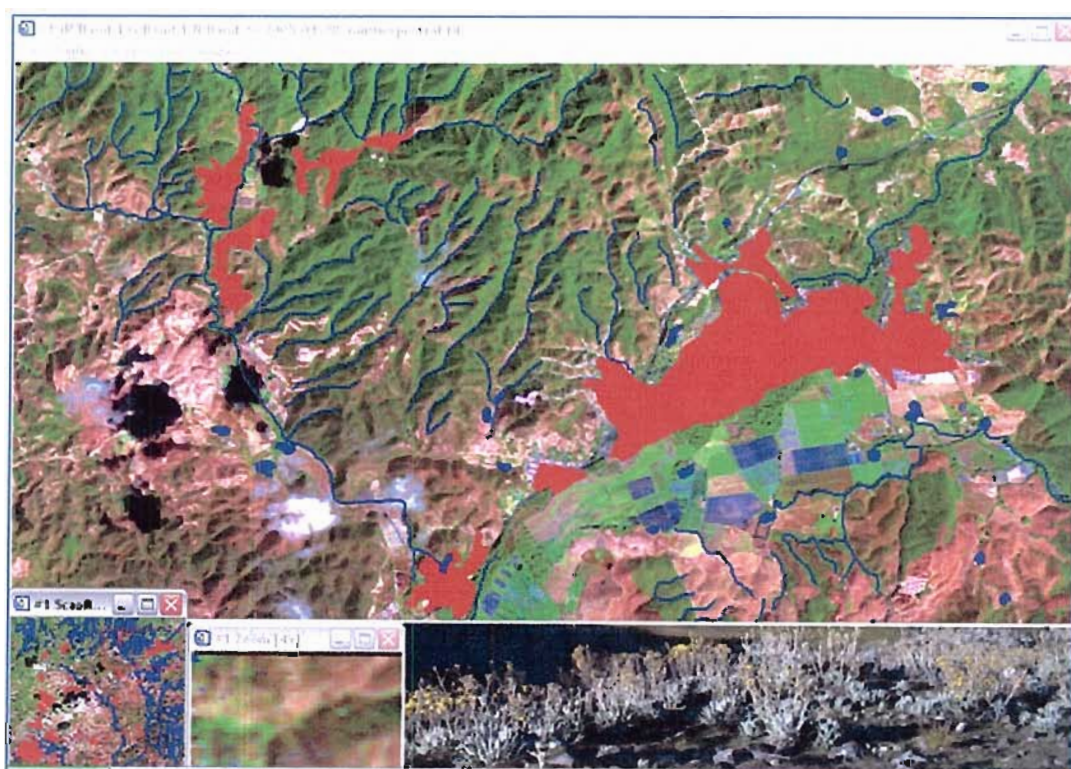


Fig 4.6: Proceso de Vectorizacion en la Imagen Spot

De esta manera se completa toda la hidrografía del área a través de la imagen Spot, de igual manera se realizó la digitalización de los centros poblados y vías de acceso.

Otro rasgo importante es la geomorfología presente en el área, se digitalizan de la imagen de satélite las formas más comunes y corrientes del terreno de acuerdo con la topografía que presentan, las cuales pueden diferenciarse con una interpretación visual, por ejemplo los límites del valle, las colinas y cerros que constituyen a las formaciones geológicas y algunos abanicos que se observan claramente.

Para la digitalización de las unidades geomorfológicas con fines de descripción de suelos es obligatorio el trabajo de campo, por la simple razón que lo identificado y delimitado en una imagen de satélite no son suelos sino formas del terreno.

Las imágenes pancromática y las fotografías aéreas fueron muy útiles a la hora de obtener mayor precisión en el trazado de la digitalización ya que estas cuentan con una resolución de 2.5 metros, esta información es almacenada y luego exportada en formato Shapefile, para ser integrada en el Sistema de Información Geográfica mediante el programa ArcGis 9.1

4.8 Clasificación Supervisada de las Imágenes

Para este paso se tomaron en cuenta datos de campo tomados con el GPS para poder hacer las clasificaciones Supervisadas correspondientes al tipo de vegetación y el tipo de suelo presentes en el área de estudio y

así poder definir sus respectivas clases, se procedió de la siguiente manera:

En el menú de la imagen se activa el modulo **Tools/Región Of interest/Roi tool**.

Utilizando el método de Mínima Distancia, se realiza una prueba de clasificación supervisada de la imagen Landsat y Spot en composición de falso color de las bandas 4, 5 y 2 con la finalidad de conocer los alcances de la clasificación digital para la generación de mapas de Suelo y vegetación. Para la clasificación de suelo se determinaron regiones de interés para seis clases como Limos y Arcillas, Arenas limosas, Arenas y Gravas, Cuerpos de agua, Nubes y por ultimo sombras asignando pixeles a cada categoría que representa una gama de variedad dentro de la imagen.

Envi, permite localizar interactivamente las áreas de entrenamiento y realizar una clasificación supervisada por el método de distancia mínima mediante la función **Classification/Supervised/Minimun Distance**. Con la ayuda del mouse, se introducen sobre la pantalla los rectángulos que definen cada una de estas regiones de interés, asignándoles a una de las categorías definidas previamente (Ver Figura 4.7).

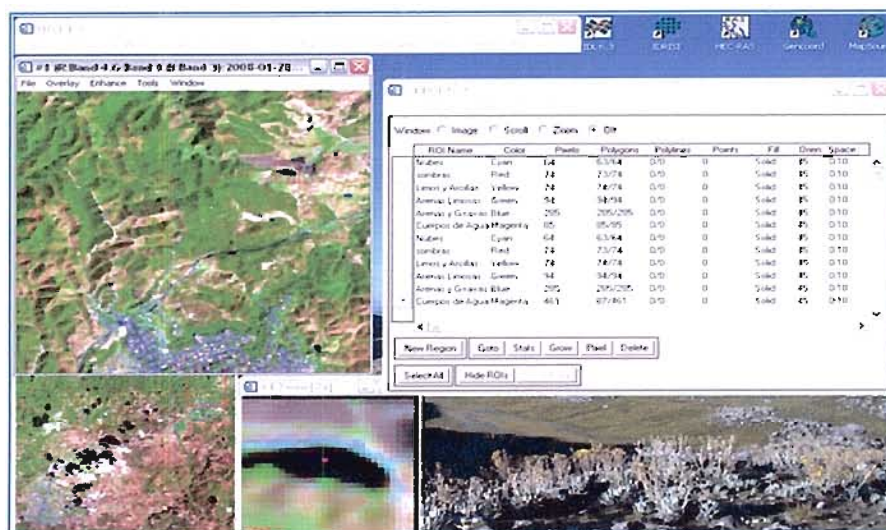


Fig 4.7: Asignación de las diferentes clases a los pixeles correspondientes

Como se dijo anteriormente es importante el conocimiento de la zona de estudio por medio de trabajo de campo, así como también una revisión cartografía convencional y geológica que permitan delimitar sobre la imagen las regiones representativas para cada una de las áreas que constituirán las clases o categorías de la clasificación.

Como resultado final se obtuvo un mapa clasificado para el área de estudio que se muestra en la figura 4.8. En general esta clasificación resulta útil para reflejar apropiadamente la variabilidad de diversas categorías, pero los resultados obtenidos no son muy buenos, ya que es importante tener presente que las áreas de entrenamiento seleccionadas deben ser ejemplos suficientemente representativos y homogéneos de la clase que pretende definirse.

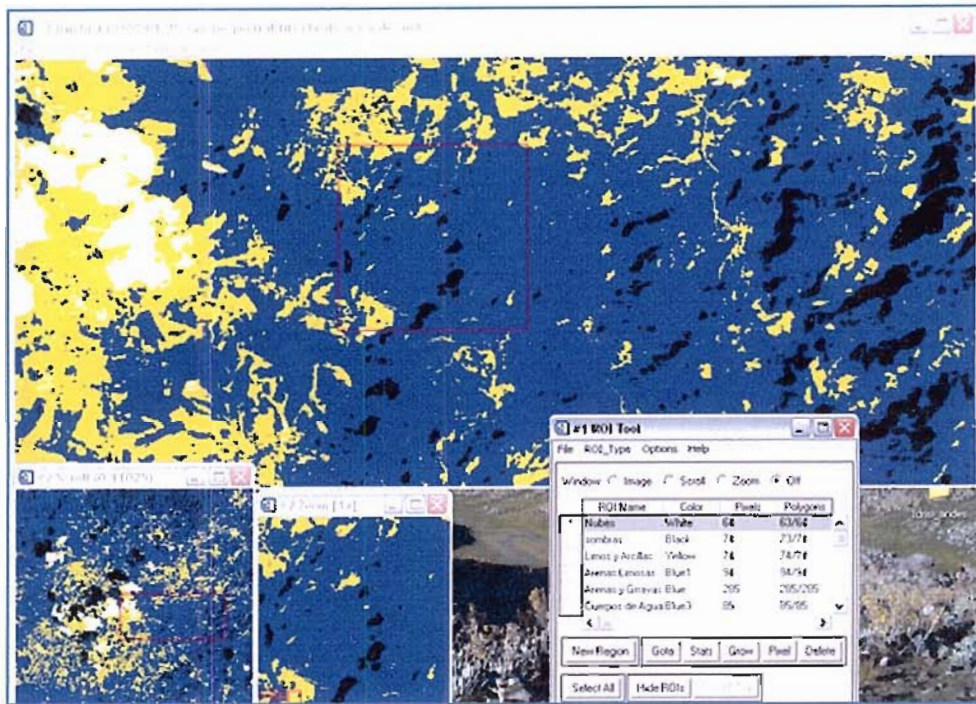


Fig 4.8: Mapa de suelo con la clasificación supervisada

Este resultado es guardado como imagen de extensión **Tiff**, para ser tratada en ArcGis y generar el mapa final de Suelo.

Siguiendo estos mismos pasos se procede con la clasificación supervisada de la cobertura vegetal para obtener el mapa de vegetación final.

4.9 Fusión de datos de la imagen Landsat a Spot

La fusión de datos es el proceso comúnmente utilizado para combinar imágenes con diferentes resoluciones espaciales. Es decir, realzar la resolución de los datos multiespectral de menor resolución espacial usando una banda (normalmente pancromática)

de mayor resolución espacial, la cual puede ser del mismo u otro sensor. Es necesario preparar previamente los datos, Esto implica que las imágenes deben estar georreferenciadas, deben cubrir la misma área geográfica, tener el mismo tamaño del pixel, numero de las filas y columnas y tener la misma orientación. Por tanto, la imagen de menor resolución debe remuestrearse, usando el método del vecino más próximo (nearest-neighbor resampling) para que tenga el mismo tamaño del pixel que la imagen de resolución superior.

Es necesario aplicar este método a las imágenes Landsat ya que éstas cuentan con una resolución que no ofrece mucho detalle debido a que el área de estudio no es muy grande.

Para esto se sigue los pasos descritos a continuación:

En el menú principal de Envi, se selecciona **Basic tools/Resize data/Spatial/spectral**, se selecciona **la imagen Landsat/OK**,

en el campo **Xfac field** se introduce el factor 2.8 ya que la imagen tiene resolución de 28 metros, en el campo **Enter Output Filename field** se introduce el nombre de salida, se selecciona la opción **RGB Color** para visualizar la imagen a color ya redimensionada.

El producto final se muestra en la figura 4.9:

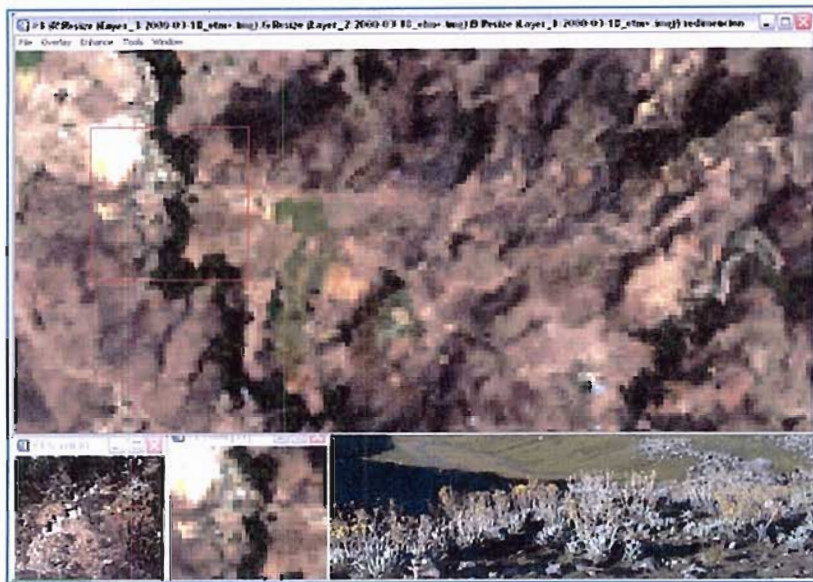


Fig 4.9: Fusión de la Imagen Landsat a través de la Spot

De esta manera se procede a realizar la vectorización siguiendo los mismos pasos descritos anteriormente utilizando como base las imágenes Landsat.

4.10 Mapas existentes

El mapa es una representación selectiva y generalizada de la superficie terrestre o regiones de la misma sobre una superficie plana, a una escala reducida, en la que se ha plasmado la información geodésica, conjuntamente con la componente descriptiva y topológica. (Vilchez, 2000).

En los mapas se pueden leer y/o medir las propiedades espaciales de entidades representadas y algunas propiedades descriptivas, expresadas a través de símbolos y colores.

Los mapas existentes pueden ser mapas analógicos clásicos o convencionales (de líneas, símbolos, toponimia y colores), los cuales son fuentes de datos principales en los Sistemas de Información Geográfica, estos documentos analógicos deben ser convertidos en formato digital (digitalización) para así luego ser integrados en una base de dato del sistema.

En todo tipo de mapa se debe tener presente la escala de representación (por ejemplo 1:50000), la extensión del área de estudio y la exactitud de un punto representado, mediante un sistema de proyección adecuado.

En este estudio es importante contar con mapas topográficos tanto analógicos como en formato digital, ya que el objetivo de este tipo de mapa es representar los hechos naturales y artificiales (topografía), situados sobre la superficie terrestre de la manera más exacta y confiable posible, dentro de las irritaciones impuestas por la escala de representación. De esta manera se tiene una visión más clara, por lo tanto, es recomendable utilizar mapas topográficos a escala 1:25000 o a escala 1:50000 ya que las imágenes Spot se encuentran con resolución de 10 metros.

Los mapas existentes fueron topográficos y geológicos.

En el momento de delimitar el área de estudio se procedió a usar el mapa topográfico a escala 1:100.000, luego de haber delimitado el área se marco las coordenadas en el mosaico de mapas topográficos a escala 1:25000 ya que esto ofrecen mayor detalle de la zona de estudio.

En cuanto a los mapas geológico se usaron a escala 1:50000 y 1:200.000, estos mapas fueron realizado por la Creole Petroleum Corporation y facilitado por el Instituto Nacional de Geología y Minas (INGEOMIN), la razón de porque se usaron estos mapas a diferentes escala es debido a que los mapas a escala 1:50000 le falta información de algunas áreas y fue completada por los mapas a escala 1:200000, de esta manera se elaboro un solo mapa geológico de toda el área en estudio.

4.11 Datos Auxiliares

La información auxiliar fueron fotografías aéreas de vuelos realizado en el año 1981, datos de estaciones climáticas (Precipitación y Evapotranspiración), toda esta información fue facilitada por el Ministerio del Ambiente del Estado Lara.

De igual manera se obtuvieron datos de Pozos perforados en el área de estudio y datos de Sondeos Eléctricos Verticales la cual fue facilitada por Hidrolara.

4.12 Normalización e integración en el Sistema de Información Geográfica (SIG)

Este proceso incluye la georeferenciacion, digitalización y edición de la información base.

El método mas común de conversión de mapas existentes (información base analógica) a formato digital es por digitalización manual, este proceso se realiza mediante un software SIG que soporte operaciones de digitalización y edición, por ejemplo ArcGis 9.1 (en formato *.shp).

En este procedimiento se utiliza como base una imagen escaneada en formato raster del mapa analógico, la cual se georeferencia y se registra como una serie de coordenadas "X,Y" en el sistema de proyección cartográfica deseado, toda la información se maneja en REGVEN (Red Geocéntrica Venezolana) que incluye el sistema de coordenadas planas rectangulares (X, Y), que en Venezuela es el Sistema Mercator Transversa Universal (proyección UTM), Datum WGS - 84 y Huso longitudinal 19 en el hemisferio Norte.

En Venezuela el datum geodésico vigente hasta el año de 1999 fue La Canoa o PSAD-56 (Provisional South American 1956). A partir de esa fecha el datum oficial es SIRGAS-REGVEN. Este Sistema de Referencia Geodésico Nacional lo materializa la Red Geocéntrica Venezolana REGVEN, en sustitución de la Red de triangulación Nacional de primer orden.

Para el caso de la información base existente es preciso tomar en cuenta en que sistema de referencia se encuentran, así como su proyección cartográfica. Si este sistema o proyección no coincide es necesario realizar la transformación a REGVEN.

El mapa topográfico de Cartografía Nacional se lleva a formato digital mediante el escaneo como imagen *.TIFF y se georeferencia a la proyección UTM, Datum PSAD-56 (La Canoa), este se transforma a la proyección WGS 84.

4.13 Digitalización

4.13.1 Topografía

Luego de tener toda la información base se procede a digitalizar el polígono del área de estudio a partir del mapa topográfico para crear las características adicionales en función de ella.

También son digitalizadas las curvas de nivel con el propósito de elaborar un modelo de elevación digital (MED), se realizó un modelo en ArcGis 9.1 y otro en Surfer 8.0 para crear este último se exporta la base de datos a una hoja de Excel.

Los rasgos como la hidrografía, vialidad, centros poblados y geomorfología fueron digitalizados a partir de la Imagen Satelital Spot como se explico en el apartado 4.7.

4.13.2 Geología

Para digitalizar la geología del área se utilizo como base el mapa geológico final, la información recolectada en la etapa de campo y del análisis visual de las imágenes de satélite. Las Formaciones geológicas se digitalizan como tema de polígonos y las estructuras geológicas como tema de líneas.

Los elementos que tengan las mismas características espaciales (puntos, líneas o polígonos) deben ir en capas separadas, de acuerdo con su tipo de elemento y atributos asociados (por ejemplo, en la geología se pueden representar dos mapas: formaciones geológicas como polígonos, y anticlinales como líneas) cada una de ellas con topología y atributos distintos.

4.14 Datos Auxiliares

Las fotografías aéreas fueron georreferenciadas para crear un mosaico de fotografías de tal manera de que abarque toda el área de estudio y se solape con la digitalización de los rasgos topográficos, esto se realizó a través de la cartografía a escala 1:25000, donde se buscó puntos comunes en la fotografías aéreas como en el mapa, de manera de asignarle al punto común la coordenadas reales del mapa.

Estas fotografías se usaron para tener mayor precisión en la digitalización de algunas áreas que no se pudieron distinguir con las imágenes satelitales.

4.14.1 Ubicación de las estaciones climáticas y pozos existentes en el área de estudio

Las estaciones meteorológicas se encuentran en coordenadas geográficas, por lo tanto se transforman a UTM utilizando el programa **Gencor**.

La ubicación de los pozos existentes y de las estaciones climáticas se realiza mediante la digitalización de cada uno de forma manual de acuerdo con sus coordenadas en UTM (X,Y) en una hoja de texto (.txt) para adicionarlos a un tema en el software ArcGIS, mediante la opción **Tools/Add XY Data** que permite ubicarlos espacialmente, luego se convierte a formato vectorial *.shp, bajo un modo de representación espacial en forma de punto, esto se realiza mediante la opción **File/Data/Export data**. Al adicionar esta información le asocia una tabla de atributos con la información de registros un campo para las coordenadas X, otro para las Y y un tercero para la Z, En esta misma

tabla de atributos se le van agregando datos como la litología de los pozos y profundidades.

4.14.2 Datos de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

La información de los SEV fue facilitada por Hidrolara, se efectuaron un total de 38 SEV, que están distribuidos por varios sectores dentro del área de estudio, con lo cuales se estudia la variación del espesor y granulometría en el subsuelo de los sectores estudiados.

La separación máxima de electrodos de corriente AB fue de 400 m con lo cual se alcanzo una profundidad de investigación de 120 a 150 m

El instrumental que se utilizo es un mili-voltímetro Phillips PM 2434, un convertidor de corriente alterna a continua con capacidad hasta 900 voltios de corriente continua y una planta generadora de corriente alterna de 117 voltios y 650 watios de potencia. Se introduce la corriente en el subsuelo para crear un campo eléctrico entre dos electrodos de corriente, los cuales se van separando progresivamente, para poder obtener una profundidad de penetración de la corriente cada vez mayor.

Para cada separación de electrodos se mide la intensidad de la corriente que fluye entre estas y se mide además la diferencia de potencial entre dos electrodos de potencial. Con estas dos lecturas se calcula, según la Ley de Ohm, la resistividad para cada separación de electrodos y se obtiene de este modo, curvas de la resistividad del subsuelo al paso de la corriente eléctrica, se interpretan estas curvas y se determinan los espesores de los acuíferos y el tipo de sedimentos que los forman.

La información arrojada por estos SEV fue integrada en la base de datos de ArcGis de igual manera que las realizadas para los pozos y estaciones climáticas, a de mas de esto se elaboro un mapa donde se muestran los perfiles para poder correlacionar entre cada sondeo vertical, es importante resaltar que la correlaciones se realizaron por sectores ya que estas se encontraban a una distancia entre si de no mas de 600 metros mas adelante se explicara con detalle la elaboración de las secciones.

4.15 Información Obtenida a partir de la integración en el Sistema de Información Geográfica

4.15.1 Preparación de mapas

Para poder bordar las zonas potenciales de agua subterránea en la zona de estudio, se preparan diferentes mapas temáticos a escala 1:50000 partiendo de datos de sensores remotos, mapas existentes y de datos de campo, que ya ha sido organizados como se mostro anteriormente.

Se entiende por mapas temáticos a la representación grafica de estudios básicos necesarios para la caracterización de parámetros cuantitativos y cualitativos donde se identifican los principales problemas a estudiar con un fin determinado.

Se elaboran 13 mapas a partir de la información procesada los cuales son: Mapa topográfico actualizado, Geológico, hipsometría, de suelo, geomorfológico, hidrogeológico, agroclimático (precipitación), de vegetación, escurrimiento, hidrografía (cuerpos de agua), densidad de drenaje, de Pendiente y el mapa de ubicación de pozos y Sondeos Eléctricos Verticales.

Las técnicas de análisis visual de las Imágenes Satelitales, pueden usarse como fuente para la preparación de los mapas de geología, geomorfología, de la red de drenaje, cuerpos de agua, Vegetación, suelo y toponimia del área.

Los mapas topográficos son útiles para la elaboración del mapa de densidad de drenaje, hipsometría y de pendiente, estos dos últimos se genera a partir de datos de elevación digital y el mapa agroclimático por medio de datos climatológicos.

La generación de cada uno de estos mapas es diferente e involucran una o más capas y diferentes operaciones entre ellas.

Todos los mapas temáticos se preparan usando el programa ArcGIS 9.1 este provee variedad de herramientas de análisis para realizar dichos mapas, con diversas operaciones, de las cuales involucran un par de coberturas de polígonos y, en algunos casos, de tipos diferentes. Las operaciones mas utilizadas son la unión, intersección, adición, creación de TIN (modelo de elevación) entre otros.

4.15.2 Mapa Topográfico Actualizado

Este se elaboro en conjunto con la cartografía base a escala 1:25000, imagen pancromática del sensor Spot 5 y las fotografías aéreas, la cual aporta precisión en cuanto a los caseríos y vías de acceso al área de estudio ya que cuenta con una resolución de 2.5 metros, de la cartografía se tomo solo las curvas de nivel del área (ver anexo).

4.15.3 Elaboración del Modelo digital de Elevación del Terreno y el Mapa de pendientes

Topográficamente, cualquier zona de estudio es caracterizada por poseer terrenos que Constituyen llanos, cerros, mesetas, terrazas y colinas escarpadas. Cada uno de estos rasgos topográficos va a estar relacionado con las diferentes clases de pendientes que presenta la zona de estudio.

Para la generación del Modelo Digital de Elevación de toda el área en estudio se aplicó técnicas Geoestadísticas la cual se procede de la siguiente manera:

En primer lugar se digitalizan todas las curvas de nivel en base a la cartografía 1:25000, para esta tarea se utilizó el programa ArcGIS 9.1 donde a cada curva digitalizada se le va asignando su respectiva elevación y así sucesivamente, hasta completar toda la digitalización de del área en estudio, como se muestra en la siguiente figura:

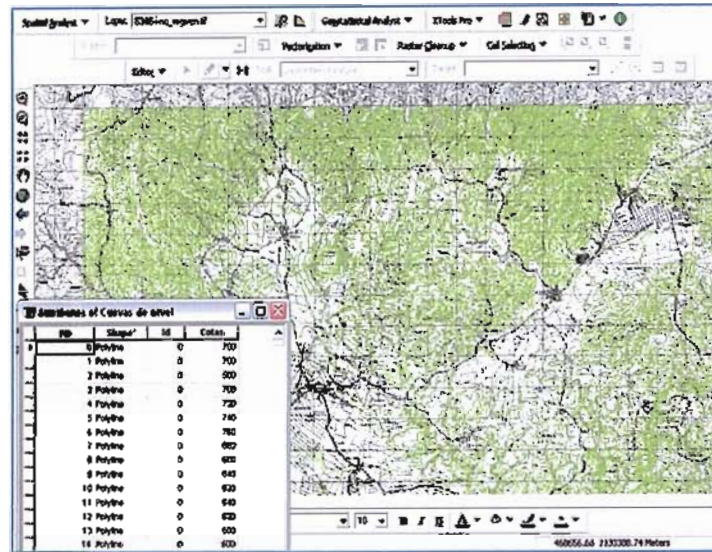


Fig 4.10: Proceso de Digitalización en ArcGis 9.1

El siguiente paso es pasar toda la base de dato creadas por **ArcGis 9.1**, a la hoja de cálculo del programa **Golden Surfer 8.0** mediante la extensión de ArcGis, **Xtolls pro/Table operations/Add x, y, z coordinates**, esta se guardara con la extensión **(.dbf)**, luego se abre el programa **surfer 8.0** con el comando **File/New/Worksheet** se abre el archivo guardado anteriormente.

El cual contiene la información de cotas, coordenadas "X" y "Y", de las curvas de nivel digitalizada, obtenida toda esta información se procede a emplear las técnicas de Geoestadísticas la cual permite la obtención de los variogramas experimentales y luego su ajuste a modelos teóricos. Todo este proceso se describe a continuación:

Como primer paso se procede en el programa **Golden Surfer 8.0** a crear un nuevo variograma por medio del menú **Grid/Variogram/New**

Variogram, Cargando la información de la base de datos guardada anteriormente, se procede a establecer la concordancia entre las coordenadas y la información de cada columna de la base de datos la cual debe quedar como se muestra en la figura:

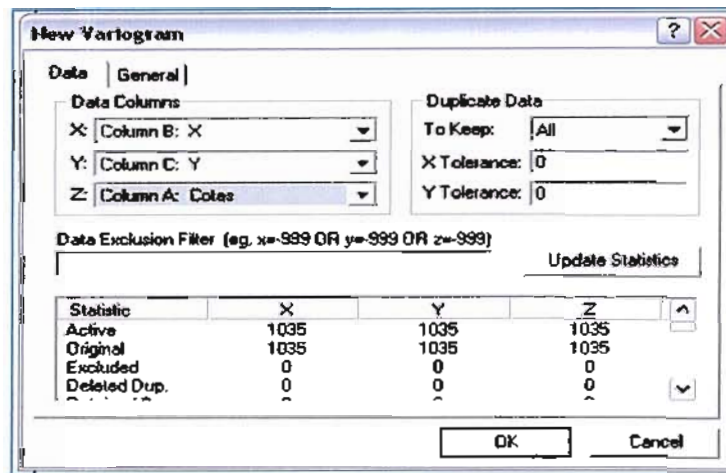


Fig 4.11: Establecimiento de los parámetros en la generación del Variograma

Luego es posible observar la grafica que genera el programa, la cual representa el variograma experimental es decir el real, respecto al teórico sin ajustar la cual se muestra en la figura 4.12:

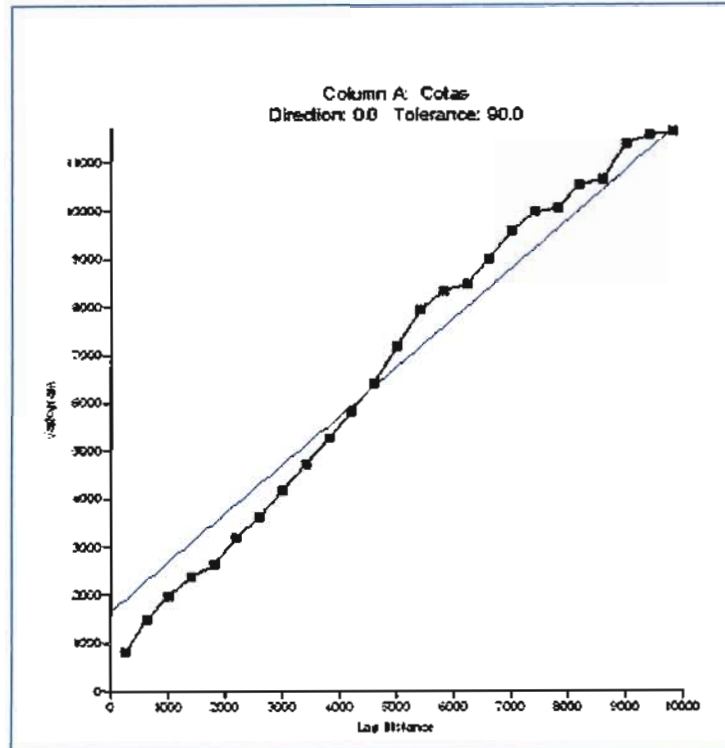


Fig 4.12: Variograma Experimental y Teórico sin ajustar

Como siguiente paso se procede a realizar el ajuste del variograma teórico al experimental para lo cual debemos usar el menú **Variogram Properties** en la pestaña **model**, se remueven los componentes del variograma teórico, para luego introducir el de mejor ajuste pulsando en **Add**, para este caso se selecciona **Power**, para luego ajustarse los valores de la escala, longitud, el Power y los de anisotropías como lo son el radio y el ángulo, el mejor ajuste para las curvas de nivel fue el siguiente:

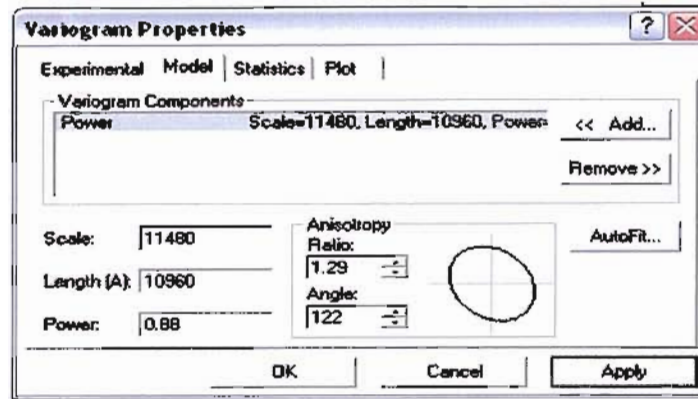


Fig 4.13: Ajuste de las propiedades del variograma Teórico

Estos valores se encuentran por interacciones sucesivas hasta encontrar el mejor ajuste. Unas ves cumplidas estos pasos podemos observar en la figura, la grafica producto del ajuste del variograma teórico.

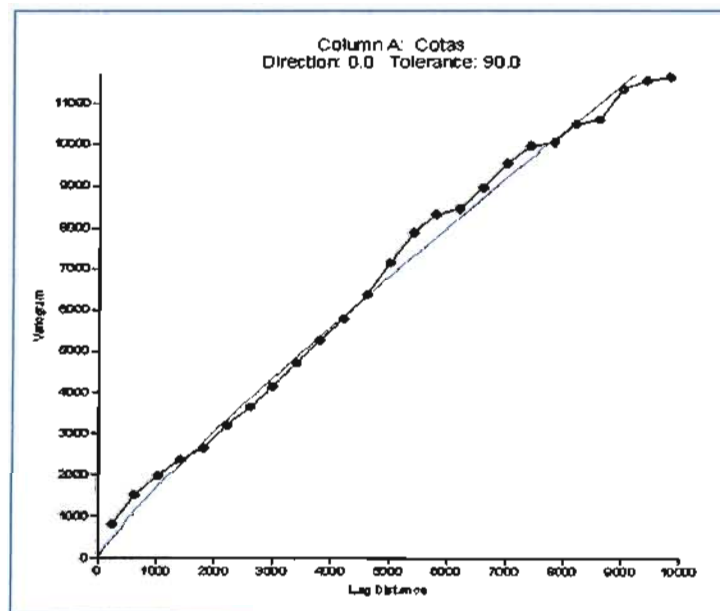


Fig 4.14: Variograma Teórico y Experimental Ajustado

Luego se sigue la carga de datos a través del menú **Grid/Data** para la generación del modelo tridimensional del terreno. Se debe especificar el método del mallado (**Gridding Method**) que para este caso es **Kriging**, luego en **Advanced options** se carga el variograma creado.

