

ESTUDIO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS SECTORES PEDRO GONZÁLEZ – EL
SALADO, MUNICIPIO GÓMEZ Y LA FUENTE – PARAGUACHÍ, MUNICIPIO
ANTOLÍN DEL CAMPO, ISLA DE MARGARITA, ESTADO NUEVA ESPARTA,
VENEZUELA

Por

Ricardina Renatta Diaz Zanardo

Bdigital.ula.ve

Trabajo de grado para optar por al título de Magíster Scientiae en Desarrollo de los Recursos
de Aguas y Tierras, Mención Planificación de los Recursos Hidráulicos

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y
TERRITORIAL (CIDIAT)

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Mérida, Enero, 2014.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderosa y la Virgen Santísima por permitirme alcanzar tan anhelada meta.

A mis abuelos maternos, mamá y hermanas, por todo su apoyo incondicional, este triunfo es gracias a ustedes.

A mi amado esposo, el amor de mi vida, gracias por tu comprensión, apoyo y confianza. Por siempre estar presente y alentarme a cumplir esta meta.

Al Prof. Hervé Jégat, por su guía, apoyo, paciencia, por ser un excelente mentor y amigo, gracias profe por todo.

A Marisela Uzcátegui, porque mas que una titora has sido una amiga y guía a nivel profesional y personal.

A la Escuela de Ingeniería Geológica, por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al CIDIAT, a todo el personal que allí labora, profesores, empleados y obreros, gracias por su formación, apoyo y hacer de ese sitio un hogar por mucho tiempo.

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT), por el apoyo financiero dado bajo proyecto código: I-1036-07-02-A

Al Laboratorio de Agua y Suelo, Coordinación de Programa de investigación, CIDIAT-ULA (Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de Los Andes) por los análisis isotópicos realizados y la colaboración prestada en el avance del proyecto.

Al Ministerio del Ambiente por su apoyo y colaboración en el desarrollo del trabajo de campo

Al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por el apoyo y capacitación suministrada al equipo de trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	iii
Índice general.....	iv
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xv
Lista de ecuaciones	xvii
Resumen	xviii
 CAPÍTULO 1.- INTRODUCCION	 1
1.1.- Introducción	1
1.2.- Planteamiento del problema	2
1.3.- Justificación	2
1.4.- Objetivos	3
1.4.1.- General	3
1.4.2.- Específicos	3
1.5.- Alcances y limitaciones	4
 CAPÍTULO 2.- GENERALIDADES	 5
2.1.- Ubicación del área de estudio	5
2.2.- Relieve	6
2.3.- Clima	6
2.4.- Vegetación	7
2.5.- Suelos	7
2.6.- Hidrografía	8
2.7.- Geología Regional	9
2.7.1.- Plataforma de Tobago y Margarita	9
2.7.2.- Evolución geológica de la Isla de Margarita	9
2.7.3.- Estratigrafía Regional	17
2.7.4.- Geología Local	18
2.8.- Características Hidrogeológicas de la Isla de Margarita	19
 CAPÍTULO 3.- MARCO TEÓRICO	 21
3.1.- Antecedentes	21

3.1.1.- Estudios geológicos	21
3.1.2.- Estudios hidrogeológicos	22
3.2.- Aspectos teóricos fundamentales	24
3.2.1.- Prospección Geofísica	24
3.2.1.1.- Método eléctrico	24
3.2.2.- Balance hídrico	26
3.2.3.- Parámetros hidrogeológicos	28
3.2.4.- Niveles Piezométricos	29
3.2.5.- El movimiento del agua subterránea y su composición química	29
3.2.6.- Sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas	30
3.2.7.- Aguas en interacción con diversos tipos de rocas	30
3.2.7.1.- Aguas en interacción con rocas ultramáficas	30
3.2.7.2.- Aguas en interacción con rocas félsicas	30
3.2.8.- Evolución de la composición química del agua en circulación regional	31
3.2.9.- Diagramas Hidroquímicos	31
3.2.9.1.- Diagramas triangulares. Diagrama de Piper	31
3.2.9.2.- Diagramas de columnas verticales. <i>Schoeller-Berkaloff</i>	32
3.2.9.3.- Clasificación del agua para uso agrícola (Diagrama de Wilcox)	33
3.2.10.- Calidad química	34
3.2.11.- Trazador ambiental	37
3.2.11.1.- Isótopos	37
3.2.11.2.- Isótopos estables del Oxígeno	39
3.2.11.3.- Isótopos estables del Hidrógeno	40
3.2.12.- Modelo de un acuífero	40
3.2.12.1.- Tipos de modelos	41
3.2.12.2.- Modelos de simulación del agua subterránea	41
3.2.12.3.- Proceso de modelación	42
3.2.13.- Uso del programa <i>visual Modflow 4.1.</i>	42
3.2.13.1.- Convención de la discretización	43
CAPITULO 4.- MARCO METODOLÓGICO	47
4.1.- Recopilación de la información	47
4.1.1.- Revisión bibliográfica	47

4.1.2.- Revisión cartográfica y fotogeológica	47
4.1.3.- Recopilación de datos meteorológicos	48
4.1.4.- Compilación de datos de los pozos	49
4.1.5.- Litología de los pozos	49
4.1.6.- Información geológica	50
4.2.- Etapa de campo	50
4.2.1.- Caracterización Geológica	50
4.2.1.1.- Geología de superficie	50
4.2.1.2.- Exploración geofísica	50
4.2.2.- Caracterización hidrogeológica e isotópica de los acuíferos	50
4.3.- Etapa de laboratorio	54
4.4.- Procesamiento de la información	54
4.4.1.- Mapa topográfico	54
4.4.2.- Modelo digital del terreno	55
4.4.3.- Procesamiento de información geológica	56
4.4.3.1.- Procesamiento de los datos geofísicos	56
4.4.3.2.- Elaboración de las curvas de SEV	56
4.4.3.3.- Análisis de los perfiles litológicos	58
4.4.4.- Actualización del inventario de pozos dentro del área de estudio	60
4.4.5.- Determinación de los parámetros hidrogeológicos	60
4.4.6.- Elaboración del mapa de ubicación de los pozos	62
4.4.7.- Elaboración de mapas de niveles piezométricos	62
4.4.8.- Mapa de líneas de flujo	62
4.4.9.- Modelo digital de la base del acuífero	63
4.4.10.- Modelo de recarga del acuífero	63
4.4.10.1.- Balance hídrico	64
4.4.10.2.- Flujo subterráneo afluente	68
4.4.11.- Descargas del acuífero: caudales de extracción y manantiales	69
4.4.12.- Procesamiento de las muestras isotópicas	69
4.4.13.- Hidrogeoquímica	69
4.4.13.1.- Mapas hidrogeoquímicos	69
4.4.12.2.-Clasificación hidrogeoquímica	69
4.4.14.-Modelo hidrogeológico conceptual	70
4.4.15.- Modelo matemático del acuífero	72

4.4.15.1- Creación del Proyecto	73
4.4.15.2- Asignación de datos de entrada (<i>Input</i>)	75
4.4.15.3.- Definición de los pozos de observación	80
4.4.15.4.- Asignación de condiciones de borde (<i>Boundaries</i>)	81
4.4.15.5.- Asignación de la recarga del acuífero	81
4.4.15.6.- Pozos de bombeo	83
4.4.15.7.- Comportamiento del acuífero	84
4.4.15.8.- Calibración	84
4.4.15.9.- Visualización del modelo	85
4.4.15.10.- Escenarios planteados	85
 CAPITULO 5.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	 87
5.1.- Revisión fotogeológica	87
5.2.- Geología de superficie	90
5.3.- Mapa topográfico	94
5.4.- Modelo digital del terreno	95
5.5.- Caracterización geológica	97
5.5.1- Geofísica	97
5.5.2.- Secciones hidrogeológicas	98
5.5.2.1.- Pedro González – El Salado	98
5.5.2.2.- La Fuente – Paraguachí	103
5.6.- Inventario de pozos	106
5.6.1.- Sector Pedro González – El Salado	106
5.6.2.- Sector La Fuente – Paraguachí	107
5.7.- Parámetros hidrogeológicos	108
5.8.- Mapa de ubicación de pozos	109
5.9.- Superficies piezométricas	111
5.10.- Modelo de recarga del acuífero	113
5.10.1.- Pedro González - El Salado	113
5.10.1.1.- Balance Hídrico.	113
5.10.1.2.- Flujo subterráneo afluente	119
5.10.1.3.- Descargas del acuífero	121
5.10.2.- La Fuente – Paraguachí	123

5.10.2.1.- Balance Hídrico	123
5.10.2.2.- Recarga subterránea	128
5.10.2.3.- Descargas del acuífero	129
5.11.- Hidrología Isotópica	130
5.11.1.- Sector de Pedro González El Salado, municipio Gómez	130
5.11.2.- Sector La Fuente – Paraguachí, municipio Antolín del Campo	135
5.12.- Mapas hidrogeoquímicos	137
5.12.1.- Sector Pedro González – El Salado	137
5.12.1.1.- CE	137
5.12.1.2.- pH	139
5.12.1.3.- Salinidad	140
5.12.2.- Mapas hidrogeoquímicos sector La Fuente – Paraguachí	141
5.12.2.1.- CE	141
5.12.2.2.- pH	142
5.13.- Diagramas hidroquímicos	143
5.13.1.- Pedro González – El Salado	143
5.13.2.- La Fuente – Paraguachí.	148
5.14.- Modelo hidrogeológico conceptual	151
5.15.- Modelo matemático del acuífero	153
CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	161
6.1.- Conclusiones	161
6.2.- Recomendaciones	164
Referencias	165
Anexos y apêndices	169

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2.- GENERALIDADES

Figura 2.1.- Ubicación del área de estudio	5
Figura 2.2.- Vegetación en la Isla de Margarita	7
Figura 2.3.- Suelos del estado Nueva Esparta	8
Figura 2.4.- Ubicación Regional de la Plataforma de los Testigos	9
Figura 2.5.- Etapa pre colisión Jurásico Medio – Tardío de la evolución geodinámica de la isla de Margarita	10
Figura 2.6.- Etapa pre colisión de la evolución geodinámica de la Isla de Margarita	11
Figura 2.7.- Etapa pre-colisión de la evolución geodinámica de la isla de Margarita II	11
Figura 2.8.- Reconstrucción simplificada de la etapa 3 (Albiense – Cenomaniense) de la evolución geodinámica de la isla de Margarita. La flecha muestra la ubicación asumida de la Agrupación Margarita	12
Figura 2.9.- Reconstrucción simplificada de la etapa 4 (Turonense - Maastrichtense) de la evolución geodinámica de la isla de Margarita. La flecha muestra la ubicación asumida del Complejo de Margarita	13
Figura 2.10.- Reconstrucción simplificada de la etapa 5 (Eoceno Temprano - Medio) de la evolución geodinámica de la isla de Margarita. La flecha muestra la ubicación asumida del Complejo de Margarita	14
Figura 2.11.- Modelo de transcolisión	14
Figura 2.12.- Representación idealizada de la Placa Caribe en el Eoceno Temprano a Medio	15
Figura 2.13.- Reconstrucción simplificada de la secuencia de movimiento de las placas tectónicas. Las flechas indican la posición de la agrupación Margarita	16
Figura 2.14.- Columna Estratigráfica para la Isla de Margarita	17

CAPÍTULO 3.- MARCO TEÓRICO

Figura 3.1.- Diagrama de Piper	32
Figura 3.2.- Diagrama de <i>Schoeller-Berkaloff</i>	33
Figura 3.3.- Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (Diagrama de Wilcox) según el procedimiento del <i>U. S. Salinity Laboratory Staff</i>	34
Figura 3.4.- Esquema del fraccionamiento del ^{18}O en la atmósfera. Ciclo de Agua ...	38
Figura 3.5.- Discretización de modelo en 3D	43
Figura 3.6.- Celdas en diferencias finitas	43

CAPÍTULO 4.- MARCO METODOLÓGICO

Figura 4.1.- Ubicación relativa de las estaciones meteorológicas empleadas en la investigación	49
Figura 4.2.- Medición de nivel de agua en un pozo en La Fuente – Paraguachí	51
Figura 4.3.- Medición de conductividad eléctrica y salinidad con el multiparámetro	52
Figura 4.4.- Muestra de agua para análisis químico	52
Figura 4.5.- Toma de agua para muestreo isotópico en el sector de Pedro González – El Salado, 2010	53
Figura 4.6.- Planilla empleada por el MINAMB para la caracterización de las aguas subterráneas	53
Figura 4.7.- Espectrómetro láser para agua líquida modelo DLT-100	54
Figura 4.8.- Base de datos para la elaboración del modelo del terreno en <i>Surfer 8.0</i>	55
Figura 4.9.- Archivo con extensión <i>.dat</i>	56
Figura 4.10.- Curva de campo mostrada por IPI2Win	57
Figura 4.11.- Configuración del parámetro de inversión	57
Figura 4.12.- Parámetros del modelo, error de ajuste y curva teórica	58
Figura 4.13.- Corte geoelectrico del sondeo Z ₃₋₄	59
Figura 4.14.- Archivo de entrada <i>.dat</i> para seudo - secciones y perfiles geoelectricos en IPI2Win.....	59
Figura 4.15.- Seudo - sección de resistividad verdadera y perfil geoelectrico en IPI2Win.....	59
Figura 4.16.- Configuración de los parámetros de la seudo - sección y del perfil geoelectrico en el programa IPI2Win.....	60
Figura 4.17.- Datos para la identificación del pozo en el programa GWW.....	61
Figura 4.18.- Elaboración del mapa de líneas de flujo en <i>Surfer 8.0</i>	63
Figura 4.19.- Ventana de dialogo para la corrección de la intersección de las capas del modelo hidrogeológico conceptual.....	71
Figura 4.20. Asignación de colores en función de la permeabilidad de las capas para la visualización del modelo hidrogeológico conceptual.....	72
Figura 4.21. Cartografía empleado para <i>Visual ModFlow 4.2</i>	73
Figura 4.22.- Cuadro de diálogo de <i>Visual Modflow 4.2</i> para crear el proyecto y asignar las unidades de medida.	74
Figura 4.23.- Cuadro de diálogo de <i>Visual Modflow 4.2</i> para asignar parámetros, propiedades iniciales y definir las opciones de flujo.....	74
Figura 4.24.- Cuadro de diálogo de <i>Visual ModFlow 4.2</i> para crear el mallado y establecer el dominio del modelo.	75
Figura 4.25.- Sistema base del acuífero.	76
Figura 4.26.- Geometría del acuífero en <i>Visual ModFlow 4.2</i> del sector Pedro González - El Salado. Topografía.	76
Figura 4.27.- Geometría del acuífero en <i>Visual ModFlow 4.2</i> del Sector Pedro González-El Salado, base capa 2.	77

Figura 4.28.- Sección transversal modelo y capas en <i>Visual ModFlow 4.2</i> del sector Pedro González - El Salado	77
Figura 4.29.- Celdas inactivas en el modelo matemático de Pedro González....	78
Figura 4.30.- Asignación de K para cada una de las capas	79
Figura 4.31.- Vista de la permeabilidad en corte transversal	79
Figura 4.32.- Porosidad asignada para cada capa vista en corte transversal	80
Figura 4.33.- Pozos de calibración asignados en <i>Visual ModFlow 4.2</i>	80
Figura 4.34.- Condiciones de borde en <i>Visual ModFlow 4.1</i>	81
Figura 4.35.- Zona de recarga por precipitación	81
Figura 4.36.- Corte transversal de la zona de recarga por precipitación	82
Figura 4.37.- Asignación de la recarga por precipitación	82
Figura 4.38.- Pozos de recarga asignada en <i>Visual Modflow 4.2</i>	83
Figura 4.39.- Pozos de bombeo asignados en <i>Visual Modflow 4.2</i>	84
Figura 4.40.- Output generado en <i>Visual Modflow 4.2</i> para el sector de Pedro González – El Salado	85
Figura 4.41.- Visualización del modelo en 3D	86

CAPITULO 5.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 5.1.- Fotomontaje del sector de Pedro González – El Salado, municipio Gómez, con su respectiva interpretación	87
Figura 5.2.- Patrón de drenajes característico de La Fuente - Paraguachí. Imágenes <i>Spot 5</i> LPAIS (2008)	88
Figura 5.3.- Principales fallas de la zona La Fuente - Paraguachí. Tomado de Imágenes <i>Spot 5</i> LPAIS (2008)	89
Figura 5.4.- Micropliegues y vetas de cuarzo y grafito presentes en el afloramiento en el sector de La Fuente Paraguachí. Coordenadas: 406250E, 1223959N a una altitud de 36 msnm	90
Figura 5.5.- Afloramiento del Complejo Metamórfico de Paraguachí, sector Guiriguire al borde del Cerro Boquerón. Coordenadas: 405385E, 1227014N a una altitud de 43 msnm	91
Figura 5.6.- Afloramiento de las Metamáficas de la Rinconada, Unidad III. Carretera Juan Griego - Pedro González. Coordenadas: 397895E, 1227460N....	91
Figura 5.7.- Muestra de mano de las Metamáficas de la Rinconada, Unidad III. Carretera Juan Griego-Pedro González	92
Figura 5.8.- Sección fina gneis granatífero de las Metamáficas de La Rinconada, Unidad III	92
Figura 5.9.- Muestra de mano de las Metaultramáficas de Cerro El Copey. Carretera Pedro González - Manzanillo. Coordenadas 400379E, 1230393N	93
Figura 5.10.- Afloramiento de la Metatrondjemita de Matasiete, Sector de Paraguachí. Coordenadas: 407714E, 1227603N, altitud de 15 msnm	93

Figura 5.11.- Topografía del sector de Pedro González, municipio Gómez.....	94
Figura 5.12.- Topografía del sector La Fuente Paraguachí, municipio Antolín del Campo.	95
Figura 5.13. Modelo digital del terreno del sector Pedro González – El Salado..	96
Figura 5.14. Modelo digital del terreno del sector La Fuente – Paraguachí.....	96
Figura 5.15.- Distribución de las secciones – geoelectricas del sector Pedro González – El Salado.	98
Figura 5.16.- Sección geológica PG-1.	99
Figura 5.17.- Sección geológica PG – 2.	100
Figura 5.18.- Sección geológica PG – 3.	101
Figura 5.19.- Sección geológica PG – 4.	102
Figura 5.20.- Sección geológica PG – 5.	103
Figura 5.21.- Ubicación de las secciones geológicas en el sector La Fuente – Paraguachí.	104
Figura 5.22.- Sección geológica LFP-1.	105
Figura 5.23.- Sección Geológica LFP-2.	105
Figura 5.24.- Sección Geológica LFP-3.....	106
Figura 5.25.- Resultado de la prueba de bombeo realizada en el pozo C5-21 en el sector de Pedro González – El Salado, según el método de Jacob en el programa GW.	108
Figura 5.26.- Ubicación del pozo C5-21 en el Salado de Pedro González.....	109
Figura 5.27.- Ubicación de pozos en el sector de Pedro González, estado Nueva Esparta.	110
Figura 5.28.- Ubicación de pozos en el sector La Fuente Paraguachí, estado Nueva Esparta.	110
Figura 5.29.- Variación de niveles piezométricos en el sector de Pedro González – El Salado. Campañas 2001, 2005, 2007 y 2008.....	111
Figura 5.30.- Variación de niveles piezométricos en el sector La Fuente - Paraguachí.	1112
Figura 5.31.- Pendientes del Sector Pedro González-El Salado.....	115
Figura 5.32.- Superposición de mapa topográfico, piezométrico y de líneas de flujo del sector Pedro González-El Salado. La línea roja indica la zona de recarga. 2007.	120
Figura 5.33.- Superficie piezométrica 2007 del sector Pedro González-El Salado.	120
Figura 5.34.- Caudales en l/s extraídos en el sector Pedro González - El Salado para la campaña del año 2007.	122
Figura 5.35.- Caudales en l/s extraídos en el sector Pedro González-El Salado para la campaña del año 2008.	122
Figura 5.36.- Pendientes del sector La Fuente y Paraguachí.....	124
Figura 5.37- Mapa piezométrico para calcular el gradiente hidráulico	128

Figura 5.38.- Caudales de extracción para los pozos del sector La Fuente – Paraguachí de la campaña julio – 2007	129
Figura 5.39.- Caudales de extracción para los pozos del sector La Fuente – Paraguachí de la campaña abril – 2008	130
Figura 5.40.- Topografía del sector de Pedro González – El Salado, con la ubicación del muestreo isotópico para el año 2008 y 2010	131
Figura 5.41.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2008 en el Sector de Pedro González	132
Figura 5.42.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2008 en el sector de Pedro González - El Salado	133
Figura 5.43.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2010 en el sector de Pedro González	134
Figura 5.44.- Ubicación del muestreo isotópico del año 2008 y 2010 en Pedro González en el gráfico de la composición isotópica de las aguas en presas y embalses de Venezuela, proyecto VEN 8/016	135
Figura 5.45.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2008 en el sector La Fuente – Paraguachí	137
Figura 5.46.- Conductividad eléctrica en el sector de Pedro González – El Salado para las campañas del 2001, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009	138
Figura 5.47.- Variación de la CE en el sector de Pedro González – El Salado para las campañas del 2008	139
Figura 5.48.- ph presentados en las campañas de 2001, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009 en el sector de Pedro González – El Salado	140
Figura 5.49.- % de salinidad en el sector de Pedro González – El Salado para las campañas del 2005, 2007, 2008 y 2009	141
Figura 5.50.- CE en el sector de La Fuente Paraguachí para las campañas del 2005, 2006, 2007 y 2008	142
Figura 5.51.- pH en el sector de La Fuente - Paraguachí para las campañas del 2005, 2006 y 2007	143
Figura 5.52.- Resultado del diagrama de Piper para aguas del sector Pedro González - El Salado. Campaña C3- 2006	144
Figura 5.53.- Resultado del diagrama de Shoeller - Berkaloff para aguas del sector Pedro González-El Salado. Campaña C3 – 2006	146
Figura 5.54.- Variación de la concentración de cloruros en función de la distancia al borde costero en la cuenca Pedro González	146
Figura 5.55.- Resultado del Diagrama de Wilcox en el sector Pedro González - El Salado. Campaña C3 – 2006	147
Figura 5.56.- Resultado del diagrama de Piper para aguas de La Fuente - Paraguachí. Campaña 2005, 2006 y 2007	148
Figura 5.57.- Resultado del Diagrama de Shoeller-Berkaloff para aguas del sector La Fuente - Paraguachí. Campaña 2005 – 2006 – 2007	149
Figura 5.58.- Variación de la concentración de cloruros en función de la distancia al borde costero en la cuenca La Fuente – Paraguachí	150
Figura 5.59.- Resultado del Diagrama de Wilcox en el Sector La Fuente - Paraguachí. Campañas 2005 – 2006 – 2007	151
Figura 5.60.- Modelo hidrogeológico del acuífero del sector de Pedro González – El Salado.	152

Figura 5.61.- Modelo hidrogeológico del acuífero del sector La Fuente - Paraguachí.	152
Figura 5.62.- Modelo tridimensional de la geometría del Acuífero en el <i>Visual ModFlow 4.2.</i>	153
Figura 5.63.- Modelo tridimensional con visualización de las distintas capas en <i>Visual ModFlow 4.2.</i>	154
Figura 5.64.- Vista en planta donde se produce la recarga directa por precipitación en el área de color verde. <i>Visual ModFlow 4.2.</i>	155
Figura 5.65.- Vista de los pozos de recarga por flujo subterráneo. <i>Visual ModFlow 4.2.</i>	155
Figura 5.66.- Calibración del modelo, representando gráficamente las cargas calculadas respecto las observadas. <i>Visual ModFlow 4.2.</i>	156
Figura 5.67.- Datos de salida del modelo luego de su calibración para la capa 1 en <i>Visual ModFlow 4.2.</i>	157
Figura 5.68.- Datos de salida del modelo luego de su calibración para la capa 6 en <i>Visual ModFlow 4.2.</i>	157
Figura 5.69.- Distribución y comparación del muestreo isotópico del año 2008 en el sector Pedro González – El Salado respecto a la conductividad eléctrica.....	159

Bdigital.ula.ve

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2.- GENERALIDADES

Tabla 2.1.- Coordenadas UTM de los dos sectores que conforman el área en estudio	6
---	---

CAPÍTULO 3.- MARCO TEÓRICO

Tabla 3.1.- Resistividades de las Aguas o rocas	26
--	----

CAPITULO 4.- MARCO METODOLÓGICO

Tabla 4.1.- Datos de los abatimientos y tiempos de bombeo empleados en el programa GWW	61
Tabla 4.2.- Datos de temperatura en °C de la estación Tacarigua	65
Tabla 4.3.- Valores de número máximo de horas de exposición al sol según la latitud para cada mes del año. Unidad: horas/día	66
Tabla 4.4.- Coeficiente de escorrentía	67
Tabla 4.5.- Cuadro comparativo entre los valores de permeabilidad, la clasificación cualitativa del acuífero y el tipo de material que lo componen ...	68
Tabal 4.6. Valores definidos para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del sector Pedro González – El Salado	70
Tabla 4.7. Pozos de bombeo a ser introducidos en <i>Visual Modflow 4.2.</i>	83

CAPITULO 5.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 5.1. Rango de resistividades para suelos y litología aplicada en el sector de Pedro González – El Salado	97
Tabla 5.2.- Datos de precipitación de la estación Pedro González	113
Tabla 5.3.- Índice de calor mensual y anual en el cector de Pedro González – El Salado de 1986 a 2006	114
Tabla 5.4.- Evapotranspiración corregida ETc en el Sector de Pedro González – El Salado de 1986 a 2006	114
Tabla 5.5.- Resultados de coeficientes de escorrentía	116
Tabla 5.6.- Valores de ETP para el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006	117
Tabla 5.7.- Valores de escorrentía para el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006	117
Tabla 5.8.- Valores de ETR real para el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006	118
Tabla 5.9.- Recarga por infiltración en mm/anuales en el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006	119
Tabla 5.10.- Datos de precipitación de la estación Paraguachí	123

Tabla 5.11.- Índice de calor mensual y anual en el sector La Fuente – Paraguachí.	123
Tabla 5.12.- Evapotranspiración corregida ETc en La Fuente – Paraguachí	124
Tabla 5.13. Resultados de coeficientes de escorrentía.....	125
Tabla 5.14. Valores de ETP para La Fuente – Paraguachí de 1986 a 1997.	126
Tabla 5.15.- Valores de escorrentía para el sector de La Fuente – Paraguachí de 1986 a 1997.	126
Tabla 5.16.- Valores de ETR para el sector de La Fuente – Paraguachí de 1986 a 1997.	127
Tabla 5.17.- Recarga por infiltración en mm/anuales.	127
Tabla 5.18.- Reporte de resultados de isótopos estables del agua en el sector de Pedro González El Salado, en el muestreo del año 2008.	131
Tabla 5.19.- Reporte de resultados de isótopos estables del agua en el sector de Pedro González El Salado, en el muestreo del año 2010.	134
Tabla 5.20.- Reporte de resultados de isótopos estables del agua en el sector La Fuente – Paraguachí, en el muestreo del año 2008.	136
Tabla 5.21.- Pozos de bombeo a ser introducidos en <i>Visual Modflow 4.2.</i> para el escenario de aumento de caudales.	158

Bdigital.ula.ve

LISTA DE ECUACIONES

CAPÍTULO 3.- MARCO TEÓRICO	16
Ecuación 3.1.- Resistencia eléctrica	25
Ecuación 3.2.- Resistividad	25
Ecuación 3.3.- Conductividad	25
Ecuación 3.4.- Variación del almacenamiento	27
Ecuación 3.5.- Balance hídrico	27
Ecuación 3.6.- Índice SAR	33
Ecuación 3.7.- Desviación por mil para determinar la variación isotópica	38
Ecuación 3.8.- Muestras de referencia	38
Ecuación 3.9.- Ley de Darcy	43
Ecuación 3.10.- Conductancia hidráulica	44
Ecuación 3.11.- Flujo desde afuera del acuífero	45
Ecuación 3.12.- Flujo combinado	45
Ecuación 3.13.- Flujo externo a la celda	45
 CAPÍTULO 4.- MARCO METODOLÓGICO	
Ecuación 4.1.- Aproximación de Jacob	61
Ecuación 4.2.- Balance hídrico establecido por Custodio y Llamas	64
Ecuación 4.3.- Índice de calor mensual	64
Ecuación 4.4.- Índice de calor anual	65
Ecuación 4.5.- Evapotranspiración media teórica	65
Ecuación 4.6.- Evapotranspiración corregida	65
Ecuación 4.7.- Evapotranspiración potencial	66
Ecuación 4.8.- Relación para obtener la evapotranspiración real	67
Ecuación 4.9.- Evapotranspiración real	67
Ecuación 4.10.- Escorrentía	67
Ecuación 4.11.- Ecuación de Darcy	68
Ecuación 4.12.- Gradiente hidráulico	68
Ecuación 4.13.- Área transversal que atraviesa el fluido	68
Ecuación 4.14.- Restricción para intersección de capas	71

RESUMEN

Los acuíferos en La Fuente – Paraguachí y Pedro González – El Salado, isla de Margarita, están influenciados por un clima semiárido, siendo explotados para abastecer a la población, sin embargo, se desconoce sus condiciones actuales, por lo que se hace necesario un estudio global en el que se evalúe el recurso subterráneo a fin de generar políticas de explotación. Para esto se desarrolló una metodología que incluye cuatro fases: recopilación de información, campo, laboratorio y una etapa final de resultados. Gracias a la implementación de la metodología se obtuvo una caracterización geológica de los acuíferos mediante la aplicación de SEV, estimación de la recarga natural a través de balances hídricos y extracción del recurso inventariando los caudales de explotación. Por otra parte, se determinó la proveniencia de la recarga en el sector Pedro González – El Salado, a partir de isótopos ambientales, que confirmó que la recarga es por flujo subterráneo debido a la precipitación y posterior infiltración a una cota de 290 m, obteniendo que el tipo de agua presente en el lugar adquiere su composición química producto de procesos de interacción agua - roca con litologías que dominan la cuenca (Grupo La Rinconada y Gneis de Guayacán) además de la contribución de otros procesos como disolución de sales, intrusión marina, evaporación y actividades antrópicas. Como resultado de esta investigación se obtuvo un modelo hidrogeológico conceptual que permitió generar el modelo matemático a fin de simular el acuífero bajo diferentes escenarios, y planificar el aprovechamiento para no sobreexplotar el acuífero.

Palabras claves: acuíferos, Pedro González – El Salado, La Fuente – Paraguachí, recarga, modelo, caudal.

Bdigital.ula.ve

CAPITULO 1.- INTRODUCCION

1.1.- INTRODUCCION

El recurso hídrico subterráneo representa una fracción importante del agua presente en los continentes, con un volumen mayor que el del agua retenida en lagos o ríos, aunque menor que el de los glaciares. Por tal motivo, es un recurso importante, pero de difícil gestión, por su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación; se encuentra normalmente saturando materiales geológicos permeables que constituyen formaciones denominadas acuíferos, donde su demanda ligada a la actividad humana se ha desarrollado en paralelo con la ocupación del territorio.

Actualmente, la escasez de agua potable es una problemática mundial y la Isla de Margarita, caracterizada por ser una zona cuya principal actividad económica es el turismo, no escapa de ella. En virtud de esto, el estado Nueva Esparta debe garantizar el servicio de agua dulce (potable) para el consumo humano durante todo el año. Hoy en día, los acuíferos ubicados en los municipios Gómez y Antolín del Campo están siendo explotados con el fin de abastecer a la población del vital líquido, tanto para consumo humano como para riego, sin embargo, no se conoce a ciencia cierta las condiciones actuales de los mismos, su depositación geológica, procedencia de la recarga de sus acuíferos, calidad del agua y condiciones de salinidad de la misma, ya que en algunos sectores el agua que se extrae llega a ser salobre, no solo la cercana a la costa, que podría ser indicativo de intrusión marina, sino lugares alejados de la misma, por lo que se hace necesario un estudio global en el que se evalúen eficazmente los acuíferos en la zona para establecer la relación recarga - descarga de los acuíferos a fin de generar políticas de explotación, ya que son numerosas las personas que se abastecen de esta agua por la escasez del recurso, destacando que la mayor parte del agua potable que se suministra a los pobladores del lugar proviene de tierra firme (represa Clavellinos y Turimiquire) ya que por sí sola no puede abastecerse debido a las condiciones climáticas que hacen difícil la presencia de cursos de agua permanentes. Para ello, se realiza una caracterización geológica de los acuíferos ubicados en el área de estudio, mediante la aplicación de métodos indirectos, específicamente sondeos eléctricos verticales, estimación de la recarga natural a través de balances hídricos bajo el apoyo del INAMEH y la extracción del recurso inventariando los caudales de explotación. Por otra parte se determina la proveniencia de la recarga a partir de técnicas nucleares con fines pacíficos, además de establecer relaciones entre la composición, distribución y circulación de las aguas de los acuíferos del área de estudio evaluando las condiciones hidroquímicas de los mismos, para conocer su interacción con el medio geológico y el tipo de agua presente en el lugar. Todo esto hasta llegar a construir un modelo hidrogeológico conceptual del área que permita generar un modelo matemático a fin de simular el acuífero bajo diferentes condiciones de funcionamiento, y planificar el aprovechamiento de los recursos.

Cabe destacar, según estudios realizados en la zona, los acuíferos del área presentan condiciones desfavorables para el aprovechamiento de sus aguas, por lo que el cierre de captaciones y pozos, debido a la contaminación con agua salina, ha sido importante en los últimos años. Es por esto, que se hace necesaria la realización de estudios y ubicación de nuevas áreas de explotación de agua dulce y consumible. Estos acuíferos presentan una reducción de sus niveles piezométricos y un continuo aumento de su conductividad eléctrica, en algunos sectores que podrían dar indicio de la alteración de la calidad del agua, debido a la solución de minerales presentes en las rocas que rodean al acuífero de este sector y a la posible intrusión de agua salada proveniente del Mar Caribe. Es por ello, que en la zona la caracterización geológica de los acuíferos tiene como premisa determinar la composición litológica, espesores y posibles estructuras geológicas que conforman el mismo, para mejorar la distribución y aprovechamiento de este recurso, y de esta forma, satisfacer las necesidades crecientes que se generan en la Isla.

La metodología empleada en esta investigación divide el área en dos zonas, en función de los acuíferos presentes, el primero, correspondiente al sector Pedro González – El Salado, y el segundo a La Fuente - Paraguachí. En primer lugar se hace una recopilación de toda la información que sirve de base para la investigación, incluyendo material bibliográfico, cartográfico y fotogeológico. En segundo lugar, una etapa de campo que se divide en dos partes, una geológica del área, que conlleva levantamiento geológico en superficie y geofísica y otra hidrogeológica e isotópica de los acuíferos, que incluyen campañas de medición y toma de muestras de agua en diferentes años, que contó con el apoyo del CDCHT – ULA, MINAMB. Posteriormente una etapa de laboratorio, para análisis físico – químico desarrollado por el MINAMB e isotópico generado por el CIDIAT - ULA. Y por último un procesamiento de la información que implica la generación de gráficos, tablas y modelos a fin de cumplir con los objetivos establecidos. Finalmente la presente investigación pretende generar conclusiones y recomendaciones referentes a la evaluación de los acuíferos de los sectores Pedro González – El Salado y La Fuente – Paraguachí en el estado Nueva Esparta a fin de generar políticas de gestión del recurso hídrico subterráneo, bajo el apoyo del OIEA.

1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Isla de Margarita está situada en la parte nororiental de Venezuela, se trata de una extensión marítima de la cordillera de la costa influenciada en su mayor parte por un clima semiárido, con un promedio pluviométrico relativamente bajo, donde los ríos de la entidad tienen un régimen de escurrimiento bastante irregular, presentando poco caudal la mayoría del tiempo y torrenciales por cortos períodos, típicos de zonas de baja precipitación anual.

Cabe destacar, que gran parte de la población se encuentra en la región oriental de la isla, y su desarrollo depende fundamentalmente de la actividad turística y comercial, trayendo como consecuencia desabastecimiento de recursos como el agua, necesarias para el consumo humano y uso agrícola, que además es escaso, debido a la carencia notoria de cursos de agua dulce superficial que imposibilitan el aprovechamiento de la misma. Es por esto, que las aguas subterráneas representan en esta zona una fuente de agua suplementaria, y su búsqueda e investigación para su evaluación, explotación y desarrollo son de vital importancia para la región.

La evaluación de los acuíferos ubicados en los municipios Gómez y Antolín del Campo en la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, plantea a partir de estudios geológicos y la aplicación de métodos geofísicos, actualizar la información geológica del área en estudio, para generar un modelo hidrogeológico conceptual y posteriormente uno matemático que permitan implementar medidas para mejorar el abastecimiento de este recurso tan vital. Además, de definir las causas que ocasionan los problemas de salinidad generados por posibles efectos geológicos, más que por intrusiones salinas provenientes de la costa, esto aparte de determinar una serie de inconvenientes e interrogantes que no permiten que sea entendido de manera precisa el funcionamiento hidrogeológico de sus acuíferos, por tal motivo se empleara la utilización de trazadores naturales (isótopos) para determinar de manera más certera algunas condiciones de los acuíferos, como las posibles zonas de recarga y descarga, análisis de explotabilidad del acuífero, relaciones entre la composición, distribución y circulación de las aguas de los acuíferos del área de estudio, entre otras, obteniendo así un modelo hidrogeológico más confiable, tanto conceptual como matemático.

1.3.- JUSTIFICACION

El área de estudio por ubicarse en una región insular presenta dificultades con el abastecimiento de agua potable, por lo que las aguas subterráneas representan en esta zona una fuente de agua

suplementaria, es por ésta razón que la búsqueda e investigación de este recurso son de vital importancia para la región.

Los acuíferos en estudio se encuentran ubicados en los municipios Gómez y Antolín del Campo, en la Isla de Margarita, en los mismos existen diferentes pozos perforados en toda su extensión, sin embargo, no todos son explotados, ya que muchos son fuente de agua salobre, lo que lleva a pensar en la falta de control en la ubicación y perforación de estos pozos. Por lo que un modelo geológico del acuífero que permita entender el comportamiento y aspectos del mismo, aportará la información necesaria para la ubicación y determinación de la calidad del agua presente en esos pozos y así obtener un mejor aprovechamiento de las concentraciones de agua dulce y consumible, así como proponer nuevas zonas de perforación.

La recolección de información geológica mediante el estudio de fotografías aéreas, datos de campo, cartografía y aplicación de métodos y técnicas geofísicas permiten validar y actualizar las características y parámetros presentes en la zona, con la finalidad de generar así datos más certeros y actualizados que sirvan de respaldo para estudios posteriores del acuífero o de la formación geológica presente. Con este estudio se pretende realizar un reconocimiento de las principales formaciones aflorantes en el área, con la finalidad de identificar la influencia de la geología en los problemas de contaminación (salinidad) del acuífero presente en la zona.

Por otra parte, el análisis hidrogeoquímico en dichos acuíferos permitirá establecer en principio, las posibles zonas de recarga y descarga, que luego serán los sectores en donde se tomen muestras isotópicas que permitan corroborar o desestimar estas primeras suposiciones, y en función del modelo isotópico generado, establecer la proveniencia de las aguas en los acuíferos y la posibilidad de intrusión salina, así como estimar las cantidades de agua que naturalmente se recargan y/o descargan. Un mejor conocimiento de las características hidrogeológicas del área en estudio establecerá un adecuado aprovechamiento de las aguas subterráneas, de manera que garantice un suministro confiable de dicho recurso para la realización de las actividades económicas de la región como son la agricultura y el turismo.

1.4.- OBJETIVOS

1.4.1.- GENERAL

Evaluar los acuíferos de los sectores Pedro González – El Salado, municipio Gómez y La Fuente – Paraguachí, municipio Antolín del Campo, en el estado Nueva Esparta a fin de generar políticas de gestión del recurso hídrico subterráneo.

1.4.2.- ESPECIFICOS

Realizar una caracterización geológica de los acuíferos ubicados en el área de estudio, mediante la aplicación de métodos indirectos.

Estimar la recarga natural y la extracción del recurso hídrico subterráneo en el área de estudio.

Determinar la proveniencia de la recarga en los acuíferos mencionados a partir de técnicas nucleares.

Establecer relaciones entre la composición, distribución y circulación de las aguas de los acuíferos del área de estudio a partir de la hidroquímica de los mismos.

Detallar el modelo hidrogeológico conceptual del área en estudio.

Desarrollar un modelo matemático que permita la simulación del acuífero bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

1.5.- ALCANCES Y LIMITACIONES

El estudio de los acuíferos de los sectores Pedro González – El Salado, municipio Gómez y La Fuente – Paraguachí, municipio Antolín del Campo, Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela, busca generar políticas de explotación de los acuíferos para abastecer de agua potable a la población y mejorar su calidad de vida, haciendo uso del recurso hídrico subterráneo. Esto a partir de la caracterización de los mismos, en función de estudios geológicos, hidroquímicos, isotópicos y de modelación que permitan integrar los datos y actualizar la información tratando de identificar las causas de los problemas de salinidad que vienen presentando los acuíferos.

Factores como tiempo, lejanía, costo de la investigación y falta de equipos, fueron limitantes importantes, afectando el desarrollo de la investigación. Entre ellos:

- La carencia de información litológica que permitiera validar los datos obtenidos del procesamiento geofísico con perforaciones geológicas en el área en estudio. Además, la falta de un equipo disponible para el empleo combinado de dos o más métodos durante la planificación y medición de la campaña geofísica, debido al alto costo y complejidad de aplicación de los mismos. Por lo que solo se contó con los datos de la aplicación de un método indirecto para la evaluación del subsuelo.
- La accesibilidad a los pozos, aljibes y manantiales, que en su mayoría se encuentran en propiedad privada dificultando el acceso para su estudio.
- La disposición de los dueños de pozos con bombas para la realización de pruebas de bombeo y otras actividades de provecho que implicaran el encendido de la bomba por largos períodos de tiempo.
- Incertidumbre en el protocolo de muestreo isotópico al momento de recolectar las muestras, y el traslado de las mismas desde la Isla de Margarita a la ciudad de Mérida.
- Falta de datos meteorológicos completos y actualizados que permitieran abarcar mas años para realizar balances hídricos más certeros.

CAPÍTULO 2.- GENERALIDADES

2.1.- Ubicación del área de estudio.

Los acuíferos en estudio se encuentran ubicados al norte de Venezuela, en la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, exactamente en su extremo oriental, dividiendo la investigación en dos (2) sectores, uno ubicado en Pedro González – El Salado, municipio Gómez, con una extensión de 36 km², y el otro en La Fuente – Paraguachí, en el municipio Antolín del Campo, con un área aproximada de 42 km², cuyas coordenadas limítrofes en UTM se presentan en la Tabla 2.1.

El área está limitada políticamente al norte y este con el Mar Caribe, al sur por los municipios Díaz y Arismendi y al oeste con el Municipio Marcando. (Ver Figura 2.1)

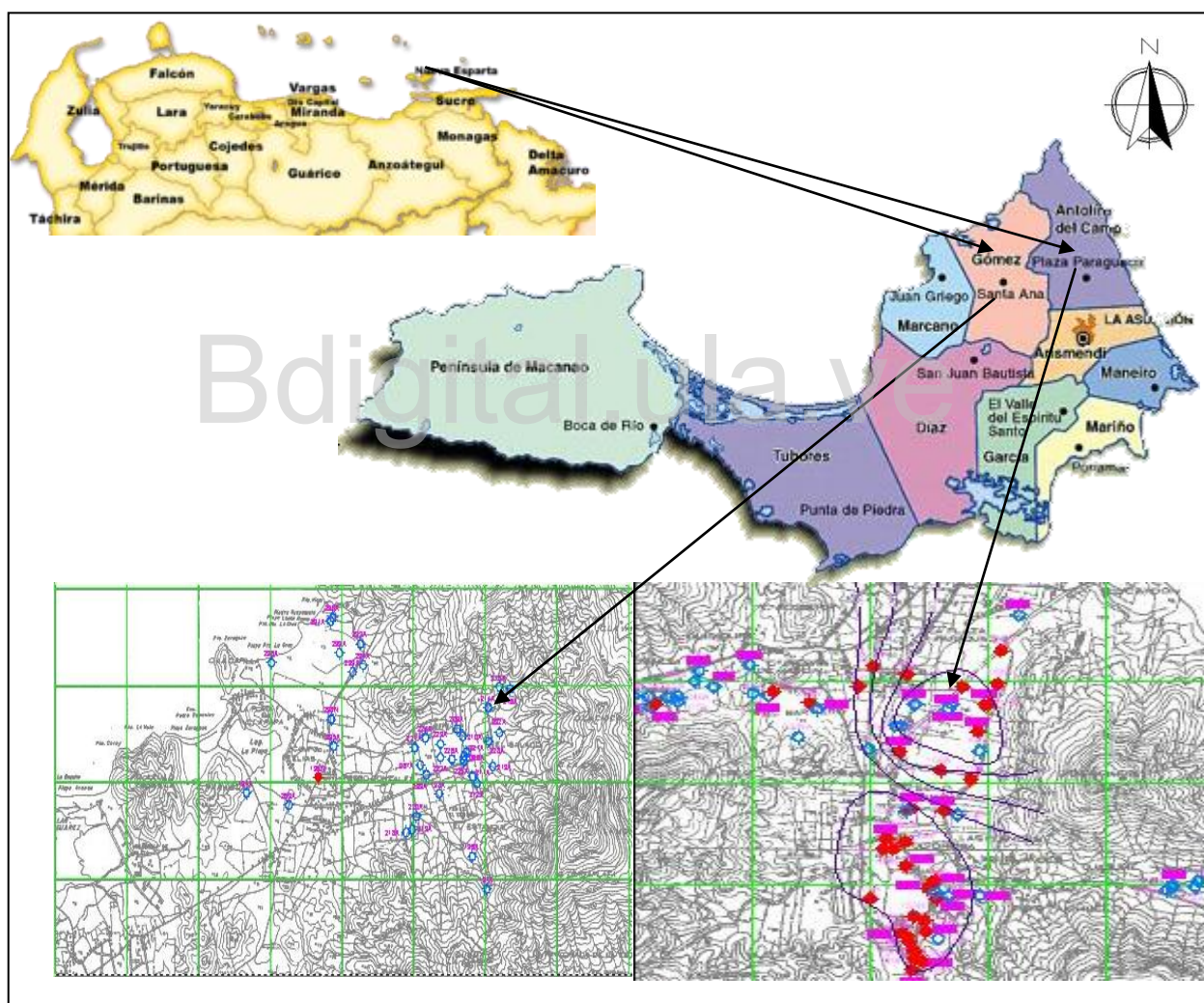


Figura 2.1.- Ubicación del área de estudio.

Tabla 2.1.- Coordenadas UTM de los dos sectores que conforman el área en estudio.

<i>Pedro González – El salado</i>		<i>La Fuente - Paraguachí</i>	
<i>Este</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>	<i>Norte</i>
396000	1227000	404000	1229000
396000	1231000	404000	1222000
404000	1227000	408000	1222000
404000	1231000	408000	1229000

Fuente: Propia.

2.2.- Relieve.

El relieve de la Isla de Margarita está compuesto de llanuras costeras, albuferas y macizos montañosos y se encuentra representado por dos (2) grandes bloques: el sector occidental denominado Península de Macanao y el sector oriental o Paraguachoa, unidos por el Istmo de La Restinga, el cual es estrecho y de muy poca elevación.

En el sector oriental, donde se encuentra enmarcada el área en estudio, el relieve es más complejo por la existencia de tres alineamientos montañosos, el primero comienza con el macizo de La Guardia (Cerro de La Vega) prolongándose hacia el norte (Cerro de María Libre y de La Galera). El segundo o central es el más importante, comienza en las planicies de El Espinal siguiendo el rumbo noreste que se conoce con el nombre de Cerro El Copey, el cual constituye la mayor elevación de la Isla (Cerro El Maco, Tragaplata) y termina en los acantilados de Cabo Negro. El tercer alineamiento montañoso comienza en el Valle San Antonio con el Cerro El Piache, continua con los cerros Guatamare, Matasiete y Guayamurí, para terminar en la costa de El Tirano. Este sistema montañoso es una extensión marítima de la Cordillera de la Costa; y sus principales valles son San Juan, Pedro González, La Asunción y el valle del Espíritu Santo.

2.3.- Clima.

El estado Nueva Esparta tiene un clima de tipo semiárido afectado por la altura al nivel del mar, las condiciones oceánicas, los vientos alisios y los centros de presión. La temperatura media anual es de 26° a 28°C, con escasa variación diaria y con máximas de mayo a septiembre y mínimas de diciembre a enero. La insolación es elevada y la evapotranspiración potencial oscila entre 1.600 y 1.800 mm. El régimen de precipitación se caracteriza por dos (2) períodos lluviosos (de junio a agosto y de diciembre a febrero) y dos (2) secos (marzo a mayo y septiembre a noviembre), pero el balance hídrico es deficitario durante todo el año. La humedad relativa media es de 70 a 80 por ciento en la mayor parte de la isla, excepto en las montañas. La zona de mayor precipitación es el bloque montañoso oriental, aunque con grandes variaciones, pues los registros oscilan entre 400 y 1.100 mm anuales. En la península de Macanao, a pesar de las montañas, la precipitación es menor debido a la acción de los vientos alisios (entre 300 y 500 mm anuales). La precipitación decrece con la altura.

2.4.- Vegetación.

En la Isla de Margarita los efectos climáticos y/o edáficos han producido una mezcla de zonas de vida, con variados ecosistemas que comprenden desde la maleza desértica tropical, en las zonas bajas y secas, hasta el monte espinoso y el bosque seco tropical en zonas de mayor altura.

COPLANARH (1974), distingue en la Isla de Margarita tres (3) categorías de formaciones vegetales (ver Figura 2.2), correspondientes cada una a ambientes naturales distintos desde el punto de vista climático y de su posición altitudinal. Estas categorías son: Bosque Húmedo Premontano (bh-P), el Monte Espinoso Tropical (me-T) y el Bosque muy Seco Tropical (bms-T).



Figura 2.2.- Vegetación en la Isla de Margarita. Fuente: COPLANARH (1974).

2.5.- Suelos.

Los suelos del estado Nueva Esparta son el resultado de procesos de adición, pérdida o transposición de materiales en zonas áridas y de escasa vegetación. Son delgados y pocos desarrollados, sujetos a intensos procesos erosivos acelerados por el sobrepastoreo, las oscilaciones del nivel del mar y la deforestación realizada para el aprovechamiento agrícola. Los suelos de los valles, las tierras de mejor calidad, son bien desarrollados, tienen capa orgánica, están protegidos de la acción erosiva del viento y se encuentran cubiertos de vegetación, pero sólo ocupan una pequeña proporción del Estado. En las zonas de piedemonte, los conos de deyección y materiales coluviales dan lugar a suelos muy pedregosos. (Tomado de Leal, R. 2008).

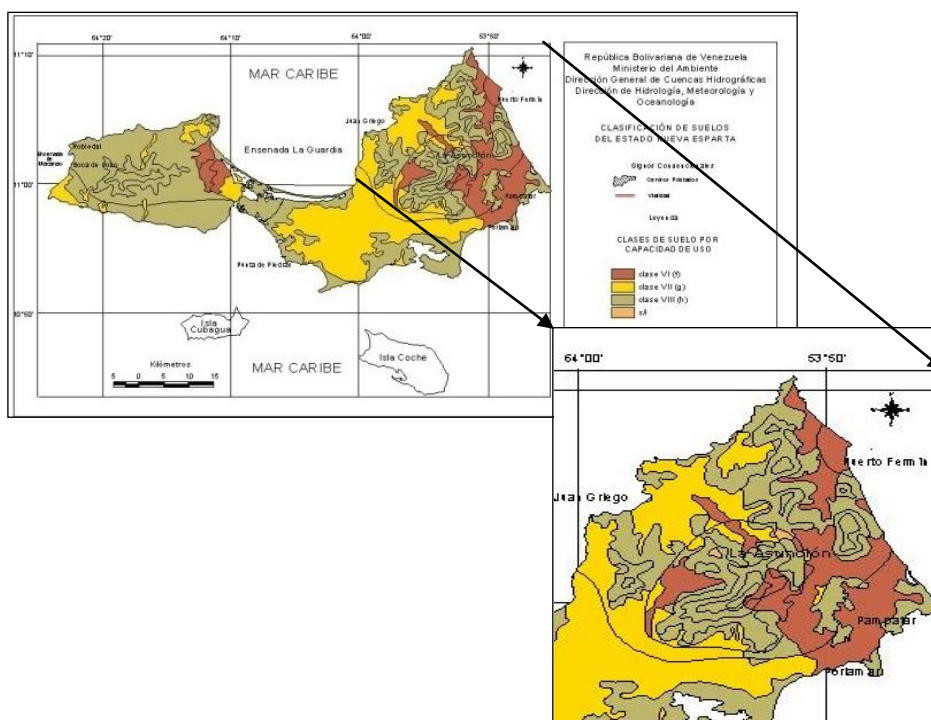


Figura 2.3.- Suelos del estado Nueva Esparta. Fuente: MARNR. 2006.

2.6.- Hidrografía

La hidrografía de la Isla de Margarita refleja las condiciones reinantes que corresponden a su clima marítimo, cálido y muy seco. Los ríos de la entidad tienen un régimen de escurrimiento bastante irregular, presentándose secos la mayor parte del año y torrenciales por cortos períodos, típicos de zonas de baja pero intensa y concentrada precipitación anual. De ellos, los principales son: San Juan (pozas de San Juan), San Francisco, La Asunción, El Valle, Chaguaramal, El Muco, La Vieja, Negro y Tacarigua.

Los principales ríos de Margarita Oriental nacen del macizo central margariteño, más o menos en forma radial, siendo los más importantes los siguientes: hacia el este, el Río de la Asunción que con rumbo hacia el este, viene a perder su expresión en las planicies de Agua de Vaca y en las playas de Guacuco. En la parte sur el Río Espíritu Santo, que recoge las aguas que fluyen de la parte sur del Cerro Copey y Cerro Grande, y que desde la población del Valle del Espíritu Santo fluye más o menos en dirección noreste y pierde su expresión en la planicie costera de Porlamar. Hacia la región oeste el río San Juan recoge las aguas de los macizos de La Guardia parte norte de Cerro Grande y las Serranías del norte de la población de San Juan Bautista; a partir del Caserío de Barrancas el río se dirige hacia el sur, se ensancha y pierde su identidad en las planicies costeras meridionales. En el norte el río más importante es el Tacarigua que recoge las aguas de las serranías que circundan la población de su mismo nombre, fluye en dirección noroeste y pierde su identidad en las planicies de Juan Griego. (Tomado de Frías, L. 2007).

Es importante destacar que el Estado depende del suministro de agua de tierra firme, el cual se efectúa mediante un acueducto submarino. (Tomado de Leal, R. 2008).

2.7.- Geología Regional

2.7.1.- Plataforma de Tobago y Margarita

La Plataforma Margarita - Tobago tiene una extensión de 250 km² dentro del territorio venezolano, estando delimitada por el meridiano 61° 50' y extendiéndose al este hasta llegar a la Isla de Tobago. Esta plataforma está enmarcada dentro del Margen continental de Venezuela el cual comprende varias cuencas sedimentarias, una cadena de islas, una prominencia amplia y varias zonas de gran desarrollo de plataforma continental, alguna de ellas con islas (González de Juana, *et al.* 1980 en Campos, C. y Guzmán, O. 2002).

En esta plataforma se localizan un gran número de islas de gran extensión como es el caso de Margarita, Cubagua, Coche, Islotes de Lobos, Los Frailes, La Sola y Los Testigos, además de dos rasgos geomorfológicos distintivos como son: el Banco de Cumberland y el Valle Submarino de Carúpano. El Banco de Cumberland es también conocido como Plataforma de Los Testigos, se ubica al sur del archipiélago Los Testigos, presentando fondos irregulares que en conjunto forman una amplia plataforma somera de menos de 20 m de profundidad que incluye las islas de Margarita, Los Frailes y Los Testigos (Maloney, 1967. en González de Juana, *et al.* 1980). (Ver Figura 2.4).

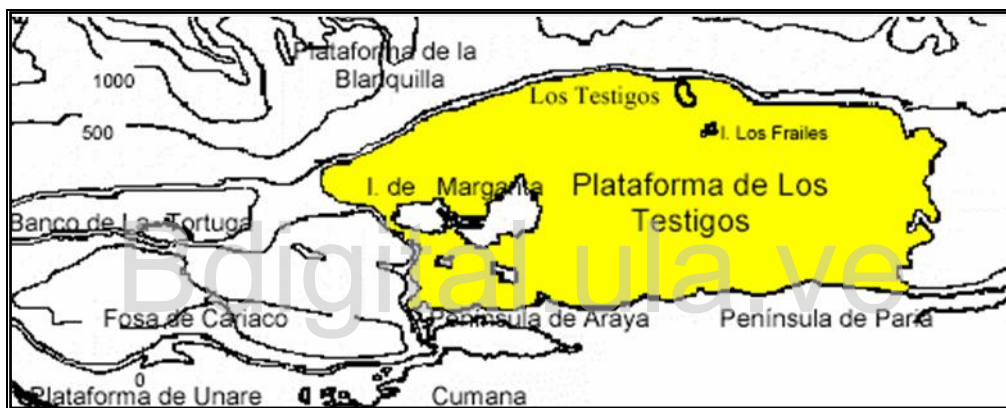


Figura 2.4.- Ubicación Regional de La Plataforma de los Testigos. Tomado de Campos, C. y Guzmán, O. (2002).

2.7.2.- Evolución geológica de la Isla de Margarita.

- **Etapas 1: Paleozoico – Jurásico – Cretácico Temprano?.**

En ésta etapa se indican eventos ocurridos en diferentes condiciones espacio - tiempo. Stöckhert *et al.* (1993, 1995) señala que para este momento las unidades que actualmente conforman la isla de Margarita no estaban unidas. Los sedimentos precursores de la Asociación Metamórfica Juan Griego eran constituyentes de un margen continental pasivo. Probablemente depositados sobre un basamento granítico (con su propia cobertura sedimentaria previa). Sin embargo, es importante resaltar, que algunos tipos de rocas gnéisicas que conforman ésta Asociación presenta características típicas de un basamento cristalino de alto grado metamórfico, como por ejemplo, cuerpos deformados cuarzo-feldespáticos de probable origen anatóctico. Una prueba más tangible de esto, resultó de la datación de seis fracciones de circón de un augen gneis de la península de Macano por el método U-Pb, de la cual se obtuvo una edad de 315 (+35 / -24) Ma (Pensilvaniense), lo que comprueba que la Asociación Metamórfica Juan Griego incluye elementos de corteza continental Paleozoica (Stöckhert *et al.* 1993, 1995).

Las Metamáficas de La Rinconada (Mplr) formaban parte de la corteza oceánica, mientras que las Metaultramáficas de Cerro El Copey (Mpec) todavía se encontraban constituyendo el manto superior (STÖCKHERT *et al.* 1993, 1995). Los protolitos de las rocas metasedimentarias de la Asociación Metamórfica Los Robles pueden haberse encontrado en un nivel superficial de alguna corteza continental o pueden haber no existido aún (Stöckhert *et al.* 1993, 1995). Chevalier (1987) no considera éste período dado que no tenía ninguna edad o datación disponible en su momento que lo vinculase al Pensilvaniense, sin embargo señala que hacia el Jurásico Tardío, la extensión oceánica provoca una importante transgresión del nivel del mar sobre la plataforma continental, instalándose una sedimentación carbonática (ver Figura 2.5). Dicha transgresión está marcada localmente, en la base, por los metaconglomerados encontrados en la Asociación Metamórfica Juan Griego (PMjg1), los cuales están formados por fragmentos líticos de naturaleza sedimentaria. Hacia comienzos del Cretácico, Chevalier (1987) señala una profundización en el nivel de las aguas, que genera depósitos pelíticos (actuales esquisto micáceo y esquisto granatífero).

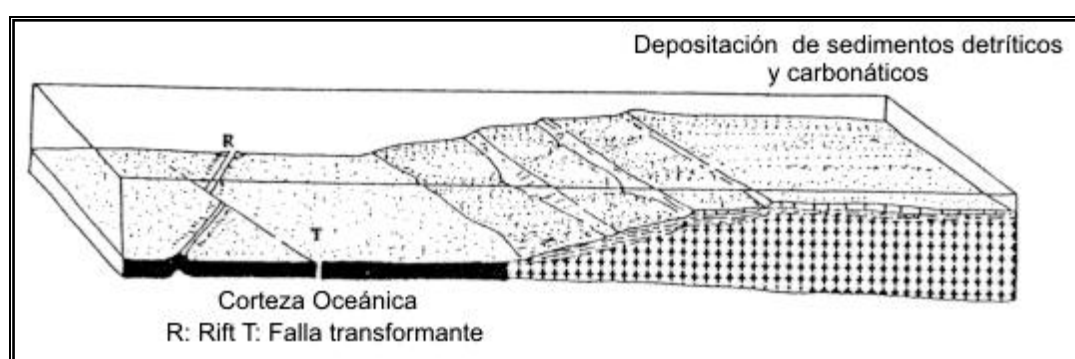


Figura 2.5.- Etapa pre colisión Jurásico Medio – Tardío de la evolución geodinámica de la isla de Margarita. Tomado y modificado de Chevalier (1987).

- **Etapas 2: Cretácico Temprano (Aptiense –Albiense).**

Stöckhert *et al.* (1993, 1995) indica que esta etapa ocurre la intrusión de la Metatrondjemita de Matasiete y el Gneis de Guayacán en el Complejo Metaofiolítico Paraguachí, las cuales se definen como intrusiones que se atribuyen ya sea a 1) diferenciaciones de basalto sub alcalino, asociados a la formación de neo-corteza en un escenario de apertura oceánica (plagiogranito), o a 2) intrusiones calco-alcalina de arco. Por la composición química y mineralógica se prefiere la hipótesis de que fuera formado en condiciones de zona de divergencia.

Tomando en cuenta las características ya descritas de estas intrusiones, y con base en la edad radiométrica determinada para las mismas, se indica que la acreción y el metamorfismo de alta P/T deben ser más jóvenes de 114 –105 Ma. Esta edad es obtenida a partir de circones del Gneis de Guayacán por el método U-Pb, sin embargo dada la completa equivalencia entre ésta y la Metatrondjemita de Matasiete, en sus elementos mayoritarios, minoritarios y composición isotópica, se puede considerar que ambos tipos de roca presentan un origen común. Las rocas precursoras al Complejo Metaofiolítico Paraguachí globalmente serían entonces de edad Aptiense-Albiense o anteriores.

Como evento previo a las intrusiones de Matasiete y Guayacán, señala la ocurrencia de una obducción de la corteza oceánica sobre el paleomargen (ver Figura 2.6), donde luego durante el Neocomaniense y afectando tanto el paleomargen como a las ofiolitas, señala la presencia de un período de actividad plutónica (ver Figura 2.6) (pluton granodioríticos y graníticos) representados actualmente por el Gneis de Guayacán, la Metatrondjemita de Matasiete, el Metagranito de El Salado, entre otros.