Luego al presionar **OK**, el programa comienza a generar el **Grid** de error y el **Grid** corregido. Como ultimo paso a través del menú **Map/Surface** se carga el archivo tipo ***grd** creado en el paso anterior para lograr los modelos de Error y el corregido de las curvas de nivel en tres dimensiones, tomándose en cuenta el Modelo Digital de Elevación corregido. En la siguiente figura se presentan el modelo en 3D:

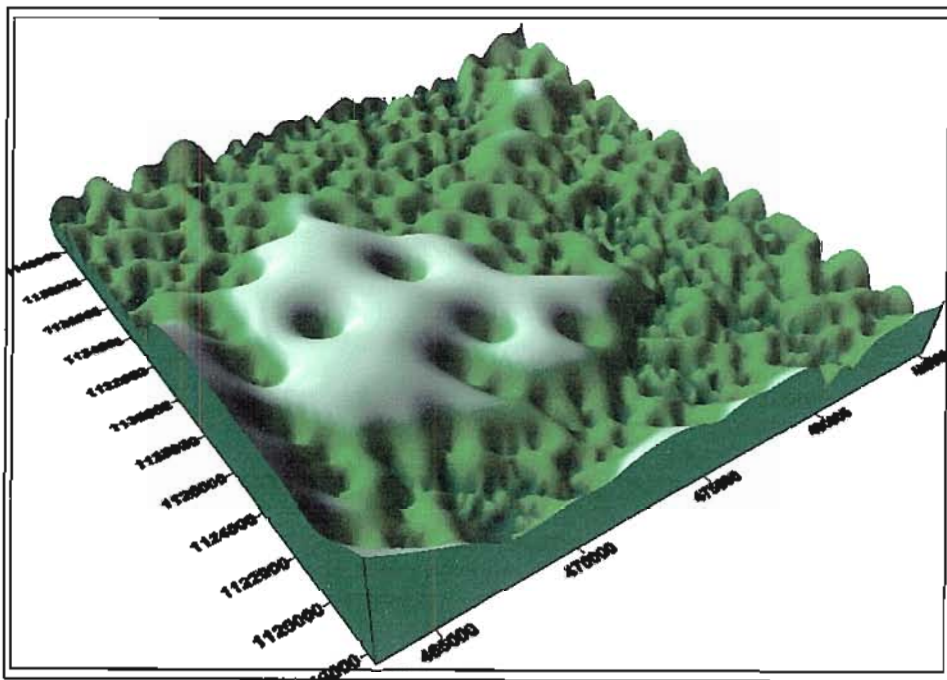


Fig 4.15: Modelo 3D del mapa de errores

Se puede observar en la figura anterior que las cotas mas elevadas son las áreas que presentan mayor error, quiere decir que requiere de más información de cotas, y el área mas bajas son los puntos con menor error lo cual indica que la información de cotas está bien distribuida.

En la figura 4.16 se muestra el Modelo Digital de Elevación corregido mediante el variograma ajustado:

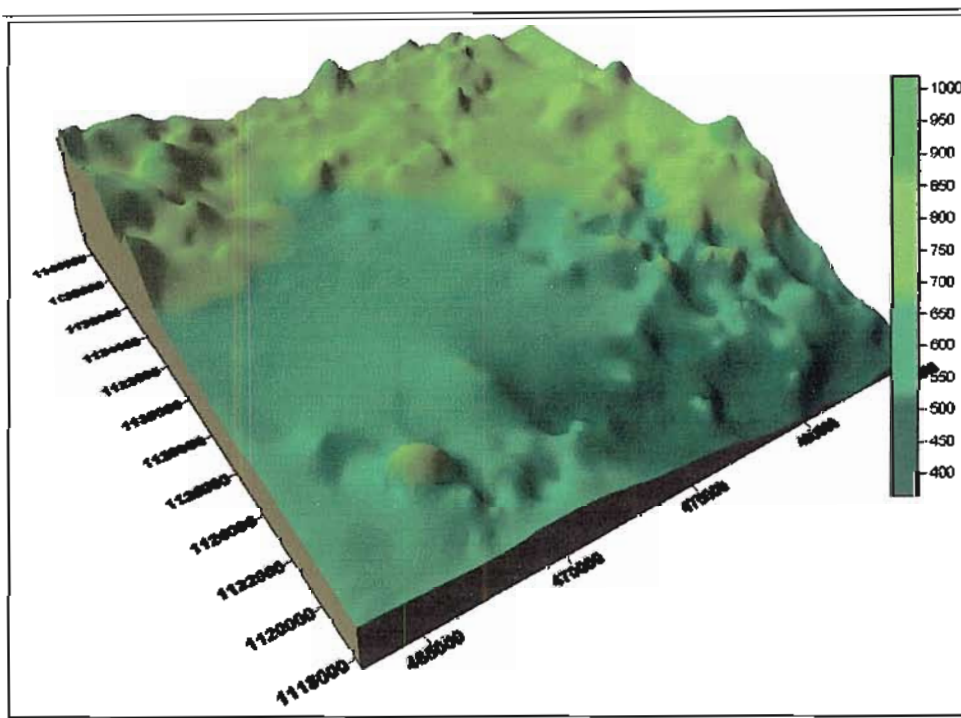


Fig 4.16: Modelo tridimensional del área de estudio

De esta manera se logro la visualización del modelo Tridimensional del terreno. Para realizar el mapa de pendiente, se tomaron los valores de las curvas de nivel digitalizadas. En algunos de los programas ya sea ENVI 4.3 o ArcGis 9.1 el mapa de pendiente se genera automáticamente

a partir del **Modelo de Elevación Digital** para tal caso se usa ArcGis 9.1. Se siguen las siguientes etapas:

Primero se genera un modelo digital de superficie en función de los valores de cota (altura Z en metros), a partir de los puntos de contorno x,y,z en formato digital, para esto se utiliza la herramienta de análisis **3D de ArcGis/ Modify Tin/create Tin From features**, luego que se tiene el Tin se usa el modulo **Spatial Analyst/SSurface Analysis/Slope**, con la intención de generar las pendiente pero este nuevo Grid hay que suavizarlo y obtener los valores en porcentajes para esto se recurre a la herramienta **Spatial analyst/Neighborhood Statistics** (estadísticas del vecino mas cercano). Esta operación ejecuta una generalización de los valores mediante un cálculo estadístico para los valores encontrados en los espacios más cercanos definido alrededor de cada celda y crea un nuevo **Grid** como tema de salida.

Calculado los nuevos datos mediante el análisis espacial, se generan los valores de pendiente en porcentaje que inicialmente se encontraban en grado radianes.

El Grid final que se obtiene de todo este procedimiento se convierte en un Tin para tener una mejor visualización del mapa de pendiente. De esta manera el programa ArcGis 9.1 permite elaborar el mapa de pendiente de manera automática, por medio de sus herramientas de análisis de superficie, Ver Anexo.

4.15.4 Hipsometría o Fisiografía

La elaboración de este mapa se realizó a través de las curvas de nivel digitalizada, para poder construir el modelo digital de elevación en ArcGis mediante el menú **3D analyst/Create/Modify TIN/Create TIN From Features**, luego se procedió a realizar perfiles longitudinales en el módulo **3D Analyst/Interpolate line/create profile Graph**.

Estos perfiles nos indican la distribución de ciertos rasgos de elevación dentro del marco geográfico, permitiéndonos conocer las características topográficas y su extensión. Para analizar la distribución topográfica hemos tomado el siguiente rango partiendo de topografía plana, ligeramente ondulada, moderada, lomas poco pronunciadas y relieve escarpado. (Ver Anexo)

4.15.5 Geomorfología

Se digitalizan de las imágenes de satélite las formas más comunes y corrientes del terreno de acuerdo con la topografía que presentan, las cuales pueden diferenciarse con una interpretación visual, por ejemplo valles, colinas, abanicos, piedemonte, terrazas, montañas, entre otras.

Para la digitalización de las unidades geomorfológicas con fines de descripción de suelos es obligatorio el trabajo de campo, por la simple razón que lo identificado y delimitado en una imagen de satélite no son suelos sino formas del terreno.

La geomorfología se puede relacionar directamente con las características de relieve que presenta el área de estudio o por sus componentes edafológicos, esta relación depende del tipo del área de estudio.

La representación del ambiente geomorfológico con fines de descripción de suelos es de gran importancia para entender los eventos que dieron origen a la morfología de un área, especialmente si la litología que la caracteriza corresponde a depósitos recientes (Cuaternario), los cuales son favorables para la formación de acuíferos por la litología que los caracteriza (generalmente intercalaciones de grava, arena, limo y arcilla).

Las unidades geomorfológicas también tienen relación directa con la recarga del agua subterránea, aquellas unidades como Llanuras de inundación, rellenos de valles y canales soterrados son típicamente fuentes buenas para recarga subterránea, mientras que otras como colinas estructurales son pobres.

Algunas características geomorfológicas se pueden preparar por medio de la interpretación de imágenes de satélites, sin dejar de un lado el trabajo de campo, ya que en este tipo de interpretación la etapa de campo juega un papel muy importante para corroborar todo tipo de estudio geomorfológico.

Para el conocimiento de los rasgos geomorfológicos se sugiere preparar un modelo tridimensional de la perspectiva del área de estudio, usando un modelo de elevación digital (MED) y las imágenes Landsat y Spot en composición de falso color en este caso las bandas (4,3,2), (4,5,3), (7,5,2) y (4,5,2) luego se hace la composición en verdadero color o color real (3,2,1), para entender desde una mejor perspectiva, el papel de los depósitos superficiales y de sus localizaciones topográficas en el control de las condiciones del agua subterránea, así como la identificación de características geomorfológicas.

Un aspecto importante en la generación del mapa de unidades geomorfológicas es establecer una relación de estas con los perfiles de SEV, descripción litológica de los pozos perforados y la descripción de los pozos artesanales, ya que estos determinan el comportamiento de los materiales en el subsuelo.

De la interpretación visual de las imágenes de satélites se digitalizaron los rasgos geomorfológicos presente en la zona de estudio las cuales se clasificaron en: Colinas, planicie de explayamiento, piedemonte, cárcavas (bad-Lands), valles, terrazas aluviales, lomas y montañas, éstas se distribuyen por toda el área, luego de haber digitalizado todas estas geoformas en ENVI 4.3 se exporta a ArcGis 9.1 se usan las curvas de nivel digitalizadas para crear un TIN como se explico anteriormente, en el Modelo de Elevación creado se superponen todas las capas de las geomorfología, para visualizar y analizar mejor toda la geoformas presentes. (Ver Anexo).

4.15.6 Cobertura Vegetal

La obtención de este mapa se realizo a través de las imágenes satelitales, en las cuales se procedió con la clasificación supervisada de todos los tipos de vegetación presente en el área de estudio elaborándose tres clase de vegetación como lo son Arbustos y matorrales perennifolios, pastos y cultivos, y matorral caducifolio. Unas veces hechas la clasificación supervisada por el programa ENVI 4.3 como **se explico anteriormente (apartado 4.8)** se exporto toda la información a ArcGis 9.1 donde fue transformada como capas para cada tipo de vegetación y así ser tratada de tal manera de obtener un solo mapa de

vegetación con sus clasificaciones (Ver Anexo).

4.15.7 Mapa de Suelos

Para la realización de este mapa se toma como base la clasificación supervisada de las imágenes de satélites, la geomorfología y la hipsometría del área, de toda la clasificación solo se tomaron en cuenta los tipos de suelos presentes como lo son: Suelos limosos y arcillosos, arenas limosas y arenas y gravas, es importante señalar que esta clasificación es de suelos superficiales, una vez realizado todo el procesamiento de la imagen se procede a exportar toda la información a ArcGis 9.1 de tal manera de tratar toda la información e integrarlo en capas vectoriales para luego obtener el mapa final como se muestra en el apartado de Anexos.

Este mapa final nos da una idea de cómo son los suelos superficiales en el área y tener una visión rápida de donde pueden ser mayores la infiltración tomando en cuenta la clasificación de la cobertura vegetal.

4.15.8 Geología

Para estudios hidrogeológicos es preciso conocer como rasgos geológicos mas importantes la litología de las formaciones y sus características, así como diversas estructuras geológicas presentes en el área de estudio como fallas y fracturas, estas estructuras son importantes para estudios de recarga en áreas de rocas basálticas, por ejemplo. Los rasgos geológicos se representan en un mapa a escala 1:50000.

En vista de las variaciones litológicas que puede presentar cualquier zona de estudio, se necesita entender las características de las rocas

en términos de su porosidad, permeabilidad y capacidad de almacenamiento.

La ocurrencia de agua subterránea en un tipo de área determinada se encuentra confinada en rocas porosas o en estructuras permeables secundarias, por ejemplo, estructuras fracturadas y en materiales no consolidados mas recientes. El mapa geológico se prepara usando técnicas de análisis visual de imágenes Landsat y Spot con la composición de falso color de las bandas (4,5,2), (7,5,2) y (1,3,5) donde las formaciones geológicas se identifican por las diferencias de texturas y tonos que se observan en las imágenes se conto con información litológica subterránea lo cual facilito un poco la interpretación de los suelos y los mapas geológicos existentes, para así obtener el mapa geológico de la área de estudio.

Todo esto se corrobora con el trabajo de campo, el cual consiste en el reconocimiento geológico del área de estudio, observación de afloramientos rocosos y evidencias de estructuras geológicas.

Se presenta una superposición de capas entre la imagen satelital y parte de la digitalización del mapa geológico base figura 4.17:

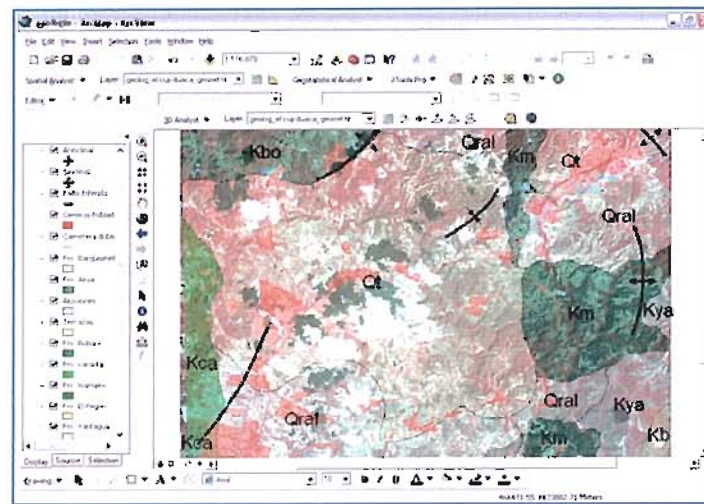


Fig 4.17: Proceso de digitalización de la cartografía Geológica

4.15.9 Hidrografía y Cuerpos de Aguas superficiales

Se presentan todas las aguas fluviales que circulan por el área de estudio, en algunos sectores la red hidrográfica es densa pero formada en gran parte por fuentes de aguas de régimen intermitente.

La red hidrográfica se digitalizo como tema de líneas en gran parte a partir de las imágenes satelitales en composición de falso color de las bandas 4,5,2, y en composición de verdadero color 3,2,1 también se uso el mapa topográfico a escala 1:25000 en sectores donde la hidrografía no se distinguen bien en las imágenes satelitales.

El mapa temático de los cuerpos de agua superficiales se genera a partir del análisis visual de la composición de falso color de las bandas 4,5,2 y 4,3,2, así como en color real 3,2,1. Toda esta información es procesada en Envi 4.3 como se explico anteriormente, para luego ser exportada e integrada en el SIG de ArcGis 9.1, adicionándole los temas de cada composición.

Es importante corroborar estas interpretaciones de la imagen con el trabajo de campo, para así obtener una visión mas clara de la ubicación de los diversos cuerpos de agua que pueden hallarse en el área de estudio, con el uso del GPS.

Entre los diferentes cuerpos de agua que se distinguieron en la zona de estudio se encuentran: lagunas naturales y artificiales, tanques de almacenamiento de agua, entre otros.

Los cuerpos de agua superficiales son parte integral de los sistemas de flujo de agua subterránea. El agua subterránea interactúa con el agua superficial en casi todos los paisajes, desde pequeñas corrientes (por ejemplo, ríos, quebradas y arroyos) hasta terrenos húmedos.

4.15.10 Mapa de ubicación de Pozos y SEV

Los pozos y Sondeos Eléctricos Verticales se digitalizan adicionando las coordenadas de su localización a un editor de texto constituyendo columnas que indican el numero de pozo, la ubicación y los que presentan litología se le agrega una columna con la descripción litológica, una vez en formato **.txt** se adicionan a un nuevo tema en el **ArcGis**, mediante la función **Add Data** y se convierte a formato vectorial **.shp**, bajo un modo de representación espacial en forma de puntos. De igual manera se realiza la ubicación de los perfiles de correlación entre sondeos verticales a diferencia de que se agrega un **.Shp** de polilínea. En el apartado de Mapas anexo, se muestra la composición del mapa de ubicación de los pozos, SEV y los perfiles de correlación en capas vectoriales diferentes.

4.15.11 Cartografía Hidrogeológica

El mapa hidrogeológico se elaboro a través de información geológica, de imágenes satelitales, de suelo, de pozos perforado por Hidrolara y de la información arrojada por los Sondeos Eléctricos Verticales realizado en algunos sectores, toda la información es llevada a un mismo sistema de proyección como se explico anteriormente, para poder procesarla en el SIG e integrarla, en el programa ArcGIS 9.1 mediante el modulo **Add Data** se procede a integrar toda la información, se le aplica transparencia a cada capa agregada de tal manera de poder visualizar todas las capas del siguiente modo en **Propiedades/Display** de cada tema agregado. Toda esta información es corroborada en campo visitando algunos pozos artesanales donde se pueden apreciar la litología que sacada mediante la excavación del mismo, con la ayuda del GPS se tomaron puntos de control de cada pozo artesanal para luego ser integrado al SIG, ver apartado Anexo.

4.16 Integración y Modelado

Para integrar los mapas temáticos en el modelo SIG e ir generando un mapa con cada integración y así llegar a un mapa final de las zonas potenciales de agua subterránea, todos los mapas se convierten a **grids**, ya que este formato tiene la ventaja de trabajar con superposición de mapas y generar buenos resultados. Este tipo de operación de análisis espacial y de superposición de mapas se realiza con la extensión de análisis de software SIG ArcGis 9.1, mediante la función de Análisis **Spatial/convert/Features to Raster**, y **Raster Calculator**, en este último es donde se ejecutan las operaciones de superposición, como resultado de esta superposición resulta una capa

Grid, y de esta manera ir clasificando las zonas según el mapa que se este trabajando.

4.16.1 Disponibilidad de agua en suelos superficiales por pluviometría

Para la generación de este mapa se procede según el esquema siguiente:

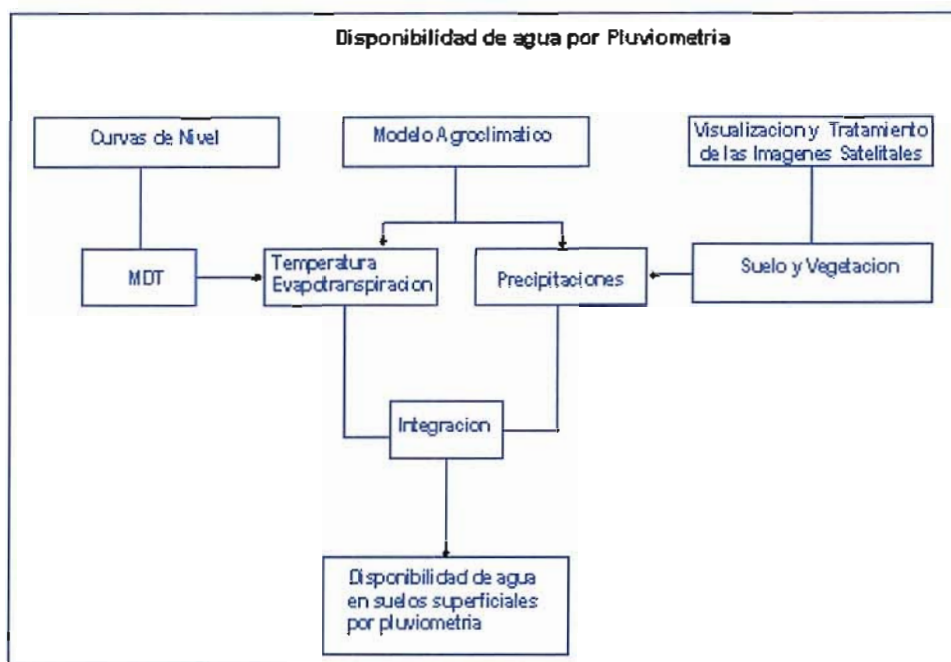


Fig 4.18: metodología para la disponibilidad de agua por Pluviometría

Se realiza un modelo agroclimatológico a través del mapa de temperatura y precipitaciones, y luego la integración con el mapa de suelo, vegetación y un modelo digital del terreno se puede observar las posibles zonas que poseen disponibilidad de agua por pluviometría.

Este mapa proporciona información básica de las características climáticas de la zona en estudio, las cuales integradas al recurso suelo, permiten señalar áreas de mayores acumulación de agua por precipitación.

Se presenta la zonificación agroclimática de toda la zona en estudio, de acuerdo a una metodología de fácil aplicación utilizando datos climatológicos que se obtienen en la mayoría de las estaciones meteorológicas como la precipitación atmosférica, y la temperatura del aire.

Sobre el inventario de los registros históricos de 6 estaciones que están dentro y otros muy cerca del área el cual presenta un periodo común homogéneo de 1973 al 2005. Los parámetros meteorológicos básicos para el procesamiento de la información fueron.

- Temperatura media mínima y media máxima mensual.
- Los totales mensuales y anuales de precipitación atmosférica en mm.
- Totales de evapotranspiración mensual y anual en mm.

4.16.2 Elaboración de las Isoyetas

Este mapa permite conocer el valor de las precipitaciones anuales promedio del área de estudio, para esto el primer paso a seguir es ubicar las principales estaciones meteorológicas que se encuentren en el área de estudio y adyacentes a ella que registren información de las precipitaciones mensuales. Como un segundo paso, se copian los valores mensuales promedios para un periodo de 32 años, en una tabla Excel, se calcula el promedio mensual.

A continuación se adicionan las estaciones como un nuevo tema de puntos al SIG ArcGis 9.1y se interpolan en función de los valores de precipitación, mediante la herramienta de análisis **Spatial Analyst/Interpolate to Raster/Kriging**,

el resultado es un mapa en formato raster el cual se transforma en contornos mediante **Spatial Analyst/Surface Analysis/contour**, y se crean contornos cada 3 mm, generando así el mapa final de Isoyetas. En la figura 4.19 siguiente se observa la elaboración en ArcGis de las precipitaciones más altas en la zona:

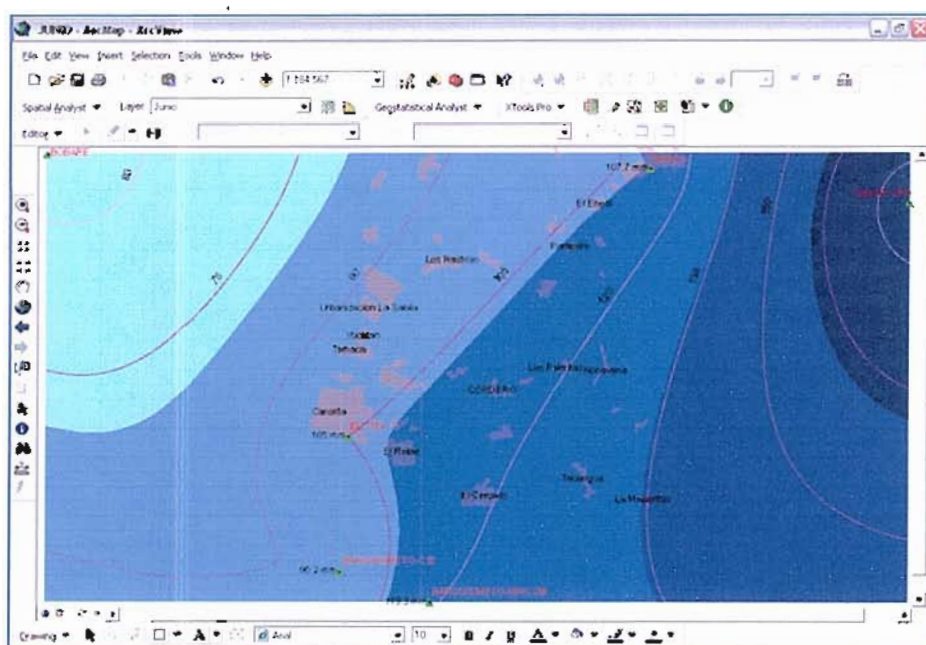


Fig 4.19: Elaboración del mapa de Isoyetas

4.16.3 Mapa de Temperatura

De igual manera como se explico en la elaboración de los mapas de isoyetas se procedió con los mapas de temperatura media máxima y media mínima mensuales, el cual nos indica la variación de la temperatura en toda la zona de estudio.

Unas ves obtenidas los mapas, siguiendo el esquema de la figura 4.20 el cual explica la integración del mapa de Precipitación, Temperatura, Suelo y el modelo digital de elevación se obtiene el mapa de posibles zonas con disponibilidad de agua por pluviometría.

Se realizaron tres clasificaciones de zonas con disponibilidad de agua las cuales son: Zonas altas, bajas y media. En la figura 4.20 se presenta el mapa final producto de la integración.

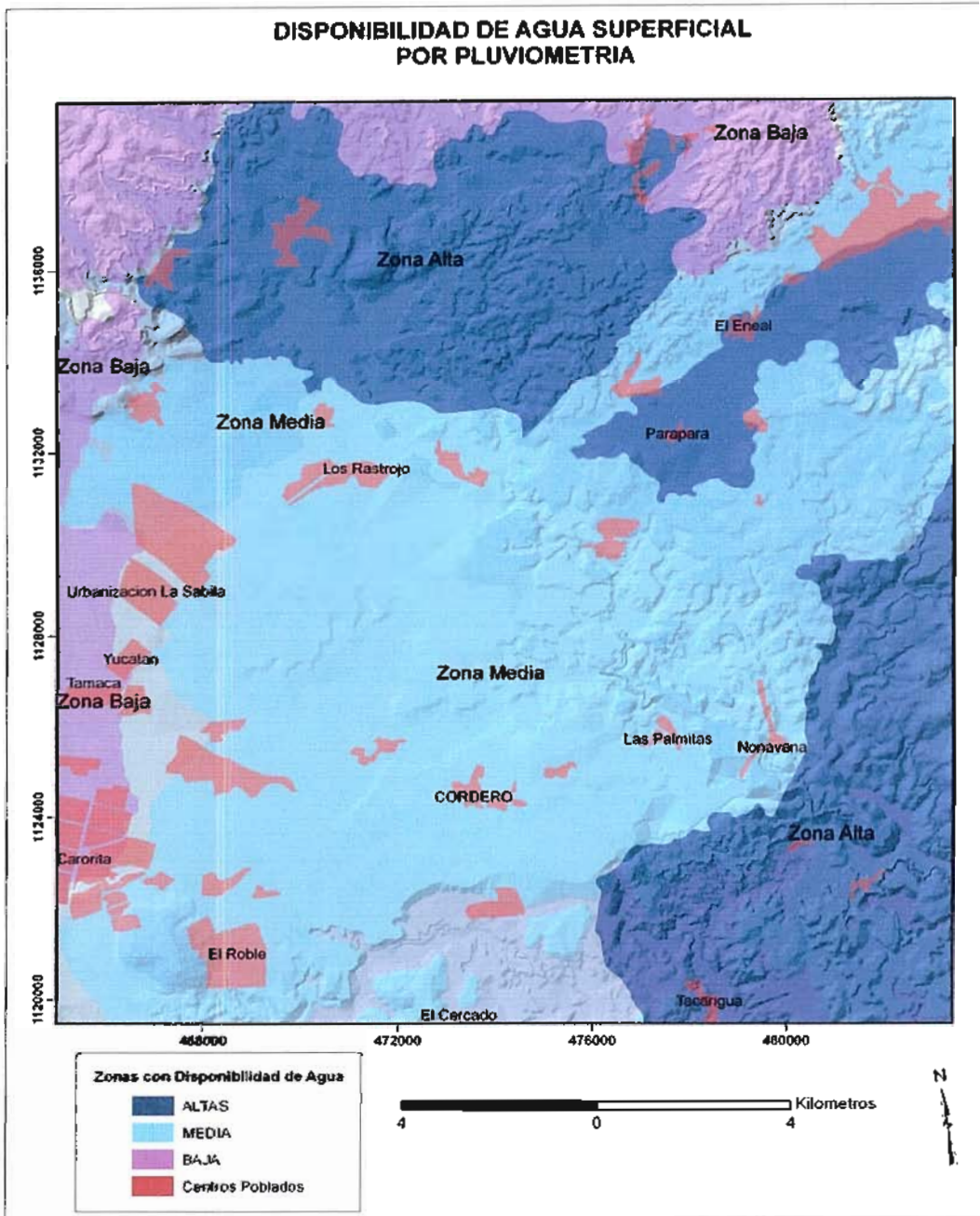


Figura 4.20: Zonas con Disponibilidad de agua por Pluviometría

4.17 Índice de Infiltración superficial

Este mapa es elaborado a través de la información que se obtiene con los datos de escurrimiento de cada estación (ver Tabla de Anexo), la densidad de drenaje de cada sub-cuenca, cobertura vegetal y tipo de suelo. Se presentan la metodología a seguir según el esquema siguiente:

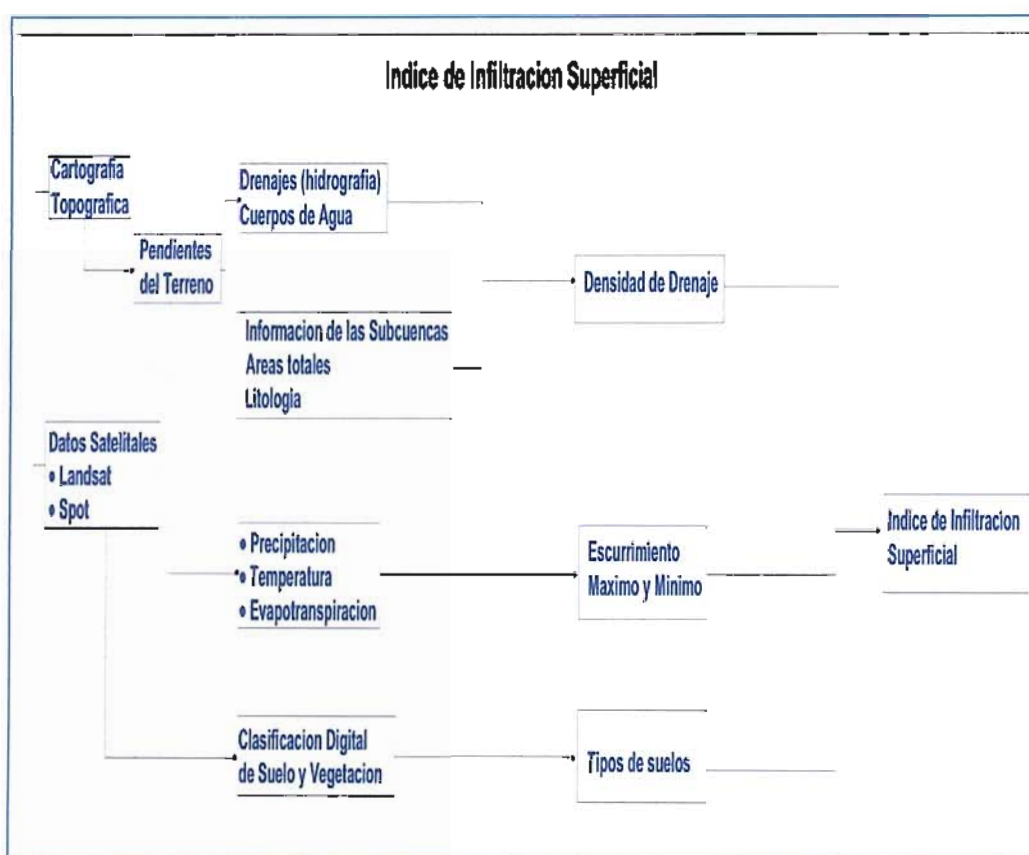


Figura 4.21: Metodología aplicada para la obtención del índice de Infiltración

Quizás una de las variables mas importante en la elaboración de este mapa es la clasificación de suelo y vegetación ya que la unión de estos nos indicaran donde serán mayores la infiltración.

Las densidad de drenaje varían de acuerdo al tipo de suelo si tenemos suelos con arenas y gravas de espesores considerable la densidad de drenaje será baja y la infiltración será mayor, al contrario de los suelos arcillosos y libres de vegetación donde la infiltración es menor y la densidad de drenaje alta.

4.17.1 Densidad de drenaje y Texturas topográficas

La densidad de drenaje es una propiedad que controla la eficiencia del drenaje y señala el estado erosivo del mismo, relaciona la longitud de la totalidad de cauces de las cuencas o sub-cuencas presentes en el área con la superficie que ocupan. Esta propiedad es una función inversa de la permeabilidad y por lo tanto es considerada como un importante índice en las evaluaciones de aguas subterráneas. Se calcula dividiendo la longitud total de los cauces entre el área total de la cuenca. También puede expresarse como una medida de la textura de la red hidrográfica, e indicar el balance entre el poder erosivo del flujo terrestre y la resistencia de los suelos superficiales y las rocas.

Dentro de los principales factores que controlan la densidad de drenaje y uno de los más importantes es la litología de la región. Los materiales duros y resistentes tales como el granito, gneis, arenisca y cuarcitas tienden a originar bajas densidades de drenaje (textura grosera). Esto es debido a que la erosión fluvial es difícil y sola pueden subsistir los cursos de agua relativamente grandes.

Por lo tanto, las cuencas de primer orden son de gran tamaño y aportan gran cantidad de agua a los cauces. En materiales blandos, tales como margas y arcillas las cuencas, por pequeñas que sean,

pueden suministrar la escorrentía suficiente como para erosionar el cauce.

Un segundo factor es la facilidad de infiltración del agua de lluvia bajo la superficie del terreno hasta alcanzar el nivel freático. Los materiales muy permeables, como las arenas y las gravas, tienden a originar una densidad de drenaje, muy baja debido a que la infiltración es grande y, por lo tanto, queda muy poca agua en superficie que pueda alimentar los cauces. Las arcillas y las margas, por otro lado proporcionan una cantidad de escorrentía grande y esto se combina con su poca consistencia para dar alta densidad de drenaje.