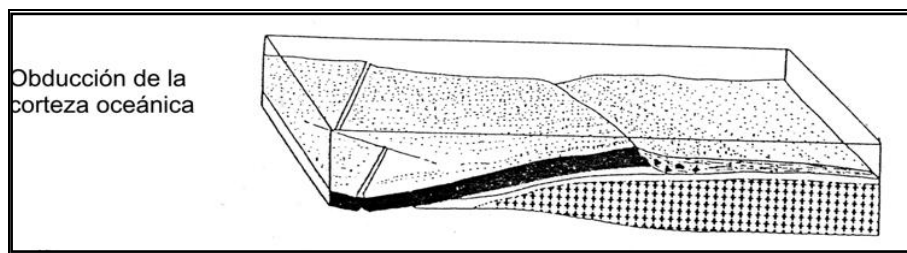


Figura 2.6.- Etapa pre colisión de la evolución geodinámica de la Isla de Margarita. Tomado y modificado de Chevalier (1987).

Según Chevalier (1987) ésta cordillera en vías de ascenso genera un surco frontal (de piedemonte), donde se deposita una secuencia euxínica (posteriormente esquisto grafitoso de la unidad media de la Asociación Metamórfica Juan Griego), cuya fuente de sedimento es el desmantelamiento de las ofiolitas obducidas y las intrusiones graníticas (ver Figura 2.7).

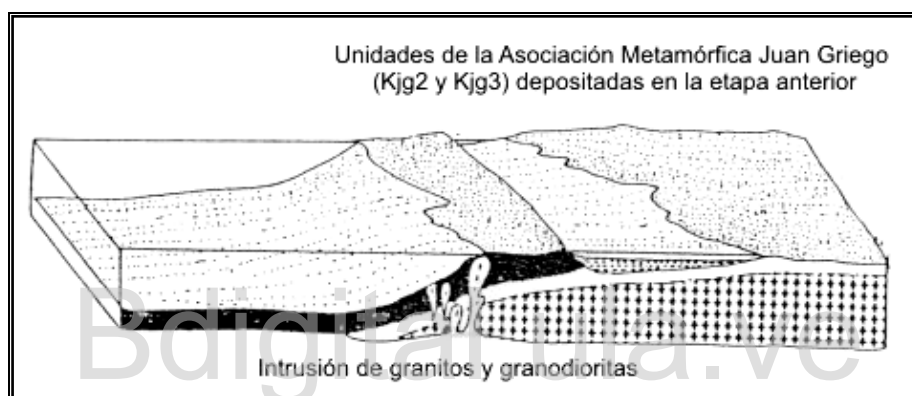


Figura 2.7.- Etapa pre-colisión de la evolución geodinámica de la isla de Margarita II. Tomado y modificado de Chevalier (1987).

Luego durante el Barremiense – Aptiense el autor señala un aumento en el nivel del mar, apareciendo la deposición de barras de carbonatos que parecieran presentar continuidad lateral, actualmente representadas por la unidad superior- Mármol de El Piache de la Asociación Metamórfica Juan Griego, estas barras señala Chevalier (1987) son dependientes en su distribución y deposición de la topografía heredada de los episodios compresivos y distensivos anteriores.

La crítica que se puede hacer a la hipótesis de Chevalier (1987) es que en las condiciones por el indicadas expresadas en la Figura 5.24, no parece probable que pueda ocurrir magmatismo, por eso se prefiere la hipótesis de Stöckhert *et al.* (1993, 1995) que Matasiete y Guayacán se hallan formado en condiciones de cadenas centro-oceánicas. Las características del Metagranito de El Salado son totalmente distintas a las de Matasiete y Guayacán, por lo tanto no parece adecuado involucrarlo en esta etapa como indica Chevalier (1987)

- **Etapas 3.**

Se indica que para éste momento los bloques requeridos (corteza basáltica y peridotita, corteza continental y sus sedimentos, como fragmentos del rifting del protoCaribe) ya estaban disponibles para la acreción y metamorfismo, en un escenario de *fore-arc* debido a la convergencia de Farallón – ProtoCaribe (ver Figura 2.8).



Figura 2.8.- Reconstrucción simplificada de la etapa 3 (Albiense – Cenomaniense) de la evolución geodinámica de la isla de Margarita. La flecha muestra la ubicación asumida de la Agrupación Margarita. Tomado y modificado de Stöckhert *et al.* (1995).

Durante éste proceso, el Complejo Metaofiolítico Paraguachí, la Metatrondjemita de Matasiete, el Gneis de Guayacán, y los metasedimentos de la Asociación Metamórfica Juan Griego, fueron juxtapuestos y enterrados a profundidades de al menos 40-50 km, donde fueron afectados por deformaciones dúctiles penetrantes y por condiciones de P/T muy elevadas, alcanzando niveles de hasta 500-600°C y 10-14 kbar, la cual es una temperatura característica de márgenes convergentes. Para efectos de esta etapa a las rocas de las unidades arriba mencionadas ya acrecionadas y juxtapuestas durante ésta etapa les llamaremos informalmente “*Agrupación Margarita*”. Esto implica que las rocas de la Agrupación Margarita se involucran en los procesos propios de un complejo de subducción.

Es posible que las eclogitas encontradas dentro de la Asociación Metamórfica Juan Griego hayan experimentado un metamorfismo aún mayor, que atribuyen a la posibilidad de que lentes aislados de eclogita hayan sido subducidos a 70 km de profundidad antes de su incorporación a la Agrupación Margarita. Sin embargo tanto las Metaultramáficas de Cerro El Copey (Mpec), como la Metatrondjemita de Matasiete no preservan actualmente características de éste metamorfismo de alta P/T, lo que se debe a un metamorfismo posterior (overprint), que unido a que las composiciones químicas de estas rocas, no favorecieron o permitieron guardar un registro de dichas evidencias.

- **Etapas 4: Turoniense – Maastrichtiense.**

Este período está acompañado de la formación de magmas en el borde de la Placa Caribe Suramericana adyacente, generándose así la Granodiorita de Agua de Vaca (la cual será emplazada tectónicamente durante Eoceno Medio y Eoceno superior).

En ésta etapa, ocurre la intrusión del Granito de El Salado datado con cuatro poblaciones de circones, de dos localidades distintas, utilizando el método U-Pb arroja una edad de 86 Ma la cual, a su vez post-data el evento metamórfico de alta P/T, ya que ésta unidad intruye presuntamente las rocas de alta presión (metabasaltos) del Complejo Metaofiolítico Paraguachí, sin ser afectado por el metamorfismo de alta presión (ver Figura 2.9) (Stöckhert *et al.* 1993, 1995).

Al final de ésta etapa la “Agrupación Margarita” (rocas acrecionadas y juxtapuestas en la etapa 3) cambian a una posición de arco, enfriándose por debajo de aproximadamente 400 °C, esto es comprobado con las determinaciones de K-Ar y ⁴⁰Ar-³⁹Ar en cuatro muestras de fengitas de esquistos de alta presión de la Asociación Metamórfica Juan Griego arrojaron edades de 80 – 90 Ma, indicando el enfriamiento regional en el momento de la intrusión del Granito de El Salado.



Figura 2.9.- Reconstrucción simplificada de la etapa 4 (Turoniense - Maastrichtiense) de la evolución geodinámica de la isla de Margarita. La flecha muestra la ubicación asumida del Complejo de Margarita. Tomado y modificado de Stöckhert *et al.* (1995).

Como se menciona anteriormente atribuye éstas intrusiones al Neocomaniense, indicando para el Cretácico Superior (Maastrichtiense – Campaniense) la instalación de un arco insular vinculado a una subducción de vergencia probablemente occidental donde ocurre volcanismo basáltico, toleítico “sensu lato”. Dentro de las zonas más internas, éste volcanismo está marcado por composiciones andesíticas y basálticas, el cual es vinculado por el autor a las secuencias de tobas y cherts negros (Volcánicas de Los Frailes). Dadas las características del Granito de El Salado con granulometría muy gruesa probablemente porfirítica, es probable que constituya una intrusión granítica epizonal en un ambiente tectónico de arco de isla.

- **Etapla 5: Paleoceno inferior (Daniense).**

En esta etapa el ascenso o exhumación de la “Agrupación Margarita” fue interrumpido a niveles intermedios de la corteza por un período de aproximadamente 30-40 Ma, quedando expuesto a un régimen de transcurrancia (*strike – slip*) similar al actualmente encontrado en el límite de placas entre la placa Caribe y la placa Suramericana, lo que generó fuertes deformaciones en un nivel intermedio de la corteza, bajo la condición de metamórfismodinamotermal de las facies de los esquistos verdes, cuya acción influye de forma penetrativa en la Asociación Metamórfica Juan Griego, mientras que en el Complejo Metaofiolítico Paraguachí se concentra en zonas de cizalla.

Durante ésta etapa, los sedimentos precursores de la Asociación Metamórfica Los Robles son igualmente metamorfizados y alcanzan su actual relación espacial con respecto a la “Agrupación Margarita”. La edad absoluta de esta etapa, es obtenida por el método Ar-Ar en un anfíbol magmático perteneciente a un gabro, el cual arrojó 66 Ma.

La característica estructural prominente desarrollada, corresponde a la segunda fase de deformación descrita en el capítulo anterior, en la cual se desarrolla una dirección casi horizontal de estiramiento (L1), con tendencia NE o E-NE en toda la isla.

Probables foliaciones previas son plegadas, con ejes de pliegues paralelos a la dirección de estiramiento. Se sugiere que esta fase de deformación está acompañada de fallas intracontinentales y el desarrollo de las napas.

- **Etapla 6: Eoceno Temprano – Medio.**

Se indica que la reequilibración en zonas de cizalla genera una nueva mica blanca, con edades de K-Ar de 55-50 Ma. La “Agrupación Margarita”, ahora incluyendo las rocas de la Asociación Metamórfica Los Robles sufre un rápido enfriamiento por debajo de los 300 °C a 53-50 Ma, determinado por

huellas de fisión en circones del Metagránito de El Salado, y una transición de una deformación dúctil bajo las condiciones de los esquistos verdes a un régimen frágil de fallamiento.

En ésta etapa un significativo levantamiento o exhumación trae a las unidades de la “Agrupación Margarita” de un nivel intermedio de la corteza a un nivel superficial. A 50 Ma una reestructuración tectónica mayor toma lugar (fase 3 de deformación), la cual puede estar relacionada con la extensión causada por los cambios relativos de los vectores de movimiento mientras que el arco pasaba la “esquina” de Colombia (ver Figura 2.10).

Para ésta etapa, propone un modelo tectónico en trans-colisión, para justificar, entre otras, la preponderancia del desplazamiento longitudinal y el paralelismo de las lineaciones de elongación en la dirección global de la sección orogénica estudiada. Teniendo en cuenta éste mecanismo, la dirección de éstas elongaciones poseerá una orientación aparente NWSE.



Figura 2.10.- Reconstrucción simplificada de la etapa 5 (Eoceno Temprano - Medio) de la evolución geodinámica de la isla de Margarita. La flecha muestra la ubicación asumida del Complejo de Margarita. Tomado y modificado Stöckhert *et al.* (1995).

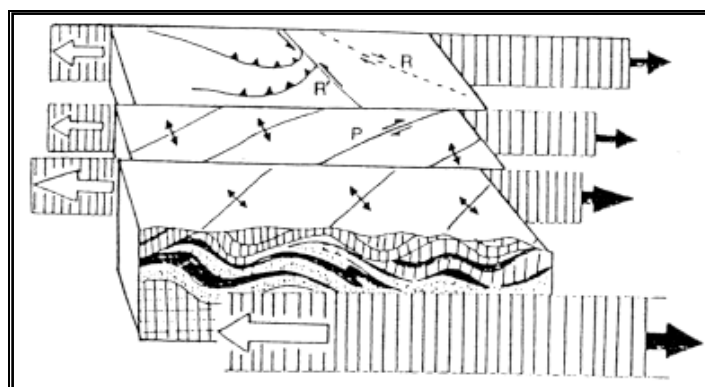


Figura 2.11.- Modelo de transcolisión. Tomado y modificado Chevalier (1987).

Simultáneamente con lo anterior, en esta etapa comienza la depositación de sedimentos Eocenos (Formación Pampatar y Grupo Punta Carnero) en el centro de la cordillera metamórfica (ver Figura 2.12), en una cuenca desarrollada sobre una zona de debilidad preexistente, la que es asumida como una cuenca *pull-apart*, además éste señala que la estructura de éstos depósitos se atribuye a la tercera

fase de plegamiento, así como a sus características sedimentarias, entre las que se encuentran niveles de *slump* generados.

- **Etapas 7.**

Esta etapa se caracteriza por una deformación enteramente en el dominio frágil, donde la extensión presenta una dirección este noreste – oeste suroeste.

Se generan fracturas, las cuales son rellenadas generando numerosas vetas de cuarzo en diferentes direcciones. Estas vetas revelaron que los fluidos que las originaron corresponden a fluidos de baja a moderada salinidad, con contenidos de CO₂ y otros componentes en pequeñas cantidades. Las variaciones significativas en densidad en las mismas revelan variaciones de presión y temperatura en los sistemas hidrotermales.

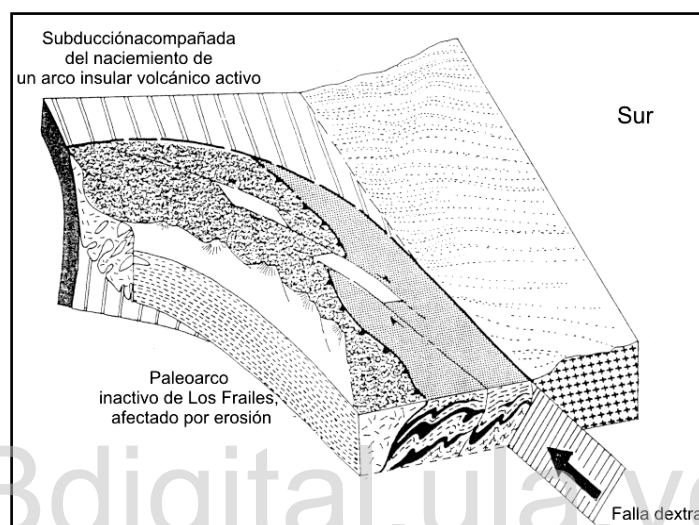


Figura 2.12.- Representación idealizada de la Placa Caribe en el Eoceno Temprano a Medio. Tomado de CHEVALIER (1987).

- **Etapas 8: Eoceno Medio.**

Diques de composición basáltica a andesítica se intruyen siguiendo las fracturas formadas en la etapa anterior. Estas intrusiones fueron datadas por el método de ⁴⁰Ar-³⁹Ar aplicado a fenocristales de anfíbol de cinco diques obteniendo una edad de 52-47 Ma.

- **Etapas 9.**

Fallamiento inverso en direcciones variables, parcialmente caracterizado por reactivación de un antiguo sistema de fracturas.

- **Etapas 10.**

En ésta etapa se desarrolla fallamiento normal en diferentes orientaciones, a su vez caracterizado principalmente por la reactivación de fallas o sistemas de fracturas anteriores.

- **Etapas 11: Mioceno Medio.**

Dado que durante el Mioceno Temprano (17 Ma) ocurre un levantamiento, de los cinturones alóctonos entre los cuales se encuentra Margarita, el cual fue causado por la flotabilidad de la corteza continental de Sudamérica en la entrada a la fosa del Caribe, lo que originó un proceso de erosión de estas zonas levantadas, que luego generó la discordancia de la Formación Cubagua sobre las capas Eocenas y rocas metamórficas. Se considera que ésta etapa erosiva pertenece al Eoceno Tardío – Oligoceno

Medio, en base a una correlación con la cuenca de Carúpano. Durante el Mioceno Medio Tardío se ha propuesto que hubo un cambio en el movimiento relativo de la placa Caribe, pasando de una dirección sureste a una este- oeste, produciendo un período de tectónica generalmente trancurrente destal la cual lleva a la isla de Margarita a su posición actual.

La depositación de sedimentos Neógenos ocurre en un episodio de relativa quietud tectónica. Pocas y muy dispersas fallas cortan los sedimentos Neógenos y controlan en cierto modo la morfología de la isla.

La historia de la “Agrupación Margarita” desde el Eoceno está caracterizada por deformación frágil, marcada por fallamientos normales e inversos, los cuales no presentan edades absolutas ligadas a ellos, a excepción de que la mayor cantidad de actividad tectónica precede a la depositación de sedimentos Neógenos, los cuales están afectados por fallamientos de bloque. La historia cortical de la isla de Margarita favorece modelos de placa que requieren un origen pacífico para la Placa Caribe, a su vez señalan que las etapas antes mencionadas (1-11) presentan una excelente correlación con la secuencia evolutiva como se observa en la Figura 2.13, donde se muestra una secuencia de reconstrucción simplificada de la tectónica de la Placa Caribe, donde además con una flecha se señala la ubicación de la “Agrupación Margarita”.

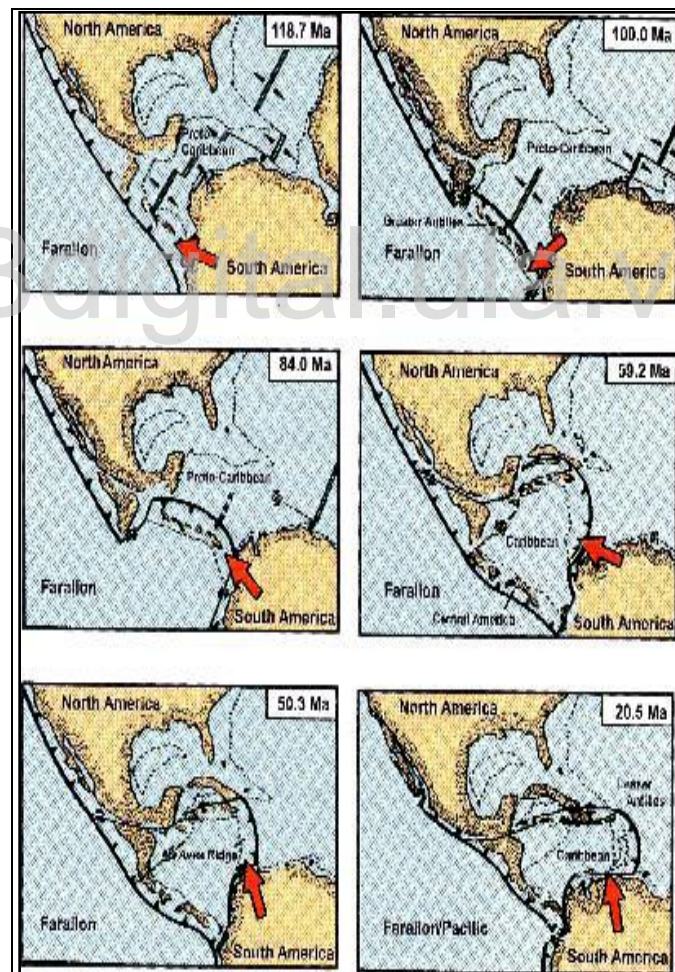


Figura 2.13.- Reconstrucción simplificada de la secuencia de movimiento de las placas tectónicas. Las flechas indican la posición de la agrupación Margarita. Tomado de MARESCH *et al.* (2000)

2.7.3.- Estratigrafía Regional.

El establecimiento de una secuencia estratigráfica completa en la Isla de Margarita presenta una serie de problemas debido a la ausencia de faunas indicativa de edad, dificultando esto la definición de correlaciones entre gran parte de las unidades litológicas existentes (ver Figura 2.14).

Eón	Era	Edad	Formaciones	Descripción Litológica
Fanerozoico	Cenozoico	RECIENTE		
		PLEISTOCENO	Fm. El Manglillo	Margas Arenosas y Coquinas
			Fm. Falca Fm. Coche Fm. Castillo	Arenas Cuarzosas Conglomerados Arenas Calcáreas
		PLIOCENO	Miembro Las Hernández	Arcillas Margosas
		MIOCENO	Miembro La Tejita	Conglomerados-Areniscas Calizas de poca elevación Limolitas- Arcillas
			Miembro La Güica	
		OLIGOCENO		
		EOCENO		
		PALEOCENO		
	Mesozoico	CRETASICO	Maastrichtiense	Fm. Los Frailes
			Campaniense	
			Santonense	
			Coniaciense	
			Turonense	
			Cenomaniense	
		JURÁSICO	Albiense	Fm. Los Robles
			Aptiense	
			Barremiense	
			Houtetiviense	
			Vatanginiense	
			Beriaciense	
			Grupo Juan Griego	Gneis, Esquistos, Cuarcitas. Facies de los Esquistos Verdes

Figura 2.14.- Columna Estratigráfica para la Isla de Margarita. Tomado de Campos, C. y Guzmán, O. (2002). Código Estratigráfico de Venezuela (2005).

2.7.4.- Geología Local

- **Depósitos Continentales (QP). Depósitos fluviales (Pleistoceno Tardío).**

En Margarita oriental aflora principalmente hacia el norte y muy raras veces en contacto con la costa. Se encuentra cubierta por depósitos holocenos de tipo marino – litoral y por la Formación El Manglillo. Por el contrario, yace sobre terrazas marinas del Pleistoceno Medio y sobre depósitos torrenciales de la misma edad, a su vez se observa sobre la Formación Arenas de Falca, Cubagua y Pampatar y descansando discordante sobre las rocas del Complejo Metaofiolítico de Paraguachí, las rocas metagraníticas de El Salado, Metatrondjemita de Matasiete y de las asociaciones metamórficas Los Robles y Juan Griego. Rekowski, F y Rivas, L. (2005).

El léxico estratigráfico de Venezuela (1997) nombra éstos depósitos como aluviones cuaternarios sin descripción y espesores específicos.

- **Metaultramáficas de Cerro El Copey (Kec). Cretácico.**

En Margarita Oriental aflora en cuerpos de gran extensión, ubicados principalmente en la zona nororiental y central, los cuales se encuentran formando cerros y colinas escarpadas, como Cerro Chico, Cerro Matasiete, Cerro Guayamurí, Cerro Los Micos, Cerro Guaraguao, Cerro El Guire, Cerro El Chaure, Cerro Las Minas, Cerro El Copey, entre otros. A su vez se observan cuerpos de menor extensión dispersos en toda Margarita Oriental. Ésta unidad está compuesta por serpentinita, peridotita serpentinizada, metadunita y metapiroxenita.

Describen que en Margarita Oriental, la serpentinita es el tipo más abundante de la unidad. Varían de color desde verde manzana pálido con un leve tinte azulado a negro, son rocas densas y compactas que ocasionalmente muestran unos pocos pseudomorfos de bastita, tiene relativamente pocas diaclasas y fracturas y está constituida por masas de antigorita verde pálida y una pequeña cantidad de mineral opaco, probablemente magnetita. En los afloramientos de serpentinita se hallan depósitos del mineral magnesita, el cual es de color blanco y el cual es producto de alteración de esta roca.

- **Asociación Metamórfica Juan Griego (JKjg). Jurásico – Cretácico.**

En el sector oriental de la isla de Margarita, donde se encuentra la localidad tipo, los afloramientos del Grupo Juan Griego forman una faja irregular que se extiende desde los accesos occidentales de La Asunción, por el este, hasta el cerro La Guardia y Punta María Libre, al sur de Juan Griego, por el oeste, y limitando al sur con el macizo de El Copey. Otros afloramientos se encuentran entre San Antonio y el valle del Espíritu Santo, al NO de Porlamar, bordeando el macizo de El Copey por el flanco SE, y prolongándose hacia el norte por la Asunción, y a lo largo del valle que flanquea los macizos de Matasiete y Guayamurí, por el oeste. El grupo aflora también en los cerros de Tetas de María Guevara, al sur de La Restinga, y en Macanao, donde abarca la mayor parte de la zona montañosa de la península.

El Grupo Juan Griego está constituido por rocas de origen sedimentario metamorizadas a la facies de los Esquistos Verdes. Los principales litotipos que lo integran, son gneises cuarcíticos, gneises y esquistos, cuarzo-feldespáticos, esquistos cuarzo-micáceos, esquistos grafitosos, esquistos granatíferos y cuarcitas y en menor proporción esquistos clorítico-epidóticos y conglomerados, y Chevalier. Las gneises son rocas con bandeamiento desde ligero a más pronunciado, duras, compactas, de color claro con tendencia grisácea, de grano fino a mediano. Algunas variedades contienen granates que pueden alcanzar tamaños hasta de 1 cm.

El Grupo Juan Griego en tres unidades: 1) un intervalo basal o de esquistos cloríticos, que consideró concordante sobre las Anfibolitas de Paraguachí, constituido esencialmente, por esquistos cloríticos con alto contenido de clorita (> 20%) y menor cantidad de muscovita, granates enhédricos, cuarzo y albita; 2) una unidad feldespática intermedia, constituida por gneises y micaesquistos, cuarzo feldespáticos, y algunos lentes de mármol bandeado; y 3) una unidad superior de esquistos grafiticos, integrada por esquistos grafitosos, con intercalaciones de esquistos micáceos y con capas de cuarcitas impuras, en parte grafiticas, en la parte inferior.

No se han medido ni estimado espesores del grupo; sin embargo se estima un espesor de 1.200 m para su unidad feldespática y de 500 m para la unidad de esquistos grafitosos.

- **Formación Grupo Los Robles (Klr). Cretácico (Neocomiense-Albiense).**

La unidad aflora en la zona sur y sureste de la isla de Margarita, desde Los Bagres hasta el cerro El Piache, La Asunción y Los Robles. Está compuesta en su parte inferior por mármol de El Piache, localmente dolomítico, de grano fino uniforme y de color predominante gris a gris verdoso con tonos rosados, blancos, verdes y púrpura. Su parte superior consiste de una espesa sección de rocas filítico-esquistosas, entre las cuales se distinguen las siguientes variedades: 1) esquisto cuarzo-sericítico-calcáreo, 2) esquisto-cuarzo albitico-muscovítico, 3) esquisto epidótico-cuarzo clorítico y 4) esquisto biotítico-clorítico-cuarzo-muscovítico. La unidad incluye además cuarcita micácea-grafitosa y escasas metatobas. Taylor (1960) estimó un espesor mínimo de 2.000 metros. La unidad no contiene fósiles.

- **Granito El Salado (Kes). Terciario.**

Sus mayores afloramientos se localizan a 0,5 Km al noroeste del pueblo de El Salado, en la Isla de Margarita. Otros afloramientos están ubicados en la parte sur de los cerros Santa Elena y Los Micos. La roca varía en textura desde granular, a intensamente cizallada, llegando a formar verdaderos a gneisses. Estos son de color excepcionalmente oscuro, en parte, por el avanzado estado de meteorización común en las variedades muy cizalladas. El intrusivo está compuesto por microclinopertítico en grandes cristales anhedrales de hasta 1 cm de diámetro, y en fragmentos granulados intersticiales menores, albita vestigial en cristales anhedrales de hasta 5 mm de diámetro, albita recrystalizada, cuarzo, epidoto, mica blanca y biotita. Con la deformación y recrystalización, se produce un aumento de mica blanca y epidoto, y disminución del feldespato ígneo vestigial. En las variedades cizalladas, los augen consisten en fragmentos rotos de microclinopertítico, oligoclasa sódica y agregados proclinalinos de los mismos, que gradan a alineamientos paralelos a la foliación, esta última, determinada por la alternancia de bandas de cuarzo con bandas de albita-microclino-mica, blanca-epidoto y mica blanca-biotita-epidoto-esfena. De acuerdo a su composición, la roca ha sido clasificada como granito o adamelita.

- **Complejo Metaofiolítico Paraguachí (Jp). Jurásico-Cretácico.**

El intervalo fue descrito por primera vez por Hess y Maxwell (1949), bajo la denominación de División de Rocas Verdes. Posteriormente, ha sido designado como Anfibolita de Paraguachí (Taylor, 1960), Grupo de los Esquistos Verdes (Jam y Méndez, A., 1962 y González de Juana, 1968), Grupo La Rinconada (Maresch, 1973, 1972). Navarro (1988), propone para este conjunto de rocas, el nombre de Complejo de Paraguachí, variación de la designación original dada por Taylor (*op. cit.*), en consideración a la complejidad y variabilidad litológica de la unidad, cual no incluye rocas ultramáficas, la carretera que une la población de Manzanillo, en el extremo norte de la isla de Margarita, con el pueblo pesquero de Guayacán en la costa noroccidental de la misma. Hipoestratotipos pueden ubicarse a lo largo de la carretera Puerto Fermin-Manzanillo, cerca de esta última población, en los acantilados costeros ubicados al suroeste de Guayacán, en Punta Zaragoza (al norte de la playa de Pedro González) y en la carretera Santa Ana-Pedro González.

En su concepción moderna, el complejo comprende las rocas originalmente atribuidas al Grupo La Rinconada, a las cuales se agrega una secuencia ultrabásica; el conjunto constituye parte de un complejo ofiolítico.

2.8.- Características Hidrogeológicas de la Isla de Margarita

El MINAMB, a través del texto explicativo del mapa hidrogeológico preliminar del Estado Nueva Esparta (Hrgetic, 1986, en Vargas *et al.*, 1997), divide las unidades litológicas que afloran en la región en tres (3) categorías de acuerdo a sus características hidrogeológicas en:

- Unidad de rocas no consolidadas o poca consolidadas, permeables por porosidad intergranular.

En esta unidad se encuentran los acuíferos granulares de permeabilidad baja, los cuales incluyen aluviones y depósitos de piedemonte. Entre los aluviones destacan aquellos vinculados a los ríos o quebradas que desembocan en las bahías de Juan Griego y Guamache y en las lagunas de Las Marites y La Restinga. Litoestratigráficamente esta unidad comprende a las Arenas de Falca y a las formaciones Coche y Cubagua (Vargas *et al.*, 1997).

- Unidad de rocas consolidadas, permeables por fisuración y disolución.

El estudio realizado por el MARNR incluye en esta unidad, a aquellas rocas que de acuerdo a sus características composicionales, permiten por fractura o disolución, presentar condiciones favorables para formar acuíferos de permeabilidad media a baja, incluyendo en este grupo a las unidades litoestratigráficas El Piache y el Grupo Juan Griego (Vargas *et al.*, 1997).

- Unidad de rocas prácticamente impermeables:

En esta unidad se ubican aquellas rocas prácticamente impermeables, incluyéndose en este grupo las rocas pertenecientes al Grupo Los Robles.

Cabe destacar que esta clasificación realizada por el MINAMB es de carácter general, pues en estudios petrográficos detallados realizados en rocas principalmente del Neógeno y Eoceno en la Isla de Margarita, las mismas muestran variaciones importantes de porosidad, las cuales pueden en algunos casos, variar la ubicación de estas unidades litoestratigráficas dentro de la clasificación realizada, de acuerdo a sus condiciones hidrogeológicas (Vargas *et al.*, 1997).

Bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 3.- MARCO TEÓRICO.

3.1.- Antecedentes.

Se puede reconocer la importancia del estudio a detalle de las aguas subterráneas, en especial en zonas insulares, donde las condiciones de temperatura, precipitación, vegetación, entre otros, determinan un clima árido y donde la concentración y recarga de un acuífero van a resultar, en ocasiones, un golpe propicio de la naturaleza. Es por esta razón, que el abastecimiento de agua potable generalmente es limitado en estas regiones, dependiendo casi totalmente, si es posible, del suministro foráneo desde tierra firme.

En este sentido, en los últimos años, se ha tenido una creciente tendencia a la búsqueda y evaluación de estos depósitos de agua; específicamente la Isla de Margarita, ha sido punto de observación para el desarrollo de diferentes estudios geológicos e hidrogeológicos que aportan información valiosa para la evaluación de sus acuíferos y que hoy sirven de referencia. A continuación se citan reseñas de estas publicaciones agrupadas en estas dos (2) áreas a saber: estudios geológicos e hidrogeológicos.

3.1.1.- Estudios geológicos.

En 1960, Taylor realiza el primer estudio geológico detallado de la Isla de Margarita y consideró que la división de rocas verdes del Grupo Juan Griego infrayace a la división cuarzosa; propuso el nombre de Anfibolitas de Paraguachí para las rocas verdes. Subdividió la división cuarzosa del Grupo Juan Griego en tres (3) unidades: clorítica, feldespática y grafitosa en la parte superior. Además, designó con el nombre de Miembro Metavolcánico de Manzanillo a los esquistos máficos de grano fino, expuestos cerca del extremo norte de la isla. Consideró el contacto Los Robles - Juan Griego como transicional. Posterior a esta investigación Maresch, (1973) efectúa uno de los trabajos más completos que se han presentado en la parte norte de Margarita oriental en lo referente a la petrología, petrografía y geoquímica. Presenta interesantes observaciones sobre la evolución tectónica de la región. Designa como Grupo La Rinconada lo conocido antiguamente como Grupo de los Esquistos Verdes o Anfibolitas de Paraguachí y lo coloca en la base de la secuencia metamórfica; considera que el contacto entre los grupos La Rinconada y Juan Griego es transicional. Eleva a la categoría de Formación Manzanillo al Miembro Metavolcánico de Manzanillo de Taylor; establece la correlación entre esta formación y una parte del Grupo Los Robles y una posible correlación entre las formaciones Manzanillo y Tacagua; mantiene el término de mármol de El Piache como una designación informal de cuerpos lenticulares de mármol en el Grupo Los Robles.

Años más tarde, 1979, Vignali, publica un informe sobre la estratigrafía y estructura de las Cordilleras metamórficas de la Península de Araya-Paria e Isla de Margarita. Entre las conclusiones alcanzadas, se propone una redefinición del Grupo La Rinconada designándolo como Formación Volcánica de La Rinconada, al considerar, como había sido propuesto originalmente por Navarro, que estas rocas fueron incorporadas a la sedimentación por procesos gravitacionales y que actualmente representan un olistostroma intercalado entre las unidades feldespáticas y no feldespáticas del Grupo Juan Griego; considera que los bloques de eclogitas y anfibolitas cartografiadas en Macanao y Margarita oriental son parautoctonas, provenientes de la zona de afloramientos de las volcánicas de La Rinconada. Postula que los procesos que determinaron la primera generación de pliegues comenzaron a fines del Cretáceo Inferior.

Para contribuir con estos estudios Campos, C. y Guzmán, O. (2002) elaboraron una caracterización sedimentológica y estratigráfica de las facies turbidíticas del “flysch” Eoceno de la Isla de Margarita, para definir litofacies, asociaciones de facies, elementos arquitecturales, y secuencias estratigráficas;

con la finalidad de hacer una interpretación de los posibles subambientes turbidíticos, presentes en cada una de las secciones compuestas estudiadas. Para el año 2005 Rekowski, F. y Rivas, L., realizaron la integración geológica de la Isla de Margarita en el que se llevó a cabo una recopilación de la información con la finalidad de generar una base actualizada y obtener 18 cartas geológicas a escala 1:25.000, donde se presentan 36 unidades ígneo-metamórficas y 29 unidades sedimentarias. Además, se muestra que la mayoría de las rocas metamórficas aflorantes, ya sean de origen ígneo o sedimentario, han sufrido un metamorfismo de evolución retrograda, pasando de la facies de la anfibolita a la de los esquistos verdes, existiendo materiales que habían alcanzado las condiciones de la facies de la eclogita.

Briceño, A. (2006) en su estudio del Grupo La Rinconada en la parte Nororiental de la Isla de Margarita para identificar la presencia de paragonita y posibles yacimientos de dicho mineral, determinó que no hay presencia de vetas pegmatíticas de mica paragonita de forma significativa, por lo que no se pueden identificar posibles yacimientos. Los resultados de los análisis geoquímicos realizados en combinación con los análisis petrográficos, mostraron que una roca con alta concentración de Na^+ y presencia de micas, puede corresponder a Paragonita.

Terán, M. y Vásquez, P. (2009) en su caracterización geológica del acuífero ubicado en los sectores La Fuente – Paraguachí, utilizando el método de sondeos eléctricos verticales, determinaron que el acuífero está constituido en su mayoría por arcillas en su parte superficial, arenas y gravas a mayor profundidad, presentando un comportamiento de acuífero libre en su mayor parte, evidenciándose esto por la distribución de los niveles piezométricos sobre la capa permeable no alcanzando los niveles de arcilla. Con esta orientación, Rubicundo, M. y Velasco, R. (2010) desarrollaron una caracterización geológica del acuífero ubicado en el sector de Pedro González, a través de la aplicación de métodos directos como observación en campo de los afloramientos de las principales unidades geológicas de la zona y mediante la ejecución de sondeos eléctricos verticales (método indirecto), se determinaron las propiedades geoelectricas, disposición de las capas, así como la profundidad del substrato resistivo de las unidades estratigráficas del subsuelo. Se obtuvieron cinco pseudoperfiles litológicos, pudiendo identificar tres comportamientos: al norte materiales arenosos y en mayor proporción arcillosos, al este definido por un dominio de materiales arenosos y gravas y al oeste mostrando un comportamiento arcilloso en dirección noroeste y arenoso en dirección suroeste, ambos divididos por un cuerpo rocoso de geometría cóncava asociado al basamento metamórfico. El acuífero estudiado según Rubicundo y Velasco tiene un comportamiento libre hacia el este, sin embargo, hacia la costa, norte del área de estudio, se infiere que el acuífero adopta un comportamiento confinado.

3.1.2.- Estudios hidrogeológicos.

Simultáneas a estas investigaciones geológicas en 1997 comienzan a realizarse estudios de reconocimiento de las características hidrogeológicas de la Isla de Margarita, Vargas, *et al.* realizaron una evaluación a través de una recopilación de datos de 209 pozos, así como interpretaciones climáticas, geoquímicas y geológicas; entre los resultados obtenidos se muestra que los sistemas hidrogeológicos de la Isla de Margarita no representan una alternativa sustituta para el abastecimiento de agua; sin embargo se puede suplir las necesidades de pequeñas poblaciones aledañas a la Isla. También señala que los sistemas hidrogeológicos con mejores áreas de acuíferos son los que se encuentran ubicados en la zona oriental de esta región insular, indicando que la evolución hidrogeoquímica que presentan las aguas subterráneas del lugar está relacionada directamente con las características fisiográficas. Las concentraciones de sulfato y nitrato en la isla, permiten proponer acuíferos contaminados hacia las poblaciones de San Juan, El Cardón y Punta de Piedras, pero por otro lado la distribución de Na^+ , Cl^- y Mg^{+2} hacia la zona de La Fuente - Paraguachí, demuestra la poca influencia de frentes salinos en el total de sólidos disueltos en pozos ubicados a 1 kilómetro de la

costa. Para explicar esto, Rodríguez, D. (2000) realizó un estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la zona La Fuente – Paraguachí de la Isla de Margarita, el cual atribuye que el proceso de interacción agua-roca es el que proporciona la calidad que muestran las aguas subterráneas, basándose para esto en las variaciones litológicas y a su vez de los elementos químicos mayoritarios, minoritarios y traza. Relacionó la calidad química de las aguas subterráneas con factores antrópicos en algunos lugares de la región, también utilizó parámetros físicos-químicos y relaciones iónicas para proponer que el sistema de acuíferos de agua dulce para consumo humano y agrícola está siendo afectado por la intrusión salina de la costa. Para actualizar estos estudios en la Cuenca La Fuente – Paraguachí, en el 2006, Michel, J. determinó la existencia de tres (3) tipos de aguas: bicarbonatadas magnésicas en las áreas de recarga, aguas cloruradas magnésicas y cloruradas sódicas en las áreas de descarga. Con la presencia de estos tipos de aguas se evidencia un proceso de evolución hidrogeoquímica el cual se encuentra caracterizado por un patrón de enriquecimiento en Na^+ y Cl^- a medida que cambian los sistemas hacia zonas más alejadas de las áreas de recarga. De igual manera las relaciones interiónicas, las distribuciones espaciales y los índices de saturación calculados señalan que el proceso evolutivo se debe principalmente a la disolución de sales, mezcla con aguas antiguas y al intercambio iónico.

En los mismos términos Corsi, J. (2006) realizó el estudio de los procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición de las aguas subterráneas en la cuenca Pedro González, Isla de Margarita, siendo caracterizados 16 pozos de agua subterránea ampliamente distribuidos en el área, con el objetivo fundamental de precisar información referente a los procesos responsables de la composición química de esta agua. En términos generales, estas aguas subterráneas adquieren su composición química como consecuencia de procesos de interacción agua-roca con las litologías que dominan la cuenca (Grupo La Rinconada y Gneis de Guayacán) además de la contribución de otros procesos tales como disolución de sales (magnesita, halita, yeso, epsomita y mirabilita), intrusión marina, evaporación y actividades antrópicas.

Para el 2007, Contreras, M. y Uzcátegui, M. realizaron un modelo hidrogeológico matemático del acuífero ubicado en el Sector Pedro González - El Salado, en el municipio Gómez de la Isla de Margarita, señalando que las aguas subterráneas de esta zona son de tipo cloruradas magnésicas, producto de la disolución de minerales contenidos en la rocas que dominan la cuenca (Complejo Metamórfico Paraguachí y Gneis de Guayacán). También establecieron que los problemas de contaminación por intrusión salina se presentan en los pozos cercanos a la costa, mientras que los pozos costa adentro no muestran contaminación por intrusión salina ya que la cuña está alejada del acuífero. En simultáneo, Frías, L. (2007) realizó un modelo hidrogeológico de los sectores La Fuente - Paraguachí del municipio Antolín del Campo de La Isla de Margarita, donde concluye que la conductividad y la salinidad presente en las aguas del acuífero no son aptas para su consumo, lo cual puede estar siendo influenciado por la desintegración de los minerales de las rocas como la halita o por la extracción constante de caudales de pozos cercanos a la costa que permite el arrastre de aguas del mar a los acuíferos.

Años más tarde, Díaz, A. y Monteagudo, N. (2009) desarrollaron una investigación donde analizaron la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero ubicado en el sector Pedro González – El Salado, Estado Nueva Esparta. En este estudio se actualizaron los parámetros hidrogeológicos y se evaluaron características físico-geomorfológicas, a través de la recopilación de información geológica e hidrogeológica de campañas de muestreo recientes y el uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales. La determinación de la vulnerabilidad fue desarrollado mediante tres metodologías: DRASTIC, GOD Y AVI, obteniendo como resultado para los métodos GOD y AVI, vulnerabilidad baja, en toda la extensión del acuífero; mientras que para el método DRASTIC se identificaron cuatro zonas de vulnerabilidad clasificadas como: despreciable, muy baja, baja y moderada, lo que permitió de acuerdo a las características intrínsecas del acuífero, interpretarse como un acuífero difícil de contaminar, pero en caso de ocurrir, su recuperación sería muy compleja.

3.2.- Aspectos teóricos fundamentales.

3.2.1.- Prospección Geofísica

Es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de yacimientos de sustancias útiles (petróleo, aguas subterráneas, minerales, carbón, entre otros), por medio de observaciones efectuadas en la superficie de la tierra.

3.2.1.1.- Método eléctrico

Es un método geofísico indirecto constituido por la determinación de las características geoelectricas del terreno en estudio. Permite medir potenciales y campos eléctricos por ocurrencia natural o inducida artificialmente en la superficie, lo que permite reconocer las formaciones geológicas que se encuentran en profundidad, empleando para ello, la utilización de los parámetros eléctricos.

Al emplearse el método eléctrico se evalúa la resistividad media del subsuelo mediante la medición de diferencia de potencial por transmisión de corriente a través de pares electrodicos, determinado así, las variaciones horizontales y verticales de los campos de potenciales eléctricos por fluidez de fenómenos electrolíticos dependientes del terreno.

La conducción eléctrica en la mayoría de las rocas es esencialmente electrolítica. Esto es debido a que las rocas (sus granos, particularmente) de por si, son aislantes, a excepción de algunas menas metálicas, por lo que la conducción eléctrica se realiza a través del agua intersticial que normalmente contienen, y que por lo general tienen, en mayor o menor grado, sales disueltas que las hacen conductoras. Por consiguiente, la resistividad de una formación será función de su contenido de electrolitos, que a su vez depende de la porosidad efectiva de la roca y del grado de saturación.

No existe una ley general que correlaciona litología con resistividad. No obstante, se puede establecer criterios generales, tales como el que la resistividad de las formaciones crece en el siguiente orden: arcilla, arena, grava y caliza; las rocas cristalinas tienen resistividades aun mayores.

- **Sondeo Eléctrico Vertical.**

Se llama sondeo eléctrico a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción. Es una herramienta ampliamente utilizada por su sencillez y la relativa economía del equipo necesario. La finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie; y finalmente, tratar de identificar el tipo de roca de acuerdo con su resistividad.

Un SEV puede realizarse sobre cualquier combinación de formaciones geológicas, pero para que la curva de resistividad aparente sea interpretable, el subsuelo debe estar representado por capas horizontales y homogéneas. En muchos casos la realidad se acerca lo suficiente a esta restricción teórica como para que los resultados sean aprovechables; en otros casos el procedimiento no es aplicable. (Tomado de López, *et al* 2006).

La profundidad de investigación viene determinada por la posición de los electrodos inyectores y detectores, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente. Un valor más útil puede ser la profundidad a la cual la mitad de la señal medida en la superficie es debida a la porción de suelo

superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal a la porción de suelo inferior. (Tomado de Gasulla, M. 2001).

La presencia de un estrato de alta resistividad cercano a la superficie bajo otro de gran resistividad, eleva el valor resultante del ensayo, al contrario de lo que sucede si existe un material de baja resistividad bajo un estrato de alta.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye. Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el sondeo eléctrico vertical, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca.

Los SEV establecen una curva de variación de la resistividad con respecto a la profundidad, permitiendo ser utilizadas sobre cualquier disposición de las formaciones geológicas que posean o que se asemejen a capas horizontales y homogéneas.

Al introducir una corriente eléctrica en el terreno a través de una pareja de electrodos de corriente (A y B), el patrón seguido por el flujo de corriente eléctrica es una respuesta a la resistividad del subsuelo. Estos patrones pueden cartografiados en superficie a través de otro par de electrodos (M y N) que miden las variaciones en el potencial de voltaje (ΔV). Estos voltajes son una medida de la energía requerida para que la corriente pase a través de los materiales y por ello también dependerá del valor de su resistividad.

- **Resistividad eléctrica de suelos.**

La resistividad eléctrica (ρ) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección s y longitud l la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad

$$\rho = \frac{R \times s}{l} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega \times m$), y se define la conductividad como el inverso de la resistividad, donde:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.

Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, entre otros, lo son prácticamente. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas. Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. La resistividad de las rocas puede variar en margen amplísimo en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros (Ver tabla 2.3) (Tomado de Gasulla, M. 2001).

- **Resistividad aparente.**

Como las mayorías de las mediciones se hacen sobre métodos heterogéneos reales, entonces la resistividad denotada como “ ρ ” se reemplaza por lo que se conoce como resistividad aparente “ ρ_a ”. Los valores de resistividad aparente obtenidos a través de levantamientos de campo y con diversas configuraciones de electrodos, nos permiten estimar las resistividades verdaderas de los diversos materiales de subsuelo.

Un arreglo de electrodos con espaciamento constante, es usado para investigar cambios laterales de la resistividad aparente lo cual refleja variabilidad geológica lateral, o anomalías características muy localizadas. Para investigar cambios en la resistividad con la profundidad, se hacen separaciones sistemáticas de los electrodos. La resistividad se ve afectada por los materiales a medida que se incrementa la profundidad (cuando se separan los electrodos).

Tabla 3.1.- Resistividades de las Aguas o rocas

Aguas o Rocas	Resistividad (en ohm.m)
Agua de mar	0,2
Agua de acuíferos aluviales	10-30
Agua de fuentes	50-100
Arenas y Gravas secas	1.000-10.000
Arenas y Gravas con agua dulce	50-500
Arenas y Gravas con agua salada	0,5-5
Arcillas	2-20
Margas	20-100
Calizas	300-10.000
Areniscas arcillosas	50-300
Areniscas cuarcitas	300-10.000
Cineritas, Tobs Volcánicas	20-100
Lavas	300-10.000
Esquistos grafitosos	0,5-5
Esquistos arcillosos o alterados	100-300
Esquistos sanos	300-3.000
Gneis, Granito alterados	100-1.000
Gneis, Granito sano	1.000-10.000

Fuente: Astier, 1982.

3.2.2.- Balance hídrico.

El establecimiento del balance hídrico, así como su cuantificación rigurosa, es uno de los aspectos más importantes en cualquier investigación hidrogeológica. Consiste en aplicar el principio de la

conservación de la masa, aunque en este caso se calcula en volumen, ya que a efectos de este balance las densidades se pueden considerar siempre constantes. Se aplica a una región definida por unas determinadas condiciones de contorno y para un determinado período de tiempo.

Se establece que la diferencia entre las entradas y las salidas del sistema que se ha definido, es igual a la variación de almacenamiento, es decir, debe existir una igualdad entre las entradas menos las salidas y las variaciones de agua almacenada en el sistema definido, positivas o negativas. Así, un balance hídrico siempre responde a una ecuación del tipo

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación de Almacenamiento} \pm \text{error} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Esta ecuación es aplicable a una región o unidad cualquiera (un acuífero, por ejemplo) y en un tiempo cualquiera. Sin embargo, cuando la unidad de tiempo es grande, se considera que las variaciones en volumen almacenado son despreciables y en este caso, las entradas son iguales a las salidas. (Custodio y Llamas, 2001).

Entonces en la ecuación los parámetros a utilizar son:

$$P = ETP + Esc + I \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Donde:

P: precipitación
ETP: evapotranspiración
Esc: escorrentía
I: Infiltración

- **Precipitación.**

Se consideran precipitaciones todas aquellas aguas que caen en la superficie terrestre en cualquiera de las formas posibles (líquido, sólido, agua – nieve, niebla...).

La precipitación constituye el componente del ciclo hidrológico que originan las aguas superficiales y subterráneas, de manera que su estimación y el conocimiento de su distribución en el tiempo y en el espacio serán esenciales. Su unidad de medida es la altura de agua caída sobre la superficie, medida en milímetros (mm).

La precipitación efectiva corresponde a la precipitación cuando se considera, en la práctica, lo que realmente llega a la superficie del terreno y la cantidad que de ésta escurre. Es lo que en realidad se puede evaporar y/o infiltrar de la precipitación.

- **Evaporación.**

Es el paso del agua de estado líquido a estado gaseoso. Este proceso de cambio de estado precisa agua y la energía que proporciona la radiación solar, llamada radiación neta. Las unidades de medida son los mm de altura de agua evaporada, lógicamente referida a un determinado período o unidad de tiempo. Es un parámetro difícil de evaluar, por tanto se utilizan diversos métodos, sean instrumentales, teóricos o formulas empíricas.

- **Evapotranspiración.**

Se define como la suma de la evaporación y de la transpiración en áreas cubiertas de vegetación, dada la imposibilidad práctica de cuantificar por separado ambos fenómenos. Se definen dos tipos o conceptos de evapotranspiración, la potencial y la real.

Desde el punto de vista práctico, dado que la evapotranspiración depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta, *Thornthwaite* (1948) introduce un nuevo concepto optimizando ambos. Es la llamada evapotranspiración potencial o pérdidas por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa. Será, por tanto, un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración y que se conoce con el nombre de evapotranspiración real. (Custodio y Llamas, 1976).

- **Escorrentía.**

Se llama escorrentía al caudal o aportación que circula sobre la superficie del terreno y que fluye hasta los ríos, el caudal medido en los ríos permite definir la escorrentía a través de aforos y elaboración de hidrogramas. Se llama escorrentía directa a la que pasa poco tiempo después de haber llovido o de haberse fundido las nieves.

- **Infiltración.**

El agua que penetra a través de la superficie del terreno se dice que ha infiltrado. Del agua infiltrada, una parte es retenida por el suelo hasta alcanzar la capacidad de campo y una vez superada esta retención máxima, el resto del agua desciende por gravedad hasta el nivel freático. A este volumen se le denomina infiltración eficaz o recarga por infiltración vertical.

- **Recarga y descarga natural.**

Recarga natural es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un período de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua.

Descarga natural es el volumen de agua que en un período de tiempo sale del embalse subterráneo a través de los manantiales terrestres, subfluviales o submarinos, y también por evapotranspiración, si la zona saturada queda próxima a la superficie en amplias áreas. (Custodio y Llamas, 1976).

3.2.3.- Parámetros hidrogeológicos.

La capacidad de almacenar y transmitir el agua por parte de un acuífero debe ser cuantificada para evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrogeológico. Por ello se asocian a las formaciones cuatro parámetros básicos en cuanto a su comportamiento respecto al agua que puedan contener y transmitir. Estos parámetros son:

- **Porosidad.**

Es la relación entre el volumen de espacio vacío o hueco y el volumen total de la roca. Es un parámetro adimensional y depende de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza. La porosidad de una formación puede estar ligada únicamente a la textura de la misma o depender además de las características del fluido que se mueve en su interior.

- **Coefficiente de Almacenamiento.**

Representa la capacidad para liberar agua de un acuífero. Se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de base unitaria y de altura la del acuífero, cuando desciende un metro el nivel piezométrico. Es, en consecuencia, un parámetro físico referido al volumen cedido por unidad de volumen del acuífero y es adimensional. La forma en que las formaciones geológicas liberan agua es distinta según su situación en la naturaleza y el estado de sus niveles piezométricos, sean acuíferos libres o confinados.

- **Permeabilidad.**

Es el parámetro que permite evaluar la capacidad del material de transmitir agua en función de la textura del mismo, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Dentro de este concepto se pueden definir otros dos:

La permeabilidad ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite, denominada *permeabilidad efectiva*, representada por el coeficiente de permeabilidad K ; y es definida como el caudal capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario.

La denominada *permeabilidad intrínseca*, k , que es sólo dependiente de las características internas del medio permeable.

- **Transmisividad.**

Es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, teniendo en cuenta no sólo la textura del acuífero y las características del fluido, sino también las características estructurales o geométricas. Se define como el producto de la permeabilidad efectiva K y el espesor del acuífero b .

3.2.4.- Niveles Piezométricos.

El nivel piezométrico es el nivel al que asciende el agua de un acuífero en un determinado punto, cuando se establece una vía de comunicación entre el acuífero y la superficie del terreno (pozo, galería, entre otros), se define como el valor de la cota que alcanza el agua cuando dicho punto se libera a presión atmosférica. Se miden con piezómetros y reflejan la energía potencial y de presión del acuífero en ese punto, expresada en términos de longitud.

En acuíferos libres, los niveles piezométricos son equivalentes al nivel freático, ya que la presión en la superficie libre del agua es igual a la presión atmosférica. Cuando un nivel piezométrico es mayor (más alto) que la altitud del terreno, entonces estaremos en la presencia de un acuífero surgente en ese determinado punto.

La unión de todos los niveles piezométricos de un acuífero generan la superficie piezométrica, que generalmente no es horizontal, sino curva, la cual simula la forma de la mesa de agua y la distribución de la presión del agua dentro del acuífero, por lo que también se denomina superficie piezométrica.

3.2.5.- El movimiento del agua subterránea y su composición química.

El agua de lluvia, es la fuente primaria de recarga de los acuíferos, y ésta agua toma una configuración química determinada antes de pasar a formar parte de los mismos. A partir de este momento el agua circula por el terreno, reapareciendo en superficie, unas veces con un recorrido relativamente corto (circulación local) y otras con un recorrido de cientos de km. (circulación regional). Los tiempos de

contacto con los materiales del acuífero son muy variados, tanto mayores cuanto mayor sea la profundidad y menor la permeabilidad, y por eso las aguas profundas suelen ser más salinas que las más próximas a la superficie dado que la oportunidad de disolver sales son mayores. Lo explicado anteriormente sobre las sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas se refiere al caso límite, es decir suponiendo un último contacto entre la roca y el agua durante un tiempo suficientemente largo. La temperatura, presión, tiempo de contacto, grado de porosidad y/o fracturación de la roca, y el déficit de saturación juegan además un papel esencial. En las rocas permeables por fracturación existe un contacto menos íntimo entre la roca y el agua que cuando la permeabilidad es por porosidad, y por lo tanto la cesión de sales es más lenta.

Con frecuencia las aguas de circulación local apenas interaccionan con el terreno y mantienen la configuración adquirida durante la infiltración, salvo que se produzca concentración por evaporación en zonas muy próximas a la superficie, a menos que encuentren terrenos que pueden aportar sales con gran facilidad, o se mezclen con aguas más profundas.

3.2.6.- Sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas.

No existen valores concretos para las sales que aportan los diferentes tipos de rocas, debido a que pueden presentar importantes diferencias de composición y alterabilidad de los minerales dentro de cada uno de ellos, sino también porque las condiciones climáticas, composición del agua de recarga, tiempo de contacto, longitud de recorrido, grado de aireación, permeabilidad, entre otros, influyen de forma importante.

3.2.7.- Aguas en interacción con diversos tipos de rocas.

3.2.7.1.- Aguas en interacción con rocas ultramáficas.

Las rocas ultramáficas están compuestas en gran medida por silicatos de magnesio tales como forsterita (Mg_2SiO_4) y enstatita (MgSiO_3), por lo que su proceso de meteorización es distinto al de otras rocas ígneas no solo por su composición química, sino también, porque la forsterita, la enstatita y la plagioclasa cálcica reaccionan rápidamente con agentes meteóricos. Razón esta por la cual es bastante común encontrar altos valores de sólidos totales disueltos (TSD) en aguas que están asociadas estos sistemas litológicos.

3.2.7.2.- Aguas en interacción con rocas félsicas

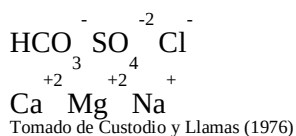
De acuerdo con Custodio y Llamas (1976) estas aguas por lo general son poco salinas, sin embargo; en zonas áridas donde la tasa de evaporación es alta la salinidad puede aumentar con facilidad. En ellas, el anión dominante es el HCO_3^- y los cationes que dominan son el Na^+ y el Ca^{+2} . Los mismos autores aseguran que debido a la gran disponibilidad de protones producto de la interacción $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$, existen cantidades importantes de sílice disuelta (SiO_2), entre 20 y 100 ppm la cual es un residuo de la alteración de silicatos. Además, existe la formación de arcillas tipo caolinita ya que la acidez de estas aguas permite liberar más átomos de sílice.

En los procesos de meteorización de feldespatos tanto potásicos como plagioclasa (albita), el proceso de hidratación varía un poco según las condiciones bajo las que se realice. Según datos contenidos en Hem (1985), las plagioclasas tienden reaccionar a los procesos de hidrólisis de forma inmediata, de acuerdo, a la proporción de alcalinos y alcalino térreos presentes en las mismas.

3.2.8.- Evolución de la composición química del agua en circulación regional.

En general, las aguas de circulación regional tienden a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando progresivamente en los diferentes iones. En una primera aproximación y entre los aniones, el primero que logra saturarse es el HCO_3^- , incluso ya desde que ocurre el proceso de infiltración de agua de lluvia sobre el área de recarga, posteriormente el SO_4^{2-} alcanza saturación. Por su parte, el cloruro según Custodio y Llamas, (1976) no llega a saturarse normalmente; mientras que en los cationes primero logra saturarse es el calcio, luego más difícilmente lo hace el magnesio y por último el sodio.

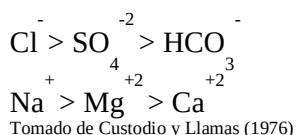
De este modo, la evolución normal de un agua de circulación regional es sucesivamente dominando por los siguientes iones:



Sin embargo, existen excepciones ya que el proceso de evolución puede empezar en una etapa de mayor avance o incluso tomar un retroceso para luego continuar con una evolución normal. En ese caso si el medio es fuertemente reductor el SO_4^{2-} disminuirá considerablemente para formar sulfuros. Custodio y Llamas, (1976) aseguran que si en el acuífero son aportadas fracciones de CO_2 , sea propio del proceso de reducción de los sulfatos o bien de algún otro origen, el contenido de HCO_3^- y Ca^{+2} puede aumentar de forma inesperada, aunque siempre limitada.

De este modo, los mismos autores sugieren que al ir aumentando la concentración de sales, aumenta la fuerza iónica y por lo tanto las solubilidades van incrementando ligeramente, permitiendo que los iones que antes saturaban puedan aumentar en cierta forma su concentración.

Los cambios de bases pueden alterar la evolución de los cationes, no solo en relación entre alcalinos y alcalinotérreos, sino también entre el Ca^{+2} y el Mg^{+2} .



3.2.9.- Diagramas Hidroquímicos.

Son utilizados para clasificar las diferentes clases de aguas subterráneas, a fin de informar de forma breve su composición química o de algunos aspectos de la misma. Las clasificaciones simples sólo dan una información global y en general reestablecen con vista a usos domésticos, urbanos, industriales o agrícolas (clasificación de las aguas para uso agrícola). Las clasificaciones geoquímicas contienen más información de carácter geoquímica y en cierta manera tienden a expresar de forma concisa lo que se tiene con los diferentes tipos de diagramas (diagrama de Piper y Shall).

3.2.9.1- Diagramas triangulares. Diagrama de Piper.

Custodio y Llamas, (1976) lo describen como un diagrama conformado por dos campos triangulares (uno correspondiente a aniones y el otro a cationes) separados por un campo central de forma

romboidal, en donde es representada la proporción de los aniones y cationes mayoritarios que dominan un tipo de agua en específico (ver Figura 3.1). En los vértices de cada uno de los campos triangulares le es correspondido un valor de 100% por cada catión (Na^+ , Mg^{+2} o Ca^{+2}) al igual que por cada anión (Cl^- , SO_4^{-2} o HCO_3^-), en donde es generado un punto de acuerdo con la proporción que representa cada uno. Por otra parte, en el campo romboidal es deducido un tercer punto debido a la intersección entre los planos proyectados desde los campos triangulares de los aniones y los cationes. En entre otros aspectos, estos gráficos permiten definir grupos de aguas, mezclas de aguas, precipitaciones, disoluciones, modificaciones, entre otros.

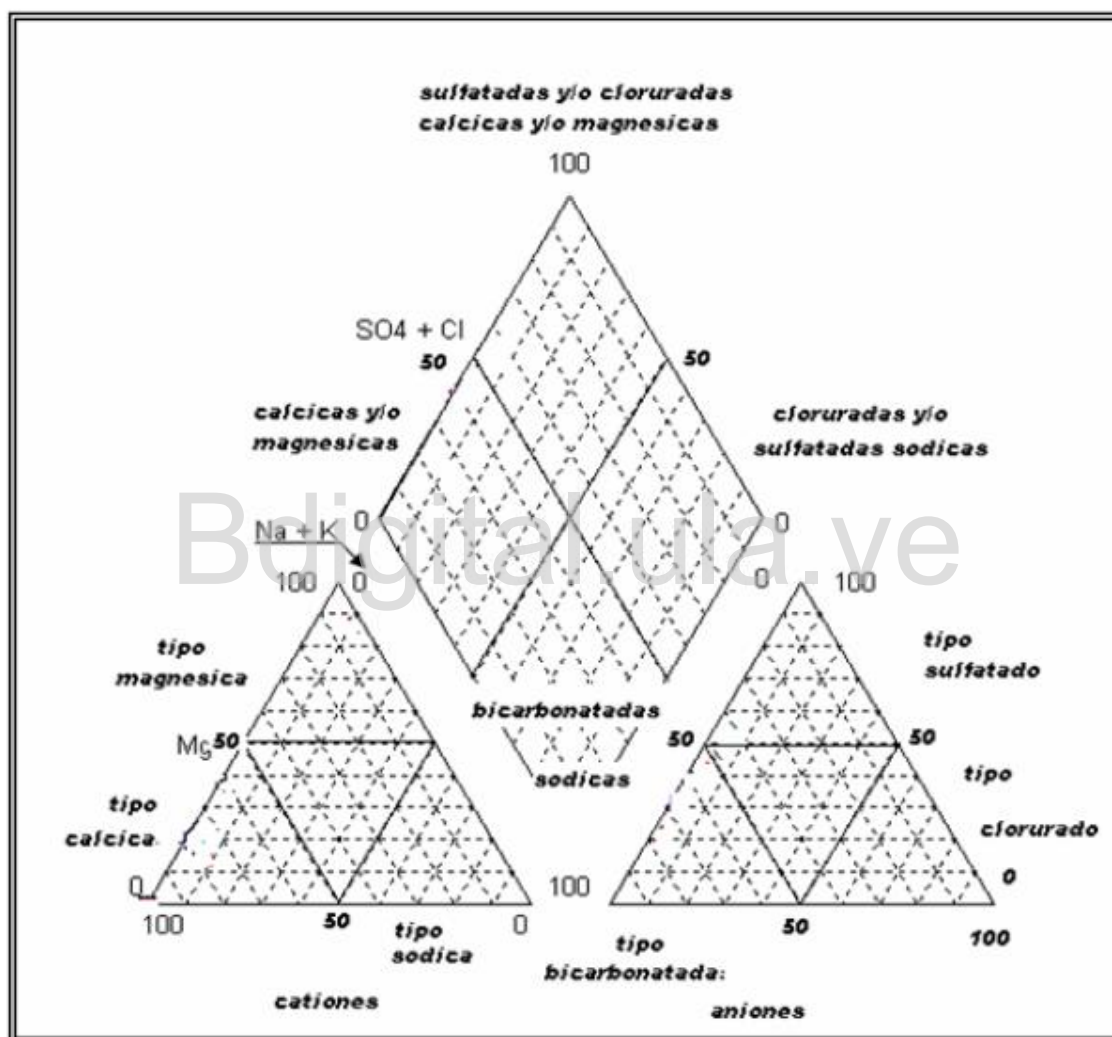


Figura 3.1.- Diagrama de Piper. Tomado de Custodio y Llamas (2002).