Un segundo factor es la presencia o falta de cobertura vegetal. Una roca débil producirá menos densidad de drenaje en un clima húmedo donde una espesa cobertura de bosques y hierbas protege el material subyacente que una región árida donde no existe esa cobertura vegetal

Para la elaboración de dicho mapa, como se explico anteriormente, esta red hidrográfica se digitalizo a partir de las Imágenes de Satelitales en composición de falso color, es obligatorio apoyarse en el mapa topográfico a escala 1:100000 y 1:25000, lo cuales permitieron reconocer el tipo de régimen de los cursos de agua presentes en la zona, así como también completar la digitalización de la misma y hacer una buena definición de toda la red hidrográfica, tanto si resultan cauces permanentes como no, dado que en momentos de crecidas todos esos cauces funcionan recolectando y transportando caudal.

Debido a que el área de estudio no ocupa una cuenca completa es necesario dividirla en sub-cuencas,

teniéndose dos sub-cuencas llamadas El Cují - Nonavana y Duaca - Eneal:

Se analiza la configuración de la red de drenaje, es decir, del espacio cubierto por el agua, los cauces presentes y la confluencia con el número de quebradas.

Se observa la red de drenaje sobre el MED para ver las líneas divisorias, las cuales están formadas por puntos de máxima altura.

Se trazan los límites de las sub-cuencas por las líneas divisorias, lo que permite definir polígonos que representen las sub-cuencas que forman parte del área de estudio.

Una vez establecidas las áreas, se calculan los valores de densidad del Drenaje para cada sub-cuenca, utilizando la siguiente formula:

$$D = \frac{\sum L}{A}$$

Donde "D" es la densidad de drenaje en Kilómetros por Kilometro cuadrado, " $\sum L$ " representa la longitud total de todo los cauces de todos los ordenes y "A" es el área total de la sub-cuenca.

En el programa utilizado como es ArcGis se realiza un cruce de los dos temas básicos: el tema de los cursos de agua (tema de líneas) con el polígono del área de interés mediante la operación de unión en el modulo de **ArcGis, ArcToolbox/Analysis Tools/Unión**, de este procedimiento se genera una nueva capa vectorial que comprende ambas características.

Luego se calcula el área en km^2 y la longitud de cada cauce en cada sub-cuenca utilizando la extensión **Xtools pro/table operations** de ArcGis.

Los valores calculados anteriormente se almacenan como un nuevo campo en la tabla de atributos de la capa generada en el cruce de tema y mediante la herramienta de análisis se calcula el valor de la densidad de drenaje para cada sub-cuenca, según la formula ya descrita.

En la siguiente figura 4.22, se observa la obtención de los datos de cada sub-cuenca.

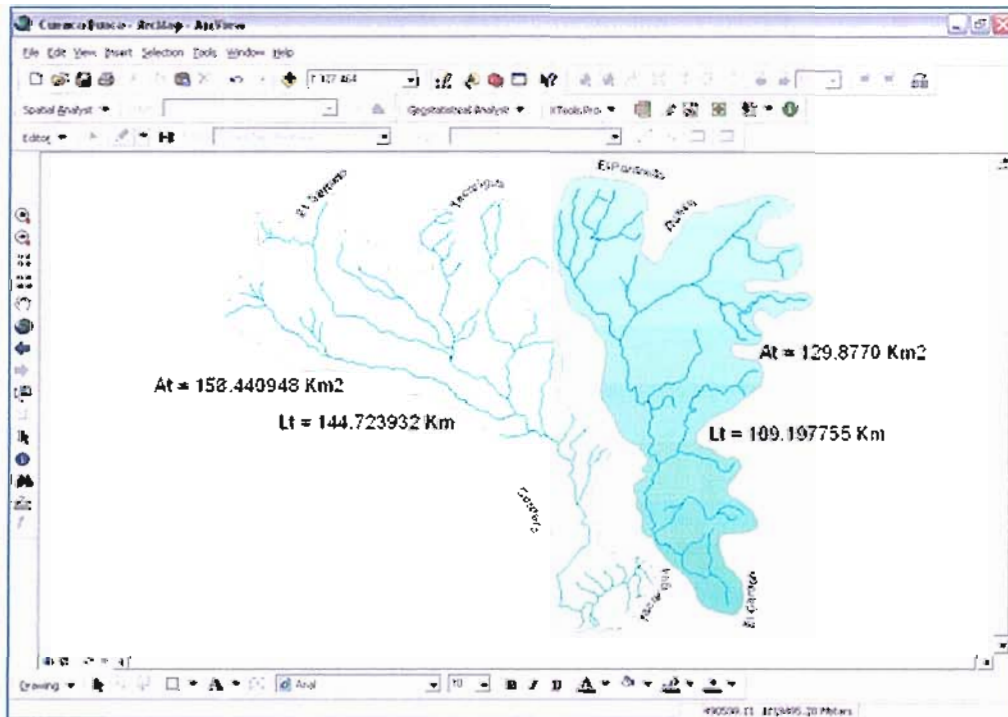


Fig 4.22: Digitalización de las Subcuenta para obtener área y longitud total de los cauces

Aplicando la fórmula anterior podemos decir que:

La sub-cuenca El Cují - Nonavana, tiene una densidad de drenaje de

$$D = \frac{144.723932 \text{ Km}}{158.440948 \text{ Km}^2} = 0.913 \text{ Km/ km}^2$$

Este valor nos indica que en esta sub-cuenca existe 0.913 Km de cauce en cada kilómetro cuadrado de terreno con una textura de drenaje que varía de gruesa a paralelo.

La sub-cuenca Duaca – Eneal, presenta una densidad de drenaje de

$$D = \frac{109.197755 \text{ Km}}{129.877051 \text{ Km}^2} = 0.841 \text{ Km/km}^2$$

El cual se interpreta igual que el anterior con la diferencia de que esta sub-cuenca presenta una textura de drenaje de media gruesa a gruesa.

4.17.2 Mapa de Escurrimiento

Para la obtención de los valores medidos de escurrimiento se empleó el mapa de isocaudales de escurrimiento elaborado por el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigaciones Ambiental y Territorial (CIDIAT), el cual nos expone una zonificación del territorio nacional en base a distintos intervalos de caudales de escurrimiento.

Para tal zona en estudio se localizaron dos sub-cuencas: El Cují – Nonavana con un área de 158,44 km² y un valor de caudal de escurrimiento de 5 L/S/ km², en esta sub-cuenca se encuentran las estaciones El Cují, Barquisimeto-C.B y Barquisimeto-MINCOM. La otra sub-cuenca pertenece a Duaca - Eneal con un área de 129,88 km² y un

caudal de escurrimiento de 9 L/S/ km^2 , aquí se encuentra la estación Duaca y cerca de esta la estación quebrada de oro.

Los valores aportados por el mapa se encuentran en unidades no adecuados con las unidades de la información obtenida de las estaciones en (mm), por lo tanto es necesario hacer las respectivas conversiones de unidades para lo cual se procede de la siguiente manera:

Para la Sub-cuenca El Cuji-Nonavana:

$$5 \text{ l/s/ km}^2 \times 158,44 \text{ km}^2 \times \frac{31536000 \text{ s}}{1 \text{ Año}} = 2,50 \times 10^{10} \text{ L/año}$$

Como $1\text{m}^3 = 1000 \text{ L}$, entonces:

$$\text{Esc} = 25000000 \text{ m}^3/\text{año}$$

Como $158,44 \text{ km}^2 = 158440000 \text{ m}^2$

$$\text{Esc} = \frac{25000000 \text{ m}^3}{158440000 \text{ m}^2} = 0,16 \text{ m}$$

Como $1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$

$$\text{Esc} = 160 \text{ mm}$$

Con este valor obtenido de escurrimiento en (mm), se procede a obtener los valores de escurrimiento mensual usando los datos de precipitación en porcentaje de la siguiente manera:

El escurrimiento para el mes de Enero:

$$\text{Esc} = 160 \text{ mm} \times \frac{7,2 \text{ mm}}{600,6 \text{ mm}} = 1,92 \text{ mm}$$

De igual manera este procedimiento se realiza para los meses siguientes. En la siguiente tabla 4.1 se presentan los resultados de una estación:

Estación El Cuji:

Parámetros Meses	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)
Enero	7.2	1.92
Febrero	9.4	2.56
Marzo	12.1	3.2
Abril	59.5	15.84
Mayo	71.1	18.88
Junio	105	28
Julio	91	24.32
Agosto	53.2	14.24
Septiembre	45.1	12
Octubre	50.1	13.28
Noviembre	65.4	17.44
Diciembre	32.2	8.64
Total (mm/año)	600.6	

Tabla 4.1 Estación el Cuji

Todo el procedimiento explicado anteriormente se aplica para la sub-cuenca Duaca - Eneal, la cual arrojó el siguiente resultado:

Esc = 280 mm

Este valor va ser multiplicado por los porcentajes de precipitación y así obtener el escurrimiento mensual para esta sub-cuenca.

Estos valores de escurrimiento de todas las estaciones presente en el are, son las tomadas para la elaboración de este mapa, se tomaron valores mensuales, del mes más seco y más húmedo de tal manera de obtener dos mapa de escurrimiento mínimo y máximo. El procedimiento en ArcGis 9.1 es el mismo aplicado en la elaboración de los mapas de isoyetas, (ver mapas en anexos).

En la siguiente figura 4.23 se presenta el mapa final producto de la metodología explicada en el esquema.

De igual manera se clasifica en zonas altas, media y bajas de infiltración superficial y se presentan el contorno del escurrimiento máximo que se puede presentar en el área de estudio.

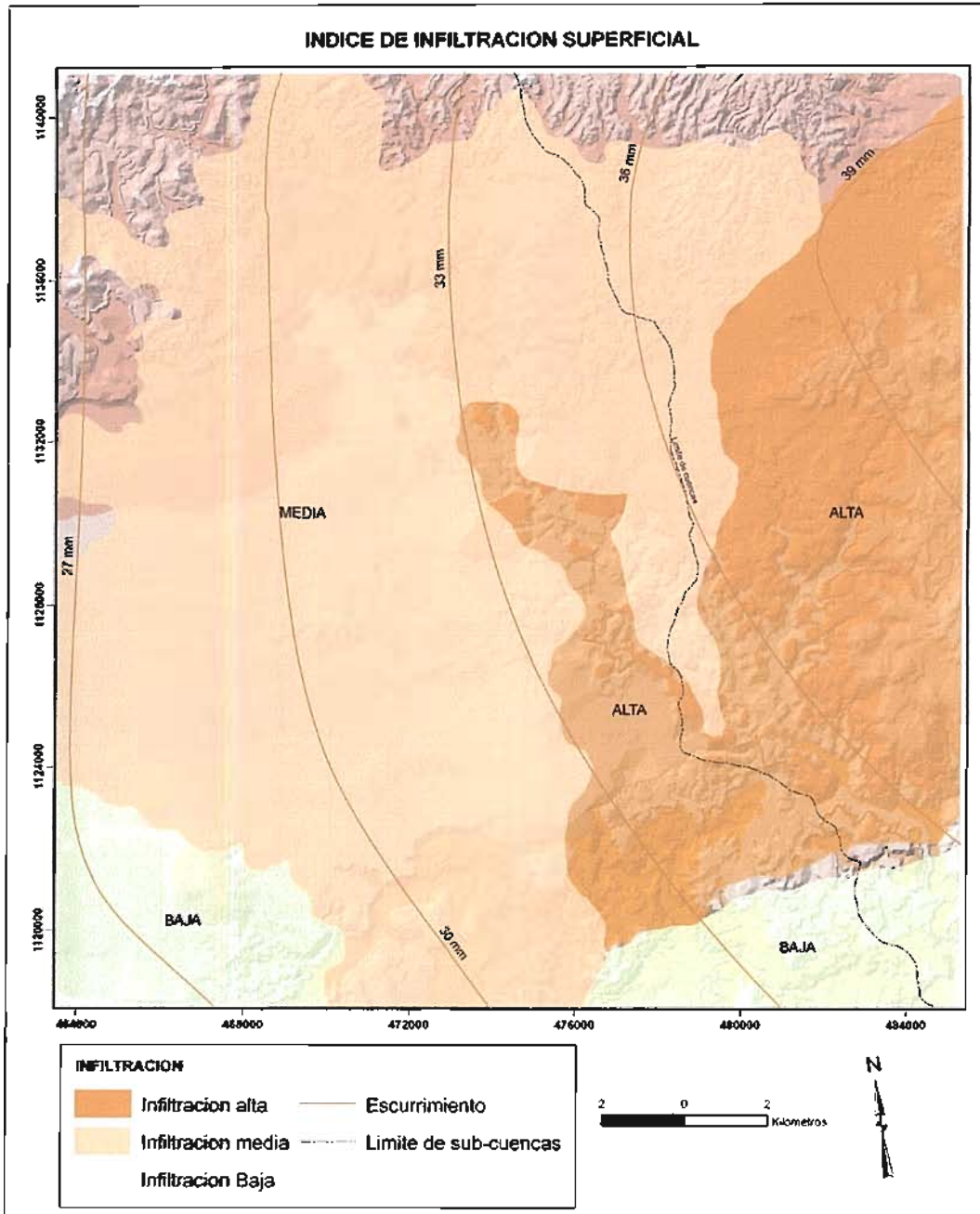


Fig 4.23: Mapa de Infiltración Superficial

4.18 Índice Potencial de existencia de Acuífero

La elaboración de este mapa se realiza mediante la combinación de cartografía hidrogeológica, geomorfológica, información de pozos como los caudales de bombeo, perfiles litológicos y datos de Sondeos Eléctricos Verticales hecha en algunos sectores del área en estudio. La metodología usada fue la siguiente:



Fig 4.24: Metodología de Índice Potencial de Existencia de Acuíferos

Una de la información mas importante fue el uso de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) el cual fue de gran ayuda para tener una idea amplia de cómo es la litología a nivel del subsuelo, para alcanzar este objetivo es necesario realizar correlaciones entre SEV por sectores para tener mayor precisión. A continuación se describe los parámetros usado para la elaboración de los perfiles litológicos de los pozos y de los SEV y su posterior correlación.

La información de los Sondeos Eléctricos Verticales, fue facilitada por la empresa HIDROLARA, los datos provienen de un estudio de prospección geoelectrica de agua subterránea realizada en el año 2007 y culminada a principio de este año (2008), por el Ing. Ariel Sanchez, Fisher Hidrogeólogo, Hidrogeofísico, tomándose en cuenta solamente los Sondeos Eléctricos Verticales hechos en el área de estudio, ya que dichas prospecciones fueron aplicadas a varias localidades del Estado Lara.

También se recolectaron datos litológicos de pozos perforados y financiados por HIDROLARA, obteniendo un total de 2 pozos que contienen información litológica, todos los sondeos eléctricos verticales y pozos presentan sus coordenadas UTM Datun la Canoa, los cuales se transformaron al Datun UTM WGS 84, para luego ser integrado al Sistema de Información Geográfica ArcGIS 9.1.

Con estos datos se realizó un inventario detallado de los SEV y pozo con litología, debido a que algunos se encuentran a mas de 4 kilometro entre sí, se clasificó por sectores, tomando en cuenta la distancia y similitud litológica entre SEV y pozos, para elaborar los perfiles litológicos individuales y posteriormente las correlaciones (secciones transversales).

El nombre original de cada SEV, de los pozos y los seriales que los identifican, fue tomado en cuenta con la finalidad de ubicarlos y leerlos en mapas digitalizados con mayor facilidad (ver mapa de ubicación de pozos en Anexo).

Cabe destacar, que en este estudio se tomaron en cuenta algunos pozos artesanales construidos por lugareños de algunos sectores, tal es el caso de Cordero, Corderito, Las Palmitas, El Potrero, Nonavana y Tamaca, perteneciendo todos al Municipio Iribarren, fue de gran importancia, ya que algunos pozos artesanales estaban en construcción, logrando observar las capas litológicas del subsuelo, y otros que contienen la litología alrededor del pozo artesanal, se obtuvo información por parte de los dueños, en cuanto a cual fue el orden litológico extraído y así ir corroborando la información de algunos SEV cercano a estos pozos.



Fotografía 4.1: Pozo artesanal a los alrededores del caserío Cordero



Fotografía 4.2: Pozo artesanal donde se aprecian la disposición de las capas litológicas

Estos fueron construidos a pulso, implementando herramientas rudimentarias como lo son: Pico, Chicora, Tobos y Palas, estos pozos artesanales alcanzan una profundidad que esta entre 9 y 26 metros.

En general toda la información litológica obtenida, se clasifica en capas permeables y capas impermeables.

Los materiales permeables incluyen Gravas, arenas limosas y gravas arenosas, y las capas impermeables corresponden a limos, arcillas y rocas impermeables (Pizarra).

Se generar un conjunto de secciones transversales involucrando distintos SEV y pozos, haciendo las respectivas correlaciones entre cada uno de ellos, permitiendo de esta manera visualizar y cuantificar

la continuidad lateral y las variaciones de espesor de cada una de las capas.

Se emplearon 12 correlaciones los cuales poseen una ubicación confiable y una litología clara y bien definida entre cada SEV. De este modo, se realizaron secciones transversales sólo con SEV y aparte con los dos pozos que contienen litología.

Las secciones estratigráficas transversales usadas para la correlación están representadas en anexo (Mapa de ubicación de Pozos y Perfiles).

La presentación visual de los perfiles litológicos y posteriormente su correlación fue hecha en el programa AutoCAD 2007, tomándose los valores de las cotas superficiales de los SEV y los pozos para establecer un Datum y así hallar la escala adecuada en vertical que se utilizara en todas las secciones transversales, del mismo modo, se considero el espaciamiento entre los SEV y los pozos, estableciéndose la escala adecuada en horizontal, la cual varía entre perfiles litológicos, debido a las grandes diferencias de espaciamiento entre los mismos. Esta información de espaciamiento entre SEV y pozos se encuentra en metros, ya que la mayoría de las correlaciones no pasan los 3 Km.

Para el trazado de las correlaciones fue empleada la metodología de similitud litológica, ya que en las descripciones de los informes, se encontró muy bien descrita la litología, lo cual permitió hacer correlaciones directas, observando también la analogía de los espesores.

Las secciones estratigráficas fueron realizadas bajo el esquema de una sección estructural, tomando en cuenta la dinámica del proceso sedimentario y geológico de la región. En la siguiente figura se puede apreciar el perfil Geoelectrico 1 y 2 correspondiente al sector Barro Negro:

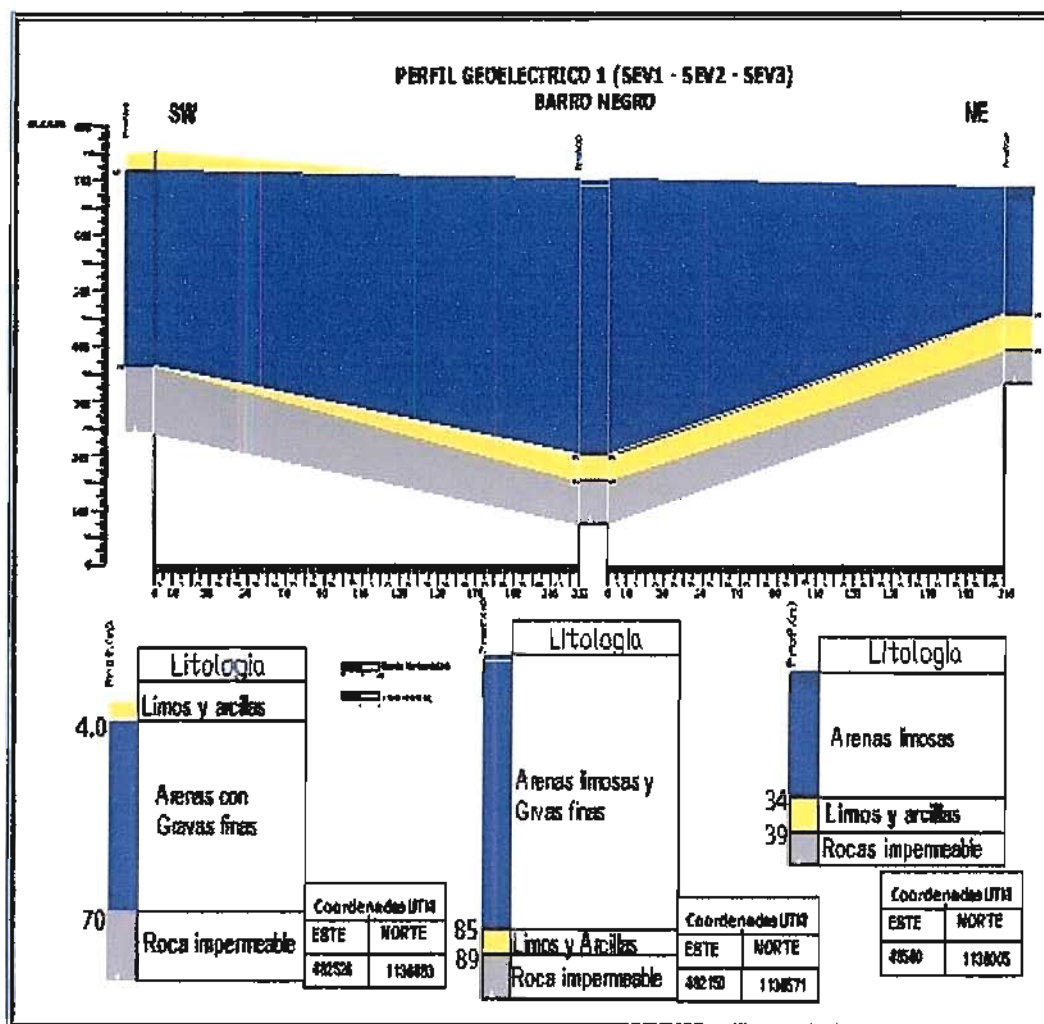


Fig 4.25: Correlación 1 de perfiles correspondiente al sector Barro Negro

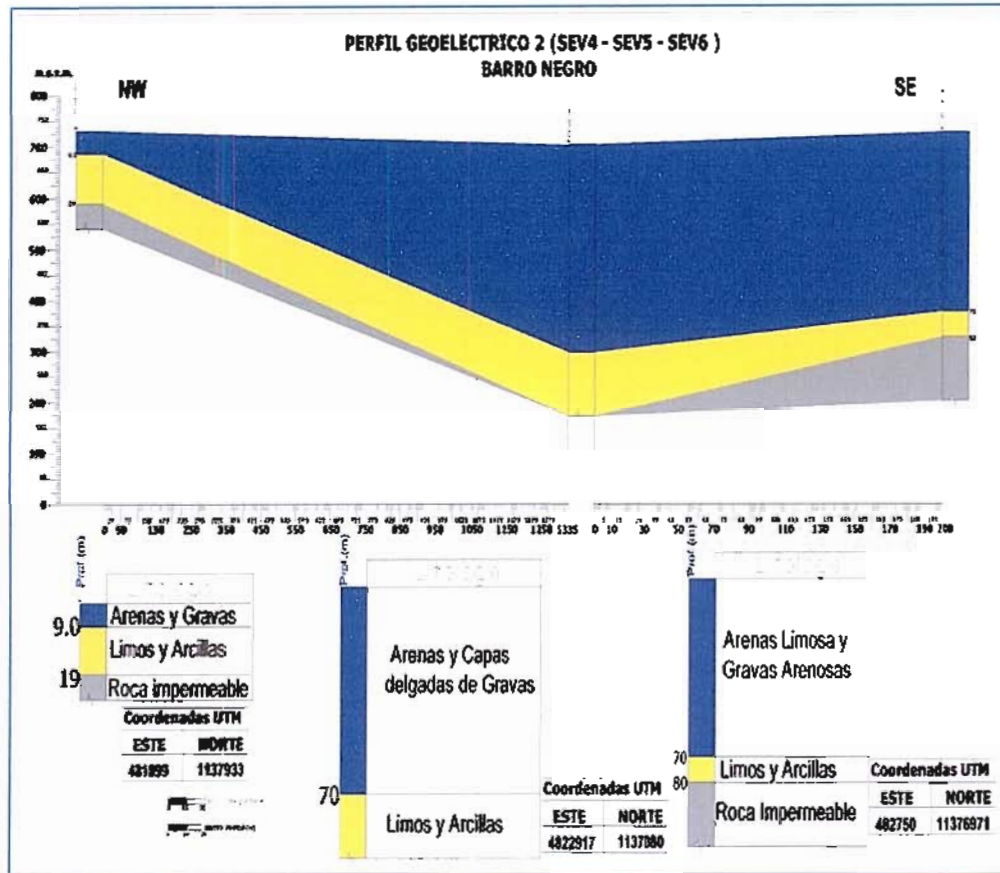


Fig 4.26: Correlación 2 en el sector Barro Negro

Dentro de las secciones estratigráficas transversales se estableció en cada SEV y pozo una escala progresiva de profundidad que proporcionará la ubicación de las capas en profundidad así, como los espesores.

4.18.1 Parámetros Hidrogeológicos

- **Elaboración del mapa de caudales**

Para la elaboración de este mapa se utilizó información reciente, detallada y precisa de volúmenes de agua, extraídos por bombeo a nivel constante, de algunos pozos ubicados dentro del área, información facilitada por HIDROLARA, se puede observar información de tabla anexos.

Se contó con 32 datos, debido a que se tomaron algunos pozos privados los cuales contaban con información de caudal resiente. Teniendo los datos de caudales, se elaboró la base de datos en formato **SURFER 8** a través del comando **Worrsheet**, el método de interpolación utilizado fue el de **Kriging**. En la figura se presenta el mapa de caudales.

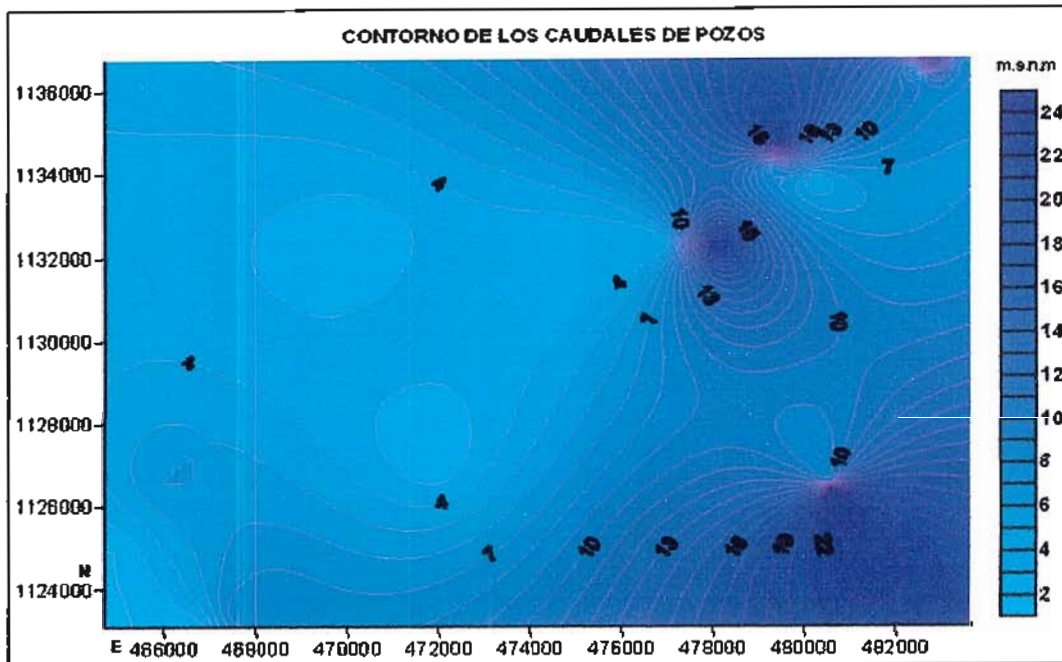


Fig 4.27: Mapa de Caudales

- **Mapa de Niveles Estático**

Para realizar este mapa se utilizaron 21 datos, lo cuales se pueden visualizar en anexo (tabla de información de Niveles Estático), donde se muestra información de pozos privados, y de Hidrolara que cuentan con información de cotas de niveles estáticos.

Para su elaboración se calcularon las cotas del nivel estático o niveles piezométricos, restando las cotas del terreno y los niveles estáticos de cada pozo, para obtener así, la altura sobre el nivel del mar de la capa de agua.

El mapa fue elaborado en el programa **Golden Software Surfer 8.0**, aplicando la misma metodología realizada para la elaboración del

modelo digital de elevación. Para la elaboración del mapa de los niveles estáticos, el mismo se importó del archivo ***.bln**, perteneciente a la base de datos de los niveles estáticos, corregido de los pozos, y su ubicación se elaboró del archivo ***.grd** respectivo, luego entramos al menú **Map/Contour Map/New Contour Map**, pudiendo entonces visualizar el mapa de contorno de niveles estáticos, como se muestra a continuación:

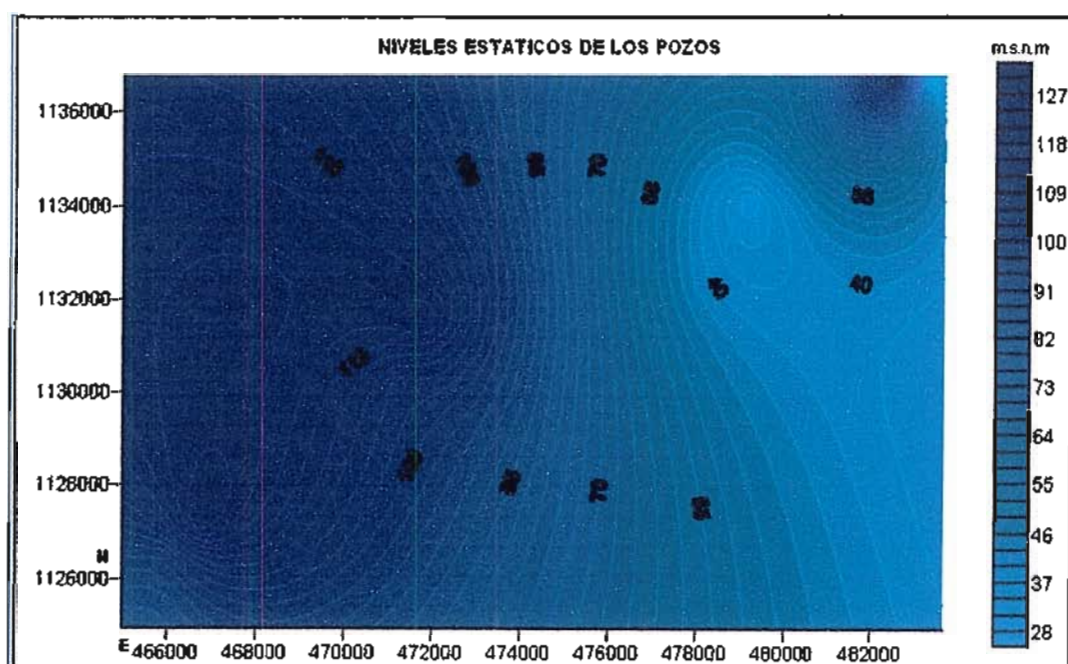


Fig 4.28: Mapa de Niveles Estáticos

- **Mapa de línea de flujo**

El mapa de líneas de flujo, permite determinar la dirección del movimiento de las aguas subterráneas en el área de estudio, la cual viene dada por las líneas de máxima pendiente, representadas por los vectores de líneas de flujo,

entre las curvas de cotas del nivel estático obtenido.

Para la elaboración del mapa de líneas de flujo se cuenta con datos de niveles estáticos, se sigue el siguiente paso entramos al programa **Surfer** en el menú **map/surface**, cargamos el archivo de texto, creado con los datos del nivel estático, posteriormente se entra al menú **Map/New 1-Grid Vector Map**, y se carga el archivo de texto, luego se visualiza el mapa de la siguiente manera:

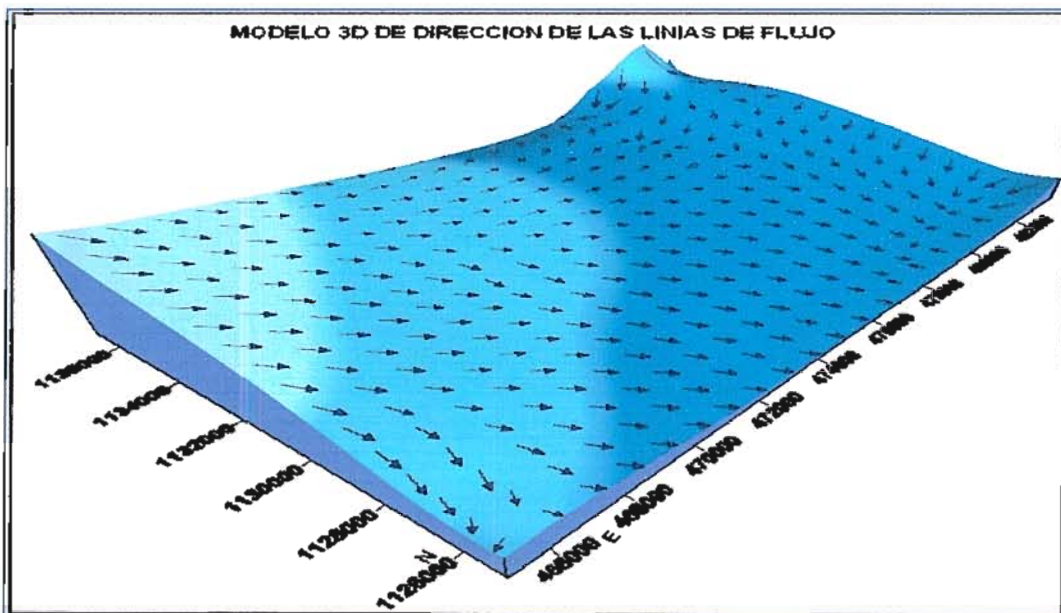


Fig 4.29: Modelo en 3D de las Líneas de Flujo

Este mapa tiene una gran relación con el mapa de cotas del nivel estático y establece las líneas de dirección del flujo o del movimiento de las aguas subterráneas del área de estudio.