3.2.9.2.- Diagramas de columnas verticales. Schoeller-Berkaloff.

Se disponen varias semirrectas verticales paralelas igualmente espaciadas. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión y se representa a partir de un origen segmentos proporcionales a la concentraciones en meq/l, ppm o en %. Los diferentes puntos obtenidos se unen dando una línea quebrada.

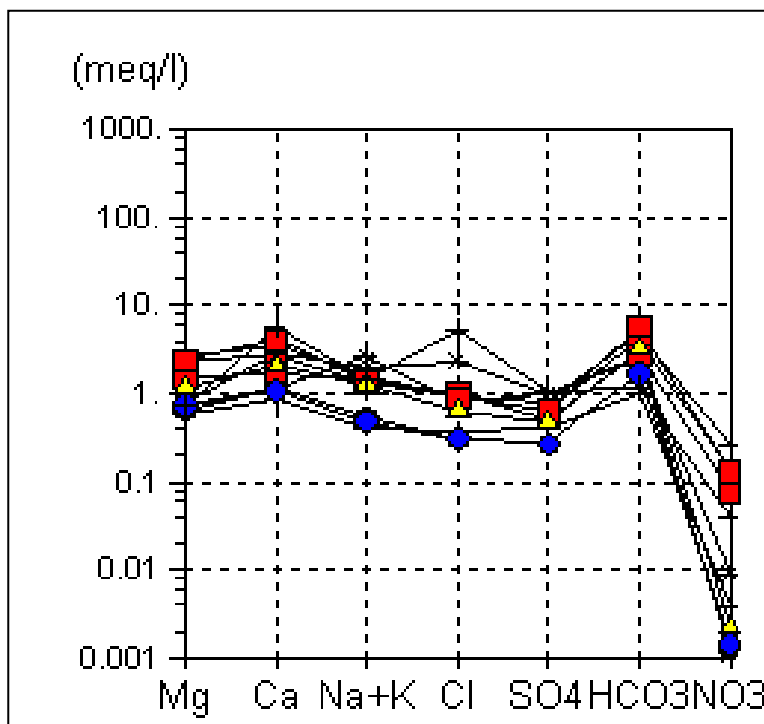


Figura 3.2.- Diagrama de *Schoeller-Berkaloff*. Tomado de Hernández, S. Última modificación Diciembre, 2006.

3.2.9.3.- Clasificación del agua para uso agrícola (Diagrama de Wilcox).

Dentro de las clasificaciones establecidas para las aguas destinadas al riego, se encuentran el índice SAR.

La clasificación establecida se basa en las siguientes características:

- La concentración total de sales solubles expresada mediante la conductividad eléctrica en micromhos por cm a 25°C.
- La concentración relativa del sodio con respecto al calcio y magnesio, denominada índice SAR (*Sodium Adsorption Ratio*), es la siguiente:

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rCa + rMg}{2}}}; r = \text{meq/l} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

A las aguas de un SAR constante se les atribuye un mayor peligro de alcalinización del suelo cuanto mayor es la concentración total. En la Figura 3.3 se observan las distintas categorías del agua establecida al combinar las características de conductividad (C) y peligro de alcalinización del suelo (S).

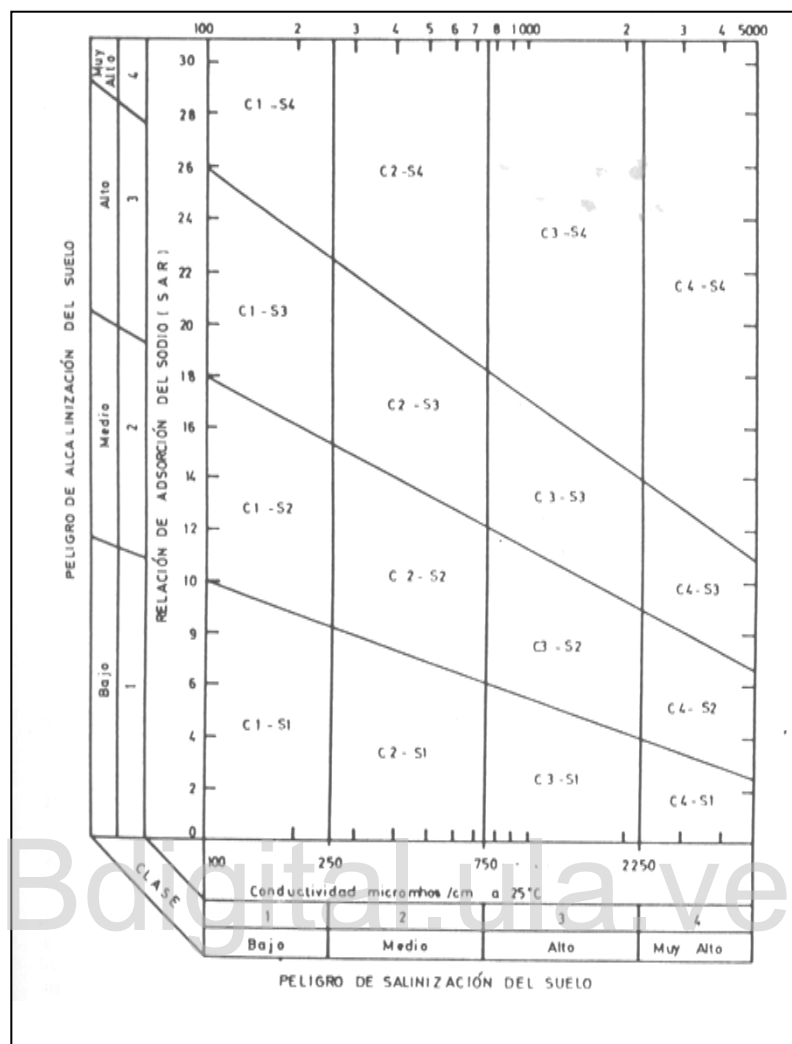


Figura 3.3.- Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (Diagrama de Wilcox) según el procedimiento del *U. S. Salinity Laboratory Staff*. Tomado de Custodio y Llamas (2001).

3.2.10.- Calidad química.

La calidad química del agua del subsuelo está también considerablemente influenciada por su movimiento relativamente lento a través del subsuelo. Su grado lento de percolación a través del subsuelo proporciona tiempo más que suficiente para que muchos de los minerales que forman la corteza de la tierra se incorporen a la solución.

Los usos que puedan darse al agua del subsuelo dependen de su contenido de minerales. Donde este contenido excede del límite recomendado, debe aplicarse un tratamiento para eliminar las cantidades excesivas del mineral que contiene.

El contenido de minerales en el agua se expresa en partes por millón (ppm) que significa el número de partes por peso del mineral encontrado en un millón de partes de la solución. (Rojas, M., 2003)

Dentro de los principales iones que se encuentran en el agua del subsuelo se tienen los siguientes:

- Cloruro.

Si se exceptúan las evaporitas y rocas de origen marino, las rocas por lo común presentan escasa proporción de cloruros. Sin embargo, dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. El agua de lluvia puede ser una fuente importante de ión cloruro, especialmente en zonas próximas a la costa, disminuyendo rápidamente tierra adentro.

El ión cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal. La concentración de cloruros en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de 10 mg/l a más de 3000. En salmueras naturales, próximas a la saturación de NaCl, puede llegar a casi 200.000 mg/l. El agua de mar contiene alrededor de 20.000 mg/l.

- Sulfato.

El ión sulfato procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, de la descomposición de sustancias orgánicas y otros. Sin embargo, la disolución de sales sulfatadas (yeso y anhidrita fundamentalmente) representa el aporte cuantitativamente más importante de este ión a las aguas subterráneas.

El comportamiento del ión sulfato puede desviarse significativamente del teórico predecible en base a los principios de su disolución, por su tendencia a formar iones complejos con Na y Ca y a incorporarse a procesos biológicos.

El ión sulfato está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica. En aguas dulces, la concentración normal de sulfatos puede variar entre 2 y 150 mg/l. En aguas salinas, asociado al Ca, puede llegar a 5000 mg/l; asociado al Mg y Na, en salmueras, puede alcanzar hasta 200.000 mg/l.

- Bicarbonato y carbonato.

El anhídrido carbónico disuelto en agua y los diversos compuestos que forma en ella juegan un importante papel en la química del agua. Se disuelve en el agua en función de su presión parcial ($p\text{CO}_2$). Una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra reacciona con el agua para dar ácido carbónico que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato. La disolución de calizas y dolomías, potenciada por el aporte de CO_2 y/o ácidos orgánicos o inorgánicos, es otra de las fuentes principales de carbonatos y bicarbonatos. Aunque con velocidades de incorporación al agua mucho menores, la hidrólisis de silicatos es otro de los mecanismos que da lugar a la formación de estos iones.

En aguas con pH inferior a 8,3, la mayoría de las aguas subterráneas naturales, la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato. En estas aguas la concentración suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/l. Concentraciones de hasta 1000 mg/l pueden encontrarse en aguas pobres en Ca y Mg o en las que se producen fenómenos de liberación de CO_2 en el acuífero.

- Nitrato.

Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas bien como resultado de la disolución de rocas que los contengan, lo que ocurre raramente, bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede de 10 mg/l.

El origen de los nitratos en las aguas subterráneas no siempre es claro. Son relativamente estables pero pueden ser fijados por el terreno o ser reducidos a nitrógeno o amonio en ambientes reductores. A menudo son indicadores de contaminación alcanzando entonces elevadas concentraciones y presentando, por regla general, una estratificación clara con predominio de las concentraciones más elevadas en la parte superior de los acuíferos libres. El tipo de contaminación a que es debida su presencia en el agua subterránea está relacionado con las actividades urbanas, industriales y ganaderas, y muy frecuentemente, con carácter no puntual, con las prácticas de abonados intensivos inadecuados con compuestos nitrogenados.

- Calcio.

Suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos (calcita, aragonito y dolomita) o sulfatos (yeso y anhidrita). Los controles de la concentración de calcio en el agua subterránea pueden resumirse en tres (3): equilibrio carbonático, aporte de H^+ (función del aporte de CO_2) e intercambio iónico. Los dos (2) primeros, íntimamente relacionados entre sí, limitan la concentración de calcio a la correspondiente a las condiciones de equilibrio en función de pCO_2 , pH, HCO_3 y CO_3 . El intercambio iónico entre calcio y otros cationes (sodio fundamentalmente), retenidos en la superficie de minerales con los que entra en contacto el agua, se potencia notablemente en terrenos arcillosos de baja permeabilidad.

La concentración de Ca varía ampliamente en las aguas subterráneas. Concentraciones entre 10 y 250 mg/l son frecuentes en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg/l, y en salmueras hasta 50.000 mg/l.

- Magnesio.

Menos abundante que el calcio en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina. La solubilidad de la magnesita ($MgCO_3$) en las aguas subterráneas naturales es mayor que la de la calcita. Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de magnesio en aguas subterráneas. En ellas, el magnesio es retenido con preferencia al calcio en suelos y rocas. En aguas naturales el contenido de ión magnesio no suele sobrepasar los 40 mg/l. En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg/l y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1000 mg/l.

- Sodio.

El sodio es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl. Una fuente importante de sodio la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar.

Las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso del calcio. Sin embargo, el sodio puede

ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado con calcio provocando una disminución de la dureza de las aguas. La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120.000 mg/l en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 100 ó 150 mg/l en aguas dulces normales.

- Potasio.

Procede de la meteorización de los feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita (KCl MgCl₂).

El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico. En aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/l, a excepción de algunas salmueras. En ocasiones, más altas concentraciones pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales.

- Hierro y manganeso.

Se consideran, usualmente, juntos a causa de sus semejanzas en el comportamiento químico y su presencia en el agua del subsuelo. El hierro y el manganeso, en las cantidades que usualmente se encuentran en el agua del subsuelo son indeseables porque su presencia es desagradable, aunque no amenaza la salud humana.

3.2.11.- Trazador ambiental.

Aparece de forma natural, su modelo espacial o su balance de masas global se utiliza para inferir los caudales de recarga y descarga. La desventaja más grande es que normalmente resulta difícil definir su función de entrada de manera exacta (tiempo y amplitud). Además la distribución espacial de la inyección del trazador no está bien definida. Algunos ejemplos son las relaciones de abundancia de los isótopos estables del oxígeno (oxígeno 18) y del hidrógeno (deuterio), que varían a lo largo del año (Gat y Gonfiantini, 1981).

Un trazador ideal del agua es una sustancia que presente un comportamiento lo más similar posible al del agua, y al mismo tiempo, debe ser fácilmente detectable y que pueda inyectarse a través de amplias regiones de un sistema hidrogeológico. Los isótopos ambientales del agua, cuya medición es más fácil, quedan inyectados en la totalidad de un sistema hidrogeológico mediante procesos naturales.

3.2.11.1.- Isótopos.

Los isótopos son definidos como los átomos cuyo núcleo contiene el mismo número de protones, pero un número diferente de neutrones. Se representan de la siguiente manera:



E: Isótopo

m: Masa atómica

n: Número atómico

Los isótopos se dividen en estables (²H Deuterio, ¹²C, ¹³C, ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O) y radioactivos (³H Tritio, ¹⁴C, ²³⁴U).

La unidad de medición de los isótopos es el delta por mil. Las variaciones isotópicas se miden como desviaciones respecto a una referencia, correspondiente a un *Standard* internacional.

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{referencia}}}{R_{\text{referencia}}} * 1000 \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

$$R = \frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}}; R = \frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}}; R = \frac{{}^{13}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}; R = \frac{{}^{15}\text{N}}{{}^{14}\text{N}}; R = \frac{{}^{34}\text{S}}{{}^{32}\text{S}} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Referencia: *Standard internacional*

SMOW: Standard de agua oceánica media para ${}^{18}\text{O}$ y ${}^2\text{H}$

PDB: Una determinada caliza de origen marino + ${}^{13}\text{C}$

N_2 : Nitrógeno atmosférico para ${}^{15}\text{N}$

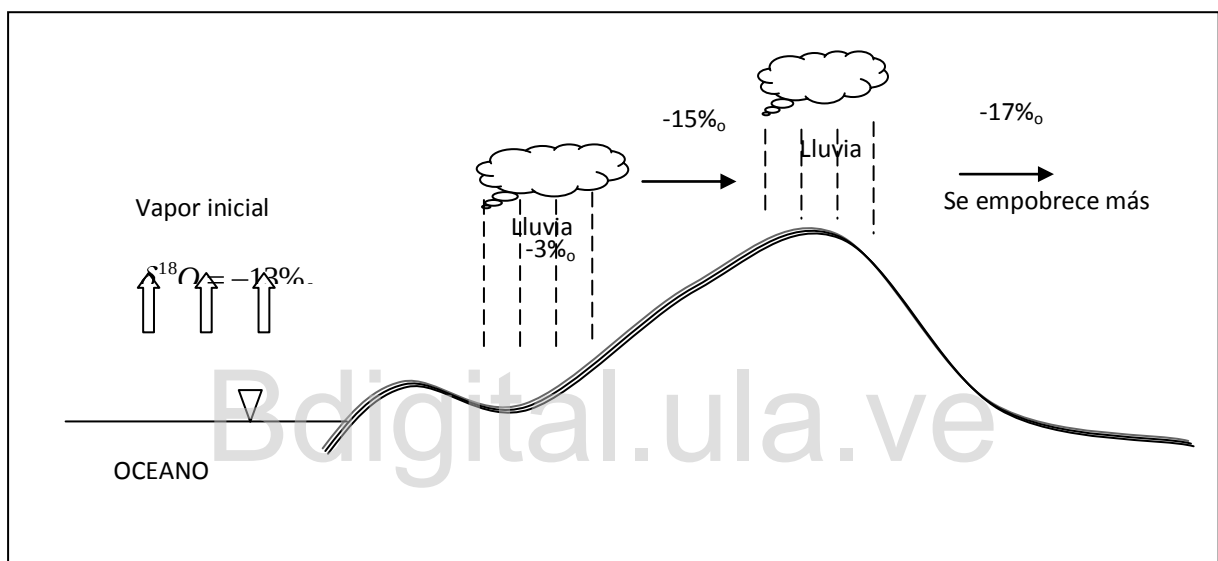


Figura 3.4.- Esquema del fraccionamiento del ${}^{18}\text{O}$ en la atmósfera. Ciclo de Agua.

El efecto isotópico se produce debido a las diferencias en propiedades físicas y químicas de un elemento asociadas a diferencias en su masa atómica. Debido a éstas diferencias, la transformación de las sustancias isotópicas van acompañadas de un efecto de fraccionamiento isotópico. La partición de isótopos entre dos sustancias con diferente razón isotópica es llamado fraccionamiento isotópico. Un ejemplo clásico se puede apreciar cuando a consecuencia de las diferencias de presión del vapor de agua y su difusión en el aire el agua cambia de estado a través de condensación o evaporación; el vapor de agua en equilibrio con el líquido es empobrecido en isótopos pesados con respecto a la fase líquida. El grado de fraccionamiento isotópico está inversamente relacionado con la temperatura.

La isotopía ambiental aplicada a la hidrogeología se utiliza para determinar el origen de los solutos del agua, discriminando entre fuentes naturales y contaminantes, así como entre distintos orígenes naturales o antrópicos, y el movimiento del agua subterránea y sus constituyentes disueltos; además permite realizar una evaluación cuantitativa de la mezcla y de otros procesos físicos, tales como la evaporación y el intercambio isotópico en los sistemas geotérmicos. En muchas ocasiones se pueden estudiar las interacciones secundarias agua-roca. De esta interacción se puede saber si los isótopos son conservativos o no conservativos.

La datación del agua subterránea es posible, bajo condiciones geoquímicas e hidroquímicas adecuadas, mediante el método del carbono 14, o a través del contenido de tritio (Mook, 2001).

3.2.11.2.- Isótopos estables del Oxígeno.

- **Abundancia natural.**

El elemento químico oxígeno posee tres (3) isótopos estables, ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , con abundancias de 99,76; 0,035 y 0,2%, respectivamente. Las observaciones de las concentraciones del ^{17}O aportan poca información sobre el ciclo hidrológico, en comparación con la que aporta el isótopo más abundante. Además las variaciones del ^{18}O se miden de forma más precisa, es decir, se considera el cociente del $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\gg 0,0020$).

Los valores de ^{18}O muestran variaciones dentro de un rango de casi el 100%. A menudo el ^{18}O posee una mayor concentración en los lagos (salinos), los cuales están sujetos a un fuerte grado de evaporación, mientras que las precipitaciones que tienen lugar en las altitudes altas y en climas fríos, especialmente en la Antártida, el contenido de ^{18}O es inferior. Normalmente, en el ciclo hidrológico de los climas templados se detecta un rango de ^{18}O que no excede el 30%.

- **Variaciones naturales del ^{18}O .**

- Agua Salada.

Los océanos constituyen el mayor reservorio de agua. El contenido de ^{18}O en la capa superficial es bastante uniforme, variando entre el +0,5 y el -0,5 %.

Sólo se observan variaciones importantes en las regiones tropicales y en los polos. En las regiones tropicales se detectan valores más positivos causados por la intensa evaporación: el $^{18}\delta$ del agua en el mar Mediterráneo es del orden de +2% ($^{2}\delta = +10\%$). En las regiones polares los valores son más negativos como resultado del agua de deshielo que se origina a partir del hielo y la nieve, que es isotópicamente más ligera. Si el agua de los océanos se evapora bajo condiciones de equilibrio, el vapor resultante podría estar empobrecido entre un 8 y un 10% en ^{18}O , dependiendo de la temperatura. No obstante, el vapor oceánico parece poseer un valor $^{18}\delta$ medio de -12 a -13%, que parece deberse, sólo parcialmente, al fraccionamiento cinético.

La humedad relativa del aire y la temperatura de evaporación influye en la importancia de fraccionamiento que ocurre fuera del equilibrio.

- Precipitación.

La transformación del vapor de agua atmosférico en precipitación depende de muchos factores climáticos y locales, ya que las variaciones del $^{18}\delta$ de la precipitación de todo el globo son muy importantes. Como regla general se tiene que cuanto más se aleje la lluvia de la fuente principal de vapor de las regiones ecuatoriales, más negativo se vuelve $^{18}\delta$. En el Ártico y en la Antártida, el $^{18}\delta$ del hielo puede alcanzar valores de hasta -50%. Entre todos los efectos se distinguen:

- ✓ El efecto latitudinal, con valores de $^{18}\delta$ inferiores a medida que aumenta la latitud.
- ✓ El efecto continental, con valores de $^{18}\delta$ más negativos para las precipitaciones que tengan lugar más al interior del continente.
- ✓ El efecto altitud, con valores de $^{18}\delta$ para la precipitación inferiores a medida que aumenta la altitud.

- ✓ El efecto estacional, (en regiones con clima templado), con valores de $^{18}\delta$ más negativos durante el invierno.
- ✓ El efecto intensidad, con valores de $^{18}\delta$ más negativos durante las tormentas intensas
- Agua Superficial.

La variación estacional con valores relativamente altos en verano es característica de las precipitaciones de las regiones templadas. La evaporación, especialmente en regiones tropicales y semiáridas, provoca el enriquecimiento en ^{18}O de las aguas superficiales.

3.2.11.3.- Isótopos estables del Hidrogeno.

- **Abundancia natural.**

El elemento químico del hidrógeno consta de dos isótopos estables, el ^1H y el ^2H (D o deuterio), con unas abundancias del 99,985 y el 0,015% y una relación isotópica $^2\text{H}/^1\text{H} \approx 0,00015$. Esta relación isotópica presenta una variación natural del 250%, mayor que las variaciones del $^{13}\delta$ y del $^{18}\delta$, debido a las diferencias de masas relativamente grandes existentes entre los isótopos.

Al igual que con el ^{18}O , también se observan concentraciones elevadas para el ^2H en aguas superficiales con una evaporación intensa, mientras que el hielo de los polos tiene unos contenidos de ^2H muy bajos.

- **Variaciones naturales del ^2H .**

Resulta evidente que debe de existir algún tipo de correlación entre los efectos del fraccionamiento del ^2H y del ^{18}O . Por lo tanto, se espera encontrar una relación entre el $^2\delta$ y el $^{18}\delta$ de las aguas naturales. Se ha encontrado incluso, una fuerte correlación entre las variaciones de $^2\delta$ y $^{18}\delta$ de las precipitaciones, del hielo, y la mayoría de aguas subterráneas y aguas superficiales no evaporadas.

3.2.12.- Modelo de un acuífero.

Custodio y Llamas (1976) explica el modelo de un acuífero como el procedimiento, ya sea analítico, matemático o analógico que permite realizar la simulación del comportamiento del mismo. Un modelo es tanto más representativo del sistema real, cuando es capaz de reproducir fielmente su comportamiento, estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que los relacionan. Para poder definir el movimiento del agua en un acuífero se necesita:

- La descripción de su geometría
- La descripción de unas propiedades físicas del medio en cada punto del dominio. Permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.
- Las leyes que rigen el movimiento del agua.
- Las condiciones en los límites del sistema.
- Las condiciones del sistema en un tiempo $t = 0$.
- La descripción de las acciones exteriores al sistema.

Un modelo de un acuífero es un procedimiento que permite hacer la descripción del mismo y resolver la ecuación diferencial (2.42) de forma suficientemente aproximada de acuerdo a las necesidades.

3.2.12.1.- Tipos de modelos.

Los tipos de modelos se diferencian en la forma de resolver la ecuación diferencial en la forma de describir el sistema.

- **Modelos analíticos:** son los que dan la solución exacta a la ecuación diferencial por medio de funciones analíticas o tabuladas. Para aplicar este método se requiere la existencia de un acuífero homogéneo con límites rectilíneos que pueden ser impermeables o de altura piezométrica constante.
- **Modelos matemáticos:** utiliza métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial. El método a utilizar en la investigación es el de *Diferencias Finitas*, con el que se obtiene la solución de la ecuación para una serie de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. De acuerdo con este método, la descripción del sistema se hace en elementos celulares asignados a cada uno de los puntos del espacio. La ecuación diferencial se aproxima por una serie de ecuaciones algebraicas en que las incógnitas son las alturas piezométricas en los puntos escogidos, y las particularidades del método consisten en el planteamiento de esas ecuaciones y en la forma de solucionarlas.
- **Modelos analógicos:** resuelven la ecuación diferencial de una forma indirecta. Para ello, se utiliza un fenómeno físico, como el flujo de la corriente, que tenga una ecuación diferencial del mismo tipo que la de los acuíferos.

3.2.12.2.- Modelos de simulación del agua subterránea.

Los modelos de simulación son una herramienta de análisis que permiten mejorar el entendimiento de un acuífero, así como también predecir casos específicos. La elaboración de estos modelos consta de dos partes:

- **Modelo Hidrogeológico Conceptual.**

Es la idealización y/o simplificación de las características conocidas de un lugar para facilitar una aproximación práctica, comprende las siguientes características:

- Número de niveles o capas del acuífero
- Características del suelo: agrupamiento macroscópico de tipos de suelos conocidos para definir las unidades hidroestratigráficas primarias
- Condiciones iniciales del nivel freático
- Límites horizontales y verticales

- **Modelo Hidrogeológico Matemático.**

Un modelo numérico (matemático o digital) consiste en la representación virtual del medio físico en un ordenador, que, mediante las operaciones adecuadas, calculara la evolución de los niveles y el flujo hídrico producido, todo ello en los incrementos de tiempo que se soliciten.

3.2.12.3.- Proceso de modelación.

Uzcátegui en el 2004 considera el proceso de modelación enfocado desde dos puntos de vista diferentes: el matemático y el físico.

- **Proceso de modelación matemático.**

Consta de tres pasos básicos:

- **Conceptualización:** se deben identificar los procesos físicos dominantes y hacer ciertas hipótesis sobre los no dominantes.
- **Formulación:** Plantear las ecuaciones diferenciales que gobiernan el proceso.
- **Solución de las ecuaciones Diferenciales:** pueden ser analíticas o numéricas.

- **Proceso de modelación físico.**

- **Conceptualización:** analizar el medio, identificar los contornos, acciones exteriores, geometría del medio, entre otros. A veces se le llama formación del modelo conceptual y es un paso importante, ya que ya que en los pasos siguientes se pueden cuantificar los errores, mientras que aquí no. Distintas conceptualizaciones pueden representar el medio real, pero darán predicciones diferentes.
- **Discretización del medio:** se divide el medio en una serie de subregiones que lo cubran y no se solapen. La forma de las subregiones depende del método numérico que se emplee e influye en los errores numéricos que se cometerán.
- **Estimación de los parámetros:** la conceptualización realizada depende de una serie de parámetros que deben obtenerse, pero es difícil porque el medio en la realidad es heterogéneo y desconocido. La forma de obtenerlos es midiendo y calibrando el modelo. La *medición* es importante y hay que hacerlo, pero no es suficiente, porque una medida es sólo un valor puntual o quizás de un pequeño entorno en cambio a partir de la *calibración*, y dadas medidas de respuesta del sistema y de los parámetros medidos, se intentan estimar parámetros representativos del medio, que reproduzcan la respuesta observada. La calibración puede ser automática y manual. Es manual cuando se juega con los parámetros para ajustar los valores calculados con los medidos; la automática, busca por medio de un ordenador los parámetros que reproduzcan mejor la respuesta del sistema. La *evaluación de los errores del sistema* se realiza haciendo variar los parámetros obtenidos, que se consideran óptimos, observando la respuesta del sistema y de esta manera analizar que tan razonable es dicha respuesta.
- **Verificación o validación:** Consiste en evaluar o correr el modelo para condiciones distintas a las que se utilizaron en la calibración.
- **Predicción:** Es utilizada una vez construido el modelo.

3.2.13.- Uso del programa visual *Modflow 4.1*.

El *Visual Modflow* fue creado con el objeto de originar un programa que pudiese ser modificado, que fuese simple de usar y mantener, que pueda ejecutarse en una gran variedad de computadoras con cambios mínimos y que fuera relativamente eficiente en memoria de cálculo y tiempo de ejecución.

El programa tiene una estructura modular en la cual las funciones similares del programa están agrupadas juntas, y las opciones de cálculo e hidrológicas están construidas de tal manera que cada opción es independiente de las demás. A causa de esta estructura se pueden integrar nuevas opciones

sin necesidad de cambiar las subrutinas existentes, además, las subrutinas que integran opciones que no están siendo usadas pueden borrarse, disminuyendo entonces el tamaño del programa. El programa puede usarse para aplicaciones bi o tridimensionales.

El programa básico incluye procedimientos para simular el efecto de pozos, recarga, ríos, evapotranspiración, entre otros, incluye diferentes opciones para algoritmos de solución.

3.2.13.1.- Convención de la discretización.

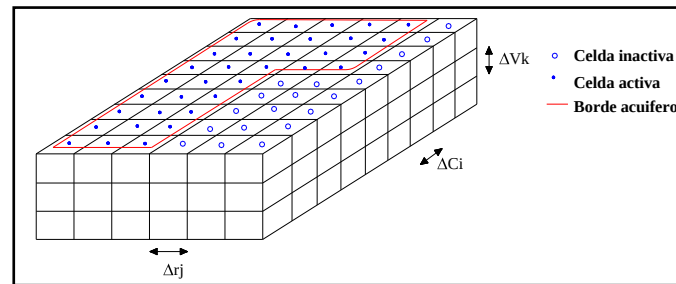


Figura 3.5.- Discretización de modelo en 3D.

i es el índice para las filas, j para las columnas y k para los estratos. Los estratos se enumeran de arriba hacia abajo. Dentro de cada celda hay un punto llamado nudo donde se calcula el nivel piezométrico h . Existen dos convenciones para definir las celdas respecto de los nudos: centradas en el bloque y centradas en el nudo. El *Modflow* trabaja con la formulación centrada en el bloque.

- **Ecuación de diferencias finitas.**

Se obtiene de la aplicación de la ecuación de continuidad: la suma de todos los flujos entrantes y salientes de la celda deben ser igual a la tasa de cambio en el almacenamiento de la celda.

Considérese una celda (i, j, k) y sus seis adyacentes: $(i-1, j, k)$, $(i+1, j, k)$; $(i, j-1, k)$, $(i, j+1, k)$; $(i, j, k-1)$, $(i, j, k+1)$. Los flujos se consideran positivos si entran, entonces, el flujo entrante en la celda (i, j, k) desde la celda $(i, j-1, k)$ (ver Figura 3.8), está dado por la ley de Darcy como:

$$q_{(i,j-1/2,k)} = K_{(i,j-1/2,k)} * \Delta Ci * \Delta Vk * \frac{h_{(i,j-1/2,k)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta r_{(i,j-1/2,k)}} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

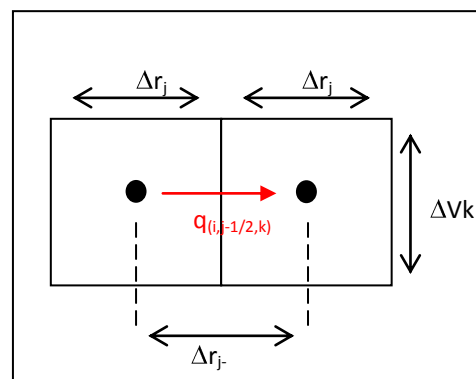


Figura 3.6.- Celdas en diferencias finitas. Modificado de Uzcátegui (2004).

Donde:

$h_{(i,j,k)}$ es el nivel piezométrico en (i, j, k)

$q_{(i,j,k)}$ es el caudal a través de la cara de las dos celdas.

$K_{(i,j,k)}$ es la conductividad hidráulica o permeabilidad entre los nudos (i, j, k) y (i, j-1, k).

$\Delta r_{j-1/2}$ es la distancia entre los nudos (i, j, k) y (i, j-1, k).

No debe asociarse el subíndice (i, j-1/2, k) con un punto específico entre dos puntos, sino que K representa la conductividad hidráulica o permeabilidad efectiva de toda la región entre los dos nudos. Similares expresiones se obtienen para el flujo a través de las otras caras.

$$q_{(i,j+1/2,k)} = K_{(i,j+1/2,k)} * \Delta C_i * \Delta V_k * \frac{h_{(i,j+1,k)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta r_{(i,j+1/2,k)}}$$

$$q_{(i+1/2,j,k)} = K_{(i+1/2,j,k)} * \Delta r_j * \Delta V_k * \frac{h_{(i+1/2,j,k)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta C_{(i+1/2,j,k)}}$$

$$q_{(i-1/2,j,k)} = K_{(i-1/2,j,k)} * \Delta r_j * \Delta V_k * \frac{h_{(i-1/2,j,k)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta C_{(i-1/2,j,k)}}$$

$$q_{(i,j,k+1/2)} = K_{(i,j,k+1/2)} * \Delta C_i * \Delta r_j * \frac{h_{(i,j,k+1/2)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta V_{(i,j,k+1/2)}}$$

$$q_{(i,j,k-1/2)} = K_{(i,j,k-1/2)} * \Delta C_i * \Delta r_j * \frac{h_{(i,j,k-1/2)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta V_{(i,j,k-1/2)}}$$

Las ecuaciones anteriores expresan el flujo a través de las caras de la celda (i, j, k) en función de los niveles de h, dimensiones de la grilla y conductividad hidráulica. La notación puede simplificarse combinando las dimensiones de la grilla y la conductividad hidráulica en una constante única, la **conductancia hidráulica**:

$$C_{(i,j-1/2,k)} = K_{(i,j-1/2,k)} * \frac{\Delta C_i * \Delta V_k}{\Delta r_{(i,j-1/2,k)}} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Donde $C_{(i,j-1/2,k)}$ es la conductancia en la fila **i** y el estrato **k** entre los nudos (i, j, k) y (i, j-1, k).

Conductancia es entonces, el producto de la conductividad hidráulica por el área de flujo dividido por la longitud del camino de flujo.

Estas ecuaciones toman en cuenta el flujo entrante/saliente de cada celda con sus seis celdas contiguas. Para tener en cuenta el flujo hacia o desde elementos externos al acuífero tales como ríos, drenes, recarga, evapotranspiración y pozos, se requieren términos adicionales. Estos flujos pueden depender del nivel en la celda en cuestión o ser totalmente independientes de él. El flujo desde fuera del acuífero puede representarse mediante la ecuación:

$$a_{i,j,k} = p_{i,j,k,n} * h_{i,j,k,n} + q_{i,j,k,n} \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

Donde

a es el flujo desde la fuente externa n en la celda (i, j, k)

p y q son constantes.

En general si hay N fuentes o sumideros que afecten una celda, el flujo combinado se expresa:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} * h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

Se llama

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n}$$

$$Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n}$$

El término general para el flujo externo a la celda (i,j,k) es:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k,n} * h_{i,j,k,n} + Q_{i,j,k,n} \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

Considerando que la suma de los flujos a la celda (i,j,k) es igual a la variación de almacenamiento de ella:

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} =$$

$$= SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} * \Delta rj * \Delta Ci * \Delta V_k$$

Donde:

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ Es la aproximación en diferencias finitas de la derivada del nivel respecto del tiempo.

$SS_{i,j,k}$ Es el almacenamiento específico de la celda

$\Delta rj * \Delta Ci * \Delta V_k$ Es el volumen en la celda

Si se sustituye el caudal en función de la conductancia y los niveles aclarando a qué tiempo corresponden dichos niveles, se tiene:

$$Cr_{i,j-1/2} * (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \pm Cr_{i,j+1/2} * (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \pm CC_{i,-1/2,j,k} * (h_{i,-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \pm CC_{i,+1/2,j,k} * (h_{i,j,k}^m - h_{i,j+1,k}^m) \pm$$

$$CV_{i,j,k-1/2} * (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) \pm CV_{i,j,k+1/2} * (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \pm P_{i,j,k} * h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} =$$

$$= SS_{i,j,k} \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} * \Delta rj * \Delta Ci * \Delta V_k$$

En esta expresión se desconocen los h^m , es decir, se tiene una ecuación con siete incógnitas y si se plantea una ecuación como ésta para cada nudo, se obtiene un sistema de n ecuaciones con n incógnitas que deben resolverse simultáneamente.

El valor de $h_{i,j,k}^{m-1}$ es, al inicio, los niveles iniciales (dato).

El *MODFLOW* usa métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones en cada paso de tiempo; se parte de un valor arbitrario o estimado para el nivel en cada nudo al fin de cada paso. Estos valores se varían obteniéndose un mejor ajuste del sistema de ecuaciones y así sucesivamente. Se debe especificar el criterio de convergencia, que especifica la máxima variación de nivel que puede producirse en una iteración, puede usarse un valor del criterio de convergencia de un orden de magnitud menor que el error deseado.

En cuanto a los niveles iniciales de niveles estimados al inicio de la iteración, el *MODFLOW* utiliza los niveles calculados en el paso anterior como valor inicial.

Debe tenerse en cuenta que los métodos iterativos dan una solución sólo aproximada al sistema de ecuaciones de diferencias finitas para cada paso de tiempo, sin embargo, si se obtuviese una solución exacta del sistema de ecuaciones de cada paso, esto sólo sería una aproximación a la solución de la ecuación de flujo. La discrepancia entre el valor obtenido en diferencias finitas y de solución exacta de la ecuación diferencial se llama error de truncación. En general, este error será mayor, en cuanto mayor sea el espaciado de la malla y el paso del tiempo.

Finalmente, debe reconocerse que aunque se obtenga una solución formal de la ecuación diferencial, será sólo una aproximación a las condiciones reales en el campo.

- **Tipo de celdas del modelo y condiciones de borde.**

Las celdas se agrupan en tres tipos:

- Celdas de Nivel Variable: aquellas en que se calcula un nivel para cada paso de tiempo (Δt).
- Celdas de Nivel Constante: aquellas en las que el nivel se especifica previamente y se mantiene constante a lo largo de toda la simulación.
- Celdas Inactivas: son aquellas que presentan flujo nulo.

Todas las ecuaciones anteriormente presentadas se plantean sólo para las celdas de nivel variable.

CAPITULO 4.- MARCO METODOLÓGICO

4.1.- Recopilación de la información.

En esta etapa se llevo a cabo la recopilación de material bibliográfico, cartográfico y foto aéreo relacionado con el área de estudio, así como también las herramientas necesarias y la planificación para el desarrollo de la etapa de campo; que sirvió de apoyo para la elaboración de esta investigación.

4.1.1.- Revisión bibliográfica.

Consistió en la recopilación y selección de toda la información concerniente al área de estudio como: trabajos previos, publicaciones, revistas y estudios geológicos realizados anteriormente en la zona. Toda esta revisión aporta una serie de conocimientos e información de carácter geológico e hidrogeológico, logrando así establecer una guía de trabajo a seguir para el desarrollo de las etapas posteriores.

Para la realización de éste trabajo, se solicitó la información disponible del área a estudiar al MINAMB (Ministerio del Poder Popular para el Ambiente) del estado Nueva Esparta y el INAMEH (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), quienes suministraron las referencias disponibles correspondiente a su banco de datos, complementando esto con trabajos realizados en la Universidad Central de Venezuela, Universidad de Oriente y Universidad de los Andes, entre ellos: Vargas (1997), RGR Ingeniería (2001), Torres *et al.* (2004), Corsi (2006), Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007), Frías, L. (2007), Díaz, A. y Monteagudo, N. (2009), Terán, M. y Vásquez, P. (2009), Rubicundo, M. y Velasco, R. (2010), entre otros, y campañas de recolección de datos en Junio de 2008 de la Escuela de Ingeniería Geológica.

4.1.2.- Revisión cartográfica y fotogeológica.

Esta etapa consistió en la revisión de mapas topográficos y geológicos, así como también de fotografías aéreas existentes del área de estudio y sus alrededores. Cabe resaltar que en función de los acuíferos presentes en el área de estudio, esta fue dividida en dos (2) zonas, la primera, correspondiente al sector de Pedro González - El Salado, municipio Gómez, y la segunda, la Fuente Paraguachí, municipio Antolín del Campo.

Referente al municipio Gómez, el mapa topográfico y geológico utilizado fue tomado de Contreras y Uzcátegui (2007), quienes emplearon como referencia la hoja 7449 III, del Ministerio del Ambiente y Los Recursos Naturales, como mapa base y el mapa geológico de Venezuela de Cerro El Cabo y Altagracia, hoja 7449 III NO Altagracia, realizado por Rekowski y Rivas (2005), para el geológico.

En lo que respecta a el municipio Antolín del Campo, el mapa base utilizado fue el topográfico a escala 1:25000, modificado del trabajo final de grado realizado por Terán y Vásquez (2009), el cual fue complementado con el mapa de relieve extraído de *Google Map*.

Respecto al mapa geológico fue adquirido del trabajo final de grado realizado por Terán, M. y Vásquez, P. (2009) a escala 1:25000. El cual fue producto de la recopilación de varios trabajos finales de grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, tomando como referencia las hojas cartográficas 7449-III-NE, 7449-IV-SO, 7449-III-SE y 7449-III-SO. Además, esta información se sustentó con el mapa geológico realizado por el Ministerio del Ambiente en el año 1997 a escala 1:25000 para el estado Nueva Esparta y del Trabajo Final de grado de Frías (2007) de la Universidad de los Andes.

Las fotografías aéreas se obtuvieron del Instituto Geográfico de Cartografía Simón Bolívar ubicado en la ciudad de Caracas, a escala 1:15000 pertenecientes a la misión 040439, fotos de la 139 a la 142 y la 155 y 156, del foto índice Margarita - Cubagua, tomadas a una altura relativa de 3072 msnm y una altura absoluta de 4270 msnm, con una distancia focal de 153,72mm, con fecha del 11 de septiembre de 1976. Fueron analizadas seis fotografías en total. (Ver Apéndice A, Figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 y A.6)

Igualmente, se emplearon dos imágenes satelitales que sirvieron como complemento de la información aportada por las fotografías aéreas, una pancromática (Identificación de la escena: 5 664-328/3 08/12/12 14:41:17 2 B) y otra a color (Identificación de la escena: 5 664-328 08/12/12 14:41:19 2 J) de 4 bandas espectrales, ambas imágenes SPOT-5 de fecha 12/12/2008, con azimut: 147.414495 y elevación 49.772575 (ver Apéndice, Figuras A.7 y A.8). Estas imágenes fueron proporcionadas por el LPAIS (Laboratorio de Procesamiento Avanzado de Imágenes Satelitales) de la Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico con sede en Caracas, con una resolución de 2,5m y para su procesamiento se empleó el software *ENVI* versión 4.2. También se usó el programa gratuito *Google Earth* para la observación y análisis de las imágenes pertenecientes a la zona en estudio.

Se realizó la revisión de la cartografía empleada, verificando lo observado en el análisis fotogeológico y a su vez, resaltando aspectos de interés (geológico, estructural y topográfico) que pudieran ser corroborados en campo. Con en el estudio e interpretación de las fotografías aéreas y mapas se logró obtener datos como: litología, relieve, vegetación, drenajes, estructuras, buzamientos de la foliación, vías de acceso, poblaciones, entre otros; tomando en cuenta para su identificación criterios como las diferentes tonalidades y brillos de la escala de grises de las fotografías, las geoformas de los cuerpos rocosos presentes, así como la morfología de los valles y redes hidrográficas observadas, pero todo de forma generalizada en las distintas áreas en estudio. Todos estos datos permitieron una comprensión general de la geología presente en el área de estudio, que luego fue corroborada y/o validada durante la etapa de campo.

Para ambas zonas se revisó el mapa hidrogeológico de la hoja NC- 20- IV, de Puerto La Cruz a escala 1:500.000 (ver Apéndice A, Figura A.9) del año 1972, que contiene información de la geología, pozos perforados, hidrografía, aguas subterráneas, topografía, rendimiento de los pozos y calidad del agua.

4.1.3.- Recopilación de datos meteorológicos.

Los datos meteorológicos, se obtuvieron de la información que anualmente lleva el MINAMB, Dirección de Hidrología y Meteorología, Sistema Nacional de información Hidrológica y Meteorológica SINAIHME. Las estaciones utilizadas para ésta investigación se pueden apreciar en la Figura 4.1, siendo las siguientes.

Tacarigua, ubicada al sur del área de estudio con coordenadas E 400.746,52 N 1.220.935,49 a 80msnm y es una estación tipo C2, de donde se toman los datos de temperatura media anual en °C, según se muestra en Anexo I, Tabla I.1).

Paraguachí, ubicada en el área de estudio con coordenadas E 404.293 N 1.229.864 a una altitud de 180msnm y es una estación tipo PR, de la que se obtuvo los datos de precipitación anual en mm según se muestra en Anexo I, Tabla I.2).

Pedro González, ubicada dentro del área de estudio con coordenadas E 400.103 N 1.228.740 a una altitud de 24msnm, siendo una estación tipo PR de la que se extraen los datos de precipitación anual en mm según se muestra en Anexo I, Tabla I.3).

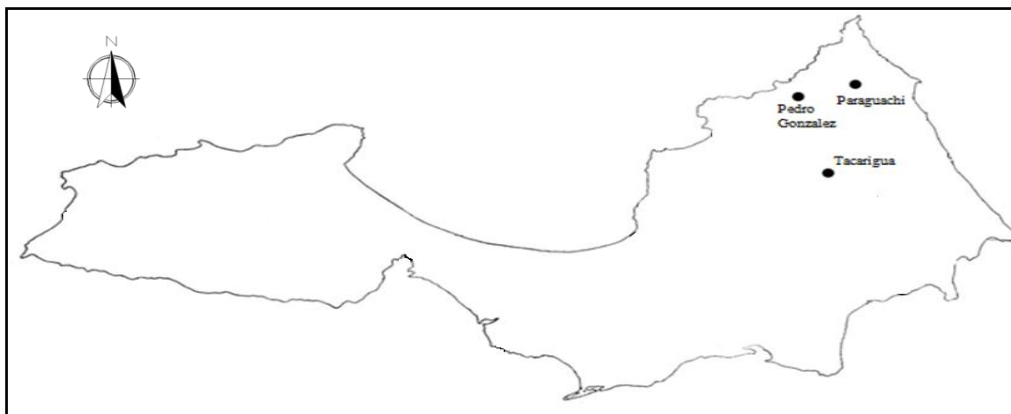


Figura 4.1.- Ubicación relativa de las estaciones meteorológicas empleadas en la investigación. Tomado y modificado del Texto Explicativo del mapa preliminar del estado Nueva Esparta, 1986.

4.1.4- Compilación de datos de los pozos.

Los datos de los pozos indican las características generales y químicas de los mismos, reflejan diferentes aspectos que lo identifican y fueron obtenidos de algunas campañas de medición a lo largo de diversos años, producto de monitoreos desarrollados por el MINAMB en apoyo con la Universidad Central de Venezuela y la Universidad de los Andes.

Estas campañas recopiladas comprenden los sectores de Pedro González – El Salado y La Fuente – Paraguachí, incluyen datos de ubicación de los pozos, propietario, elevación del terreno, profundidad del pozo, niveles estáticos y/o dinámicos del agua, pH, conductividad, salinidad, dureza, OD, RAS, TSD, temperatura, aniones, cationes, color y olor del agua, uso y estado del pozo, entre otros. Resaltando que algunos de ellos no presentó información completa de varios de sus datos.

Para el sector de Pedro González fueron recopiladas las campañas de Noviembre de 2001, elaborada por el MINAMB junto con la compañía RGR Ingeniería; marzo del año 2005, desarrollada por el MINAMB bajo la Dirección de Estudios Ambientales del estado Nueva Esparta, mayo de 2006, realizada en el marco de la investigación del Licenciado Corsi como parte de su trabajo final de grado en La Universidad Central de Venezuela bajo el apoyo de la Dirección de Estudios Ambientales del estado Nueva Esparta; campaña Febrero del año 2007, ejecutada por la Escuela de Ingeniería Geológica de la Universidad de Los Andes, y campañas durante los meses de abril y octubre del año 2008, 2009 y 2010, realizadas por el MINAMB.

En este sentido en el Sector La Fuente – Paraguachí se recopilaron las campañas elaboradas por el MINAMB en julio de 2005, agosto 2006, abril - mayo del año 2007, julio 2007 bajo el apoyo de la Escuela de Ingeniería Geológica, abril y octubre de 2008.

Con toda esta data recopilada se realizó el inventario de los pozos (ver Apartado 4.4.).

4.1.5.- Litología de los pozos.

En relación a los pozos con litología que se emplearon, los detalles de los mismos provienen de la información presentada del trabajo de Rengel (1959) titulado "Historia del abastecimiento de agua para las islas de Margarita y Coche", publicado en el III Congreso Geológico Venezolano, donde se muestran cinco columnas geológicas de pozos localizados en el sector de Pedro González, los cuales fueron perforados en 1949, por el Ministerio de Agricultura y Cría a petición del ejecutivo Estatal. En el sector de La Fuente – Paraguachí no existen informes técnicos de perforaciones que pudiesen aportar referencias en cuanto a la litología de los mismos (ver Anexo II, Figura II.1).

4.1.6.- Información geológica.

Se recopiló la información referente a levantamientos de campo realizados en la zona, donde se presenta de manera detallada las características litológicas, mineralógicas y estructurales tanto de afloramientos como muestras de mano analizadas en investigaciones previas, entre ellas la realizada por Rekowski, F. y Rivas, L. (2005), Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007) en el Sector de Pedro González y Frías, L. (2007), Terán, M. y Vásquez, P. (2009) en La Fuente – Paraguachí.

4.2.- Etapa de campo.

El trabajo se dividió en dos (2) etapas de caracterización, una relacionada a la geológica del área y la otra referente a la hidrogeológica e isotópica de los acuíferos.

4.2.1.- Caracterización Geológica.

En esta etapa se recopiló la información geológica y geofísica necesaria para el desarrollo y posterior análisis de resultados de esta investigación.

4.2.1.1.- Geología de superficie.

Durante esta etapa se validó parte de la información geológica recopilada en investigaciones previas, donde se corroboró la información de los principales afloramientos estudiados por Rekowski, F. y Rivas, L. (2005), Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007), en el sector de Pedro González, y Frías, L. (2007), Terán, M. y Vásquez, P. (2009), en La Fuente – Paraguachí. En ellos se identificó las principales unidades aflorantes, donde se localizó geográficamente el afloramiento, se verificaron los rasgos litológicos y estructurales más relevantes como litologías y características del material (color, grado de alteración, textura, dimensiones del afloramiento y minerales presentes observados con ayuda de la lupa petrográfica), descripción de rocas ígneo-metamórficas, fallas, pliegues, esquistosidad, entre otros.

4.2.1.2.- Exploración geofísica.

En esta etapa se empleó el método geofísico SEV, con la configuración del dispositivo *Schlumberger*, en algunos sectores seleccionados del área de estudio, para la ubicación y descripción general de las secciones estratigráficas, donde se validó y corroboró las litologías presentes. Ya que mediante estas secciones se determinaron la geometría en profundidad de los acuíferos.

Cabe resaltar que para el acuífero del municipio Gómez, se utilizaron los datos de campo de Rubicondo, M. y Velasco, R (2010), que consistió en el registro en superficie de información geoelectrica aplicando corriente continua al terreno, ejecutando así 13 SEV en el área de estudio, donde se recolectó información de fecha, lugar, coordenadas (UTM) de cada punto, precisión del GPS, numero de perfil, dirección del tendido, coordenadas, observaciones que describieron rasgos influyentes al momento de realizar dicho sondeo, abertura AB/2, abertura s, valor del dial, factor de multiplicación, resistencia y resistividad aparente (ver Anexo II).

Respecto al Municipio Antolín del campo se seleccionó las secciones estratigráficas definidas por Terán, M. y Vásquez, P. (2009), ya que las mismas abarcaron toda la zona y permitieron definir la geometría del acuífero, cuyo procesamiento de los datos se validó para certificar la información.

4.2.2.- Caracterización hidrogeológica e isotópica de los acuíferos.

Abarcó el conjunto de actividades fundamentales para caracterizar los acuíferos de la zona en estudio, para ello se realizaron varias campañas de mediciones, que permitieron complementar la investigación y establecer un seguimiento a lo largo del tiempo de los pozos visitados en años anteriores,

desarrollando un muestreo en julio de 2008 y otro en julio de 2010, bajo el apoyo del MINAMB. En estas visitas se tomaron los parámetros del agua como: TSD, CE y pH; además se midieron los niveles estáticos y/o dinámicos del agua. El procedimiento seguido en cada uno de los pozos fue el siguiente:

- Ubicación de los pozos: Tomando en cuenta el inventario de pozos realizado por la Dirección de Estudios Ambientales del estado Nueva Esparta, perteneciente al MINAMB, tanto para el municipio Gómez como Antolín del Campo, se ubicó cada uno de estos pozos y otros que no tenían registro y se corroboró su existencia.
- Entrevista con el encargado del pozo: se realizó con la finalidad en primera instancia de entrar al lugar donde se encuentra el pozo y conocer las características del mismo, el tiempo de construido, el material extraído al momento de su perforación, profundidad, caudales, usos y variación de los niveles en épocas de precipitación y/o sequía. Para luego así realizar su ubicación geográfica con la ayuda del GPS.
- Medición de niveles de agua: se midió a través de la sonda de medición de niveles proporcionada por el CIDIAT. Ésta se introdujo por un orificio del pozo y se bajó hasta el agua, momento en el cual se encendió en la sonda la luz del bombillo, indicando que ya se ha estaba tocando agua, y se realizó entonces la correspondiente anotación. (Ver Figura 4.2)



Figura 4.2.- Medición de nivel de agua en un pozo en La Fuente – Paraguachí. Fuente propia.

- Obtención de parámetros del agua subterránea: se adquirió mediante una muestra de agua extraída del pozo, a través de la bomba o por medio de un captador de agua. Los parámetros de conductividad eléctrica, TSD y pH se obtuvieron por medio de una sonda multiparámetro facilitado por el MINAMB de la Isla de Margarita. (Ver Figura 4.3)



Figura 4.3.- Medición de conductividad eléctrica y salinidad con el multiparámetro. Fuente propia.

- Toma de muestras de agua para análisis químico: se recolectaron 20 muestras de agua de los diferentes pozos visitados en las campañas del 2008, tanto para el sector de Pedro González – El Salado como La Fuente - Paraguachí, para ser enviadas al laboratorio y realizar los análisis básicos de química del agua (Iones mayoritarios, pH, dureza, TSD, CE, entre otros), que permitieron establecer las características hidrogeoquímicas del acuífero y su evolución en el tiempo (ver Figura 4.4). Cabe resaltar que cada muestra se etiquetó debidamente donde se indicó coordenada, hora del muestreo y la respectiva nomenclatura en función del pozo de donde se obtuvo la muestra.



Figura 4.4.- Muestra de agua para análisis químico. Fuente propia.

- Toma de muestras de agua para análisis isotópico: se recolectaron muestras de agua de diferentes pozos, aljibes y manantiales visitados en las campañas del 2008, obteniendo así 13 en el sector de Pedro González y 20 en La Fuente Paraguachí, y en la campaña del 2010 se tomaron cuatro muestras a fin de corroborar la hipótesis planteada y posible incertidumbre de datos de la campaña anterior en Pedro González – El Salado, para luego ser enviadas al laboratorio y analizadas en un espectroscopio Laser cuyo fin es determinar las concentraciones de Deuterio (H^2) y Oxígeno 18 (O^{18}). Para ello el protocolo a seguir fue el siguiente: inicialmente los envases de 50 ml fueron curados con el agua de la zona de muestreo (ver Figura 4.5), luego se sumergió el envase completamente dentro del agua y se colocó la tapa con la finalidad de que quedase herméticamente sellado sin burbujas, luego se marcó con la

nomenclatura respectiva de ubicación del punto de muestreo y la fecha tomada. Finalmente se almacenaron en cavas protegidos del sol. Y se enviaron al laboratorio.



Figura 4.5.- Toma de agua para muestreo isotópico en el sector de Pedro González – El Salado, 2010. Fuente propia.

Cabe resaltar que las muestras en la Fuente – Paraguachí no siguieron un protocolo de muestreo para su recolección, dejando burbujas dentro del envase colector, lo cual pudiese generar error en los resultados.

- Realización de prueba de bombeo: se desarrollo en el sector de Pedro González en la campaña del 2008 donde se midió en el pozo 21 de coordenadas E: 401539 y N: 1229234, el NE y las variaciones en abatimiento luego de bombear por 1, 2, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80 minutos.

**MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA EL AMBIENTE
DIRECCIÓN ESTATAL AMBIENTAL NUEVA ESPARTA
COORDINACIÓN DE GESTIÓN DE AGUAS**

CARACTERIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

IDENTIFICACIÓN		FECHA		HOJA CARTOGRÁFICA		COORDENADAS		E	N
				E: 5.000		GEO. LAT: _____			
				E: 25.000		GEO. LONG: _____			
ESTADO: _____		LUGAR O SITIO: _____				MUNICIPIO: _____			
PROPIETARIO O USUARIO: _____						ELEVACIÓN: _____ m. (CARTA)			
						ELEVACIÓN: _____ m. (ALTIM)			

REPORTE DE LABORATORIO				
ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO				
UNIDADES	mg/L	mgCaCO ₃ /L	(U-PS-CO)	(UNIT)
Calcio				
Magnesio				
Sulfato				
Cloruro				
Bicarbonato				
Dureza Total				
Dureza Calcio				
Dureza Magnésica				
Dureza Carbonática				
Dureza no Carbonática				
Alcalinidad Total				
Alcalinidad Fenolítica				
Color				
Turbidez				
Sodio				
RAS				

ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO		
FECHA	COLIFORMES TOTALES (NMP/100 ml)	COLIFORMES FECALIS (NMP/100 ml)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
ASPECTO	OLOR	SABOR
CLARA ☐	INAPRECIBLE ☐	DULCE ☐
TURBIA ☐	FUERTE ☐	SALOBRE ☐

PRUEBA DE CAMPO							
FECHA: _____		HORA: _____		FUNCIONARIO: _____			
TEMP. AIRE: (°C)	TEMP. AGUA: (°C)	pH: _____	OD: (mg/L)	CONDUCTIVIDAD: (µS/cm)			
SALINIDAD: (g/L)	POLOSO DUREZA TOTAL: (mg/L)	MO. ESTÁTICO: (mg/L)	MO. DINÁMICO: (mg/L)				

CONSTRUCCIÓN DEL POZO:	
FECHA: _____	COMPANIA: _____
DIRECCIÓN: _____	TELÉFONO O FAX: _____
Nº ORIGINAL: _____	Nº MODIFICADO: _____
PROFUNDIDAD DEL POZO:	
PERFORADA: _____ m.	DIÁMETRO: _____"
ENTUBADA: _____ m.	DIÁMETRO: _____"
PERTENECE A LA RED: SI ☐ NO ☐	
ESTADO ACTUAL:	
ACTIVO ☐	
REACTIVO ☐	
ABANDONADO ☐	
USO:	
DOMESTICO: ☐	
URBANO: ☐	
COMERCIAL: ☐	
AGRICOLA: ☐	
OBSERVACIONES: _____	

Figura 4.6.- Planilla empleada por el MINAMB para la caracterización de las aguas subterráneas. Fuente: MINAMB.

Los datos obtenidos del inventario de pozos se anotaron en una tabla suministrada por el Ministerio del Ambiente (ver Figura 4.6), la cual contiene la fecha, hora, lugar, número de análisis, coordenadas, observaciones, pH, CE, temperatura, nivel del agua, registros del Ministerio, bomba, uso, estudio, profundidad del pozo, dueño y cualquier otra observación que fuese de relevancia al momento de analizar los datos.

4.3.- Etapa de laboratorio.

En esta etapa se procesaron en laboratorio todas las muestras tomadas para la identificación de las características químicas e isotópicas del acuífero. Para el análisis químico fue desarrollado en los laboratorios del MINAMB. En el caso del procesamiento isotópico, consistió en llevar las muestras de agua al Laboratorio de Agua y Suelo; Coordinación de Programa de investigación, CIDIAT-ULA, donde se analizaron en un espectrómetro láser para agua líquida modelo DLT-100 (ver Figura 4.7.) con una desviación límite de 2,0‰ para Deuterio y 0,3‰ para Oxígeno 18. Los análisis fueron realizados con respecto a *Standard Working LRG*.



Figura 4.7.- Espectrómetro láser para agua líquida modelo DLT-100. Fuente propia.

4.4.- Procesamiento de la información.

Esta etapa implica la conversión de los datos obtenidos en las etapas anteriores, en información que pueda ser analizada y empleada como datos en otros aspectos de este trabajo.

Se procesó toda la información recopilada, los datos obtenidos en campo y las muestras analizadas en el laboratorio, para obtener resultados concretos en cuanto a la caracterización geológica de los acuíferos del área, la proveniencia de la recarga y extracción del recurso, el modelo hidrogeológico conceptual y por último el modelo matemático a fin de simular el acuífero bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

4.4.1.- Mapa topográfico.

Haciendo uso de los mapas topográficos hoja 7749 III a escala 1:25.000 del MINAMB, se procedió a escanear y posteriormente, mediante el programa *AUTOCAD 2008*, se digitalizó todas las curvas de nivel, principales centros poblados, carreteras, ríos, quebradas y caños; estableciéndose el mapa base de la zona, previamente georeferenciado según sus coordenadas UTM, las cuales fueron transformadas utilizando el programa *TCOOR 5 – 7*, desarrollado por el Prof. Luís Mora del CIDIAT.

El proceso de digitalización se realizó marcando sobre el mapa escaneado una serie de puntos, que el programa por defecto iba guardando en una ventana adjunta. Es importante destacar que para cada una de las capas digitalizadas (curvas topográficas, ríos, quebradas, carreteras, centros poblados, entre otros), se creó un archivo diferente, con el fin de tenerlos por separado, y luego se superpusieron en el mapa base los de mayor interés, para ser exportados separadamente como archivos *.dxf* al programa *Surfer 8.0*, donde se realizó el modelo digital del terreno (3D).