Toda esta información obtenida a través del programa **Surfer 8.0**, es exportada en formato ***shapefile** para poder ser integrada en el Sistema de Información Geográfica ArcGis 9.1.

- **Mapa de Índice Potencial de existencia de Acuíferos**

El siguiente mapa (Fig: 4.30) muestra las zonas con índices potenciales de existencia de acuíferos el cual se logro mediante la combinación de diferentes mapas como la hidrogeología y la morfología, asimismo es de suma importancia la integración de datos de prospección geofísica y parámetros hidrogeológicos de los pozos perforados en el área de estudio.

Se puede observar que las zonas con mayor índice de existencia de acuífero se encuentran de color rojo, lo cual presentan mayores caudales y es el area que contiene mayor información en cuanto a parámetros hidrogeológicos y geofísicos.

La zona de color amarillo claro corresponde al índice potencial medio, es el área geomorfológicamente de explayamiento, donde la topografía es muy plana la cual se encuentra a 540-580 m.s.n.m, aquí los caudales presente son de 4 a 5 l/s, siendo estos los caudales mas bajo del área.

Las zonas clasificadas con índice potencial bajo, corresponden a áreas donde la morfología es el principal controlador, ya que estas zonas están en las montañas o colinas que presentan una elevación de más de 800 m lo cual hace difícil la existencia de acuíferos debido al desnivel topográfico haciendo que migre el agua a zonas mas topográficas.

INDICE POTENCIAL DE EXISTENCIA DE ACUIFEROS

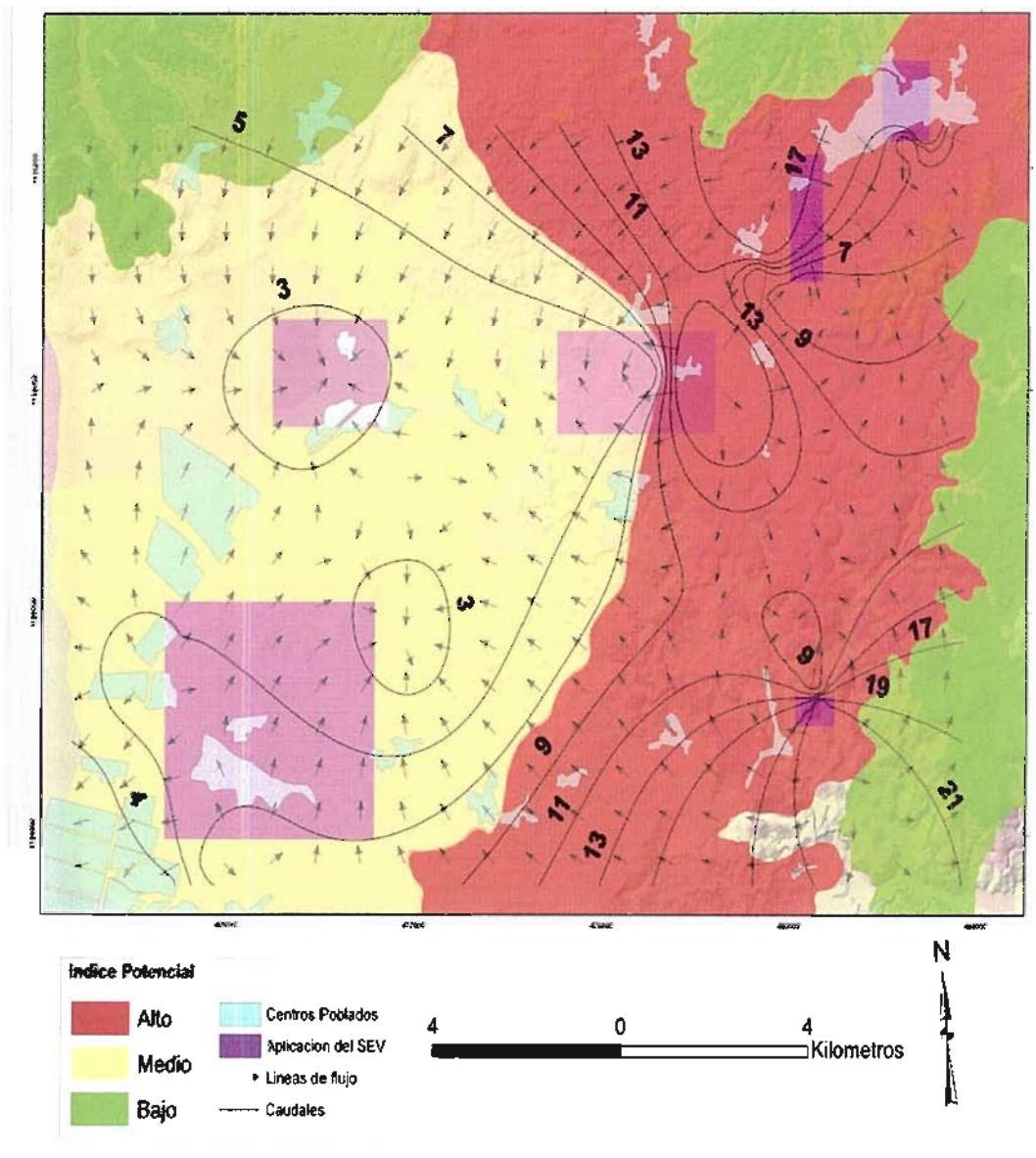


Fig 4.30: Mapa de Índices Potenciales de Existencia de Acuífero

4.19 Zonas potenciales de agua subterráneas

Para poder llegar a obtener este mapa donde se plasma toda las posibles zonas con altas probabilidades de poseer agua subterráneas se realizo la integración de los mapas de índice potencial de recarga, índice potencial de existencia de acuífero, los datos de Sondeos Eléctricos Verticales, también se tomo encuentra la morfología de cada zona.

Toda esta información fue procesada e integrada con el programa ArcGis 9.1 en formato raster.

En el esquema general, se puede entender con más claridad como obtener este mapa debido a que es una integración de toda la información temática elaborada anteriormente. A continuación se presenta el esquema general donde se observa como poder llegar al objetivo final de todo este trabajo de tesis de grado donde las flechas nos van guiando como tiene que ser la integración con cada mapa temático e información o datos obtenidos en campo y otros suministrado por la empresa Hidrolara.

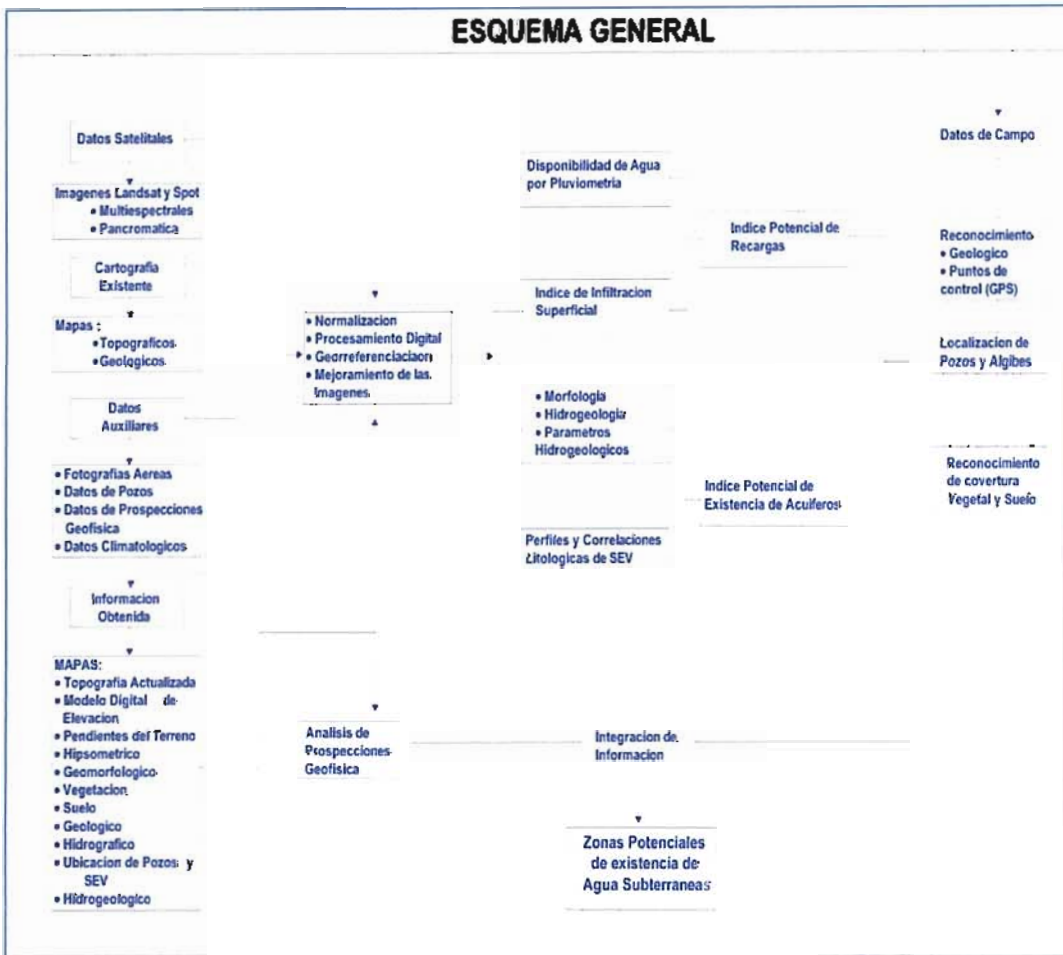


Fig : Esquema General de la Metodología Aplicada

En la siguiente figura se puede observar el mapa con las zonas potenciales de agua subterráneas, donde se clasifican en áreas con probabilidades altas, medias y bajas de en contra acuíferos. Las zonas de color azul oscuro son probabilidades altas, las de color azul claro son probabilidades media y las de color rojo son áreas con escasa probabilidades.

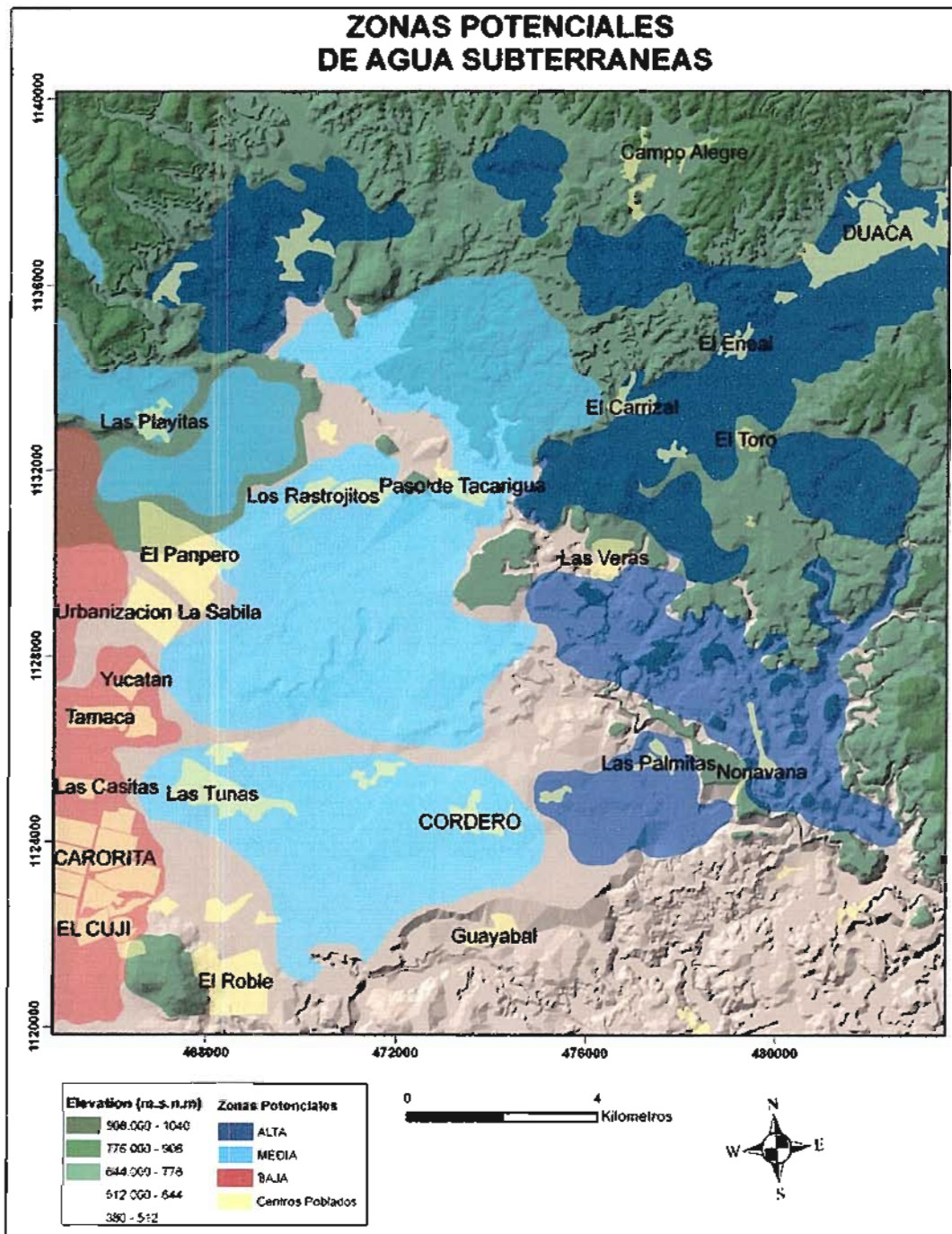


Fig 4.31: Mapa de Zonas Potenciales de Agua Subterráneas

También se elaboro un modelo en tres dimensiones para observar toda el área de estudio a través de una imagen Landsat el cual nos da una idea de cómo es la zona perspectivas reales del terreno.

Esta se realizo con el programa Envi 4.3 mediante la opción **3D Surface View**, a la cual se le superpone la digitalización de las curvas de nivel con sus respectivas elevaciones, para si poder visualizarla en tres dimensiones. La composición de las bandas de la imagen Landsat corresponde a las siguientes 4,5,3, lo cual nos indica que esta en falso color esto se logra mediante el comando **Available Bands List**.

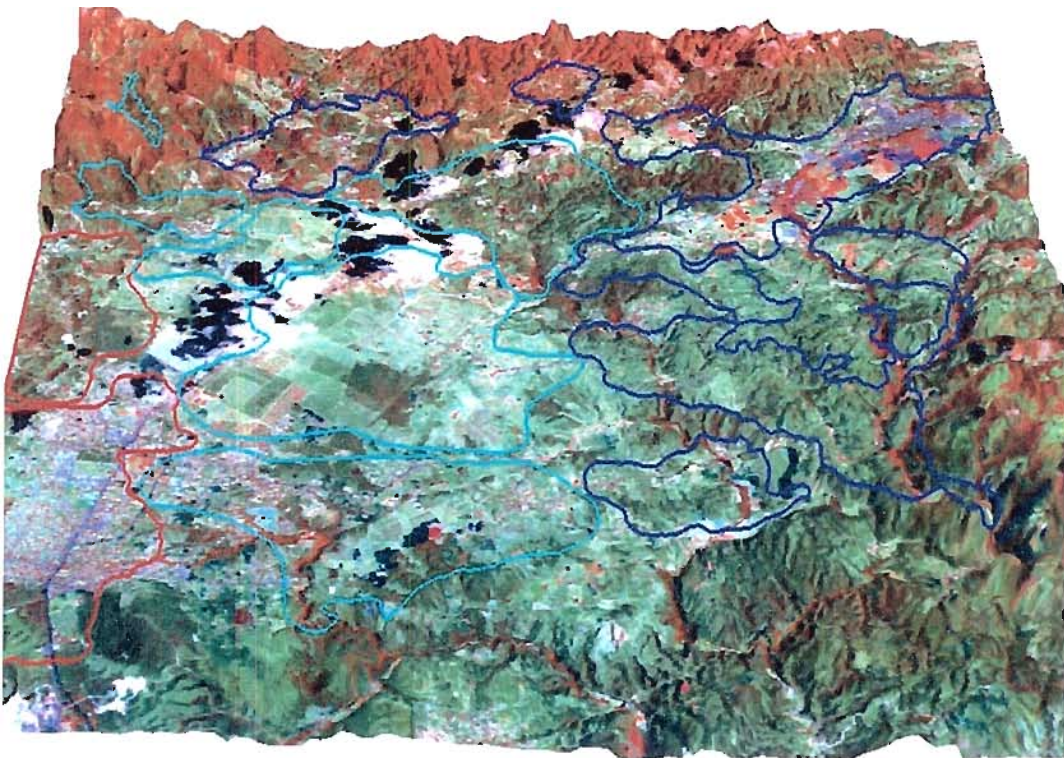


Fig 4.32: Modelo en tres dimensiones de Imagen Landsat en falso color 4,5,3.

Capítulo V

- Análisis y Resultados
-

A continuación se presentan los resultados de la metodología aplicada al área de estudio en el Estado Lara, zona que se ha tomado como caso de estudio de este trabajo. El área ocupa una extensión de 195 Km². Las características generales de este caso de estudio se encuentran definidas en el Capítulo I.

La asociación de la etapa de recopilación y procesamiento e interpretación de la información perteneciente al área de estudio en cuanto a los mapas topográficos, geológico, Imágenes Satelitales, datos de pozos y prospecciones geoelectricas, estaciones climáticas y fotografías aéreas se presentan en este capítulo, con la finalidad de representar de manera cartográfica y analítica, la idealización de los Modelos temáticos que se derivan de toda la información disponible.

5.1 Ordenación de la información Base

Este paso tiene como objetivo la organización de toda la información necesaria para la aplicación al área de estudio la metodología propuesta en el capítulo IV, esto es, la información base necesaria para estudios hidrogeológicos que incluya el uso de imágenes de satélite y Sistemas de Información Geográfica.

5.2 Interpretación de las Imágenes de Satélites

La resolución espacial de las imágenes Landsat y Spot juegan un papel muy importante en este estudio esta se encuentra con un tamaño del pixel de 30 metros y 10 metros,

se hizo mayor énfasis en la Spot ya que esta cuenta con mayor resolución, a la hora de realizar una buena visualización de los rasgos mas importantes y su posterior digitalización.

De igual manera Para el análisis se utilizan las dos imágenes adaptadas al área de estudio dispuestas en diferentes composiciones de bandas. Se identifican principalmente rasgos generales de geomorfología, geología, hidrógrafa y vialidad.

Para el análisis de la geomorfología y la geología se prepara un modelo 3D a partir de las curvas de nivel y superponiendo la imagen satelital, este modelo proporciona una perspectiva mas real del área, donde se visualiza claramente el relieve del área.

Con la composición de falso color en las imágenes Landsat y Spot se distinguen por su disposición geométrica algunos cultivos en tonos rojos, naranjas, amarillos, azules y verde lo cual, se podría deducir que aquellos cultivos que presentan un color azulado, constituyen suelos un poco húmedos que no han llegado a la marchitez y aquellos que se observan en tonalidades muy claras cercanas al blanco representan suelos muy secos o suelos que se encuentran en barbecho.

Respecto a la geomorfología se observan las montañas, colinas y cerros prominentes alrededor del valle y lomas en su parte central.

En la interpretación de la geología es fundamental un estudio geológico previo de la zona para un mayor conocimiento de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio se distinguen los depósitos del Cuaternario que constituyen las áreas

de explayamiento en la zona central y las terrazas aluviales alrededor de la población del Eneal y Duaca.

El drenaje es otro criterio que puede utilizarse para discriminar tipo de suelo, en este caso los sedimentos aluvionales (parte central del área) el drenaje es paralelo y cambia a textura gruesa en algunas zonas, en pocos lugares se comporta como dendrítico debido a las formaciones rocosas.

En cuanto a las estructuras geológicas, no se observa ningún rasgo o patrón estructural evidente, ya que este tipo de imagen no es la más idónea para detectar estructuras y es aun más difícil en zonas planas.

Para identificar la red de drenaje del área también se utilizan las imágenes. En este caso de estudio la red hidrográfica esta constituida por quebradas de carácter intermitente, estas se observan en tonos de negro o rojizo ya que presenta vegetación alrededor de estas quebradas de forma sinuosa y se comparan con la imagen. Algunas quebradas pueden confundirse con las carreteras o caminos, se diferencian en que las últimas no presentan sinuosidad, sino al contrario se observan más rectas y definidas.

Los cuerpos de agua también se distinguen con las imágenes satelitales y se comparan entre ellas ya que son de diferentes años, el azul oscuro indica aguas profundas y el más claro de media profundidad.

Fue muy importante la interpretación de las diferentes imágenes en cuanto a la clasificación de cobertura vegetal debido a que a través de esta interpretación se obtuvo el mapa de cobertura vegetal.

Como se puede observar las imágenes satelitales son de gran ayuda en los temas relacionado con la hidrología e hidrogeología en la cual se pueden obtener una serie de información actualizada y tener una idea previa a la hora de realizar las visita al área en estudio.

5.3 Mapa Geológico

En el Mapa Geológico (ver anexos de mapas), se puede observar la presencia de la unidad cretácica Formación Mamey, compuesta esencialmente de esquistos, filitas, meta-areniscas y calizas. Durante la etapa de campo especificada en el capítulo III, se observó ésta unidad con una extensión de 125 metros a lo largo de la carretera, la cual no estaba representada en el Mapa Geológico de Bellizia y Rodríguez (1969), ésta se presenta de manera cartográfica según sus coordenadas UTM en los anexos de mapas. Debido a la pequeña extensión de la unidad solo representa un remanente dentro de sedimentos Cuaternarios.

La Formación Mamey está compuesta principalmente por rocas metamórficas y sedimentarias, y tiene su mayor desarrollo hacia el este y oeste de Duaca, hacia la Serranía de Aroa y Bobare, respectivamente. En el Mapa Geológico se observan las zonas donde afloran las demás Formaciones Geológicas presente en el área y algunas estructuras geológicas como lo son anticlinales y sinclinales

que se encuentran desarrolladas mayormente hacia la Serranía de Aroa.

La mayor parte del valle de Duaca donde se encuentra el acuífero, está constituido por sedimentos pleistocenos y recientes de edad Cuaternaria al igual que la parte central del área de estudio.

5.4 Cartografía de disponibilidad de agua en suelos superficiales por Pluviometría

En la elaboración de este mapa se tomo en cuenta tanto las precipitaciones y temperatura como la cobertura vegetal debido a que este ultimo tiene bastante influencia a la hora de acumularse el agua en el suelo, ya que en las zonas donde la cobertura vegetal es muy espesa como los bosques y arbustos el agua de lluvia se le hace mas difícil llegar al suelo e infiltrarse ya que las plantas absorben gran cantidad de agua antes de llegar al suelo es por esto que la zonas que presentan estas características y que tienen una pendiente considerable se clasifican como zonas de bajas disponibilidad de agua superficial, al contrario de aquellas zonas donde la vegetación es un poco menos densa pero en estos caso jugaría un papel importante la composición litológica de los suelos y el desnivel del terreno, las zonas que se clasificaron como zonas con alta y media disponibilidad de agua superficial es debido a que presentan suelos arenosos-arcillosos y las precipitaciones son altas y prolongadas la cual facilita la acumulación del agua, es de esta manera como se llega al mapa final con toda las zonas marcada según su clasificación.

5.5 Índice de Infiltración Superficial

Para la realización de este mapa fue necesario el calculo del área de la cuecas presente dentro del área de estudio ya que se debe aplicar formula para la obtención de la densidad de drenaje y en conjunto con la obtención del mapa de suelo se puede predecir cuales son las zonas con mayor infiltración, esta información va en conjunto con los datos de escurrimiento de cada estación del cual se elaboro un mapa de escurrimiento para la zona en estudio, según la información tomada del mapa elaborado de escurrimiento la zona se divide en dos fracciones, una situada al Noreste en donde la tasa de escurrimiento es alta por tanto menor infiltración lo que nos hace pensar que el suelo en este sector es menos permeable con la presencia en algunos sitios de bajas pendientes y las llanuras de inundación de los ríos que circulan con poca energía y depositan material fino al contrario hacia el Suroeste donde los valores de escurrimiento es menor permite inferir que en esta área el suelo es mas permeable y la infiltración es mayor lo cual concuerda con el tipo de suelo presente los cuales son aluvionales que están compuesto por gravas y arenas.

De esta manera se llevo a la obtención de las delimitaciones delas zonas con índices de infiltraciones presente en el área de estudio según su clasificación en alta, media y baja. Como se muestra en la el capitulo 4.

5.6 Ubicación de Sondeos Eléctrico Vertical y Pozos existente en el área de estudio

La zona de estudio tiene un área aproximada de 195 km², dentro de ella se conocen 38 SEV y 24 pozos de los cuales solo dos tienen descripción litológica. Los pozos dentro del área se representan en el mapa de ubicación de SEV y Pozos en el apartado de anexo, y se distribuyen según sus coordenadas UTM WGS 84.

Se observa que los pozos y SEV, se localizan en mayor proporción hacia la zona Norte específicamente alrededores de Duaca por lo que se hizo una extensión del área en la cual abarca eso SEV y pozos, la mayoría de estos se encuentran sobre aluviones cuaternario dispuestos sobre el valle de Duaca y zona de explayamientos alrededores de el Cují, Tamaca y la Sábila.

Todos los SEV y los dos Pozos marcados con punto rojos mostrados en la en el mapa de ubicación de Pozos y SEV contienen información litológica, esta información es utilizada para crear los perfiles de cada uno de ellos y a su vez definir las direcciones de las secciones estratigráficas más favorables para visualizar la continuidad de los materiales en el subsuelo.

5.7 Secciones Estratigráfica

Se elaboraron 12 secciones estratigráficas mediante la correlación de SEV y Pozos con litología por sectores debido a que esta información se encuentra dispersa en varias localidades del área de estudio. El estudio de esta secciones estratigráfica aportaron información del subsuelo y en

relación con la geomorfología de la zona se comprobó que lateralmente hay una variación de la geofomas y del comportamiento del sub-suelo.

En cuanto a los Sondeos Eléctricos Verticales, se caracterizan por un espesor en metros, la profundidad a que se encuentran de la superficie y una resistividad expresada en ohmxm, la cual corresponde a la resistencia de dicha unidad al paso de la corriente eléctrica.

Esta resistividad permite inferir que el espesor de la unidad esta constituido por arcillas, limos, arenas o por gravas.

Con la ejecución de estos SEV se puede localizar antes de perforar, cuales son las zonas que tienen las mejores posibilidades de encontrar acuíferos económicamente explotables.

Cada unidad geoelectrica corresponde a un conjunto de capas litológicas de propiedades granulométricas semejantes y predominantes en el espesor considerado. La resistividad o resistencia de cada una estas unidades geoelectricas al paso de la corriente eléctrica, esta dada por la frecuencia de las capas predominantes en cada una de estas unidades.

Por lo tanto, podemos señalar que las resistividades bajas corresponden a capas arcillosas y/o limosas e indican perspectivas acuíferas bajas, debido a la impermeabilidad de las arcillas; las capas de arcilla que son altamente porosas y contienen importantes volúmenes de agua, no transmiten el agua que las satura debido al fenómeno llamado "retención capilar" que determina que las arcillas sean impermeables. Las resistividades entre 50 y 150 ohmxm corresponden a capas de arenas o arenas arcillosas y se puede esperar entonces buenas perspectivas acuíferas.

Las resistividades altas pueden corresponder en algunos casos, a capas de arena por encima del nivel estático de las aguas subterráneas y/o rocas que según su grado de meteorización pueden tener resistividades variables entre 50 y 10.000 ohmxm.

La información que se presenta a continuación corresponde a los SEV, se debe tomar en cuenta que para facilitar la comprensión, se depura la información, trabajando solo con tres tipos de materiales: los permeables e impermeables y basamento rocoso las cuales se presentan como semipermeable e impermeable. Para lograr esto, se toman como materiales permeables las arenas, granzones, gravas y lajillas; y como materiales impermeables las capas vegetales, arcillas, lutitas y pizarras. Se realizan las correlaciones con los SEV mas cercanos entre si, para visualizar la continuidad lateral de los cuerpos permeables e impermeables.

- **Sector Barro Negro**

Se muestra en la (figura 4.25 y 4.26) el perfiles geoelectricos 1 y 2, elaborada con los SEV 1, 2, 3 en dirección SW-NE, y 4, 5, 6 en dirección NW-SE, los cuales se encuentran a una distancia de separación de menos de 1400 m entre ellos, ubicados en la zona de mayor acumulación de sedimentos. Estos perfiles muestran una apreciable continuidad entre la capa permeable de considerable espesor y dos capas impermeables. La capa permeable es producida por la depositación de sedimentos fluviales que han sido transportados hacia las zonas de menores pendientes. Los sedimentos impermeables podrían representar depósitos de abanicos de rotura, producidos por aumentos en la carga fluvial.

La continuidad lateral del cuerpo permeable favorece la acumulación de agua en la zona, según la descripción el nivel estático se encuentra a profundidades de 25 a 30 metros, podemos decir que en contexto serían posiblemente acuíferos libres debido a que en las capas permeables se encuentran el nivel estático y por de bajo, las capas impermeable.

- **Sector Eneal**

Se realizaron dos perfiles geoelectrico en este sector, el primero se puede apreciar en La Figura 5.1, formada por los SEV 1, 2, 3 separados por una distancia de menos de 400 m entre ellos, esta tiene una dirección NE-SW entre el SEV 3 y 1, el 2 con dirección SE.

En este perfil se puede apreciar una capa permeable de espesor considerable en toda su extensión, puede ser un depósito de canal fluvial, cuya sedimentación es mayor al Noreste y Sureste y menor al Suroeste de la sección. La capa permeable se encuentra sobre dos capas impermeables que mantienen su espesor en toda la sección, y podrían representar depósitos de abanicos de rotura, provenientes de diques que se desbordan debido a un aumento brusco de la carga fluvial. El nivel estático se encuentra entre los 40 y 50 m, la cual esta en la capa permeable pudiendo definir el acuífero como libre.

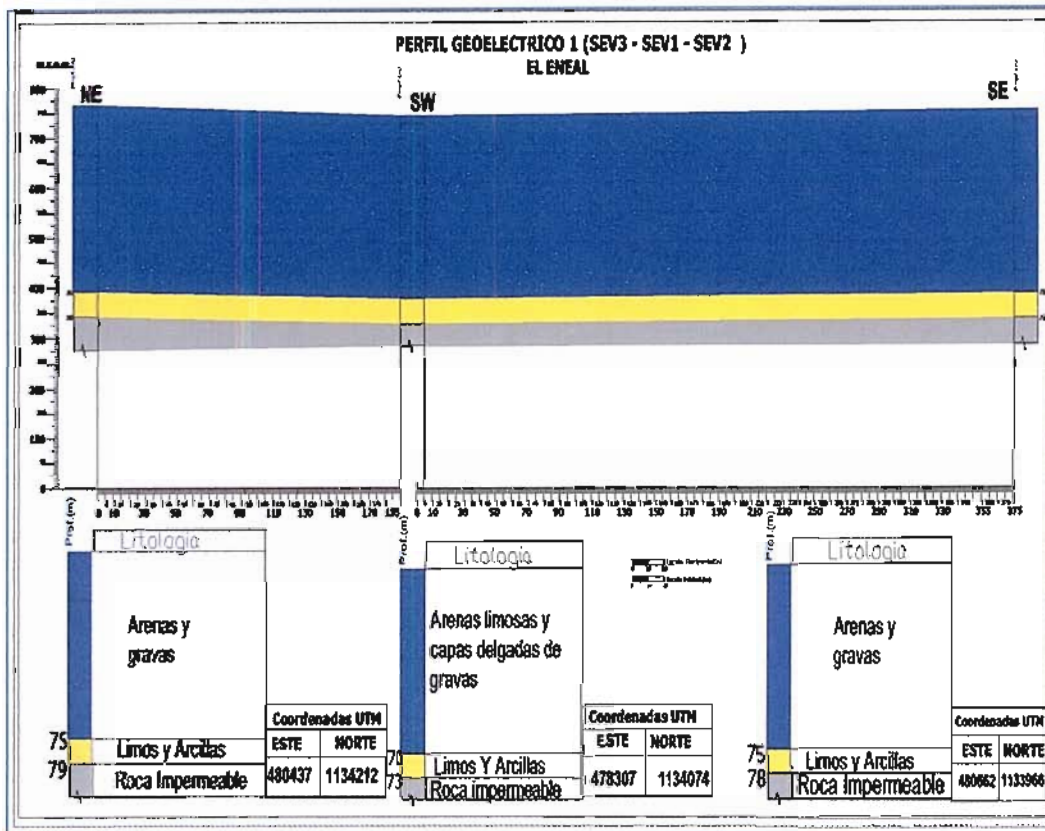


Fig 5.1 Correlación 1 Sector Eneal

El segundo perfil esta compuesto por los sondeos 1 identificado como el chivato y el sondeo 8, se puede observar que la capa impermeable se acuña hacia el SE, y aumento de espesor al NW con una continuidad de capas impermeable a lo largo de toda la sección. Este acuífero no se pudo definir su nivel estático debido a que el alcance de la conductividad eléctrica fue muy superficial por lo tanto no se puede decir si es un acuífero libre o confinado. Se presenta en la figura 5.2.