Este procedimiento se desarrollo en el sector de Pedro González – El Salado y La Fuente – Paraguachí.

4.4.2.- Modelo digital del terreno.

La digitalización obtenida en los pasos anteriores generó una base de datos, ésta fue guardada como un archivo *.dxf* se exportó a *Surfer 8.0*, seguidamente se empleó el programa *Dxf2xyz 2.0*, almacenando el archivo en formato *.xyz* de manera que pudo ser leído por el programa *Surfer 8.0*, donde para la generación del modelo se utilizó un *Grid* o mallado, que son las condiciones y limites que se le dieron al programa cuando se generó el modelo.

La base de datos se cargó en *Surfer*, a través del menú *Grid* opción *Data*, donde el método de interpolación que se utilizó fue el *Kriging* (ver Figura 4.8.), por ser el que mejor se ajusta cuando se trabaja con una gran cantidad de puntos, produciendo un margen de error, el cual es necesario corregir a través de la elaboración de un variograma, en donde se trata de ajustar la línea experimental a la teórica, logrando así reducir dicho margen que se produce.

Esto se realizó a través del comando *Model* de *Variogram Properties*, donde se remueven los componentes del variograma y se añade el componente de ajuste que corresponda según el caso. Hasta que arroje el mejor ajuste del variograma experimental. (Ver Anexo IV, Figura IV.1)

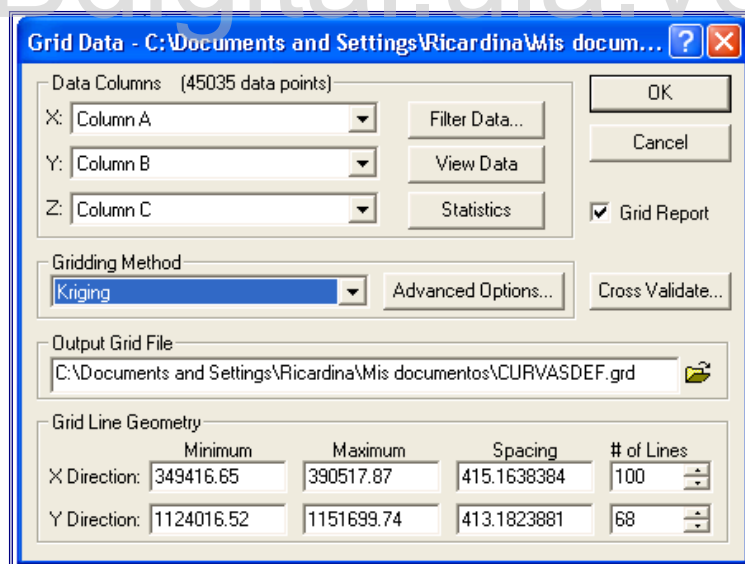


Figura 4.8.- Base de datos para la elaboración del modelo del terreno en *Surfer 8.0*. Fuente propia.

Después que se asignó toda la base de datos, cargó el variograma, creó la superficie del terreno en un modelo tridimensional, y definió el método utilizado para la elaboración del modelo (*Kriging*); se procedió a ver el modelo del terreno, para lo cual se hizo clic en el menú *Map*, comando *Surface*, se cargó el archivo *.grd* anteriormente creado, generando finalmente el modelo tridimensional del

terreno. Es importante resaltar, que el programa *Surfer 8.0*, produce un mallado en forma rectangular (*Grid line Geometry*), de acuerdo a la base de datos establecida para el modelo del terreno; el cual fue modificado según las necesidades del estudio.

Esta metodología se realizó tal cual como se describió en el municipio Gómez, para el municipio Antolín del Campo fue tomado y modificado el modelo digital del terreno de Terán, M. y Vásquez, P. (2009).

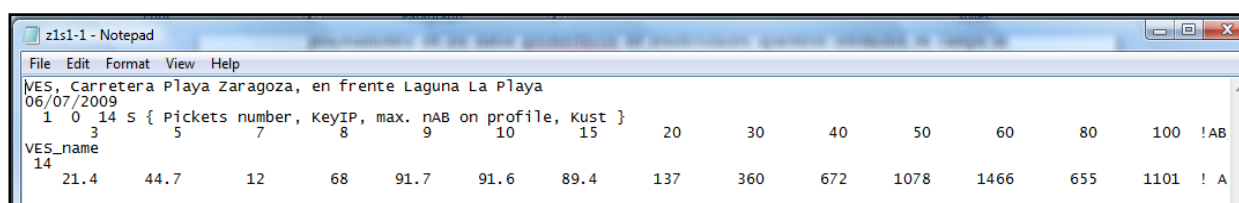
4.4.3.- Procesamiento de información geológica.

Se procesó toda la información recopilada para obtener resultados concretos en cuanto al modelo geológico conceptual del acuífero, tanto en superficie como en profundidad. La información mineralógica de las rocas que se encontraron dentro del área de estudio, sirvió de apoyo para establecer el posible paso del flujo de acuerdo a la comparación entre la composición química del agua y de las rocas.

4.4.3.1.- Procesamiento de los datos geofísicos.

De acuerdo a los datos obtenidos por medio de los SEV y utilizando los programas computacionales, se procesó y suministró la información cuantitativa de las resistividades para cada punto de muestreo de la línea de medición. A su vez, esta información se alcanzó por el procesamiento automático y la aproximación gráfica de las curvas de resistividades verdaderas y secciones, con respecto al arreglo de *Schlumberger*. Este procesamiento de los datos geoelectrónicos de resistividades aparentes obtenidos en campo y tomados de Rubicondo, M. y Velasco, P. (2010) se realizó utilizando el programa *IPI2Win Versión 3.0.1e*, diseñado para la interpretación automática y semi automática en 1D de los SEV a los largo de un perfil, presentando de esta manera información de las resistividades de acuerdo a la profundidad de las capas, logrando un ajuste entre las curvas teóricas y de campo.

Para iniciar el procesamiento del programa, se elaboraron todos los archivos de entrada en un block de notas o *WordPad* que se guardó bajo una extensión *.dat* para todos los sondeos efectuados, de manera que fuese compatible con *IPI2Win*. Estos archivos contienen el sondeo, fecha, número de mediciones AB/2 y los valores de resistividad aparente para cada abertura (ver Figura 4.9.).



VES, Carretera Playa Zaragoza, en frente Laguna La Playa													
06/07/2009													
1	0	14	s {	Pickets number,	KeyIP,	max.	nAB on profile,	Kust }					
	3	5	7	8	9	10	15	20	30	40	50	60	80
VES_name													100 !AB
14	21.4	44.7	12	68	91.7	91.6	89.4	137	360	672	1078	1466	655
													1101 ! A

Figura 4.9.- Archivo con extensión *.dat*. Fuente propia.

4.4.3.2.- Elaboración de las curvas de SEV.

A partir de los resultados de las observaciones en campo se confeccionaron las curvas de SEV, las cuales se adquirieron a través de opciones ofrecidas por el programa, pues se seleccionó en los comandos desplegados en la barra superior del programa el icono  y se ubicó el archivo *.dat* del

sondeo a hacer procesado, en la barra de menú se buscó  que desplegó en pantalla la curva de campo, la cual se presentó en escala logarítmica para ambos ejes de coordenadas correspondiendo a valores de resistividad y aberturas AB/2. (Ver Figura 4.10).

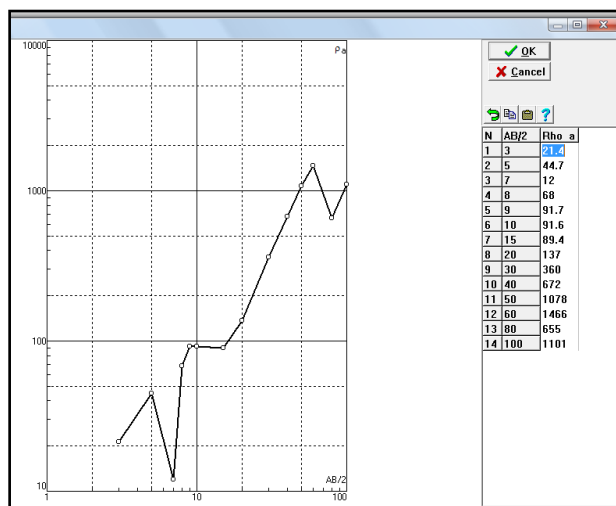


Figura 4.10.- Curva de campo mostrada por IPI2Win. Fuente propia.

Luego de graficar la curva de campo, se realizó un modelado 1D de las mismas, a partir de la interpretación automática por aplicación de la aproximación de mínimo número de capas que da el programa.

Se eligió el comando *Options* en la barra menú y se hizo clic en *New Model*, el cual crea un modelo para el mayor ajuste entre las curvas de campo y la teórica, teniendo un parámetro de inversión que demuestra valores máximos y mínimos de error, así como también el número mínimo de capas (ver Figura 4.11).

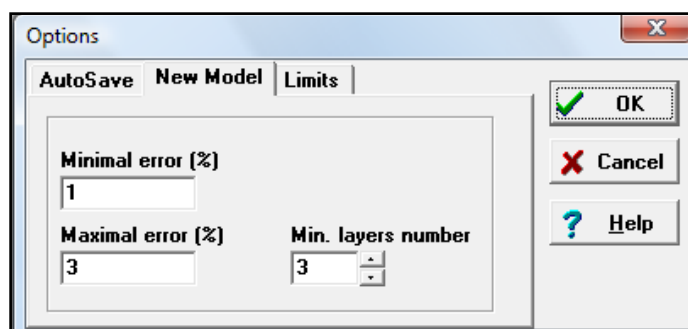


Figura 4.11.- Configuración del parámetro de inversión. Fuente propia.

Una vez realizado este procedimiento, se ubico el icono  haciendo click sobre este para obtener las iteraciones entre la curva teórica (representada por la línea roja) y la curva de campo según el error de ajuste que presenta los parámetros del modelo (representada por la línea negra) (ver Figura 4.12).

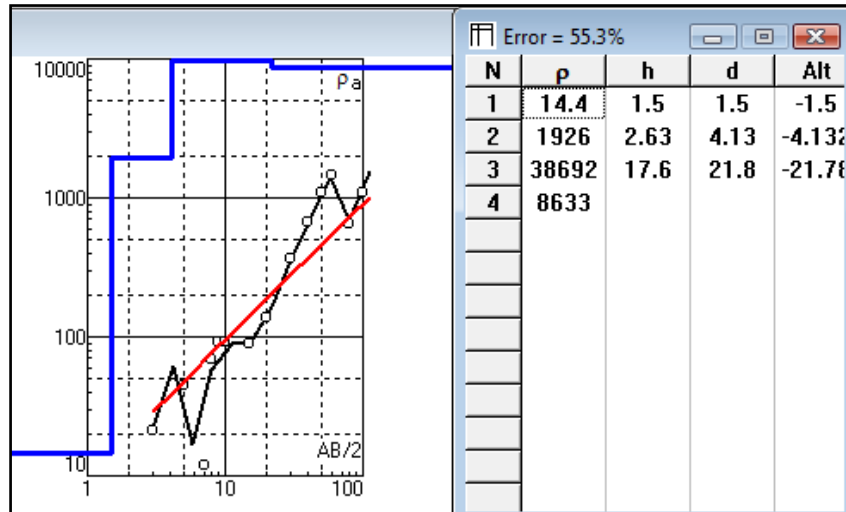


Figura 4.12.- Parámetros del modelo, error de ajuste y curva teórica. Fuente propia.

4.4.3.3.- Análisis de los perfiles litológicos.

Se tomó como referencia los cinco perfiles litológicos ubicados en el sector de Pedro González (ver Anexo II, Figura II.1), donde la nomenclatura propuesta para la investigación corresponde a P_L seguido por el número que lo identifica. Esta información sirvió para la calibración de los cortes eléctricos generados a partir de los datos de resistividad verdadera y profundidad de cada capa obtenida mediante los SEV.

Para el análisis cualitativo, la presentación e interpretación de los resultados se efectuó de acuerdo a las correlaciones pertinentes para el área de estudio.

- **Cortes geológicos.**

Se fundamentó en la transformación de los cortes eléctricos generados a partir de los datos de resistividad verdadera y profundidad de cada capa, que a su vez, se calibraron con la información de investigaciones geológicas y pozos perforados en el área (perfiles litológicos, muestras de mano y registros eléctricos), los cuales permitieron establecer asociaciones de rangos de resistividades para cada litología presente en el área de estudio, a la cual se le asignó un color ajustado en función de la litología para los cortes geoelectricos (ver Figura 4.13).

Para determinar los rangos de resistividades del suelo, se realizó una correlación e integración de todos los datos geológicos existentes del área de estudio y zonas aledañas, entre ellos, información del mapa geológico y descripciones litológicas (Díaz, A. y Monteagudo, N. 2009) provenientes de estudios sedimentológicos realizados con anterioridad; por ello, fue imprescindible establecer una relación directa entre la descripción litológica y valores de resistividades verdaderas del corte geoelectrico del SEV, el cual se convirtió en una aproximación a un corte geoelectrico del subsuelo.

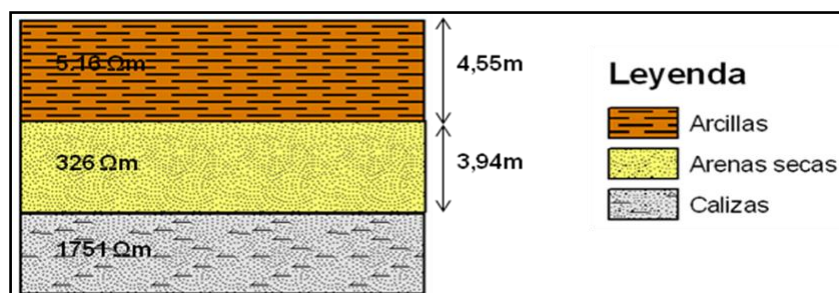


Figura 4.13.- Corte geoelectrico del sondeo Z 3-4. Fuente propia.

• Seudo - secciones

Para la elaboraci3n de la seudo - secci3n de resistividad, con la cual se puede realizar una correlaci3n lateral de los sondeos el3ctricos verticales de acuerdo a la distribuci3n geogr3fica, se emple3 el programa *IPI2Win*, donde se agruparon en un mismo archivo .dat tres SEV (ver Figura 4.14) los cuales presentaron resistividades y litologías similares, adem3s de su cercanía geogr3fica.

Archivo de entrada .dat para seudo - secciones y perfiles geoelectricos en IPI2Win. El archivo contiene los siguientes datos:

```

dia2
SEV:1,2,3
3 0 14 s { Pickets number, keyIP, max. nAB on profile, Kust }
3 3 5 7 8 9 10 15 20 30 40 50 60 80 100 !AB/2
SEV23
14
9.32 4.28 20.9 39.2 68.2 84.5 13.51 6.45 4.97 15.0 4.61 4.46 11.6 12.
SEV22
14
69.4 96.6 317.0 295.0 269.0 247.0 280.0 433.0 739.0 1088.0 1111.0 1429.0 495.0 138
SEV21
14
18.1 15.3 21.9 20.6 19.6 16.5 15.9 25.2 18.2 27.9 26.2 34.9 231.0 2

```

Figura 4.14.- Archivo de entrada .dat para seudo - secciones y perfiles geoelectricos en IPI2Win. Fuente propia.

Una vez culminada la modificaci3n del archivo .dat se pulso en la barra del programa el icono  desplegando la seudo - secci3n en la parte superior y el perfil geoelectrico en la parte inferior (ver Figura 4.15). Para la buena lectura de los mismos se ajust3 el error a cada secci3n haciendo click en las barras laterales.

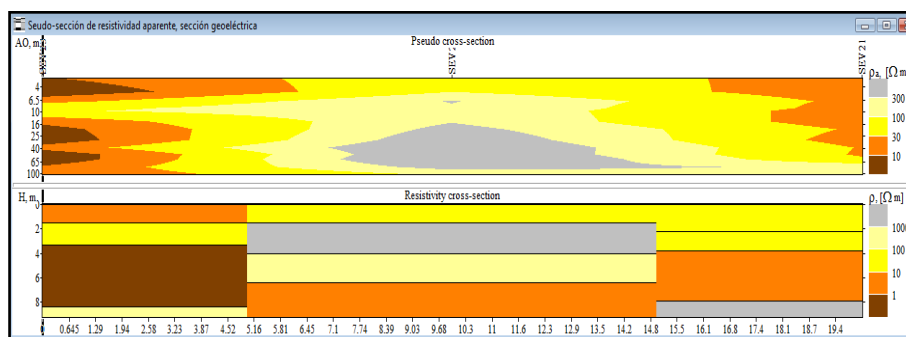


Figura 4.15.- Seudo - secci3n de resistividad verdadera y perfil geoelectrico en IPI2Win. Fuente propia.

Los parámetros de esta seudo - sección se ajustaron a través del comando sección/comando, desplegando en pantalla una ventana para realizar las modificaciones. (Ver Figura 4.16).

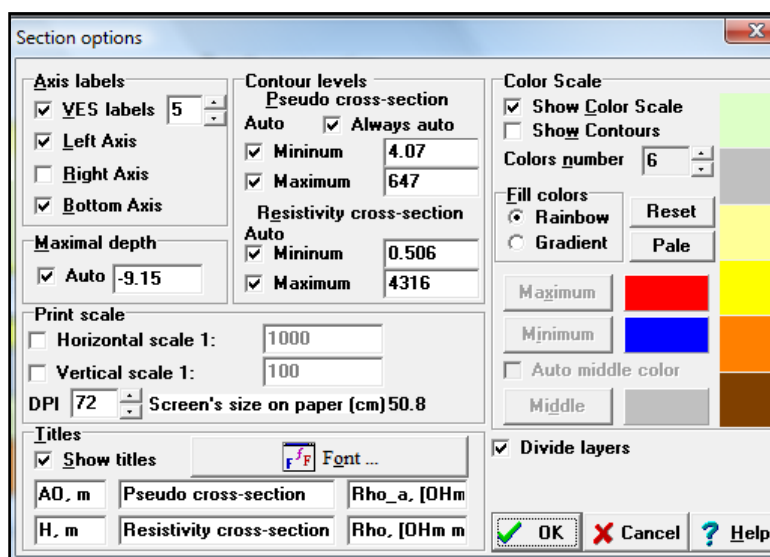


Figura 4.16.- Configuración de los parámetros de la seudo - sección y del perfil geoelectrico en el programa IPI2Win. Fuente propia.

4.4.4.- Actualización del inventario de pozos dentro del área de estudio.

Con base en el material recopilado por el MINAMB, sede Nueva Esparta, campañas realizadas por la Universidad Central de Venezuela, la Escuela de Ingeniería Geológica de la Universidad de los Andes, y la información suministrada por propietarios independientes de haciendas en el área de estudio y los datos recopilados en el marco de esta investigación, se elaboró el inventario de los pozos dentro de la zona estudiada. La información básica referente a los pozos corresponde a datos de localización espacial, profundidad, elevación del terreno, nivel estático y/o dinámico, caudales, pH, conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos, salinidad y química del agua. Es importante resaltar que gran parte de los datos suministrados se encontraban dispersos, incompletos y en algunos de los casos desactualizados, por lo cual se depuró la información, se seleccionaron los pozos que se encontraban dentro del área de interés y que además proporcionaron la mayor cantidad de datos reales. En la zona de Pedro González se consideraron campañas correspondientes a los años 2001, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010; y en La Fuente – Paraguachí, 2005, 2006, 2007 y 2008. (Ver Anexo III)

4.4.5.- Determinación de los parámetros hidrogeológicos.

A partir de los datos tomados de la prueba de bombeo realizada en la campaña 2008 en el marco de esta investigación, en el sector de Pedro González, específicamente en el pozo 21 de coordenadas E: 401539 y N: 1229234 y se determinaron los parámetros hidrogeológicos S y T a partir de los abatimientos medidos en un tiempo de bombeo de 80 minutos. (Ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1.- Datos de los abatimientos y tiempos de bombeo empleados en el programa GWW.

Tiempo (min)	Abatimiento (m)
1	1,83
2	2,13
8	2,34
10	2,4
15	2,46
20	2,5
30	2,55
40	2,61
50	2,65
60	2,7
70	2,78
80	2,8

Fuente: propia.

Haciendo uso del programa GWW (*Ground Water Software for Windows*) se calculó la transmisividad del acuífero. En primer lugar se suministraron al programa los datos de caudal, 3 l/s, duración de la prueba de bombeo, 80 minutos (0,0417d) y radio de pozo, 0,05m (ver Figura 4.17) y posteriormente se introdujeron los abatimientos correspondientes a los diferentes tiempos de bombeo expuestos en la Tabla 4.1.

Ground Water Software for Windows			
Well Ident. MARQ	Description		
Distance 0.05	Aver. Pumping Rate 3.000000	Duration 80.00000	Initial Sat. Thickness

Figura 4.17. Datos para la identificación del pozo en el programa GWW. Fuente propia. Finalmente para el coeficiente de almacenamiento se empleó la ecuación de hidráulica de aguas subterráneas siguiente:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \left(\frac{2,25Tt}{r^2 S} \right) \quad (\text{Ecuación IV. 1}) \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde:

s es el abatimiento (m)

Q es el caudal (m³/d)

T es transmisividad (m²/d)

t es el tiempo (d)

r es el radio del pozo (m)

S es el coeficiente de almacenamiento (adimensional).

4.4.6.- Elaboración del mapa de ubicación de los pozos.

Este mapa se desarrollo usando como base el mapa del área de estudio previamente realizado, en el cual fueron ubicadas las diversas campañas establecidas en el inventario, con la finalidad de distinguir en que zonas existe la mayor cantidad de información, tanto para el sector de Pedro González como La Fuente Paraguachí, donde en este último se tomó la información de Frías, L. (2007).

4.4.7.- Elaboración de mapas de niveles piezométricos.

Para crear este mapa se calculó el nivel piezométrico, restando a las cotas del terreno los niveles estáticos de cada pozo, respectivamente.

En su elaboración se contó con datos de niveles piezométricos de diversas campañas de medición, los cuales permitieron crear una base de datos en *Excel*, que contenía la identificación de los pozos, sus respectivas coordenadas UTM y las cotas del nivel piezométrico, halladas como se indico anteriormente.

Seguidamente, se cargo dicha base de datos en el programa *Surfer 8.0*, con el menú *Grid* comando *Data*, donde las variables x e y, correspondieron a las coordenadas UTM, este y norte, respectivamente, y la variable z represento los niveles piezométricos medidos en campo para cada campaña de monitoreo (ver Anexo V). El método de interpolación utilizado fue el *kriging*. (Ver Anexo IV)

El mapa de contorno se obtuvo abriendo el menú *Map*, con el comando *Contour Map* y por último se cargó el *Grid* blanqueado ya creado. El programa generó un mapa de contorno, el cual se modificó según criterio personal, para su posterior presentación.

Cabe resaltar que este mapa se construyó para las diferentes campañas inventariadas a fin de mostrar la variación de la piezometria a lo largo del tiempo, tanto en el área de Pedro González como en La Fuente Paraguachí.

4.4.8.- Mapa de líneas de flujo.

Éste mapa tiene una gran relación con el de cotas de niveles piezométricos, y se empleó para establecer las líneas de la dirección del flujo o del movimiento de las aguas subterráneas, del área de estudio.

Se generó haciendo uso del menú *Map*, con el comando *Vector Map*, en la opción *New - 1 Grid Vector Map* (ver Figura 4.18.), y se cargó el archivo de niveles piezométricos; generando en el programa un mapa de vectores, el cual, indicó la dirección del flujo. Para una mejor visualización de esta dirección, se le añadió a este mapa la red de drenaje de la zona, previamente elaborado en el mapa base del área de estudio.

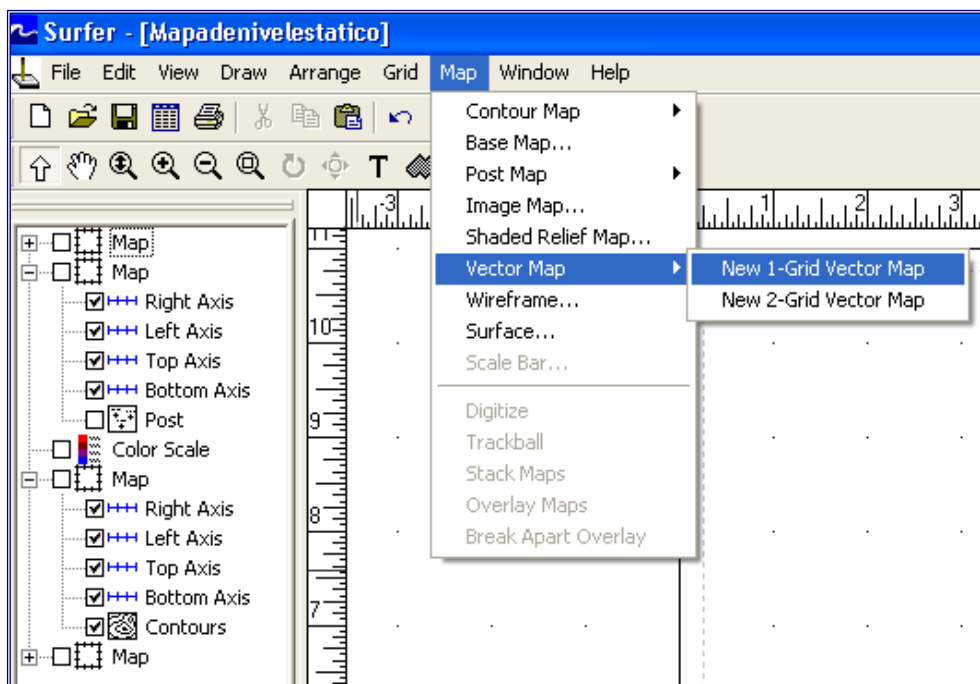


Figura 4.18.- Elaboración del mapa de líneas de flujo en *Surfer 8.0*. Fuente propia.

4.4.9.- Modelo digital de la base del acuífero.

Se realizó a partir de los datos de profundidades de todos los pozos y SEV distribuidos en Pedro González – El Salado, que contenían dicha información, se tomó como base una tabla elaborada en *Microsoft Excel* (ver Tabla 4.6) que contiene las referidas coordenadas. De la base de datos, fueron eliminados los aljibes, cuya profundidad es bastante somera y no representaban el mismo nivel del acuífero al cual la mayoría de los pozos realizan la captación. A través del programa *Surfer 8.0* se obtuvo una representación gráfica de un plano imaginario que pasa por las profundidades de los pozos, que para efectos de ésta investigación, representó la base del acuífero; no indicando con esto que el acuífero tenga dicho límite en profundidad. El variograma se muestra en el Anexo IV.

A partir del mapa base, se delimitaron los bordes del acuífero, por medio del blanqueo realizado en *Surfer 8.0*.

El blanqueo consistió en eliminar las zonas que por sus condiciones físicas no presentaron niveles piezométricos o de las que fue imposible conseguir información; así se blanquearon las zonas montañosas y el Mar Caribe que tiene un nivel constante de agua y la zona suoroeste del área de estudio.

El procedimiento de blanqueo, se realizó con una propiedad del programa que permite digitalizar el área que se quiere eliminar, denominada *Digitize*, y que se mantiene constante para todos los mapas a los que se aplique. Para obtener el mapa blanqueado se selecciono y se elimino de él, el área anteriormente digitalizada.

Este procedimiento se realizo para todos los mapas en los que el objetivo principal era mostrar alguna característica específica del acuífero.

4.4.10.- Modelo de recarga del acuífero

Para el cálculo de la recarga del acuífero es necesario conocer el volumen de agua que ingresa por precipitación, la cantidad de agua que se infiltra por los cursos de agua o por flujos subterráneos

afluentes. Para ello se dividió este estudio en la determinación del balance hídrico y en la obtención del flujo subterráneo afluente. Esto tanto para el Sector de Pedro González como en La Fuente Paraguachí.

4.4.10.1.- Balance hídrico

El cálculo del balance hídrico se realizó por diversos métodos, donde para esta investigación se empleó la ecuación establecida por Custodio y Llamas en el 2001, donde se hace uso de datos meteorológicos.

$$\text{Recarga} = P - (\text{ETR} + \text{Esc}) \quad (\text{Ecuación 4.2}).$$

Donde:

P: precipitación (mm)

ETR: evapotranspiración real (mm)

Esc: escorrentía (mm)

Para los acuíferos en estudio, la recarga se determinó por la precipitación originada en la zona, menos la escorrentía y la evapotranspiración, cuyos valores se obtuvieron de la siguiente manera:

Los datos de precipitación se recolectaron en la primera fase de la investigación, a través del MINAMB. Donde se generó una base de datos para el Sector de Pedro González, desde 1986 hasta el 2006, exceptuando los años 1993, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, de los que no se tenía información, haciendo uso de la estación Pedro González. Para el sector de La Fuente Paraguachí se empleó la estación de Paraguachí, con los datos del 1986 al 1997, exceptuando el año 1993. (Ver Anexo I).

La evapotranspiración real se calculó utilizando el método de *Thornthwaite*. El cual requiere una serie de parámetros que se obtienen según las ecuaciones que él mismo establece.

En primer lugar se calculó el índice de calor mensual:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (\text{Ecuación 4.3}).$$

Donde:

t = temperatura media diaria del mes (° C)

i = índice de calor mensual

Tomando en cuenta lo anterior se requirió la temperatura media para cada mes, datos que se tomaron de la estación de Tacarigua por ser la que contenía la información. (Anexo I, Tabla I.1).

Para demostrar el método de *Thornthwaite* se tomó un ejemplo arbitrario, el año 2003, en el sector de Pedro González, que presentó una temperatura media para cada mes como muestra la Tabla 4.2. Obteniendo con esto un índice de calor mensual para cada mes de los 15 años que se evaluaron.

Tabla 4.2.- Datos de temperatura en °C de la estación Tacarigua.

	Temperatura (°C)											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	26,6	26,8	26,7	27,0	27,2	26,9	27,2	27,4	27,2	27,0	26,0	27,3
1987	27,5	26,6	27,0	27,9	27,7	28,5	28,2	28,6	28,3	27,8	28,1	27,7
1988	28,1	27,7	28,2	27,8	28,3	28,4	28,6	28,1	28,4	28,7	27,4	24,7
1989	25,1	27,2	27,4	26,6	27,6	26,4	26,7	27,5	27,1	26,8	25,1	23,9
1990	23,9	25,0	26,1	27,6	27,6	27,4	27,7	28,0	28,4	27,8	27,4	27,1
1991	27,4	25,7	26,4	27,0	27,1	26,8	27,1	27,1	27,6	27,1	26,0	24,7
1992	25,0	25,0	25,7	27,8	28,5	28,0	27,8	28,7	27,3	28,1	27,5	26,0
1994	25,3	25,6	26,5	28,0	27,6	27,2	27,3	27,9	28,4	28,5	27,7	27,4
1995	25,4	26,9	27,1	28,2	28,9	28,0	28,3	28,9	28,2	28,1	27,9	27,7
1996	26,6	27,5	26,8	28,7	33,4	27,6	27,4	27,9	27,9	29,3	27,9	26,5
1997	26,3	25,8	26,4	28,1	28,8	25,0	25,6	26,8	29,2	27,4	27,5	27,1
2003	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,7	27,4	27,3
2004	27,4	27,5	27,8	27,9	27,9	27,4	28,5	27,4	27,4	27,9	28,0	27,5
2005	27,5	27,6	27,5	10,3	19,2	28,7	28,9	29,3	29,0	28,2	28,1	27,3
2006	27,2	27,8	28,3	29,0	29,2	29,2	28,5	28,7	29,1	28,4	28,2	28,3

Fuente: Tomado y modificado del MINAMB. Estación Tacarigua.