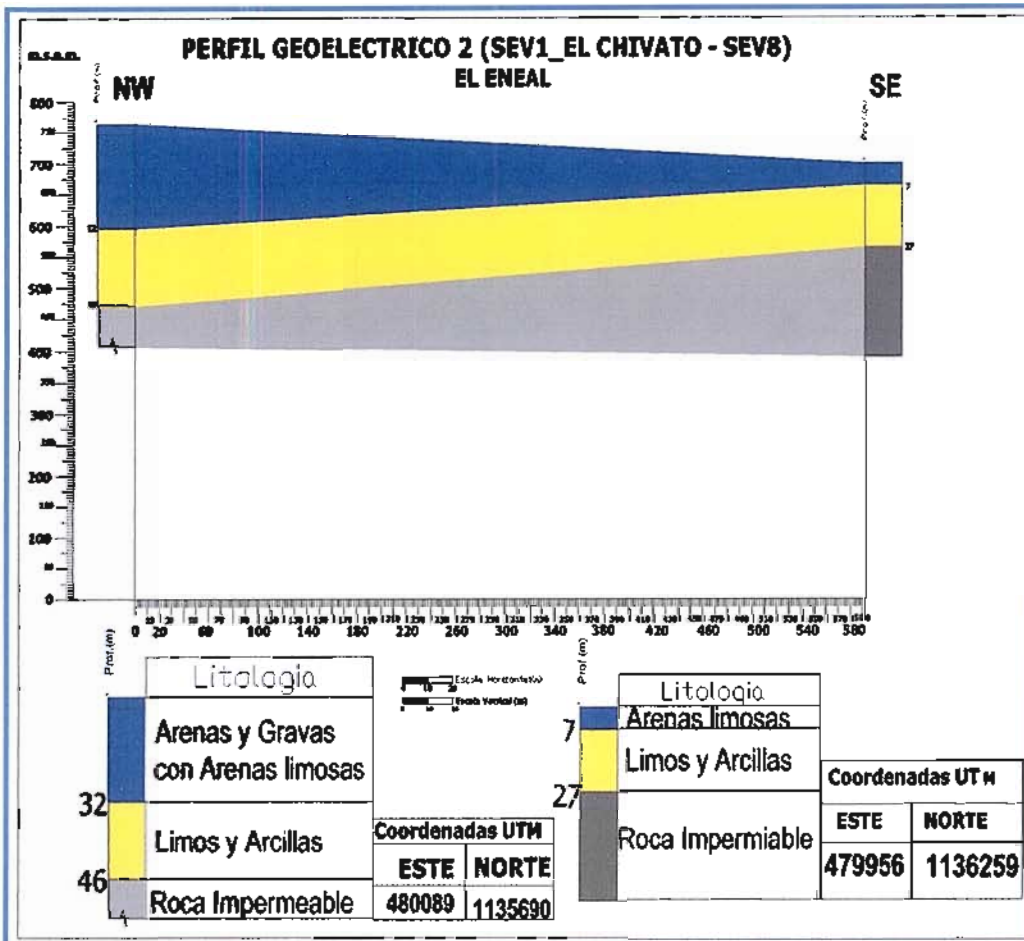


Fig 5.2 Correlación 2 Sector el Eneal

- **Sector Parapara**

De igual manera se realizaron dos perfiles en este sector el perfil1 en correlación con el SEV 4 y 9 de dirección SW-NE se observa en la figura 5.3, este comprende una continuidad lateral de una capa permeable de unos 80 metros de espesor que esta por arriba de las capas impermeable de espesores pequeños unos 10 metros, la separación entre SEV es de

1350 metros, el nivel estático se encuentra a profundidades de 60 metros lo cual nos indica que es un acuífero libre.

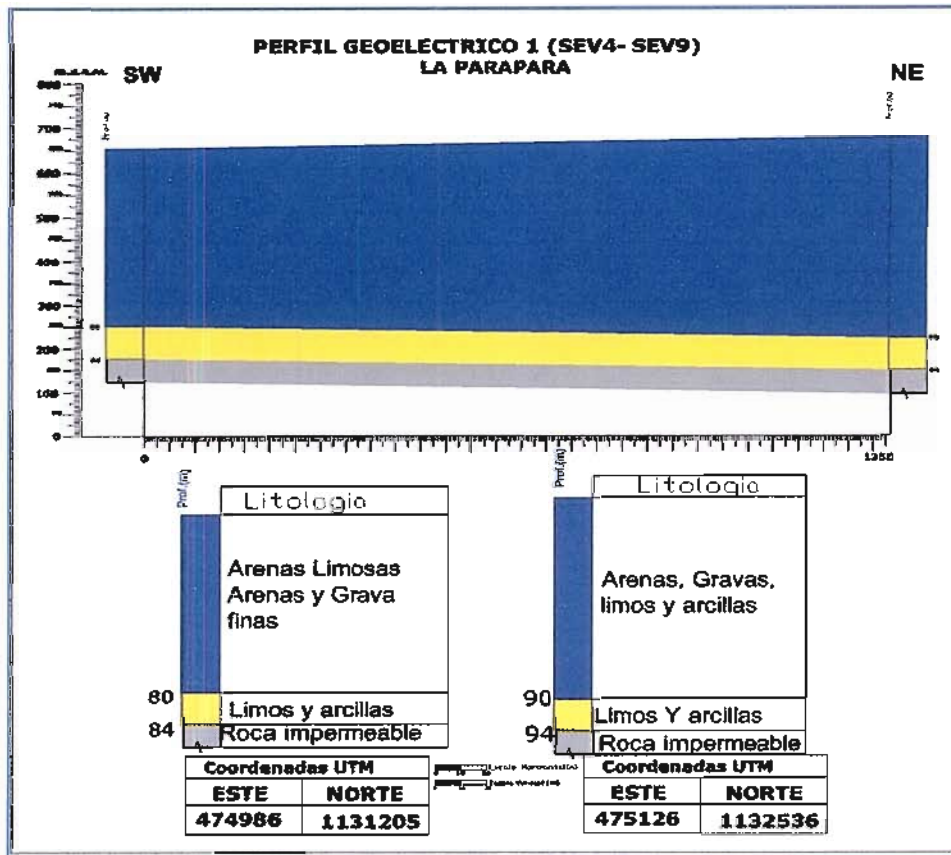


Fig 5.3: Correlación 1 Sector La Parapara

El perfil 2 compuesto por los sondeos 1, 2 en dirección SE-NW y el SEV 5 de dirección SW, se puede apreciar que de sentido SE-NW la capa permeable se acuña hacia el NW con espesores que van de 32 a 3 metros en esta dirección el nivel estático se encuentra a 22 metros de profundidad lo cual nos indica que en este sentido se comporta como un acuífero libre, mientras que en el sentido NW-SW, el espesor de la capa

permeable aumenta en este sentido, pero se comporta como un acuífero confinado debido a que hay una capa impermeable por encima y otra por debajo de esta capa permeable, el nivel estático se encuentra a 30 metros de profundidad.

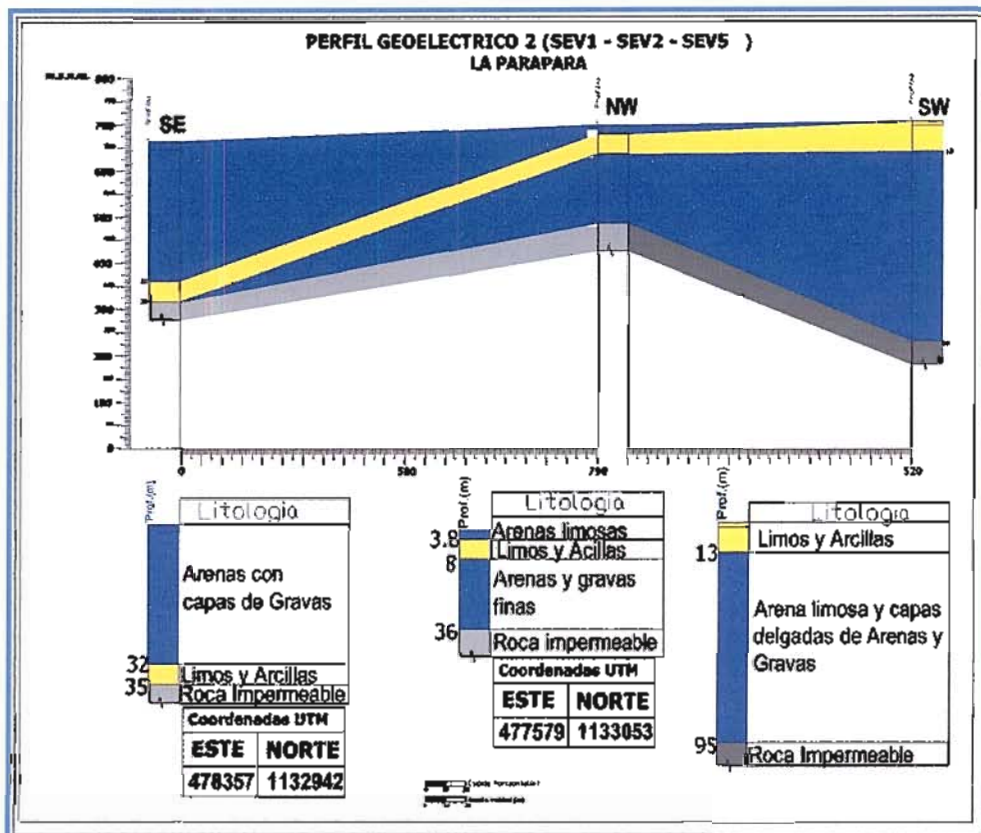


Fig 5.4 Correlación 2 Sector La Parapara

- **Sector La Sábila**

Comprende los SEV 1, 2, 3, para el perfil 1, que presentan orientación Noreste – Suroeste, Esta sección se caracteriza por presentar grandes espesores de capas permeables (arenas), con lentejones de limos y arcillas de espesores pequeños, estos se acuñan hacia el centro,

representando excelentes condiciones para la acumulación de agua, el nivel freático corta la capa permeable y considerando que las capas impermeables son de poco espesores por lo tanto en esta zona tiene un comportamiento libre. (Figura 5.5).

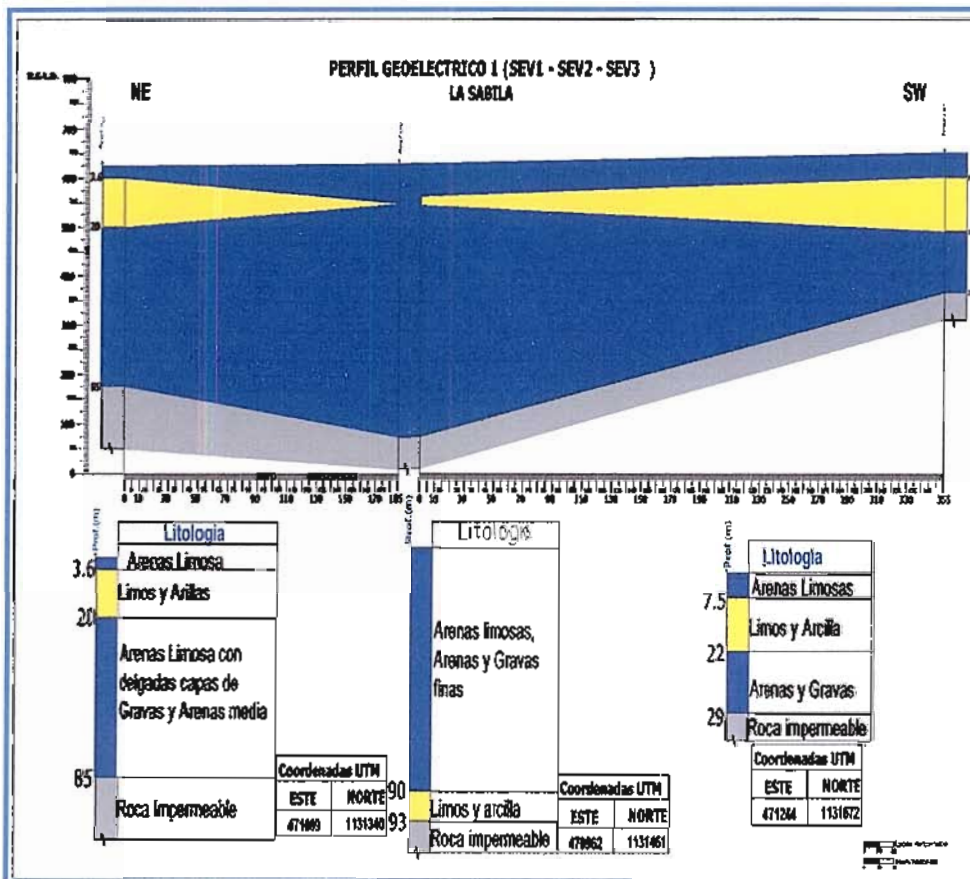


Fig 5.5 Correlación 1 Sector La Sábila

El perfil 2 (figura 5.6), compuesto por los SEV 4, 5 y 6, posee una extensión de 345 m y presenta 3 capas, de las cuales la primera es impermeable y se mantiene a lo largo de la sección, la segunda es permeable y comienza en el Noroeste con un espesor considerable de 57 m para luego en el Sureste disminuir a 10 m, la tercera capa es

impermeable y comienza al Noroeste con un espesor que va disminuyendo a hacia el Sureste.

Se observa que los depósitos de capas permeables de buen espesor se encuentran al Noroeste en este lado se encuentra el nivel estático a 66 metros de profundidad lo cual nos puede indicar que el acuífero se comporta confinado de igual manera hacia el Sureste.

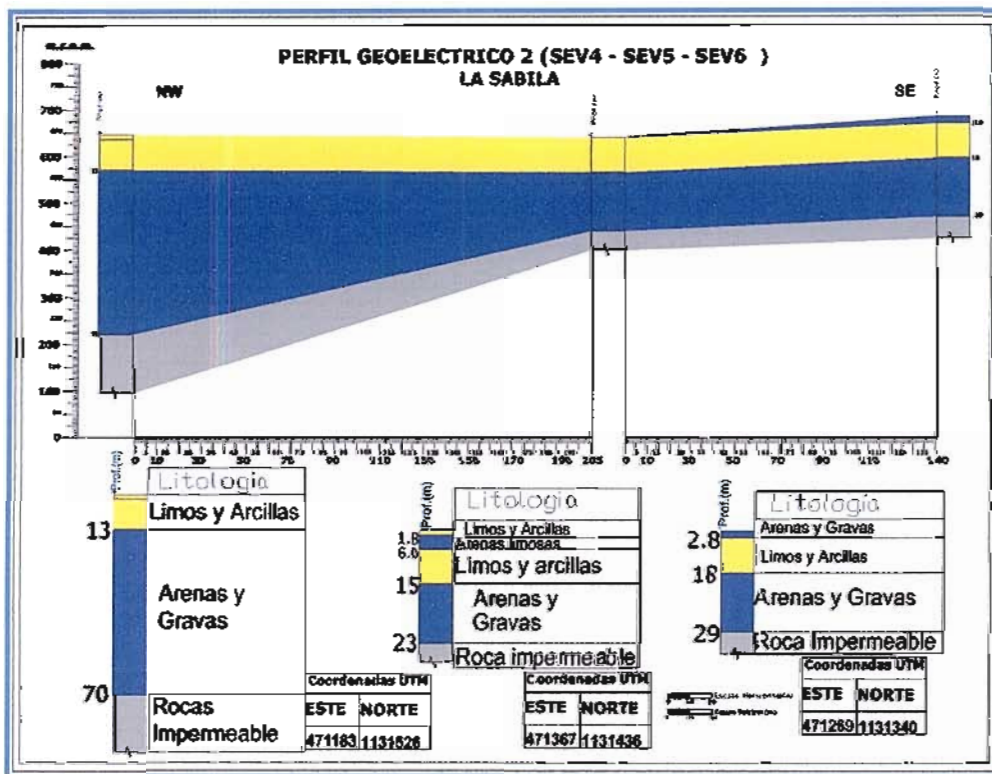


Fig 5.6 Correlación 2 sector La Sábila

- Sector Yucatán

A continuación se muestran los perfiles correspondiente a este sector, el perfil 1 figura 5.7, con orientación Sureste – Noroeste y con una distancia de 850 metros.

En forma general este acuífero presenta una gran continuidad lateral de capa permeable de aproximadamente 80 metros de espesor, con una capa delgada de arcilla debajo de esta, la capa permeable puede cuantificar grandes reservas de agua. En relación al nivel estático no se contacto mediante la prospección eléctrica, considerándose que se encuentra por debajo de estas capas, por lo tanto se puede inferir como un acuífero confinado.

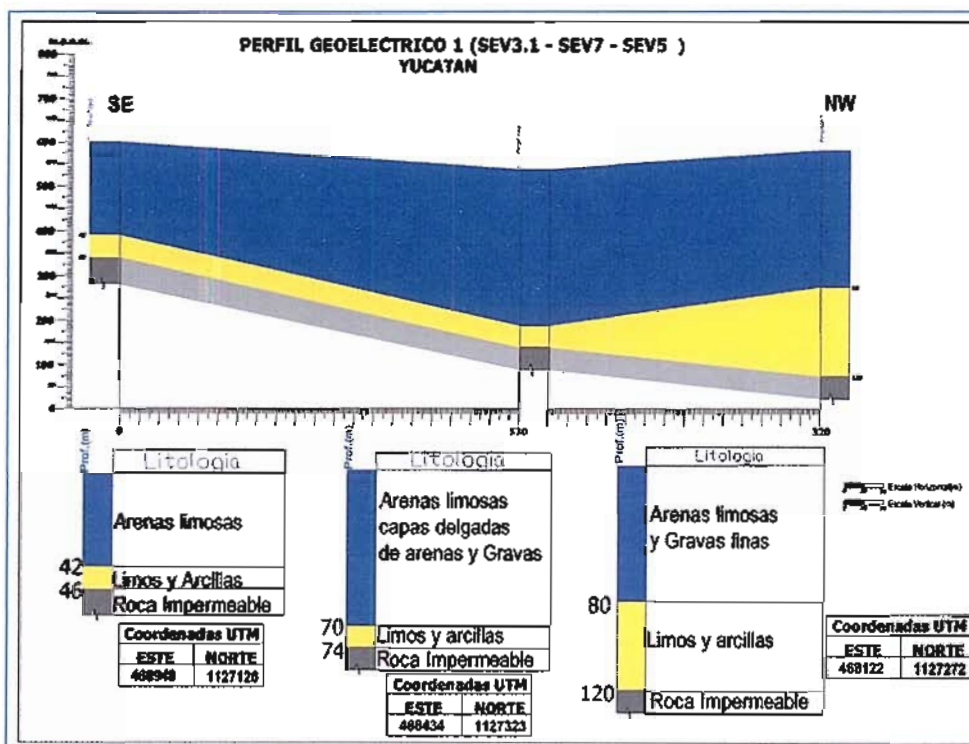


Fig 5.7 Correlación 1 Sector Yucatán

El perfil geoelectrico 2 compuesto por el SEV 1 y SEV 2-pueblo lindo, presenta una orientación SE-NW y una distancia de 2100 metros, en este se puede observar la gran continuidad lateral de una gran capa de arenas permeables a lo largo de toda la sección con capas delgadas de sedimentos impermeables hacia la parte inferior. La sección en general

presenta altos volúmenes de material permeable, indicando de buen reservorio de agua subterránea, pero al igual que el anterior no se pudo contactar el nivel estático en todo el espesor alcanzado. En la siguiente figura 5.8 se presenta el perfil geoelectrico 2.

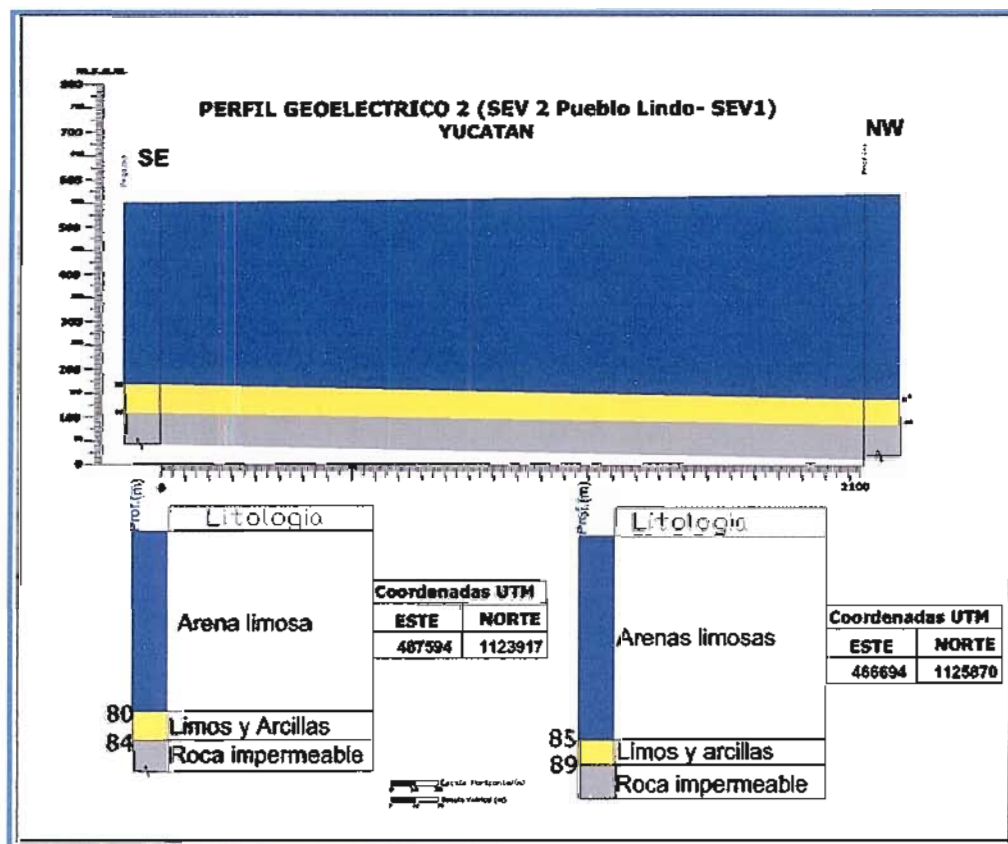


Fig 5.8 Correlación 2 Sector Yucatán

- **Sector Nonavana**

En este sector se elaboro solamente un perfil geoelectrico el cual presenta una orientación NW-SE, con una distancia de no mas de 250 metros entre cada sonde, se puede observar una continuidad de toda las capas a lo

largo de la sección, la capa permeable presenta un espesor de 20 m mientras que las capas impermeables son de espesores delgado, el nivel estático en este perfil se presenta a 8 metros de profundidad lo cual indica que el acuífero es de tipo libre, esta zona presenta grandes prospectivas de acuífero ya que los niveles estáticos no están muy profundo, el clima, la geomorfología y la litología favorece a la acumulación de agua subterránea.

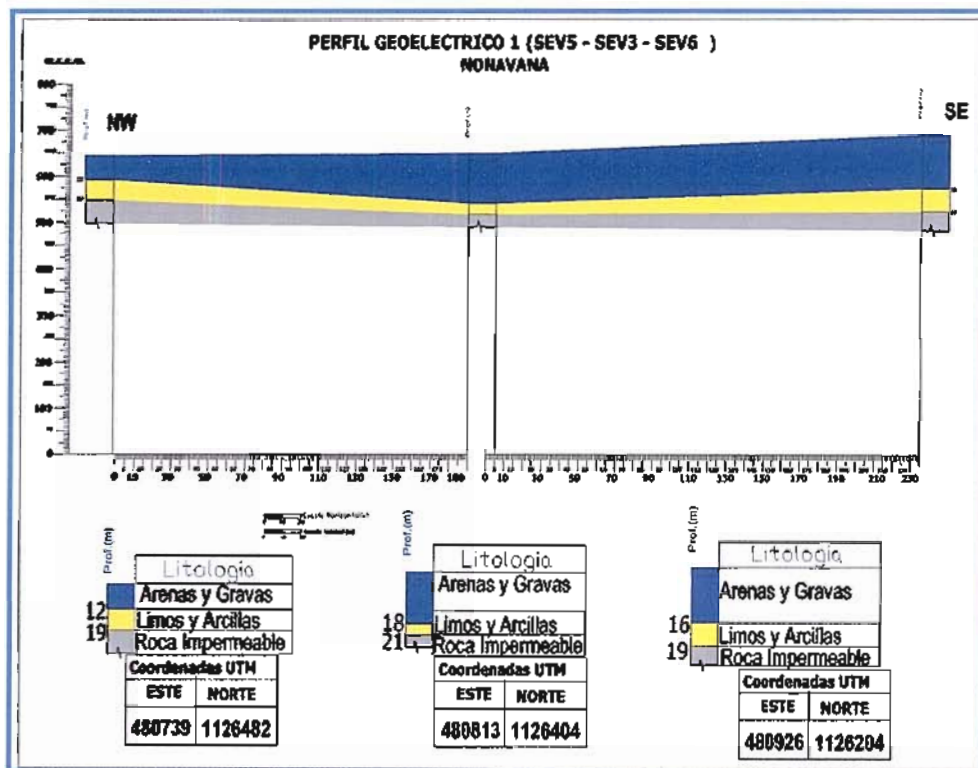


Fig 5.9 Sección Transversal Sector Nonavana

Las de más prospecciones geoelectricas se pueden apreciar en la sección de anexos.

5.8 Índice Potencial de existencia de Acuífero

Para la elaboración de este mapa fue necesario estudiar los parámetros hidrogeológicos y elaborar un modelo hidrogeológico en el cual se usaron los datos de caudales y niveles estáticos de cada pozo activo en el área de estudio.

Es de suma importancia recalcar que un modelo hidrogeológico busca simular el estudio de un evento real, esto implica una simplificación de la realidad, lo que da origen a la aparición de errores que deben ser aminorados, pero que no pueden ser del todo eliminados, por tanto, el uso que se le pueda dar a este modelo que fue elaborado con herramientas informáticas como lo es el programa **Golden Software Surfer 8.0**, empleando técnicas geoestadísticas que fueron aplicadas a la información facilitada por Hidrolara, aporta gran ayuda en el momento de integrar los datos en una sola capa para dar así, a la búsqueda de zonas potenciales de acuíferos.

5.9 Mapa de caudales

En la figura 4.27 del capítulo 4, se representa los caudales extraídos de los pozos y se expresa en litros/segundos. Se observa que los mayores valores de caudales se ubican en las poblaciones de Duaca, Eneal y Nonavana, la zona de Duaca-Eneal está cerca de la fuente de aporte de sedimentos, lo cual favorece a la deposición de gravas gruesas y arenas, excelentes para la acumulación de agua subterráneas, observando este mapa se da una idea de cómo son los caudales en toda el área de estudio y así llegar a la conclusión de este mapa cuales son los mejores acuíferos debido a su bombeo de caudales.

5.10 Niveles estáticos y líneas de flujo

Para tener una visión completa del comportamiento de los acuíferos, se elaboro el mapa de niveles estático el cual nos da una idea del nivel de las aguas en los pozos presentes en el área de estudio, este nivel varia entre los 28 y 137 msnm como se puede observar en la figura 4.28 y 4.29 del capitulo 4.

Se observa que en la zona de Duaca-Eneal hasta llegar a nonavana por la margen derecha las profundidades están entre 55 y 100 m.s.n.m. Es importante conocer la profundidad de la capa de agua respecto a la superficie, para el momento de la perforación y ubicar las mejores zonas.

Por otro lado es importante tener en cuenta la dirección de flujo de las aguas en el interior de los acuíferos, esta importancia radica en que de esta manera podemos saber el recorrido que realizan esta agua. En el mapa de líneas de flujo podemos observar el comportamiento de las aguas en el interior de los acuífero, pudiéndose observar claramente que hacia el Norte de Duaca-Eneal las aguas se desplazan en dirección Sur y Suroeste, situación que va cambiando a medida que recorre el área y en la zona Noroeste la aguas migran en sentido Sureste.

Se observa hacia el Sur en la zona de Nonavana, en donde convergen casi todas las aguas, esto es debido a que justo en este punto se sitúan las cotas mas baja. Toda la validación de este proceso se integra en el Sistema de Información Geográfica para así visualizar todos los parámetros en un mismo mapa y obtener las zonas potenciales con existencia de acuíferos en conjunto con los datos de prospecciones geofísicas hechas cerca de los acuíferos obteniéndose de este análisis que las mejores zonas son Duaca, El Eneal y

parte de Nonavana ya que en estos sectores se encuentran los mejores caudales y las mejores condiciones litológicas y climáticas, las zonas medias estarían en los alrededores de el Cují, Tamaca y la Sábila, ya que las condiciones no son muy favorable y los caudales extraídos en esas área son muy baja.

5.11 Zonas Potenciales de acumulación de Agua subterráneas

El mapa de zonas potenciales reflejan los resultados de la metodología planteada. Consiste en la integración de todos los mapas temáticos obtenido a través de cada procesamiento de datos para luego clasificar las zonas en altas, media y baja, esta zonas se ubican según la geomorfología presente en cada área y el tipo de litología si es favorable o no.

Las zonas con mayores probabilidades de que existan acuíferos o no en el área de estudio se pueden distinguir según los colores azul oscuro, azul claro y rojo.

Las áreas que presentan un color azul oscuro son las que mayor probabilidad de encontrar grandes acuíferos rentables, lo cual s corrobora con las perforaciones hechas en estas áreas donde arrojan mejores resultados y es la zona que presentan mayores caudales de extracción y donde la recarga de por pluviometría y por drenaje subterráneo son altos, este ultimo es debido a que en esta área pasan quebradas con agua permanentes. La zonas con probabilidades media son áreas de color azul claro las cuales se encuentran en las zonas de explayamiento, aquí las condiciones son un poco desfavorable en el sentido de que es una ara un tanto seca, las lluvias son un poco

escasas y las condiciones litológicas son casi desfavorable la cual hace que en tiempos de lluvias la densidad de drenaje sea alta, además de esto no pasan quebradas permanentes por estas áreas haciendo casi nula la infiltración subterráneas y se corroboran según las perforaciones hechas en la cual los caudales son muy bajo están entre 5 y 7 l/s debido a esta información recabada e integrada se clasifican como zonas con probabilidades medias.

La zonas con probabilidades baja o casi nula son aquellas zonas de color rojo y es en estas áreas donde las condiciones litológicas son totalmente desfavorable ya que la mayoría son rocas impermeables compuestas por rocas ígneas haciendo que la infiltración sea nula, las condiciones climáticas son desfavorable ya que las lluvias son muy escasas y el área esta desprovista de quebradas haciendo nula la infiltración por pluviometría y subterráneas.

Este mapa se puede observar en la siguiente figura.

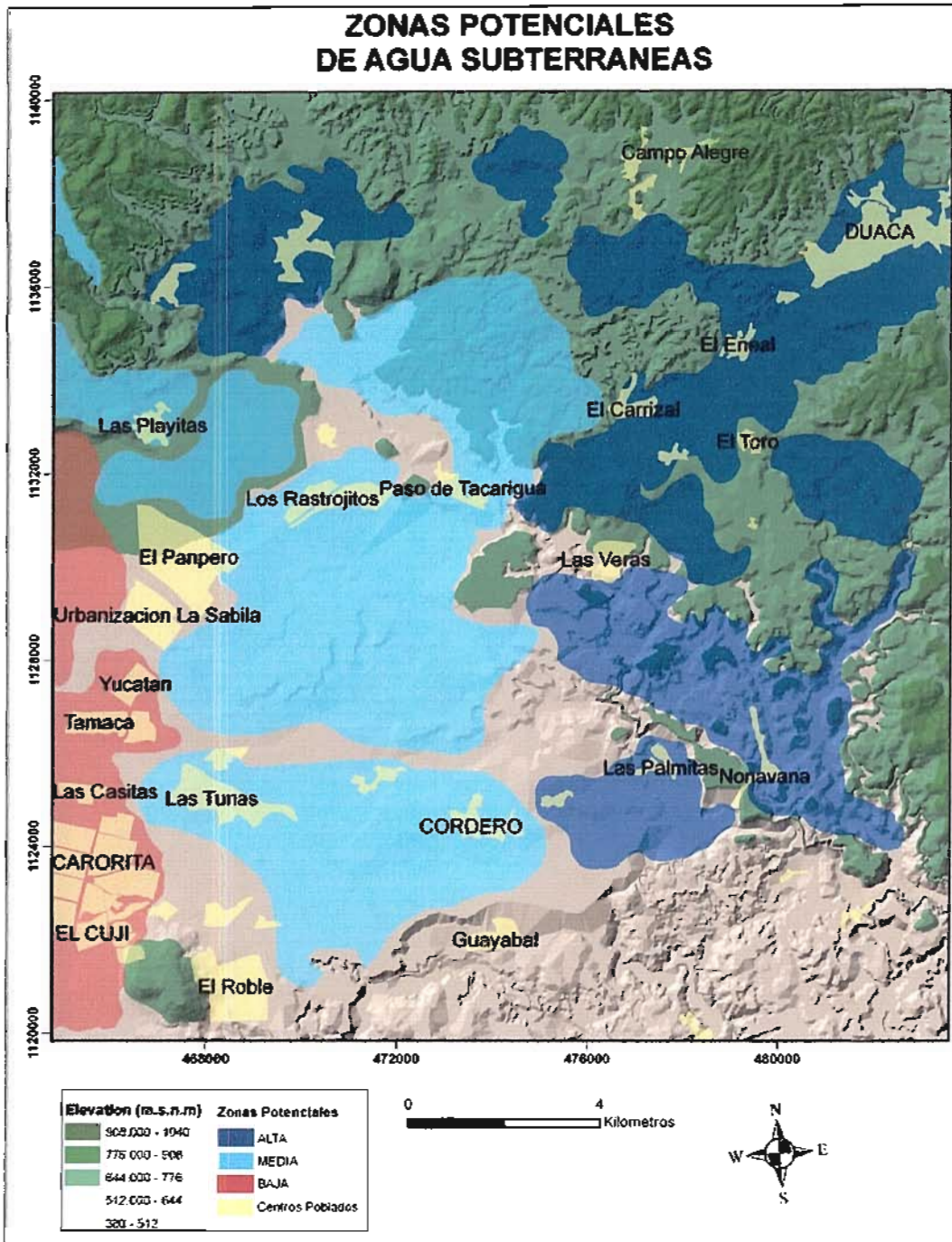


Fig 5.10: Zonas potenciales de agua subterranas

Se presenta también el modelo en tres dimensiones del terreno en verdadero color donde se puede constatar las condiciones real del terreno y los drenes de las quebradas que pasan por las zonas coloreadas como se explico anteriormente.

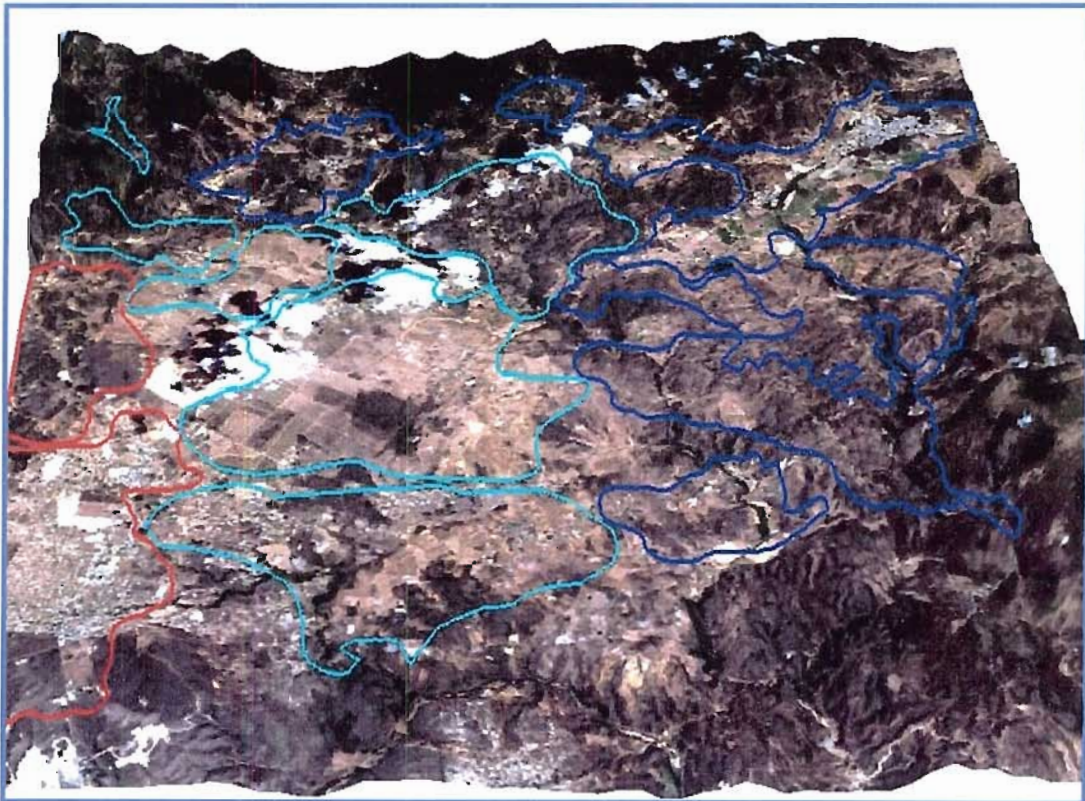


Fig 5.11: Modelo digital de elevación en verdadero color con las zonas potenciales de agua subterráneas

Es necesario contar con información reciente para obtener mejor detalle y precisión, los datos de prospecciones geoelectricas fueron de gran ayuda ya que se pudo tener una idea de las composiciones litológicas a nivel del subsuelo.

5.12 Análisis General

Realizando un análisis general del enfoque de este estudio titulado Evaluación de Acuífero mediante la interpretación de Imágenes Satelitales y uso de Sistema de Información Geográfica y describiendo algunos parámetros mas importantes se puede decir que, el conjunto de técnicas incluidas en esta metodología permiten definir las relaciones entre las características superficiales del área de estudio y las del subsuelo.

El análisis de la imagen Landsat y Spot demostró ser una importante herramienta para dar una visión instantánea del área de estudio y como fuente para la elaboración de los mapas que guían a la generación de un mapa final integrado, sin dejar de un lado que estas interpretaciones tienen que ser comprobadas con verificación de campo, para obtener elementos confirmativos de las áreas resultantes con posible potencial de agua subterráneas.

El mapa geomorfológico realizado tomando en cuenta las series de suelo, es importante porque incluye un componente edafológico. Los suelos presente en el área de estudio varían desde arcillosos hasta arenas y gravas donde en algunos sectores son bastante homogéneos pero predominando en toda la zona los suelos limos arenosos en algunas áreas, estos suelos presentan una baja estabilidad estructural y muy sensible a la erosión hídrica.

La otra etapa del estudio de suelos en que debería intervenir la clasificación geomorfológica corresponde a la descripción de los perfiles litológicos de cada Sondeos Eléctricos Verticales, para los cual se establece una relación de estos con la posición geomorfológica que ocupan, lo que ayuda a definir

las distribuciones de las posibles capas subterránea presente en cada sector.

Los estudios geológicos permiten definir la naturaleza y características de las formaciones y los límites de cada acuífero. En la zona entre El Cují-Eneal los acuíferos están constituidos por el relleno aluvial asociado a depósitos coluviales cuaternarios, que de acuerdo con los perfiles litológicos están formados por gravas y arenas entre un conjunto predominantemente de capas arcillosas, con una distribución horizontal y vertical muy homogénea. Todos estos suelos cuaternarios se emplazan sobre un basamento de rocas compactas más antiguas (Paleoceno - Eoceno).

El patrón de una red hidrológica tiene una relación directa con la litología que atraviesa el cauce. La densidad de drenaje es un índice que está relacionado con el tipo de relieve y la litología.

El análisis morfométrico y de la red de drenaje se desprende que la rapidez en la concentración de las aguas se ve favorecida especialmente por las pendientes, de manera que son las cabeceras de cada subcuencas las que presentan las mayores crecidas debido a esas pendientes superiores que facilitan una rápida concentración de las aguas.

La baja densidad de drenaje contribuye a las altas tasas de infiltración y por lo tanto favorece la acumulación del agua subterránea. Las altas densidades de drenaje se asocia a pendientes muy empinadas en las laderas que terminan en valles profundos en forma de V, excavados en la roca como es el caso de las áreas montañosa al norte de Duaca.

El mapa de pendiente es un factor importante para la acumulación de agua subterránea.

El análisis de las pendientes se genera inicialmente del modelo digital del terreno utilizando las curvas de nivel base como tema de polilínea digitales. En el mapa de pendiente la mayoría del área de estudio muestra más o menos una topografía plana excepto algunas colinas que afloran en su parte central, Las elevaciones mínimas y máximas son 520 m y 1040 m respectivamente. Casi el 80 por ciento del área total muestra 0-28% de pendiente, asimismo las pendientes suaves se han calificado como las más importantes, ya que sirven para acumular grandes masa de agua y se consideran como la condición más conveniente. Las áreas que tienen pendientes muy altas o escarpadas se consideran completamente desfavorables como es el caso de las montañas que están al Norte de Duaca y al Este de Nonavana.

La pendiente también se relaciona con la climatología, ya que en áreas de menor altura las temperaturas tienden a ser mayores aumentando la evaporación del agua que llega de las precipitaciones, mientras que en zonas altas la temperatura es menor y el agua proveniente de la lluvia no se evapora tan rápidamente y escurre hasta las zonas bajas aumentando la recarga natural si la litología presente en el área presenta buenas condiciones de permeabilidad.

El terreno geológico corresponde en la zona central una planicie de explayamiento de edad Cuaternaria ya que esta constituido por gravas finas y sedimentos finos aluvionales. El material permeable se encuentra intercalado con sedimentos impermeables que sirven como sello (arcillas).

En cuanto a la densidad de drenaje la zona ocupa valores entre 0.841 y 0.913 Km/Km², indicando que esas áreas deben constituir zonas permeables, debido a que esta función es inversa a la permeabilidad. También se considera un índice importante que contribuye a la acumulación del agua subterránea, ya que en materiales como arenas y gravas favorece la infiltración del agua hacia el subsuelo y por lo tanto queda muy poca agua en superficie que pueda alimentar los cauces.

Los perfiles litológicos y los estudios realizados anteriormente a partir de pruebas de bombeo en los pozos ubicados dentro del área de estudio, permiten corroborar que bajo las zonas clasificadas como altas potencialidad existen capas acuíferas constituidas por sedimentos permeables (arenas y gravas) e impermeables (arcillas).

Las zonas potenciales de agua subterráneas generadas a través de esta metodología fueron verificadas con resultados obtenidos en otros estudios donde se han generado mapas de espesores de arena y de espesor saturado de arena por métodos de interpolación. Se puede concluir entonces que la validez del modelo desarrollado constituye una buena aproximación de las áreas aptas para acumulación de agua subterránea en la zona comprendida entre El Cují - Duaca.

Capítulo VI

- Conclusiones y Recomendaciones
-

- La metodología aplicada resulta ser adecuada para determinar las zonas con mayor probabilidad de existencia de agua subterráneas en regiones donde el régimen de recarga es pluvial o subterráneo.
- Este estudio ha demostrado las capacidades de utilizar técnicas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica y datos de Sondeos Eléctricos Verticales mediante su integración para la demarcación de diversas zonas potenciales donde pueden existir acuíferos, esta resulto ser valida de acuerdo a la corroboración con pozos existentes y perfiles geoelectricos realizado en algunos sectores del área en estudio.
- La integración de Imágenes de Satélites Landsat y Spot demostró ser una importante herramienta para la elaboración de los mapas temáticos, así como también para proveer una visión general instantánea del área de estudio.
- La técnica del mejoramiento del contraste es útil para facilitar la interpretación visual de una Imagen por incremento de la distinción aparente entre las características de una escena.
- La información generada de un análisis visual se analiza y convierte en mapas digitales temáticos, sin dejar de un lado la cartografía existente y los datos auxiliares para poder emplearla dentro de un modelo SIG, con esta transformación se elaboran los mapas índices de cada integración.
- El empleo de un modelo SIG mediante herramientas de programas que soporten análisis espacial no solo permite la organización y almacenamiento de los datos de un caso de,

estudio, sino que además permite aplicar técnicas conocidas como combinación de mapas cualitativos, las cuales se han usado por su facilidad de aplicación.

- La interpretación de las composiciones multiespectral con fines de diferenciación geología, hidrográfica, geomorfológica y de cobertura vegetal constituyeron la base para el levantamiento de toda la información temática obtenida.
- Se combinan diferentes características, porque ningún factor individual es suficiente, todos están interrelacionados. La geología es de primordial importancia, ya que las secciones y las exploraciones geoelectricas hechas en el área de una manera complementaria muestran que tipo de rocas son susceptibles de contener agua.
- El factor geomorfológico es importante y mas aun si se le adiciona la descripción de suelos y su interpretación genética, también se necesita el conocimiento de otros factores ambientales. El ambiente hidrológico esta en gran parte determinado por la posición geomorfológica.
- Contar con datos sistemático de precipitación resulta ser relevante para determinar el potencial de recarga en toda la extensión del área.
- Los modelos de elevación son la base para lograr la especialización, tanto de la variable temperatura, como la propia precipitación.

- Para confirmar este estudio y la eficacia de la metodología planteada es necesario e indispensable el trabajo de campo, tanto el reconocimiento del área, como la ubicación de los pozos existentes, los cuales deben estar posicionados con GPS ya que la litología de estos pozos permite conocer que materiales componen el subsuelo y su relación con la posición geomorfológica que ocupa en superficie.
- En cuanto a la valoración de las zonas potenciales de aguas subterráneas, la metodología es una aproximación a la realidad, pero tanto mas cercana a la misma, mientras mas información litológica exista a través de las prospecciones geofísica e información hidrogeológico de los pozos.
- En resumen, la metodología desarrollada permite apoyar la prospección de agua subterránea en cuenca de recarga pluvial o subterránea, cubriendo extensas áreas a bajo costo y aplicando las debidas adaptaciones, puede ser extrapolado a zonas con características similares al área de estudio.

Recomendaciones

- Integrar al pensum de Ingeniería Geológica una materia electiva de introducción a los Sistemas de Información Geográfica, ya que es una herramienta que abre horizontes amplios en el manejo y análisis de información geográfica y es indispensable en momentos de actualización para los proyectos de Ingeniería.
- Aplicar la metodología en otros casos de estudio de manera de complementarla y realizarles mejoras
- Para el área de estudio es importante que en futuras perforaciones se realice una descripción litológica mas detallada de los estratos perforados.
- Realizar una mayor cantidad de Sondeos Eléctricos Verticales, con la finalidad de tener una base de datos que proporcione mayor certeza en cuanto a la información de litología para estudios posteriores.
- Realizar un inventario actual de todos los pozos dentro del acuífero del área de estudio, el cual incluya pozos privados ya que si se tiene la mayor cantidad de datos posible mas preciso va ser el trabajo.

Referencias Bibliográficas

- Bellizia A. y Rodríguez D. Consideraciones sobre la estratigráficas de los Estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo. Boletín de geología, volumen IX, número 18. Editorial Sucre. Caracas, 1968 y 1969.
- Bellizia A. y Rodríguez D. Guía de excursión a la región de Duaca-Barquisimeto – Bobare. Boletín de geología, volumen III, número 16. Editorial Sucre. Caracas, 1967.
- Castany, G. Tratado Práctica de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España, 1975.
- Custodio, E. y Llamas, M. Hidrogeología subterránea I y II. Ediciones Omega, S.A. Casanova, 220. Barcelona, 1976.
- Fundación para el desarrollo de la región centro-occidental de Venezuela (FUDECO). Dossier, estados y municipios de la región centro-occidental de Venezuela. Barquisimeto, Edo. Lara, 2004 y 2005.
- Hidrosondeos y Suministros Imanagua, C.A. Estudios de geofísica realizados en los poblados El Eneal, Duaca, Aguada Grande, Edo. Lara. Yaracuy, Junio 2002.
- Díaz R. Hidrogeología de los distritos Crespo y Urdaneta. Universidad Centro-occidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Edo. Lara, 1989.

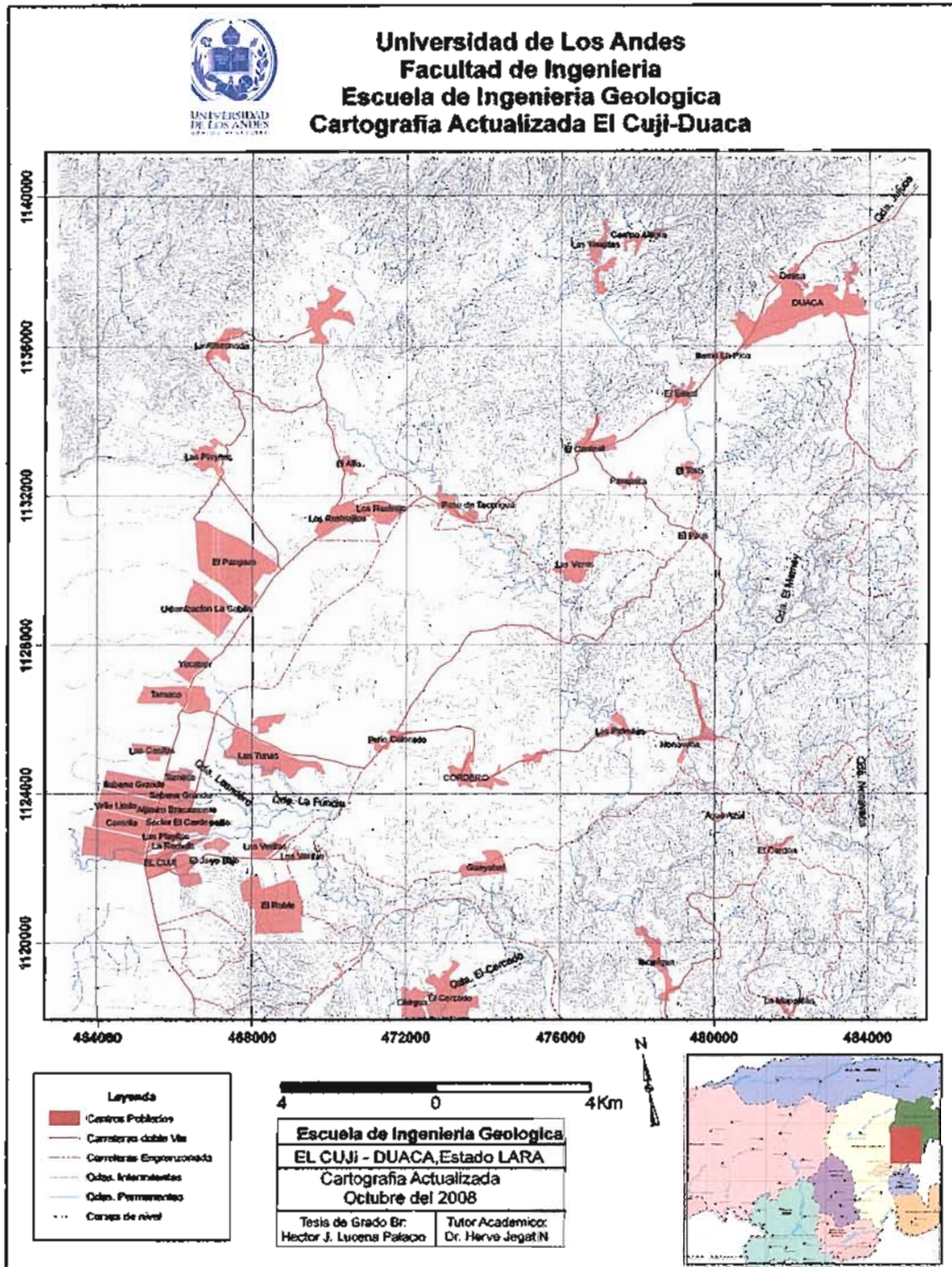
- Conde E., Narváez G. y Sanz J. Evaluación potencial del acuífero ubicado entre las poblaciones de Duaca – El Eneal con fines de abastecimiento urbano. Universidad Centro-occidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Edo. Lara, 2000.
- Stanley, N. Hidrogeología. Edición Ariel, 48. Barcelona, 1971.
- Otero, I. Paisaje, Teledetección y SIG. Concepto y Aplicaciones. Edición Conde del Valle de Salazar. España, 1999.
- CHUVIECO, E. 2002. Fundamentos de Teledetección Espacial. Edición Rialp. Madrid, España.
- PINILLA, C. 1995. Fundamentos de Teledetección. Edición Omega. España.
- RUIZ, L. 1994. Introducción al tratamiento digital de imágenes. Valencia, Universidad Politécnica, servicio de Publicaciones. Carabobo. Venezuela.
- SCANVIC, Jean-Yves. 1989. Teledetección Aplicada. Editorial Paraninfo. S. A. Madrid, España.
- GUTIERREZ G, Manuel.1993. Compendio de Teledetección Geológica. Universidad de Oviedo, servicio de publicaciones. España.49.
- VILCHEZ, V., José, G. 200. Introducción a los Sistemas de Información Geoespacial. Universidad de los Andes. Consejo de desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico. Mérida, Venezuela. 97.

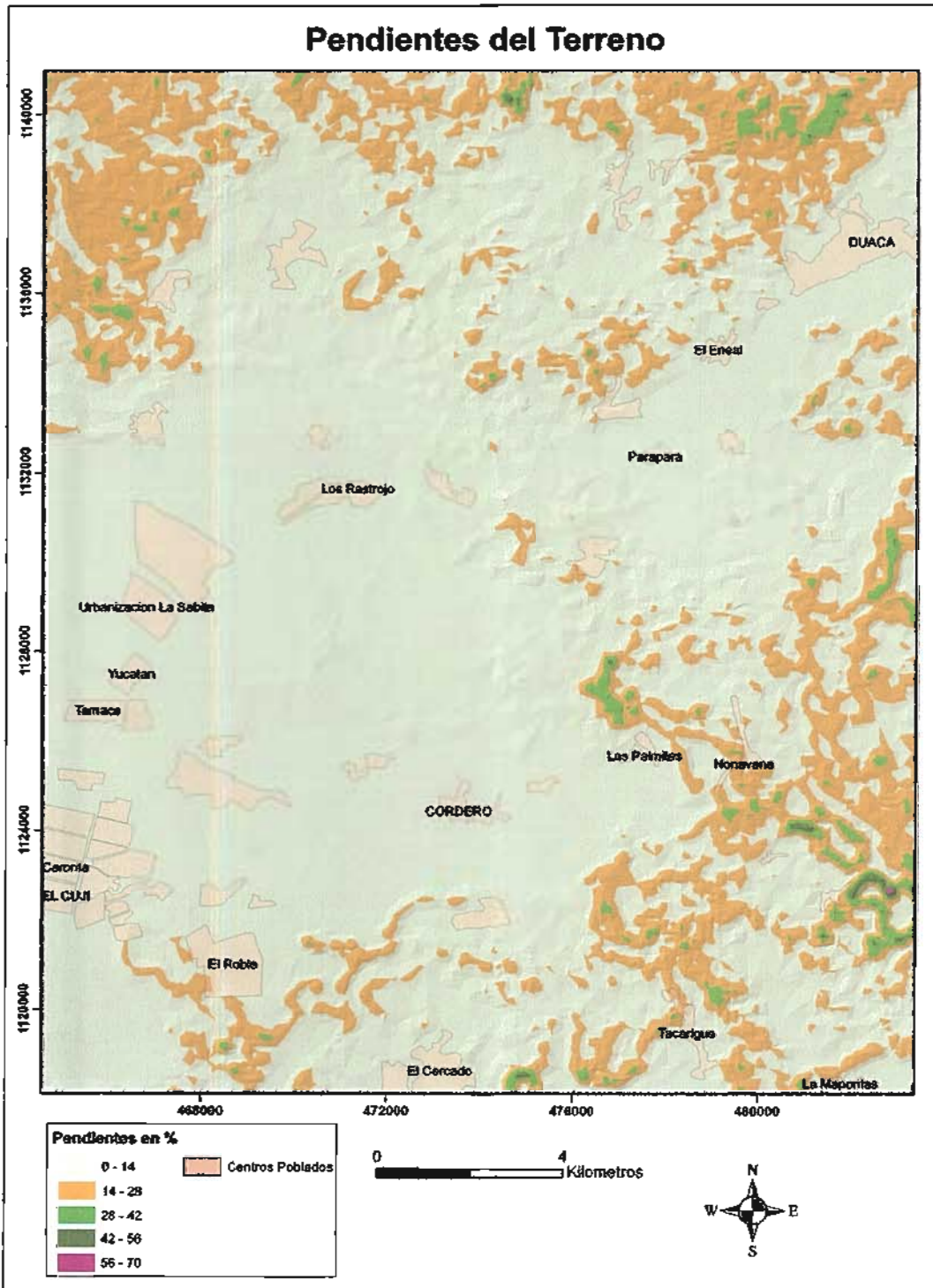
Referencias Electrónicas

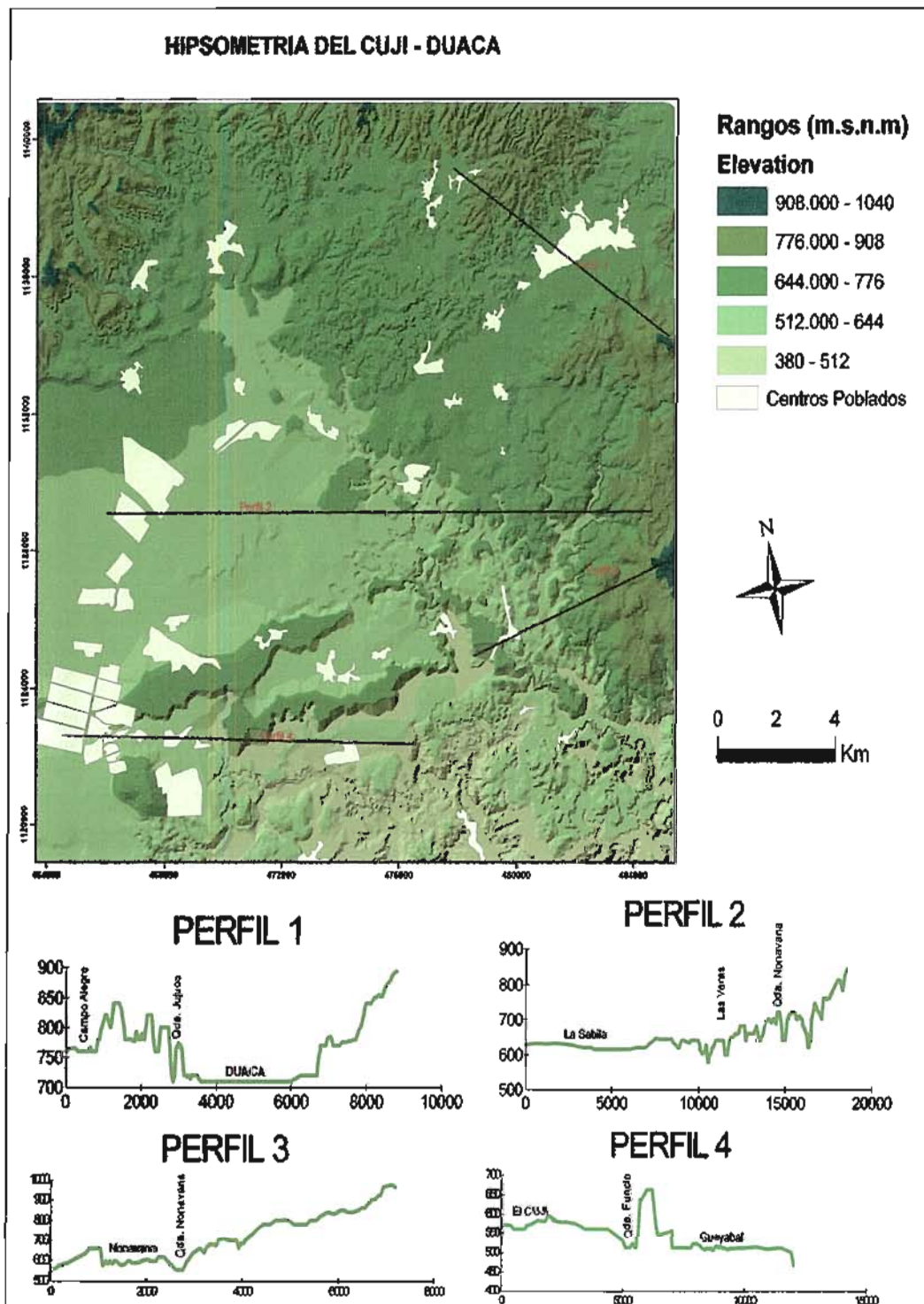
- <http://www.aguas.imn.ac.cr/Pagina6.htm>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Acu%C3%ADfero>
- <http://diagrama.de.piper.pdf>
- <http://club.telepolis.com/geografo/geomorfologia/actagua.htm>
- <http://www.geologia.uson.mx/academicos/grijalva/ambientesfluviales/introduccion.htm>. Fraser, 1989.
- <http://www.labsis.usc.es/labsis/teledet/principal.html>
- <http://www.cyberambiental.com/suplementos/teledeteccion/introduccion.htm>
- www.mipunto.com/venezuelavirtual/mapas/mapa_cuencas.html
- <http://www.explora.cl/otros/agua/ciclo2.html>
- http://aguas.igme.es/igme/educacion_ambiental/libro_aguas_sub/PAGINAS%20HTML.html. Wilson, 1995.
- <http://www.unesco.org/uy/phi/libros/libroPIEB/1-3.html>
- <http://images.google.co.ve/imgres?imgurl=http://aguas.igme.es/>

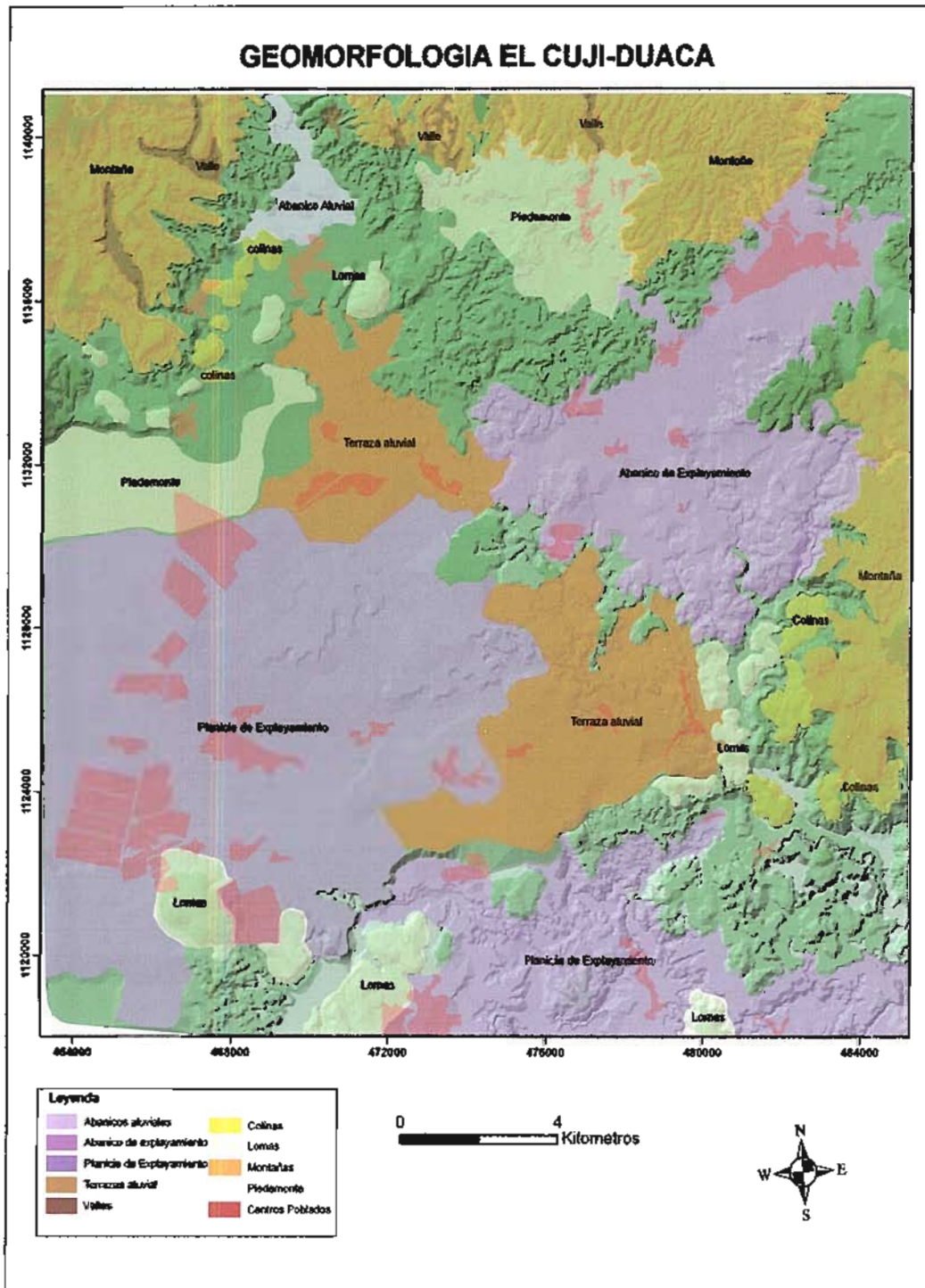
ANEXO

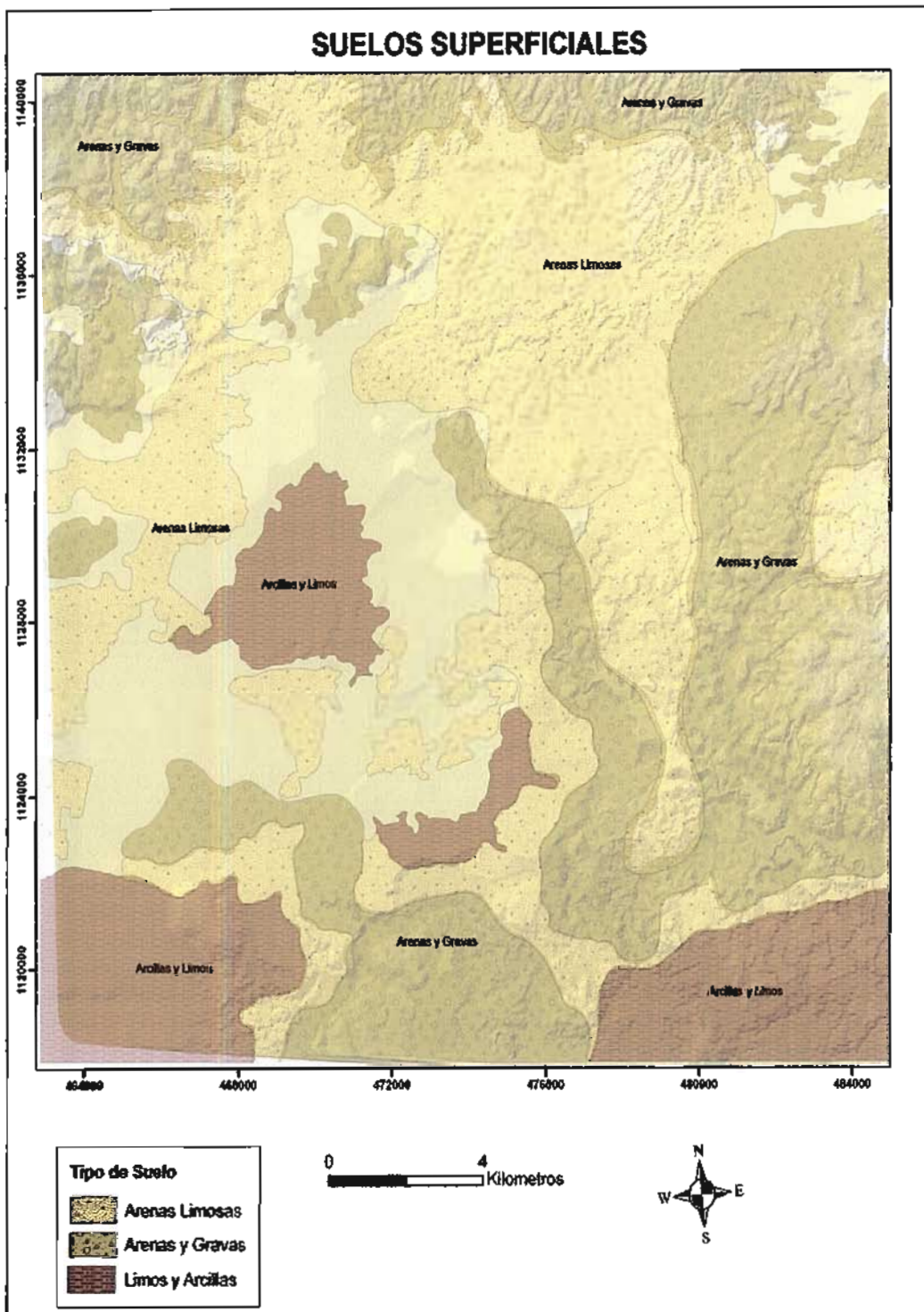
- Anexos de Mapas y Perfiles Litológicos
 - Anexos de Tablas
 - Anexos de Fotografías
-

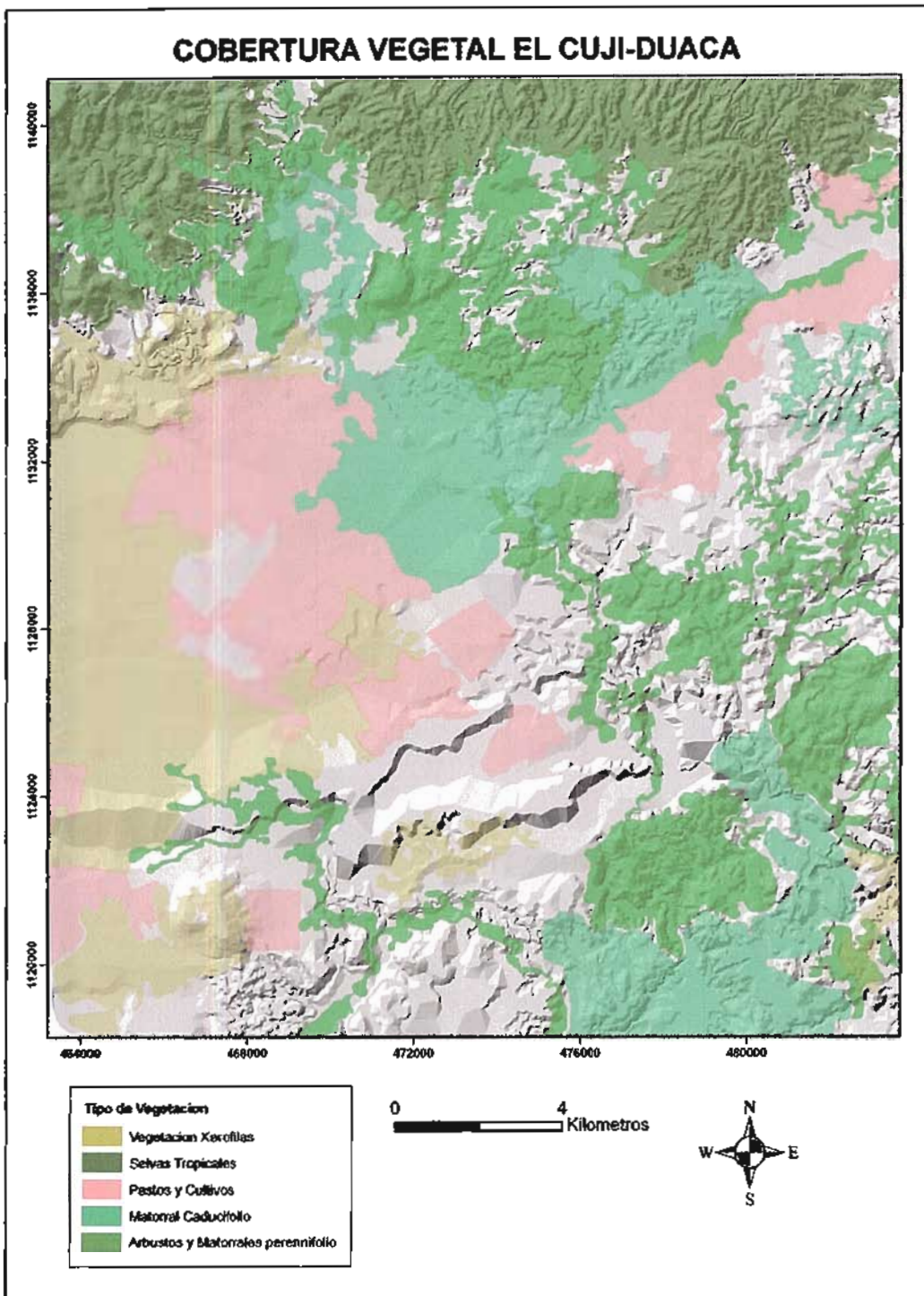


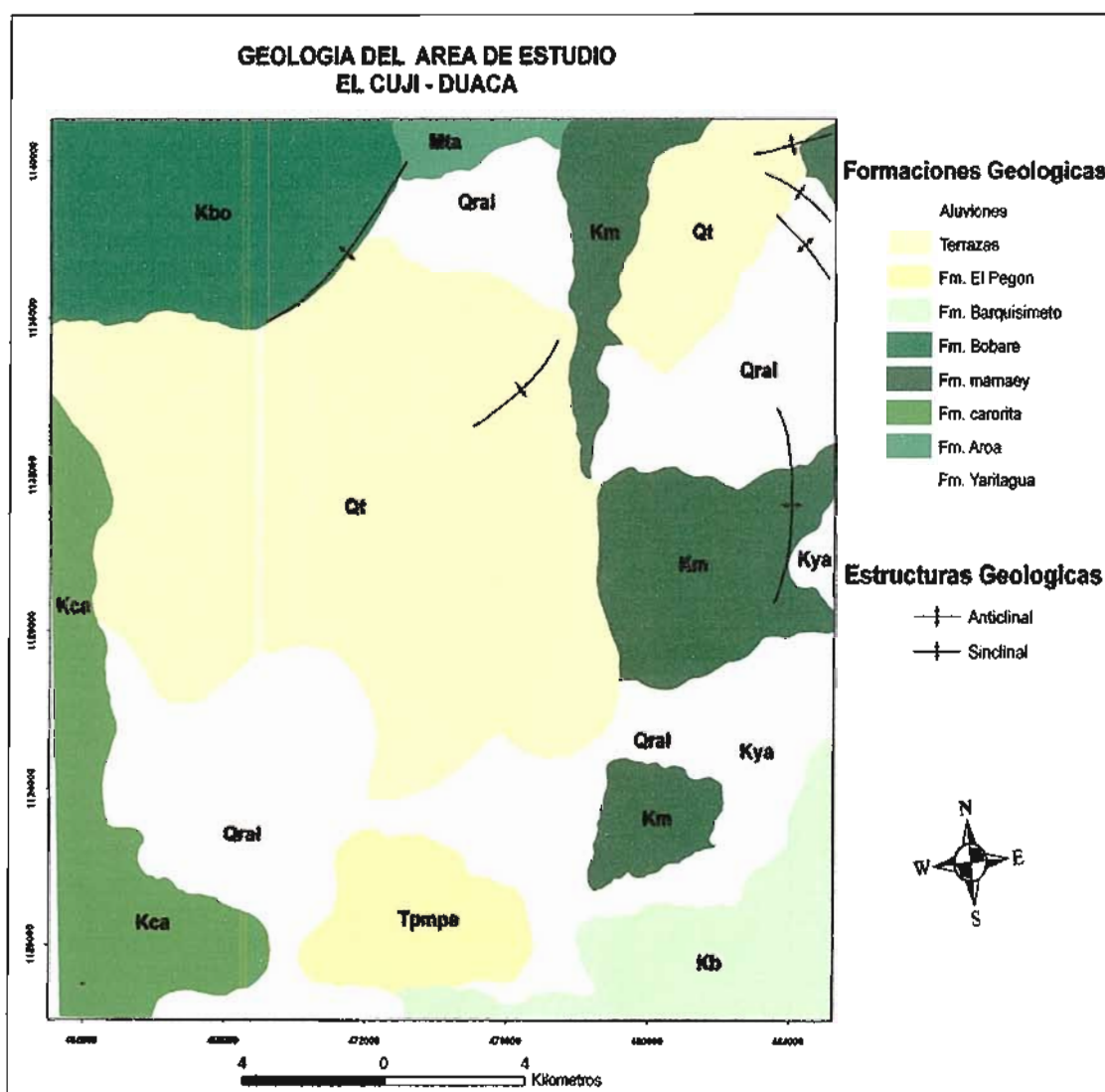


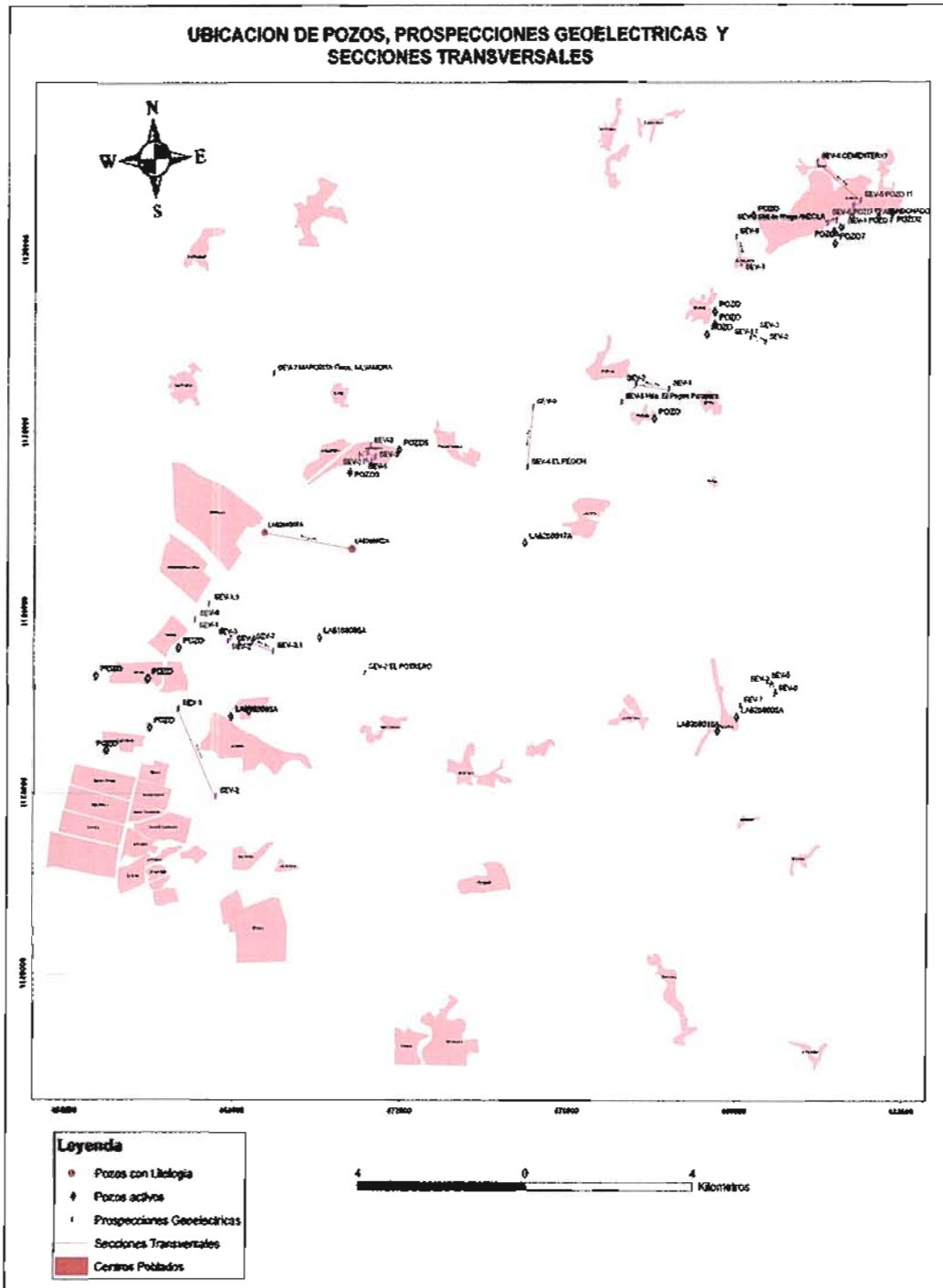


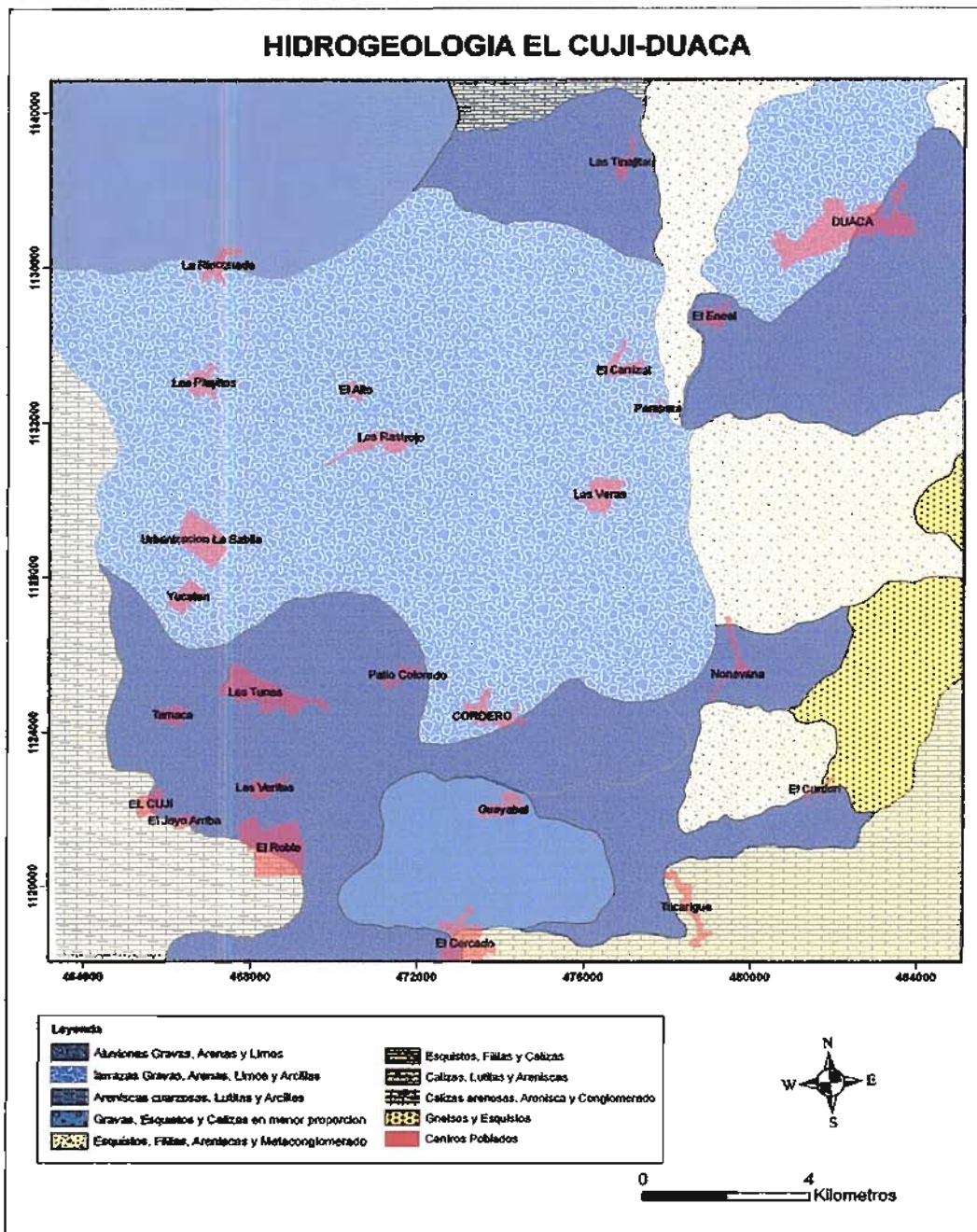


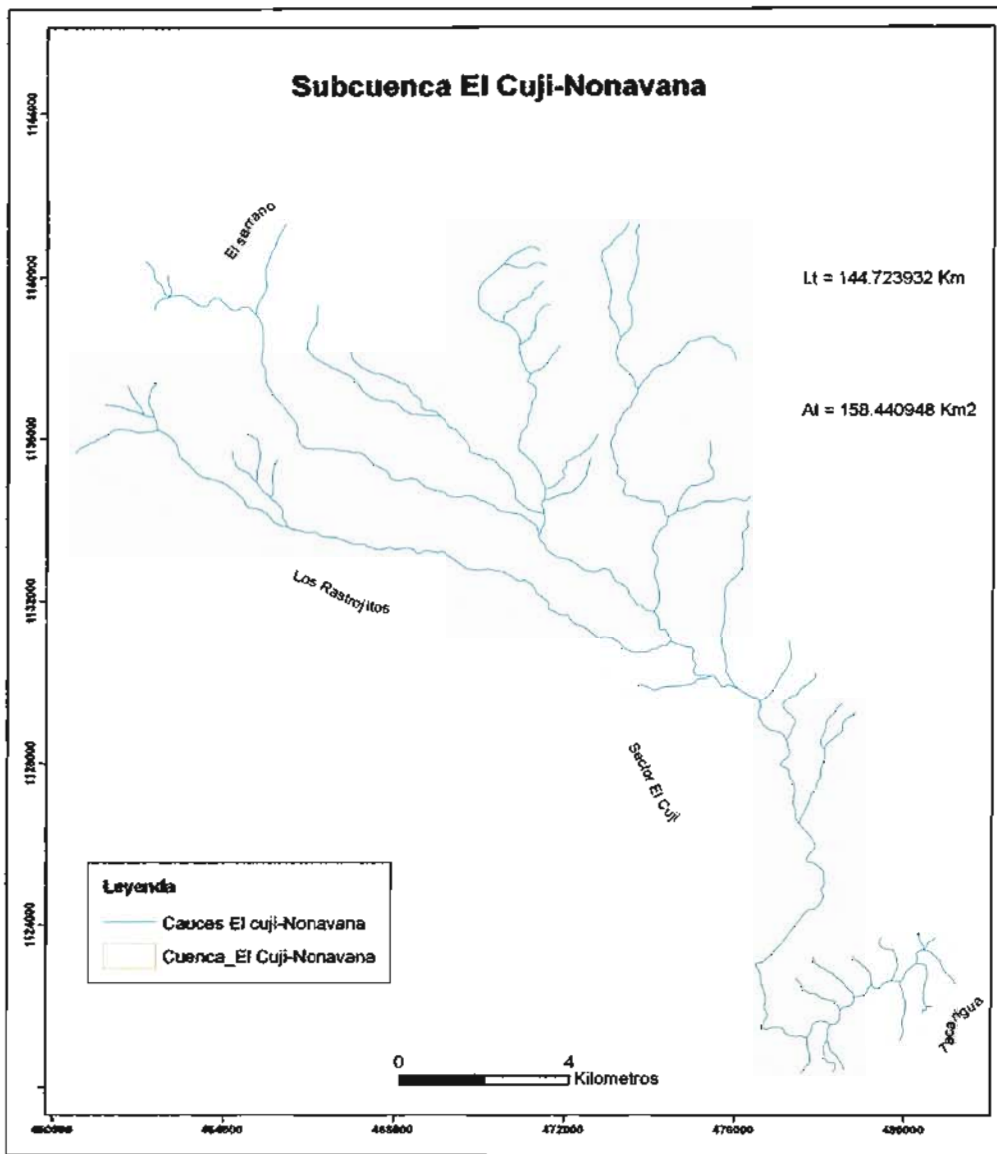


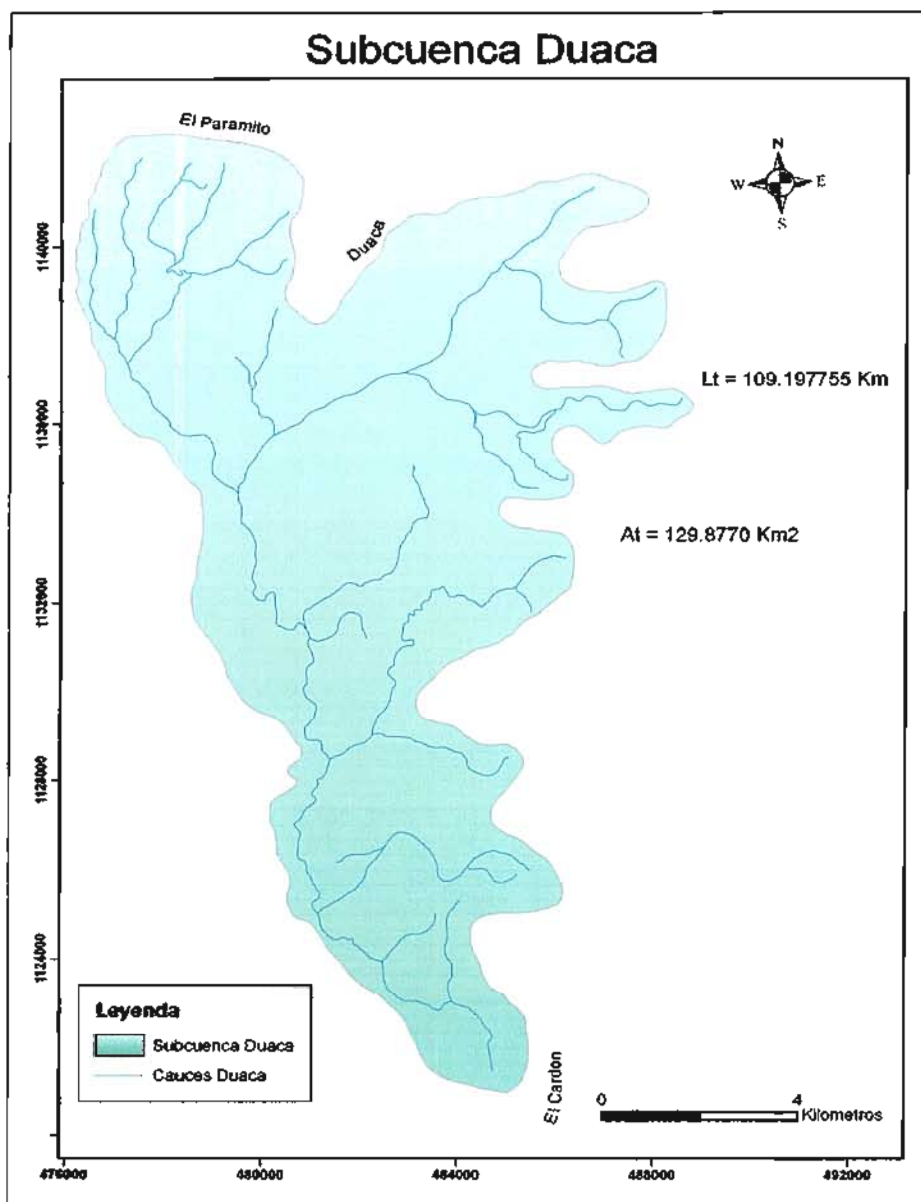


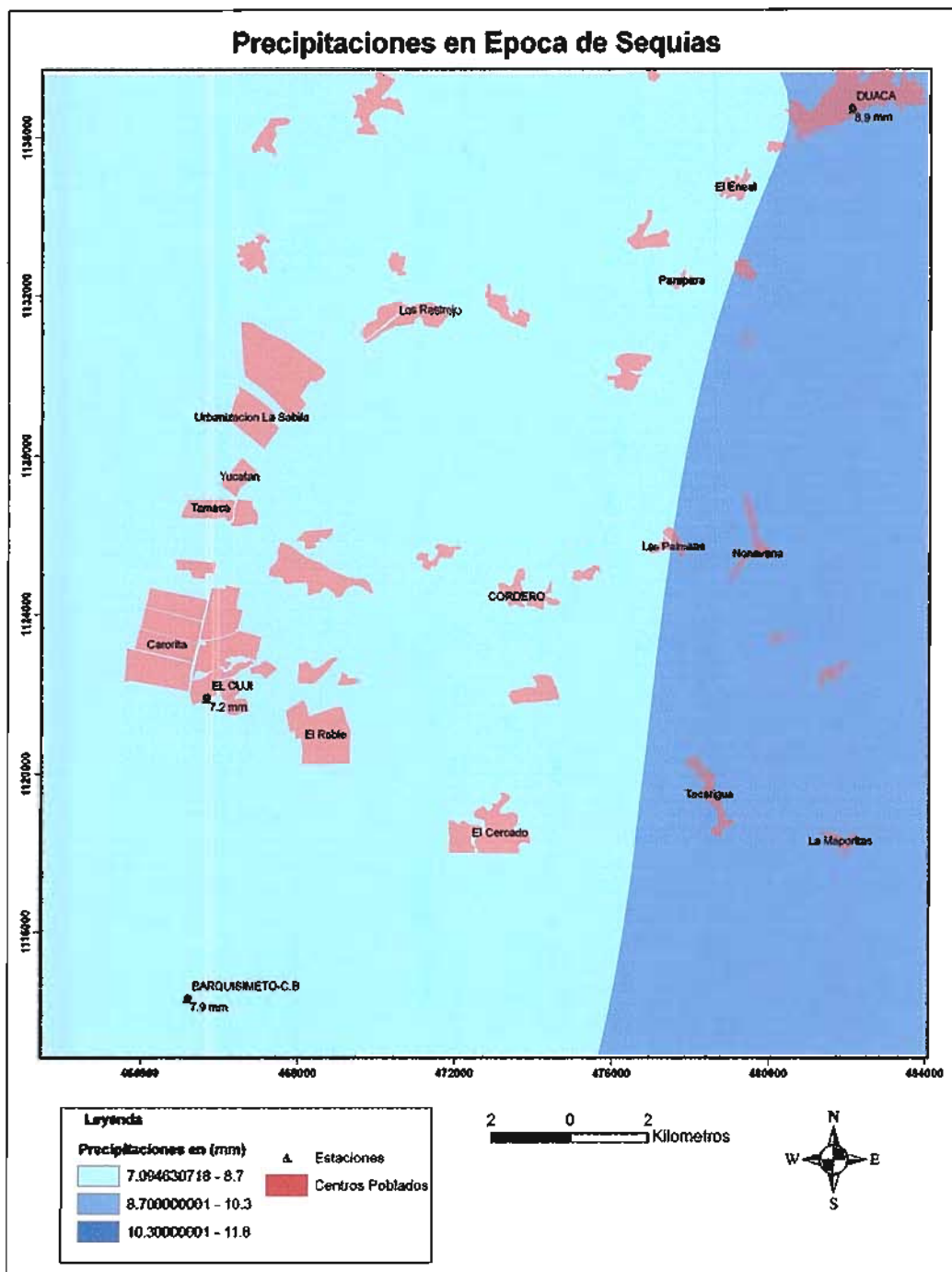


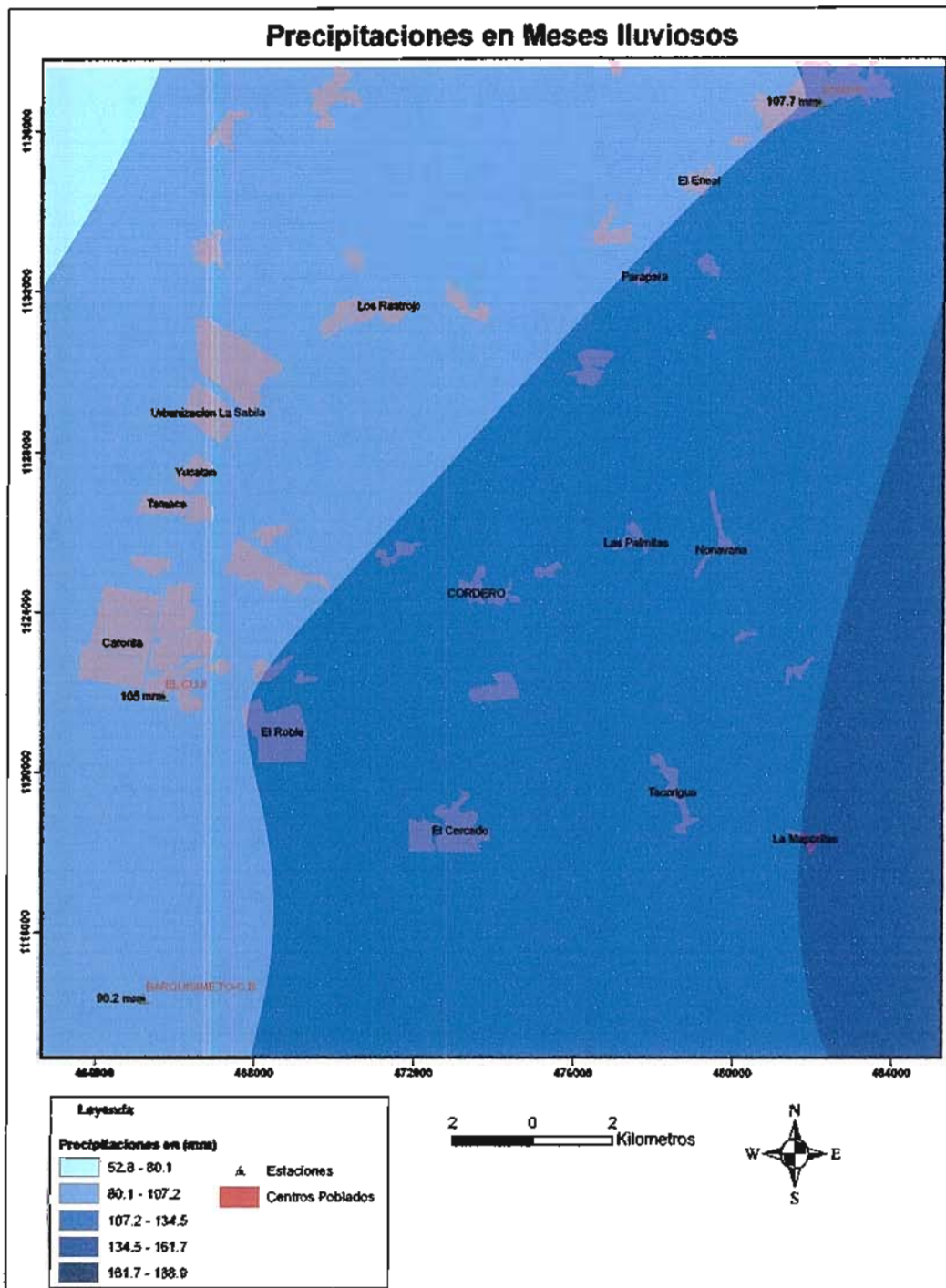


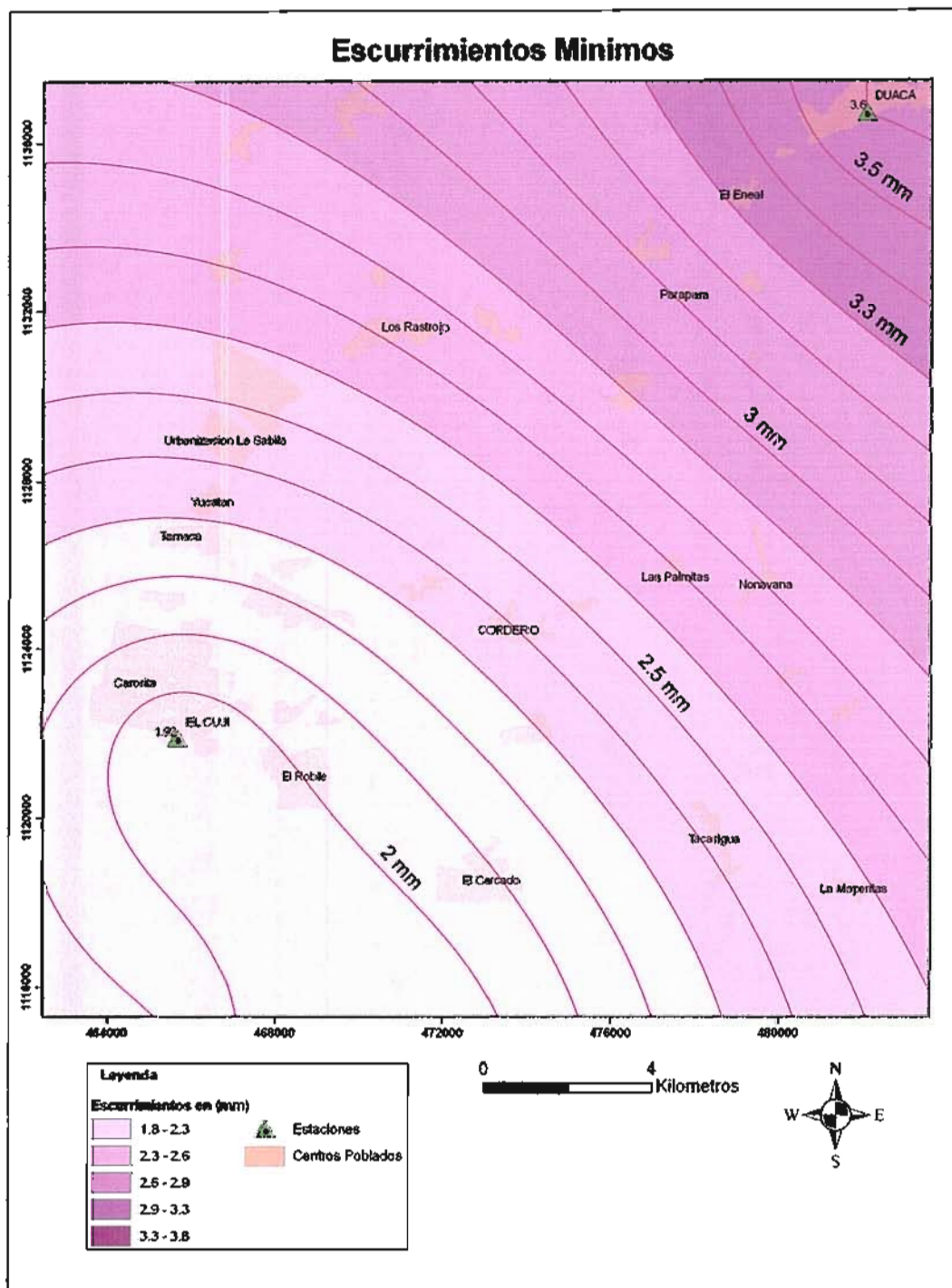


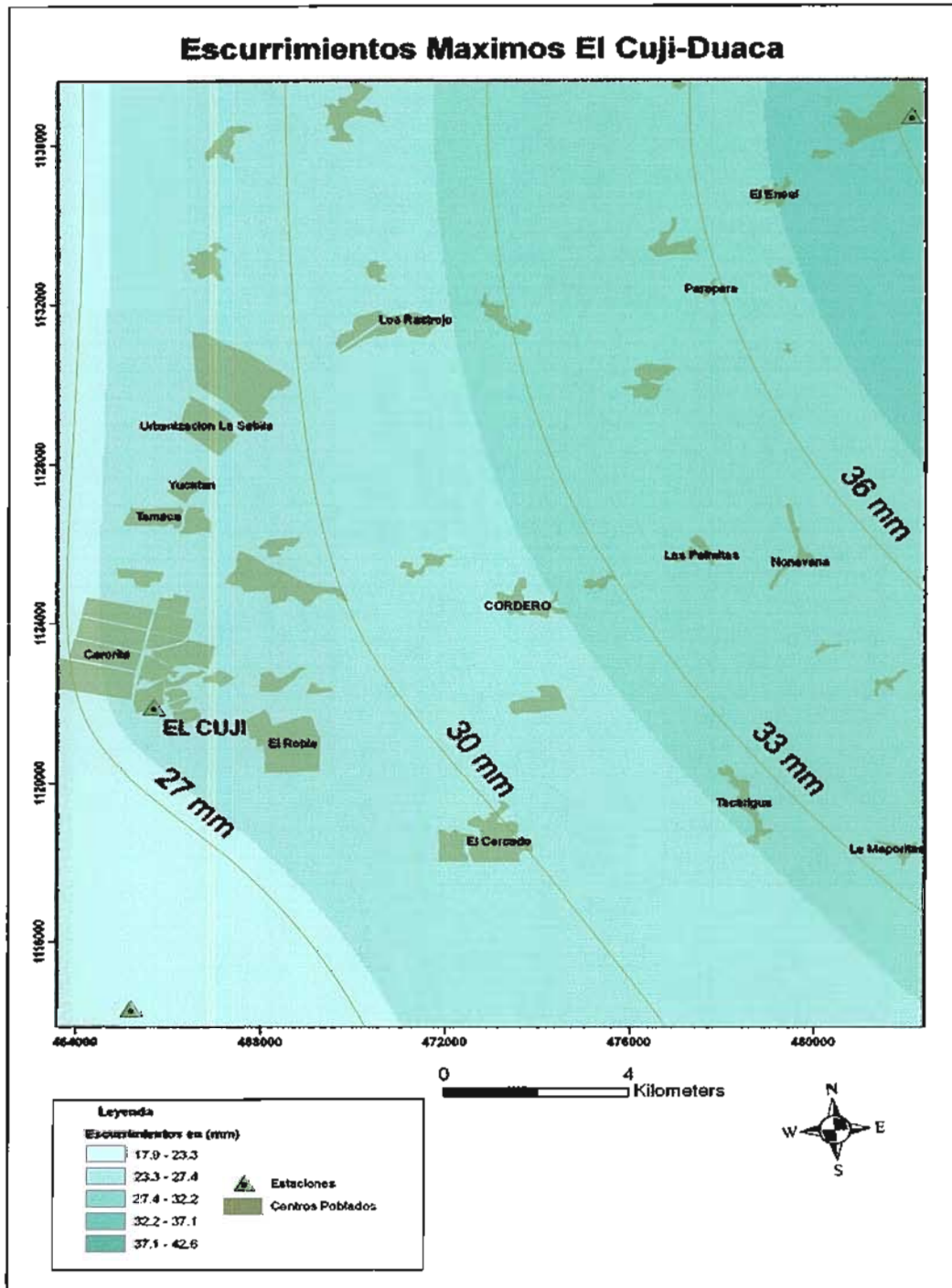


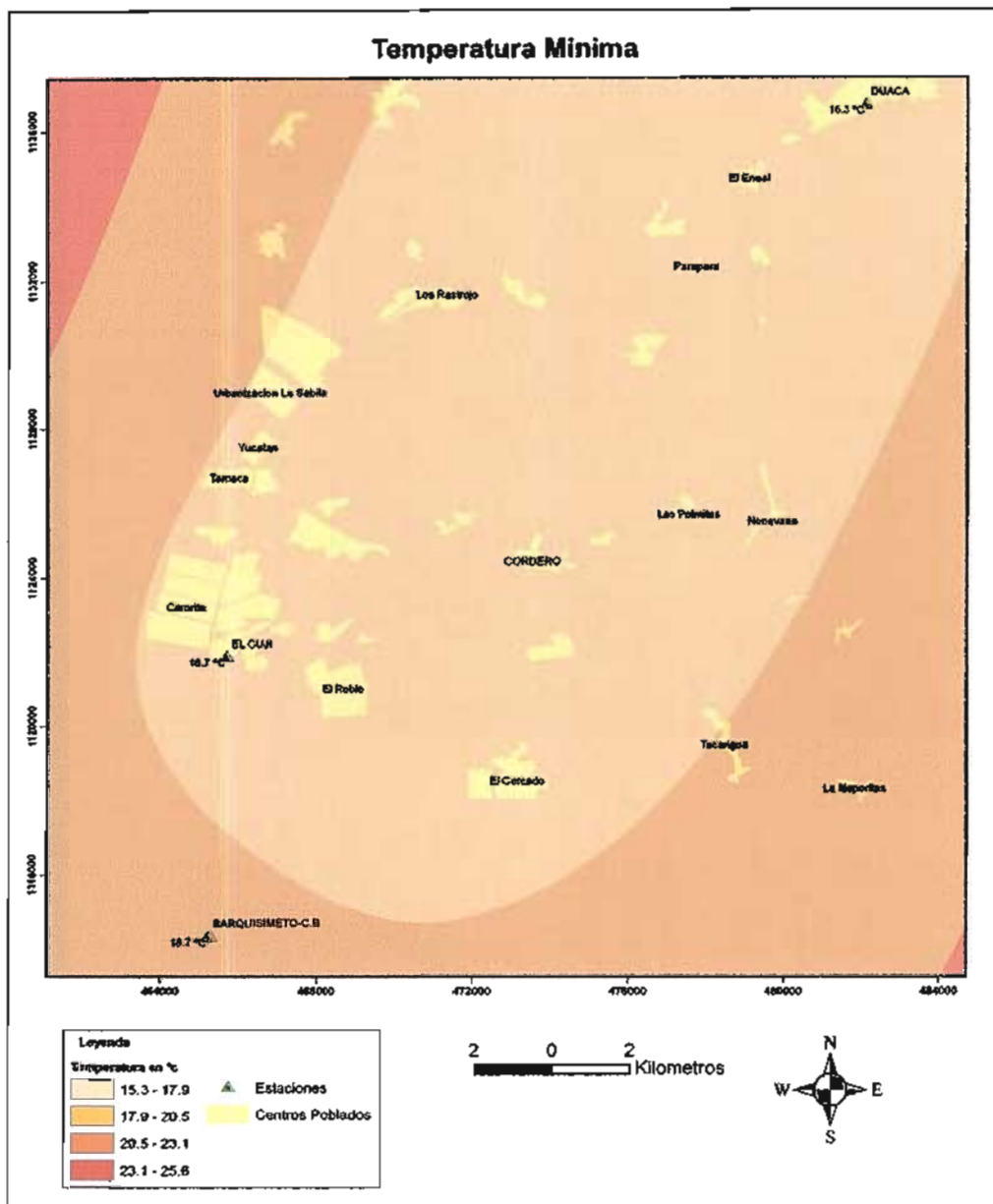


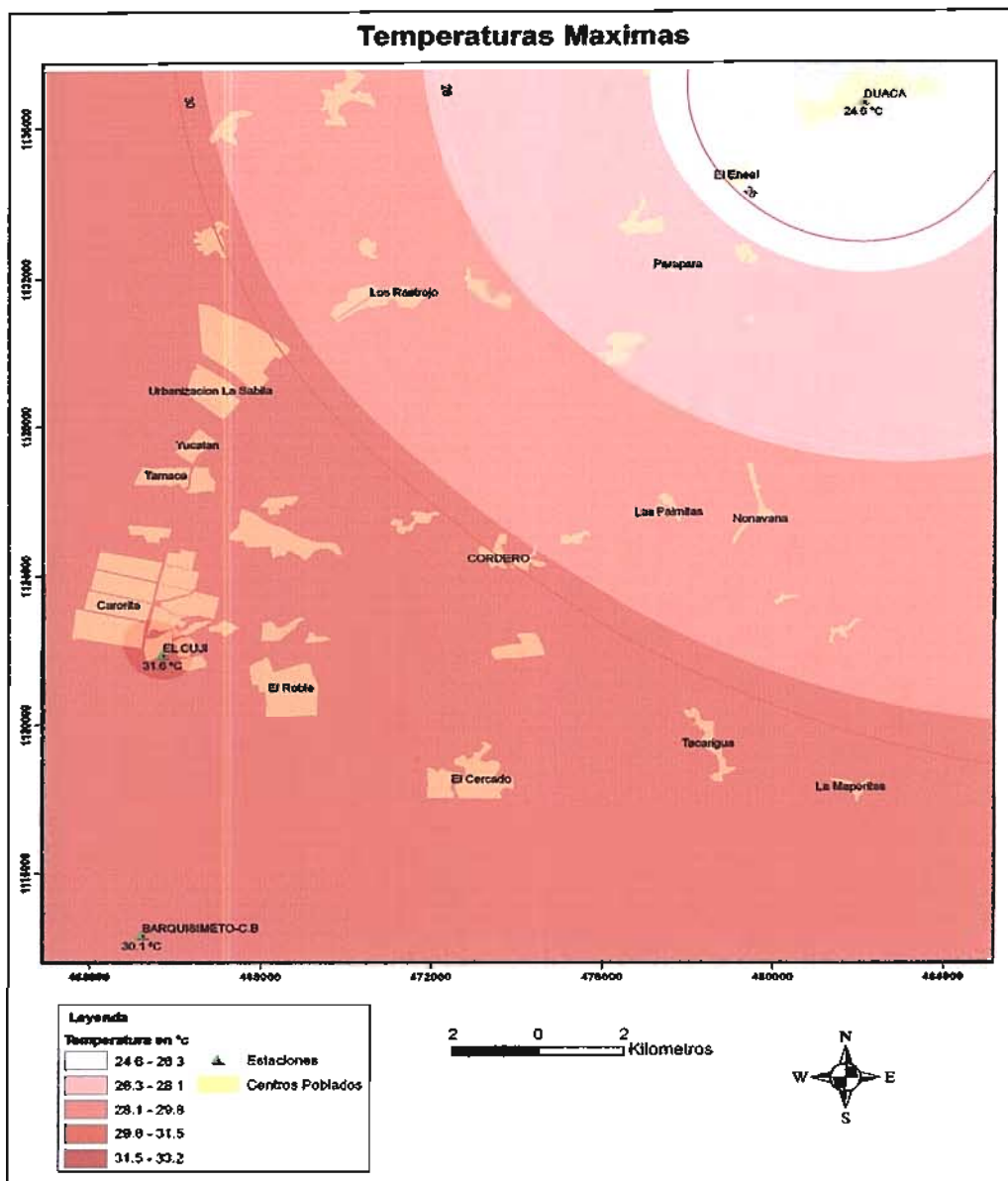


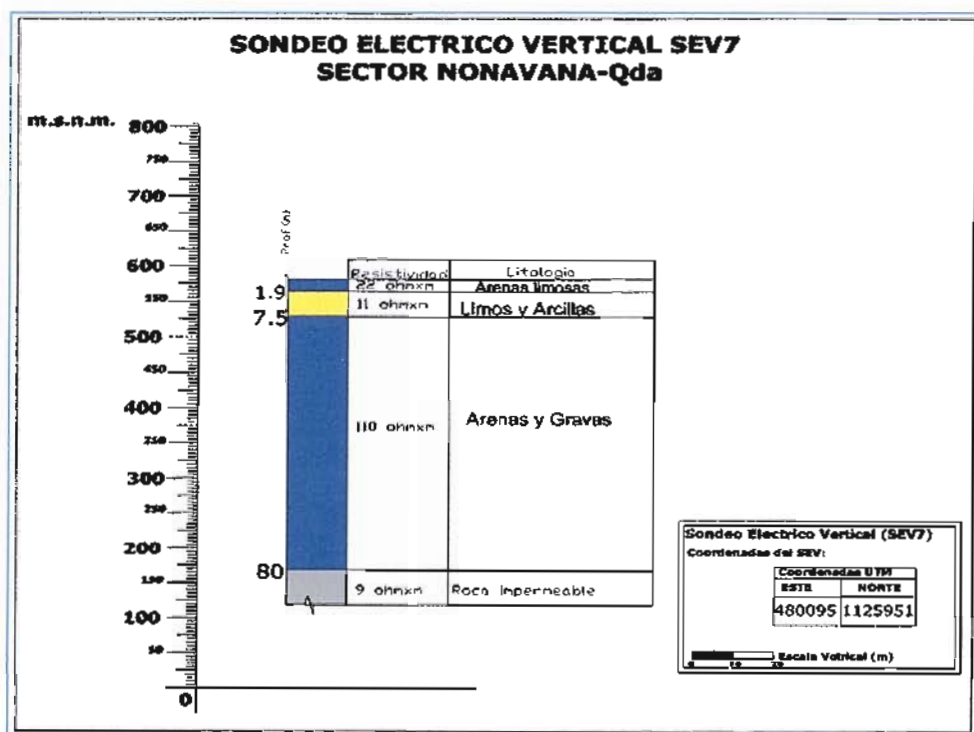
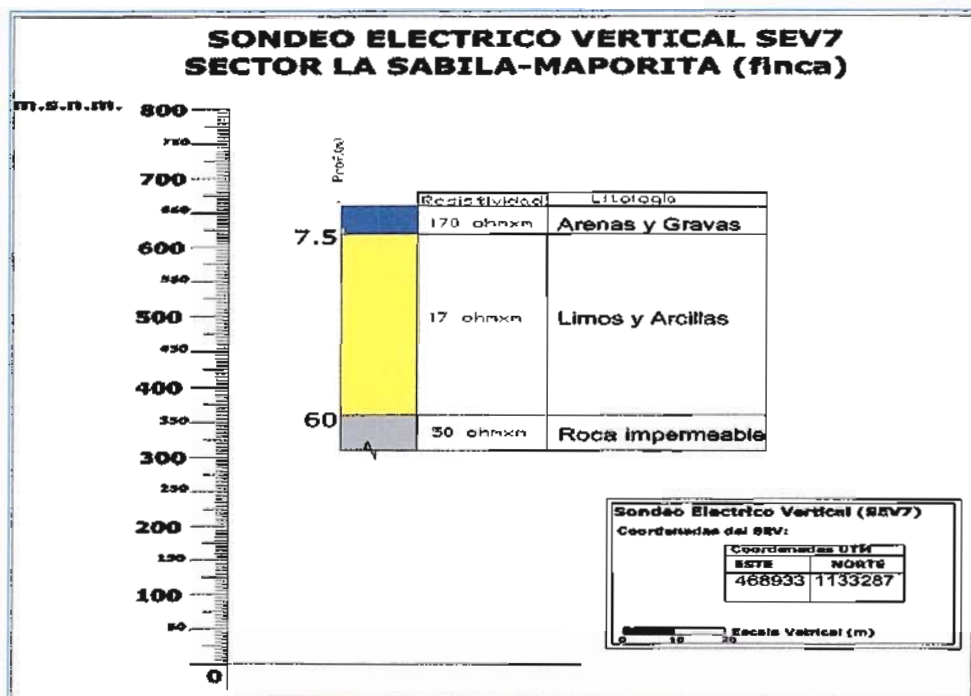


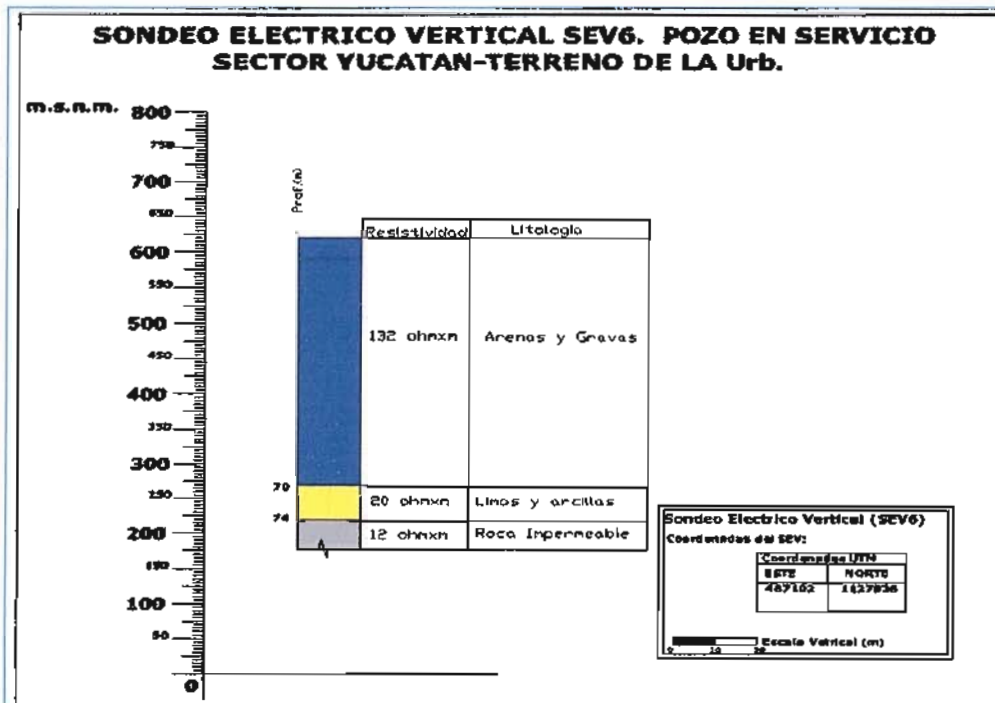
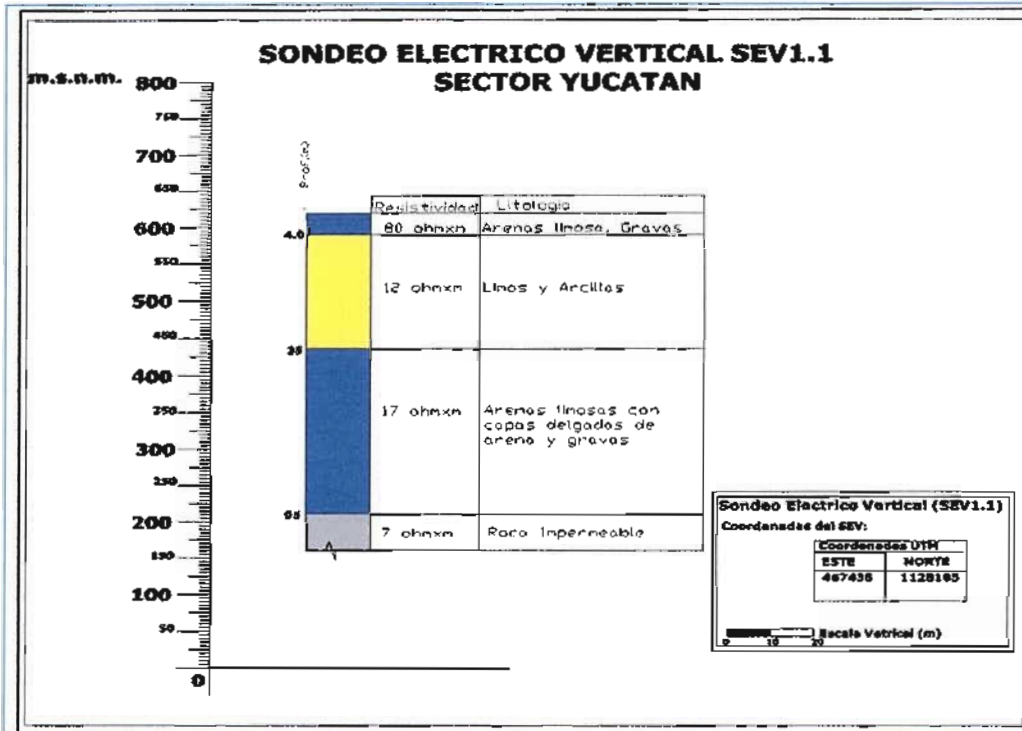


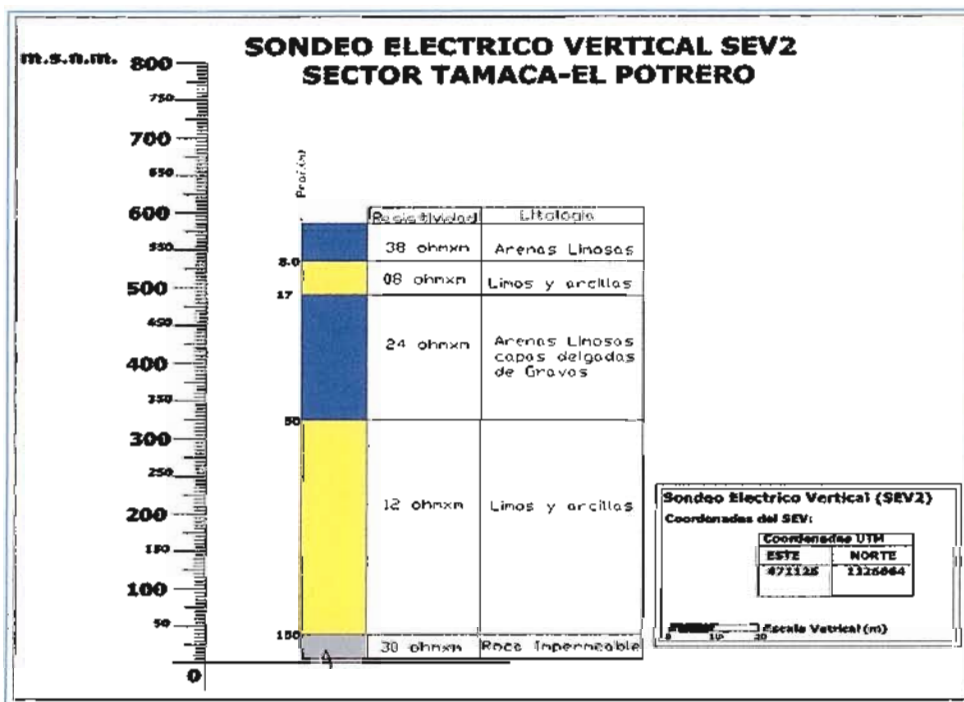
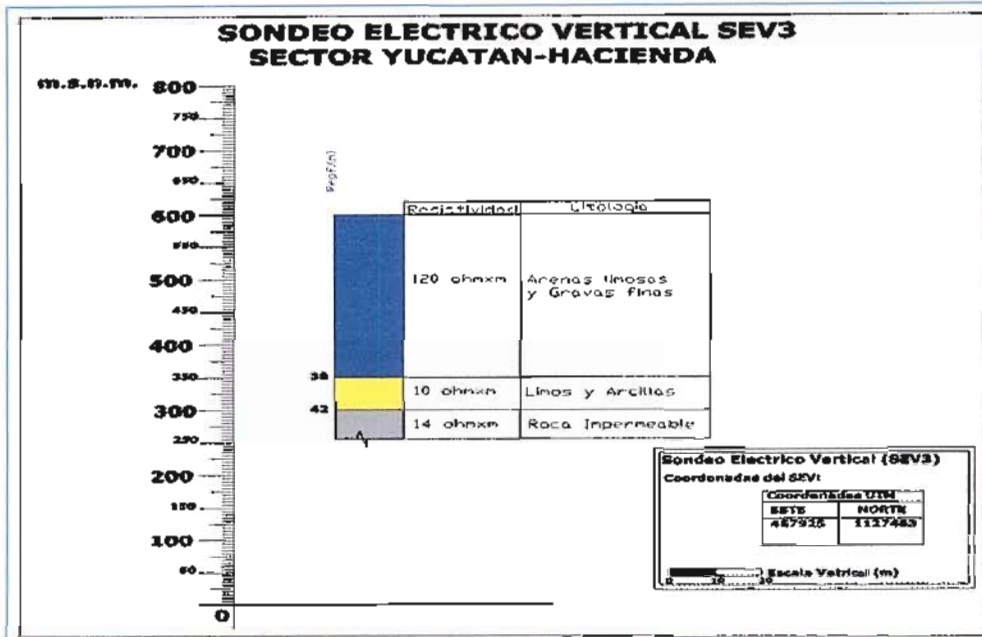












Tablas de Información de Escurrimiento
Estación El Cuji:

Parámetros Meses	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)
Enero	7.2	1.92
Febrero	9.4	2.56
Marzo	12.1	3.2
Abril	59.5	15.84
Mayo	71.1	18.88
Junio	105	28
Julio	91	24.32
Agosto	53.2	14.24
Septiembre	45.1	12
Octubre	50.1	13.28
Noviembre	65.4	17.44
Diciembre	32.2	8.64
Total (mm/año)	600.6	

Estación Duaca:

Parámetros Meses	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)
Enero	7.2	3.36
Febrero	9.4	3.64
Marzo	12.1	4.76
Abril	59.5	24.36
Mayo	71.1	31.64
Junio	105	36.68
Julio	91	39.20
Agosto	53.2	35.28
Septiembre	45.1	30.52
Octubre	50.1	29.40
Noviembre	65.4	29.12
Diciembre	32.2	12.32
Total (mm/año)	600.6	

Estación Barquisimeto-Mincom:

Parámetros Meses	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)
Enero	7.2	1.81
Febrero	9.4	2.77
Marzo	12.1	3.01
Abril	59.5	15.16
Mayo	71.1	20.91
Junio	105	26.68
Julio	91	24.42
Agosto	53.2	16.60
Septiembre	45.1	13.95
Octubre	50.1	15.01
Noviembre	65.4	11.50
Diciembre	32.2	8.23
Total	600.6	

Estación Barquisimeto C-B:

Parámetros Meses	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)
Enero	7.2	2.14
Febrero	9.4	3.69
Marzo	12.1	3.78
Abril	59.5	16.76
Mayo	71.1	20.53
Junio	105	24.50
Julio	91	21.81
Agosto	53.2	16.02
Septiembre	45.1	13.17
Octubre	50.1	15.86
Noviembre	65.4	13.44
Diciembre	32.2	8.34
Total (mm/año)	600.6	

Estación Bobare:

Parámetros Meses	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)
Enero	7.2	3.12
Febrero	9.4	3.87
Marzo	12.1	6.45
Abril	59.5	17.09
Mayo	71.1	17.84
Junio	105	17.22
Julio	91	17.93
Agosto	53.2	10.40
Septiembre	45.1	10.52
Octubre	50.1	21.96
Noviembre	65.4	21.84
Diciembre	32.2	11.73
Total (mm/año)	600.6	

Estación Qda. De Oro

Parámetros Meses	Precipitación (mm)	Escorrentamiento (mm)
Enero	7.2	3.38
Febrero	9.4	3.38
Marzo	12.1	5.23
Abril	59.5	20.54
Mayo	71.1	33.02
Junio	105	38.40
Julio	91	42.57
Agosto	53.2	36.17
Septiembre	45.1	30.05
Octubre	50.1	32.30
Noviembre	65.4	24.55
Diciembre	32.2	8.64
Total (mm/año)	600.6	

Tabla de Información de Pozos (CAUDALES)

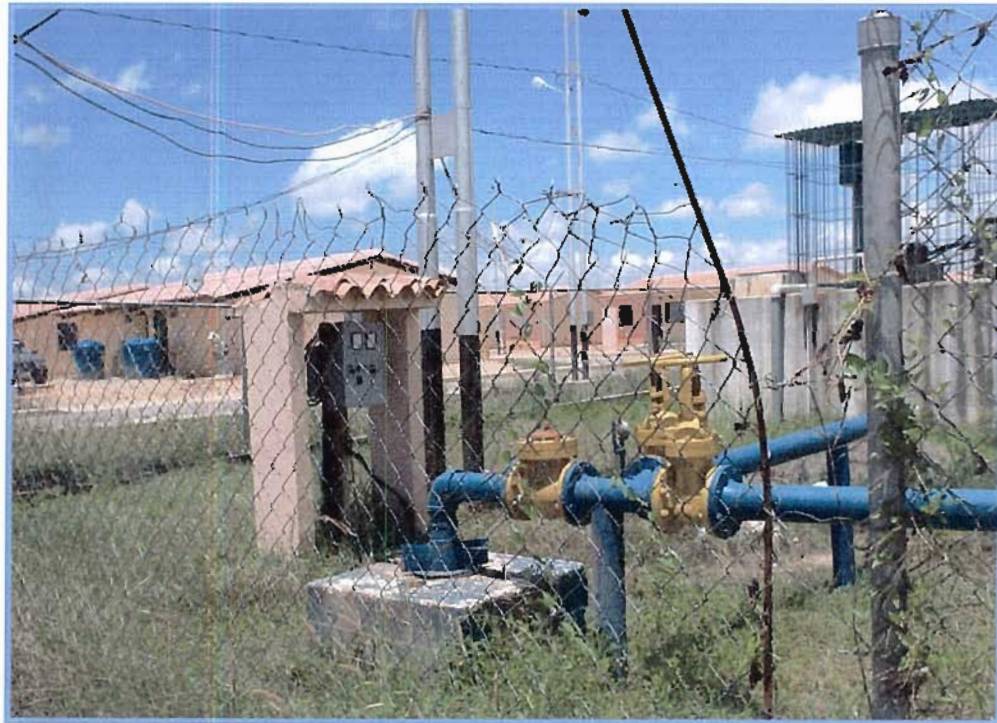
Identificación	ESTE	NORTE	Q= L/S	COTA
BARRO NEGRO-6	482461	1136482	4.1	725
BARRO NEGRO-7	482325	1136119	9.8	723
10	482305	1136378	8.3	640
11	482713	1136721	23	741
NIGUITO	479453	1134365	14	674
MILAGRO	479261	1134154	6.6	695
SAMAN	479447	1134645	23	700
LEONI	480360	1136741	18	692
DANUVIO1	483350	1136690	9.1	732
DANUVIO2	483670	1136779	9	719
PERARAPA	478024	1132295	23.9	668
AURELIO	465985	1125470	4.5	601
CARCEL	464957	1124942	2	605
PRINCESA	464710	1126600	4	614
SABILA-3	470748	1131098	3	638
SABILA-2	471195	1130239	3.7	633
SABILA-5	471923	1131599	3.5	624
DON JESUS	466683	1127208	6	614
LOS RIOS	465931	1126536	6	612

NONAVANA1	480551	1126527	8	571
NONAVANA2	480604	1126386	24	573
PRIVADO-1	476589	1125262	12	576
PRIVADO-2	471900	1127029	2	594
PRIVADO-3	472258	1126982	2.5	613
PRIVADO-4	467613	1123461	8	579
URB.CARDENALITO	466858	1123099	2.5	582
FINCA-2	480240	1133867	4	696
CASTILLERO	470341	1132320	2	643
ARTESANAL	474971	1132140	3	654
PRIVADO-5	477022	1132301	3	678
URB.YUCATAN	467020	1127540	5	634

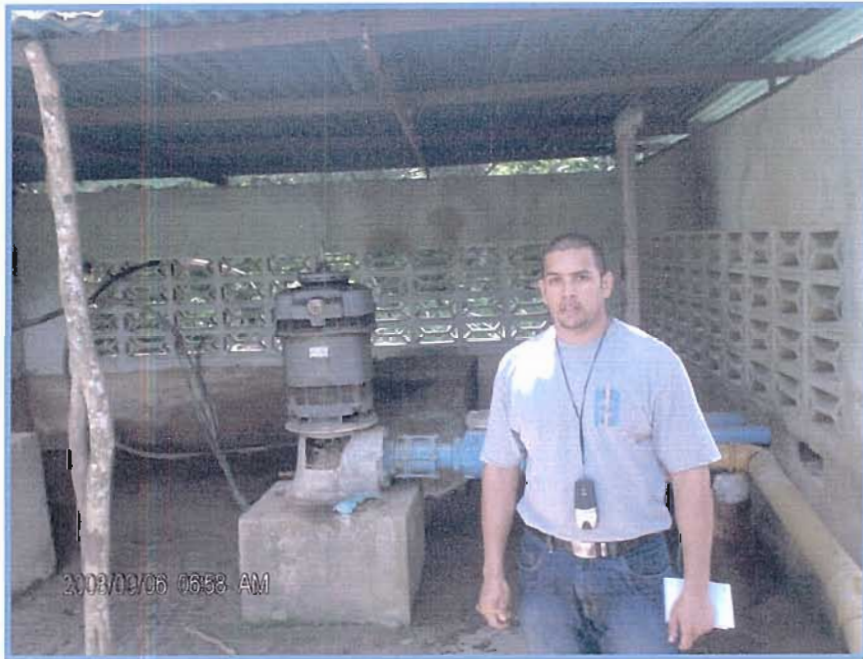
Información de Pozos (Niveles Estáticos)

Identificación	ESTE	NORTE	NV. EST
10	482305	1136378	114.8
11	482713	1136721	119.8
NIGUITO	479453	1134365	36.76
MILAGRO	479261	1134154	28.6
LEONI	480360	1136741	60.33
DANUVIO1	483350	1136690	29.3
DANUVIO2	483670	1136779	27.7

PERARAPA	478024	1132295	42.32
AURELIO	465985	1125470	89.6
CARCEL	464957	1124942	85.4
SABILA-3	470748	1131098	116.3
SABILA-2	471195	1130239	105.2
SABILA-5	471923	1131599	122.7
DON JESUS	466683	1127208	127.4
LOS RIOS	465931	1126536	98.3



Sistema de bombeo Pueblo Lindo



Pozo Nonavana



Pozo Privado El Potrero



Quebrada Barro Negro



Perforación de Pozo (Urb. Yucatán)



Construcción de Aljibes (cordero)



Laguna (El Potrero)