A partir de los resultados del índice de calor mensual se dedujo el índice de calor anual por medio de la siguiente ecuación:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (\text{Ecuación 4.4}).$$

Se obtuvieron entonces índices de calor anual para los quince años en estudio, respectivamente.

Ahora bien, para calcular la ETR fue necesario además, obtener la evapotranspiración media teórica (ε), que fue calculada con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (\text{Ecuación 4.5}).$$

Donde:

I = Índice de calor anual, calculado anteriormente.

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1972 \times 10^{-5} I + 0.49239$$

ε = ET media teórica (mm/día)

La evapotranspiración corregida (ETc) para meses reales y horas de sol máximas según la latitud corresponde a:

$$ETc = \frac{N}{12} \frac{d}{30} \times \varepsilon \quad (\text{Ecuación 4.6}).$$

Siendo:

ε = ET media teórica, calculada anteriormente.

N = número máximo de horas de exposición al sol según la latitud

d = número de días del mes

Los valores de N son tomados de la Tabla 4.3, que siguiendo el ejemplo demostrativo, para el año 2003 son los señalados en la referida tabla.

Es conveniente presentar que la latitud tomada para buscar N fue de 10° latitud norte, a pesar de que el área de estudio se ubica en la latitud 11°.

Tabla 4.3.- Valores de número máximo de horas de exposición al sol según la latitud para cada mes del año. Unidad: horas/día.

	N (horas)											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1987	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1988	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1989	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1990	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1991	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1992	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1994	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1995	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1996	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
1997	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
2003	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
2004	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
2005	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
2006	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5

Fuente: Modificado de Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Hidrogeología.

No obstante a partir de la ETc se obtuvo la ETP.

$$ETP = ETc * (1 - Ce) \quad (\text{Ecuación 4.7}).$$

Ce = Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía a su vez, depende de la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente del terreno. Tal como se aprecia en la Tabla 4.4. La cobertura vegetal y el tipo de suelo presente en cada zona se identificó y evaluó principalmente por medio de observaciones de campo. Las pendientes se obtuvieron a partir del mapa de pendientes realizado en *Surfer 8.0*; por medio de la opción *Calculus* y luego *Terrain Modeling / Terrain Slope* aplicada al mapa base.

Finalmente la ETR está dada como:

$$\text{Si } ETP > P_e; ETR = P_e + \text{almacenamiento} \quad (\text{Ecuación 4.8}).$$

$$\text{Si } ETP < P_e; ETR = ETP \quad (\text{Ecuación 4.9}).$$

Donde P_e corresponde a la precipitación efectiva y se obtiene al sustraer de la precipitación la escorrentía.

La escorrentía es calculada de la siguiente manera:

$$Esc = P \times C_e \quad (\text{Ecuación 4.10}).$$

Donde:

Esc: escorrentía

P: precipitación

C_e : coeficiente de escorrentía (Tabla 4.4.)

Tabla 4.4.- Coeficiente de escorrentía.

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA C_e						
Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente del Terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		50%	20%	5%	1%	
Sin Vegetación	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
Cultivos	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
Pastos Vegetación Ligera	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
Hierba - Grama	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Bosques Densa Vegetación	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

Fuente: Fundamentos del ciclo Hidrológico. José Leoncio Pérez Machado. 1976. UCV.

Los cálculos de la recarga por infiltración para los demás años desde 1986 hasta 2006 se realizaron de la misma manera que fue presentado el año 2003. Así pues, se desarrollo la misma metodología para el sector de La Fuente – Paraguachí.

4.4.10.2.- Flujo subterráneo afluente.

Se obtuvo calculando la posible entrada de agua que, por flujos subterráneos pueda provenir de ríos u otros acuíferos de cuencas cercanas. Por observaciones en campo y por la hidrología particular de la zona, los ríos y quebradas están secos la mayor parte del año; por lo que el aporte subterráneo podría provenir de un acuífero o cuenca vecina, de las zonas más elevadas que se encuentran cercanas al área del acuífero. Para calcular este caudal fue utilizada la Ecuación de Darcy:

$$Q = A * k * i \quad (\text{Ecuación 4.11}).$$

Donde:

$$i = \Delta h / \Delta l \quad (\text{Ecuación 4.12}).$$

i gradiente hidráulico, que constituye la pendiente de la línea piezométrica. Se determinó por medio del mapa piezométrico, donde Δh representa la diferencia de cotas entre las curvas piezométricas y Δl la distancia en planta de la curva piezométrica.

k es la permeabilidad del material por el que circula el fluido; tomada de la Tabla 4.5, la cual comprende los rangos de permeabilidad en función de la formación geológica y tipo de material de los depósitos.

$$A = L * E \quad (\text{Ecuación 4.13}).$$

A el área transversal que atraviesa dicho fluido, y que fue considerada como el producto del espesor del acuífero por la longitud del piedemonte por donde se localiza la entrada de agua.

Tabla 4.5.- Cuadro comparativo entre los valores de permeabilidad, la clasificación cualitativa del acuífero y el tipo de material que lo componen.

(m/d)	Rango de permeabilidad				
	10^{-7}	3.10^{-4}	5.10^{-2}	5.10^0	4.10^2 3.10^5
Calificación	Impermeable	Poco Permeable	Algo Permeable	Permeable	Muy Permeable
Calificación de la formación	Acuicludo	Acuicludo	Acuífero Pobre	Acuífero regular a bueno	Acuífero excelente
Ejemplos de materiales	Arcilla Compactada, Pizarra, Granito	Limo arenoso, Limo, Arcilla limosa	Arena Fina, Arena Limosa, Caliza fracturada	Arena limpia, Grava y Arena, Arena fina	Grava limpia

Fuente: Comisión Docente Curso Internacional de hidrología subterránea 2009.

4.4.11.- Descargas del acuífero: caudales de extracción y manantiales.

Las descargas del acuífero están representadas por los caudales extraídos en los pozos y las descargas naturales de agua del mismo, tales como los manantiales. Para obtener las descargas del acuífero se sumaron todos los caudales incluyendo los manantiales y se visualizaron mediante mapa de caudales. Para la ejecución de éste mapa se contó con la información proveniente del inventario de pozos ya actualizado, realizándose este con la finalidad de distinguir, gráficamente en toda el área de estudio, los volúmenes de agua extraídos y así poder dar una idea de la intensidad de explotación en la zona y su evolución en el tiempo, según se muestra en el anexo III.

4.4.12.- Procesamiento de las muestras isotópicas.

Una vez entregado el reporte de resultados emitido por el Laboratorio de Agua y Suelo, Coordinación de Programa de investigación, CIDIAT-ULA, de las muestras de agua tomadas para dichos análisis, se graficaron las concentraciones relativas de Deuterio H^2 y O^{18} para obtener la distribución isotópica de las muestras de agua con respecto a la línea meteórica mundial (LMM), realizando los análisis respectivos, en Pedro González como en La Fuente Paraguachí, encontrando un error en estas últimas. Posteriormente, se ubicaron en el mapa topográfico del área de estudio, en el Sector de Pedro González, tanto las del 2008 como las del 2010, para considerar su ubicación geográfica. Y se compararon con la composición isotópica de las aguas en presas y embalses de Venezuela proyecto VEN 8/016, para así tener una referencia de la cota topográfica a la cual se produce la proveniencia de recarga de los acuíferos en la zona.

4.4.13.- Hidrogeoquímica.

4.4.13.1.- Mapas hidrogeoquímicos.

La calidad del agua se determinó con base en sus propiedades físico químicas, es por ello, que fue necesaria la elaboración de mapas que mostraron las características químicas del agua. Entre ellos tenemos los de CE, TSD y pH, para la realización de este estudio. Los mapas hidrogeoquímicos se generaron en el programa *Surfer 8.0*, donde el método utilizado para interpolar en su mayoría fue el *krigeado*, aunque en algunos casos por la escasez de información se empleó el método de mínima curvatura por ser el que mejor representó los datos introducidos. Para su elaboración se consideró la información recopilada en el inventario de pozos donde en el sector Pedro González – El Salado se mapeó los datos de CE y pH de las 7 campañas de los años 2001, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010. Además, se elaboraron mapas de salinidad de las campañas del 2005, 2007, 2008, 2009 y 2010, y TSD del 2008, 2009 y 2010, así como de dureza del 2008 y 2009. Los datos para los mapas se encuentran en los Anexos III.

En La Fuente – Paraguachí se generaron los mapas de conductividad eléctrica, y pH para las campañas del 2005, 2006, 2007 y 2008. Esto a fin de mostrar la evolución en el tiempo de los diferentes parámetros considerados y conocer la variación hidrogeoquímica en el área de estudio.

4.4.12.2-Clasificación Hidrogeoquímica.

Para la clasificación del agua en esta investigación, se empleó un diagrama que permite estudiar los aspectos geoquímicos del agua y su relación con las rocas donde se realizaron distintas gráficas que

representaron las características de la misma y la relación entre los iones (aniones y cationes) mayoritarios que la componen; dicho diagrama fue el Triangular de Piper.

De los datos recopilados se contó con información química necesaria, para introducirlos en el programa *EASY_QUIM.4* elaborado por Enric Vázquez Suñé, 1999; para ello se introdujeron los iones mayoritarios del agua, aniones: HCO^{-3} , NO^{-3} , SO^{-4} , Cl^{-} y cationes: Na^{+} , K^{+} , Ca^{++} y Mg^{++} . Además, fue necesario colocar la identificación del pozo y sus respectivas coordenadas y la fecha de realización del análisis. Luego, el mismo, de manera simple, se ubicaron los datos químicos de los pozos en los diagramas y realizo los cálculos respectivos, para posteriormente y con ayuda de la figura Triangular de Piper (Custodio y Llamas, 2001) poder clasificar las aguas del área de estudio. El programa permitió obtener el diagrama de Piper, el diagrama de Schoeller y la clasificación de aguas para uso agrícola.

Para el sector de Pedro González – El Salado se tomaron los datos de la campaña elaborada en el 2006 por Corsi (ver Anexo III) y para La Fuente Paraguachí los recopilados en el 2005 y 2006 por el Ministerio del Poder Popular para El Ambiente y en el 2007 por Frías, L.

4.4.14.-Modelo hidrogeológico conceptual.

Este modelo permitió observar la geometría del acuífero vista en tres dimensiones, detallando la existencia de capas permeables, impermeables, incluyendo la superficie topográfica, a fin de idealizar el comportamiento del acuífero.

El modelo hidrogeológico conceptual se construyó a partir de la información obtenida de las secciones estratigráficas generadas mediante los SEV, los perfiles geológicos, pozos con litología y la recopilación de la información geológica, donde se obtuvo en cada punto la cota correspondiente para cada una de las capas, haciendo la diferencia entre la cota del terreno menos el espesor del material (valor definido a partir de las secciones geológicas).

Para ello se elaboró una tabla con las profundidades de las distintas capas que constituyen el modelo hidrogeológico (ver Tabla 4.6), donde según la información geológica procesada en función de las correlaciones definidas se establecieron un total de siete capas, donde el tope de la primera capa corresponde al modelo digital del terreno y la base de la ultima capa al modelo del basamento rocoso del acuífero.

Tabal 4.6. Valores definidos para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del sector Pedro González – El Salado.

Punto	Coordenadas		Cota	Capa 1		Capa 2		Capa 3		Capa 4		Capa 5		Capa 6		Capa 7	
				Arcilla		Grava		Arcilla		Arena		Gneis		Caliza		Gneis	
	Este	Norte	m	Tope	base	Tope	Base	Tope	Base	Tope	Base	Tope	Base	Tope	Base	Tope	Base
Z3-4	400435	1228461	20	20	19	19	19	19	14,55	14,6	10,5	10,5	9,51	9,51	-8,5	-8,5	-9,5
Z3-1	400717	1228666	22	22	21	21	21	21	19,93	19,9	18,9	18,9	8,3	8,3	-10	-10	-12
Z3-3	401923	1229153	58	58	57	57	57	57	55,91	55,9	54,9	54,9	34,2	34,2	6	6	4
Z3-2	400948	1229282	20	20	19	19	19,3	19,3	18,01	18	9,6	9,6	8,6	8,6	7,6	7,6	5,6
PL-5	401175	1228893	33	33	32	32	27	27	17	17	13	13	6	6	-12	-12	-13
PL-1	401225	1228561	40	40	39	39	32	32	30	30	27	27	26	26	8	8	7
PL-3	400602	1228860	20	20	19	19	19	19	10	10	9	9	3	3	-15	-15	-16

Fuente: Propia.

Tomando en cuenta lo anterior, este modelo se construyó empleando el programa *SURFER 8.0*, con el variograma de ajuste respectivo (ver Anexo IV), de la siguiente manera:

A través del menú *Grid*, en el comando *Math...*, se estableció la función matemática que permitió restringir la intersección entre capas, para evitar el corte mutuo que pueda afectar el correcto despliegue del modelo. En la ventana de diálogo de la Figura 4.19 se muestran los parámetros a seleccionar, repitiendo el proceso para cada una de las capas, de modo que se corrigieron los posibles errores de visualización. En la casilla de *Input Grid File A*, se abrió el archivo *.grd* correspondiente a la capa superior (en este caso la superficie del terreno). Luego en *Input Grid File B*, se cargo el archivo *.grd* de la capa inmediata inferior. Entonces se asignó el nombre para la capa corregida, *Output Grid File C*, y se insertó la función matemática adecuada para efectuar la corrección, que para el caso de restringir la intersección de las capas fue:

$$C = \text{IF} (B < A, B, A - 1) \quad (\text{Ecuación 4.14}).$$

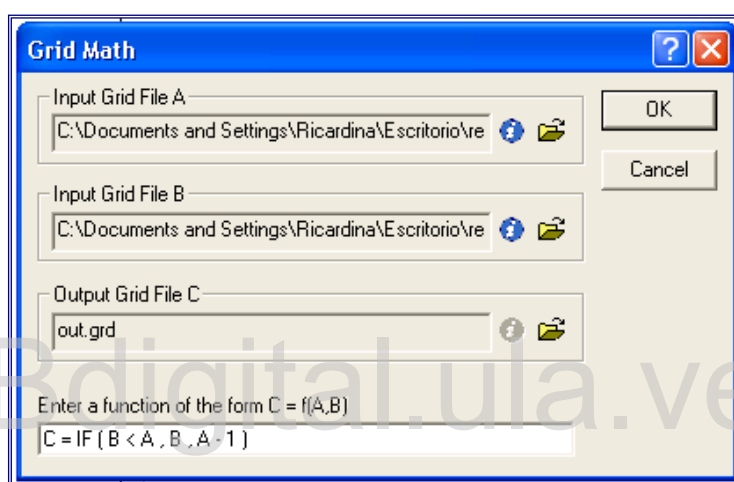


Figura 4.19.- Ventana de dialogo para la corrección de la intersección de las capas del modelo hidrogeológico conceptual. Fuente propia.

La ecuación 4.14 puede interpretarse como sigue: la capa nueva (*Output Grid File C*) no debe ser corregida si las cotas de la capa B (inmediata inferior) son menores a las de la capa A; en todo caso, B deberá tener siempre cotas menores en una unidad respecto a la capa A.

Luego, cada una de las bases de las capas corregidas, fue distinguida con un color específico en función del tipo de material, manteniéndose el mismo color empleado en las secciones estratigráficas, para mantener una uniformidad en el desarrollo del estudio.

Para efectuar estos cambios, se hizo doble clic a la superficie visualizada para llamar la ventana de dialogo *Map: 3D Surface Properties* de la figura 4.20.

En la casilla *Upper* de *Material Color*, se escogió el color adecuado según lo mencionado anteriormente. Fue importante establecer la uniformidad de la escala de colores, a un aspecto monocromático en la ventana *Color Spectrum*, eliminando todos los elementos distintos de la paleta virtual. Una vez aplicada la uniformidad del color de la capa, se suprimió el sombreado, en la pestaña *Lighting* de la ventana de *Map: 3D Surface Properties*, escogiendo *none* (ninguno), para los efectos de iluminación que generan el sombreado. Este proceso se efectuó para cada una de las bases de las capas, alternando el color.

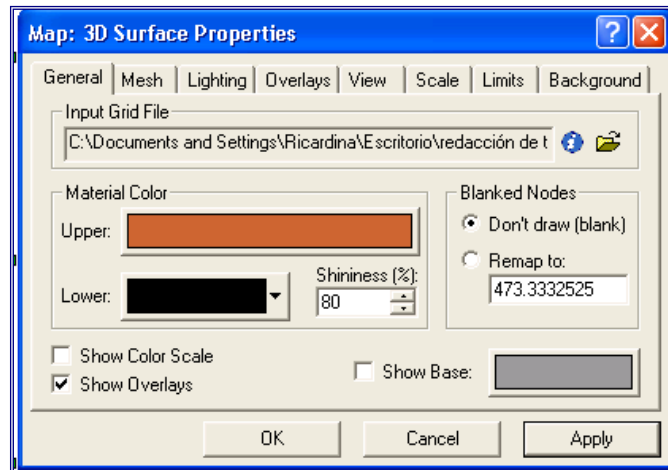


Figura 4.20. Asignación de colores en función de la permeabilidad de las capas para la visualización del modelo hidrogeológico conceptual. Fuente propia.

Posteriormente, se procedió a crear el modelo 3D, cargando cada una de las capas corregidas en los procesos anteriores al programa, por el menú *Map* en el comando *Surface*. Una vez hecho esto, se selecciona la visualización de las capas y a través del comando *Overlay Maps*, del menú *Map*, se generó la superposición de las capas integradas en el modelo Hidrogeológico Conceptual 3D.

Se realizó el *Grid* correspondiente a cada capa, con los comandos; *Grid Data*, seleccionando en el cuadro de diálogo *Open*, la tabla del programa *Microsoft Excel*, que contenía los datos de los pozos con litología y sondeos. Seguidamente se colocaron las coordenadas este, norte y la capa a la cual se le realizó el *Grid*, en la columna de *data* “x”, “y” y “z”; así como las coordenadas correspondientes al área de estudio, y el número de filas y de columnas.

A partir del mapa base, se delimitaron los bordes del acuífero, por medio del blanqueo realizado en *Surfer 8.0*. Éste consistió en eliminar las zonas montañosas y el Mar Caribe que tiene un nivel constante de agua y la zona suroeste del área de estudio.

El procedimiento de blanqueo se realizó con una propiedad del programa que permite digitalizar el área que se quiere eliminar, denominada *Digitize*. Tomando en cuenta la ubicación de los pozos inventariados, los cuales se seleccionaron a través del comando *Post Map*, y cuya digitalización se mantiene constante para todos los mapas a los que se aplicó. Para obtener el mapa blanqueado se seleccionó *Grid Blank*, y se eliminó de él, el área anteriormente digitalizada. Este procedimiento se realizó para todos los mapas en los que el objetivo principal fue mostrar alguna característica específica del acuífero.

Luego se seleccionó el mapa realizado con el blanqueo y en la herramienta *Properties* se cambió las propiedades como el color, escala, entre otras. Finalmente se obtuvo el modelo hidrogeológico conceptual realizando el procedimiento anterior para cada una de las capas litológicas.

4.4.15.- Modelo matemático del acuífero.

La elaboración del modelo hidrogeológico matemático es un proceso que va desde la definición de la geometría del acuífero, presencia de cuerpos de agua o impermeables que limiten al acuífero, definición de las características meteorológicas del área, ubicación de pozos de observación y de bombeo, profundidad de niveles de agua en el acuífero, características hidrogeoquímicas e isotópicas,

entre otras, que se consideraron para realizar un modelo y poder calibrarlo con los datos de mediciones de campo y lograr tener un resultado confiable que permita descifrar incertidumbres en cuanto al funcionamiento del acuífero y establecer políticas de explotación adecuadas.

Se realizó a partir del mapa base, el modelo digital de la base y tope del acuífero, queriendo con esto, representar físicamente el modelo hidrogeológico conceptual para modelar el flujo de aguas subterráneas del acuífero del sector Pedro González - El Salado, precisando el área en función de donde se contaba con mayor información (ver Figura 4.21).

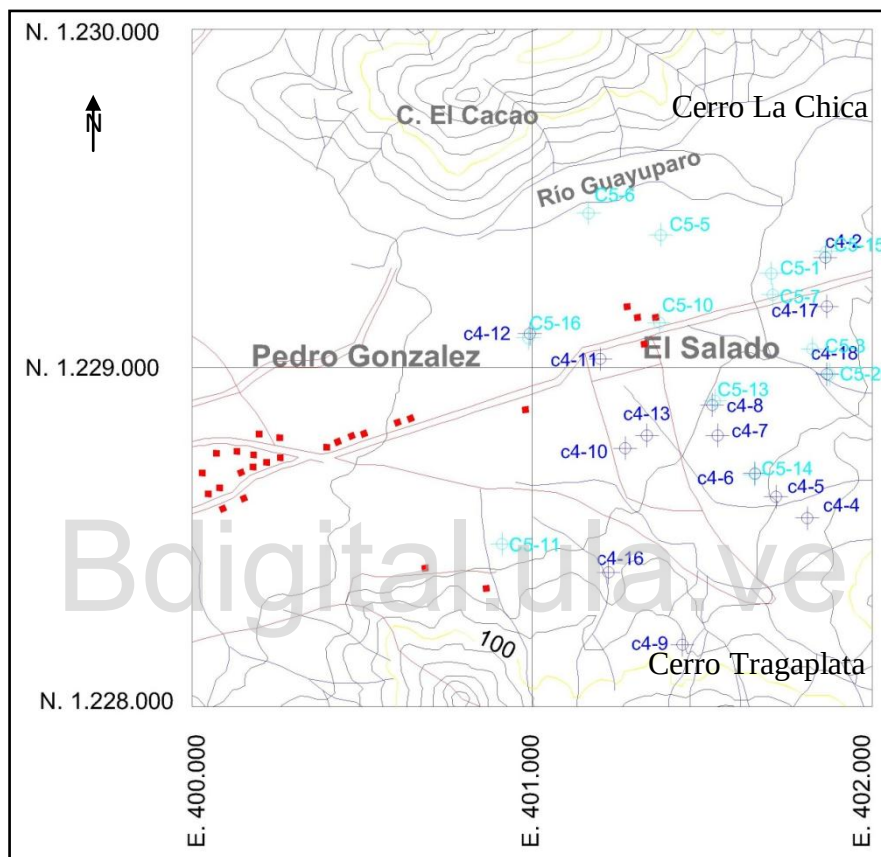


Figura 4.21. Cartografía empleado para *Visual ModFlow 4.2*. Fuente propia.

Ahora bien, el programa *Visual ModFlow 4.2* utiliza el método de diferencias finitas que permite pasar de la ecuación diferencial a un sistema de n ecuaciones lineales con n incógnitas, que es resuelto de forma matricial por métodos implícitos. El programa requiere ciertos parámetros de entrada para desarrollar el modelo como: ubicación y características de los pozos, geometría del acuífero, mecanismos de recarga y descarga, condiciones de borde y condiciones iniciales de niveles.

Para crear el modelo a partir de los datos mencionados fue necesario llevar a cabo una serie de pasos como se muestra a continuación:

4.4.15.1- Creación del Proyecto.

Para iniciar el modelo, el programa requiere la creación de un archivo *.vmf* al que se le estableció el nombre de Pedro González y fue guardado en la base de datos del programa, además se asignaron las

unidades de medida (ver Figura 4.22), los parámetros, el tipo de régimen: *Permanente* y el tiempo de modelado (ver Figura 4.23), en este caso para diez años (3650 días).

Figura 4.22.- Cuadro de diálogo de *Visual Modflow 4.2* para crear el proyecto y asignar las unidades de medida. Fuente propia.

Parameter Name	Value	Units
Kx	8.64	m/d
Ky	8.64	m/d
Kz	0.864	m/d
Ss	1E-5	1/m
Sy	0.20	
Eff. Por.	0.15	
Tot. Por.	0.30	
Recharge	0	mm/yr
Evapotranspiration	0	mm/yr
Extinction Depth	0	m

Figura 4.23.- Cuadro de diálogo de *Visual Modflow 4.2* para asignar parámetros, propiedades iniciales y definir las opciones de flujo. Fuente propia.

4.4.15.2- Asignación de datos de entrada (Input).

- Construcción del mallado.

Para la construcción del mallado inicial se asignaron 99 filas, 99 columnas y 7 capas, además las dimensiones de la malla fueron definidas a partir del mapa generado en *Surfer 8.0* en función de donde se contaba con mayor información. (Ver Figura 4.24)

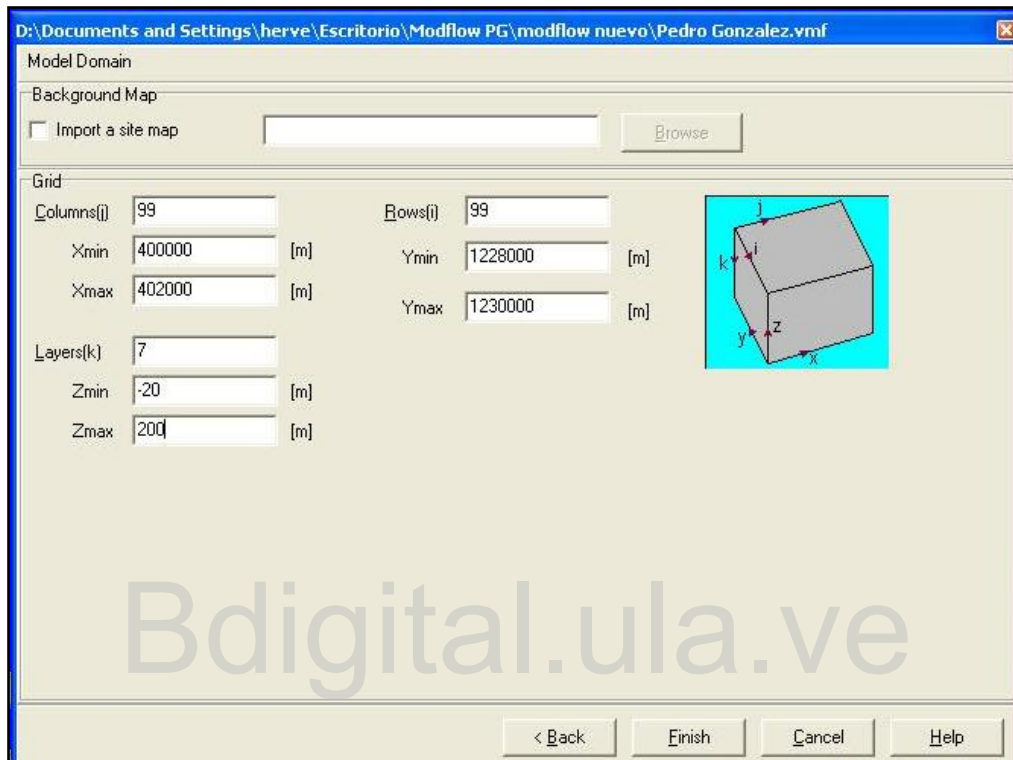


Figura 4.24.- Cuadro de diálogo de *Visual ModFlow 4.2* para crear el mallado y establecer el dominio del modelo. Fuente propia.

El programa permite hacer el mallado más denso en un área específica de mayor interés; ubicando, para nuestro caso, el acuífero en el Sector Pedro González - El Salado donde se concentraron la mayor cantidad de pozos de agua.

- Geometría del Acuífero.

Se obtuvo importando los modelos de la superficie del terreno, la base y las capas desde archivos *.grd* elaborados en etapas anteriores en *Surfer 8.0.*, las mismas elaboradas para el modelo hidrogeológico conceptual.

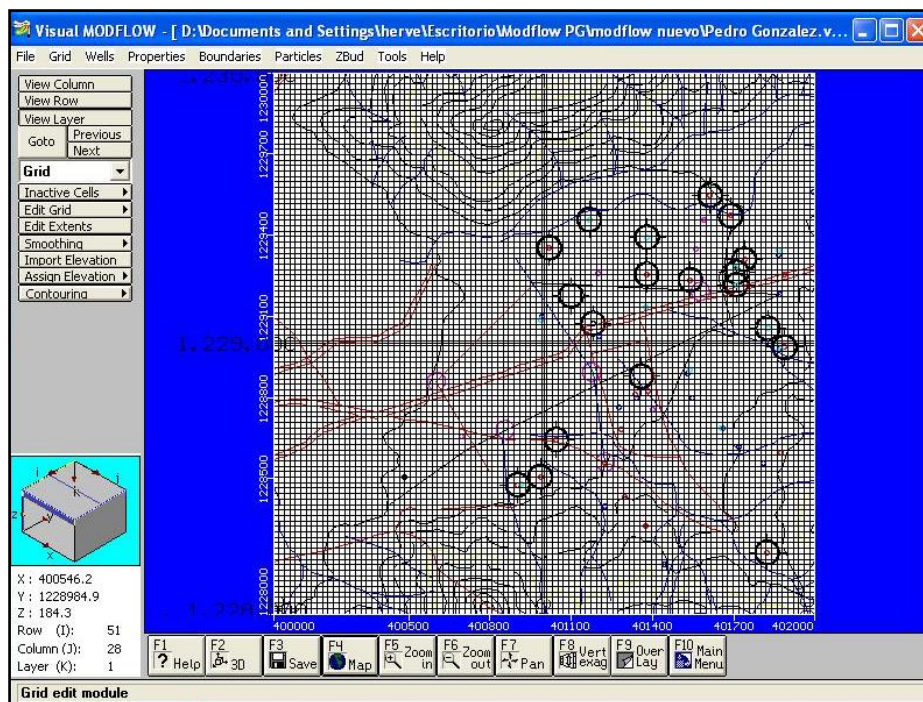


Figura 4.25.- Sistema base del acuífero. Fuente propia.

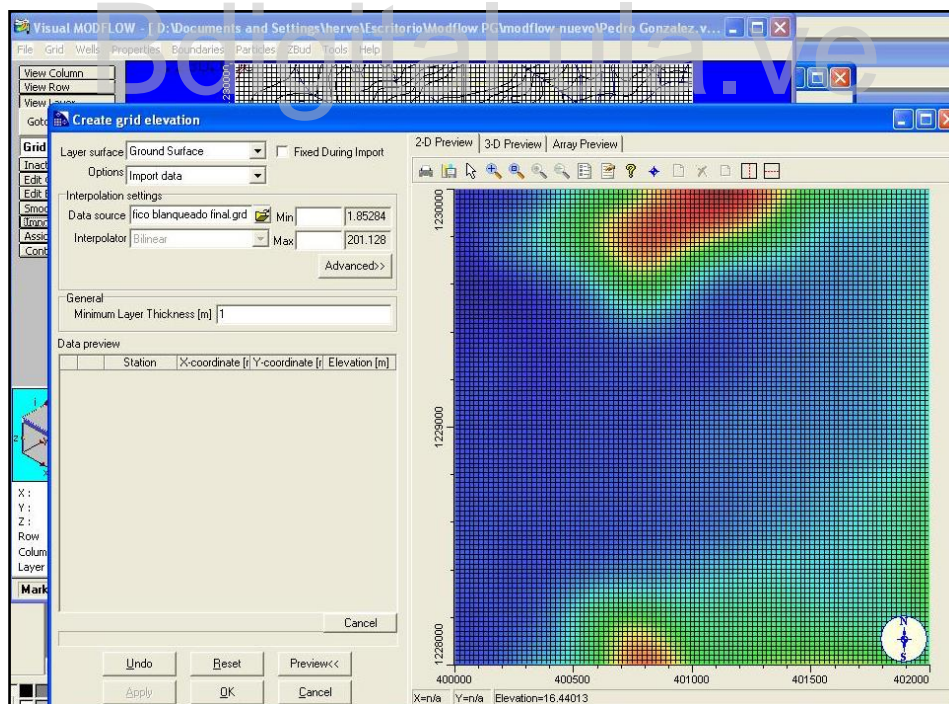


Figura 4.26.- Geometría del acuífero en Visual ModFlow 4.2 del sector Pedro González - El Salado. Topografía. Fuente propia.

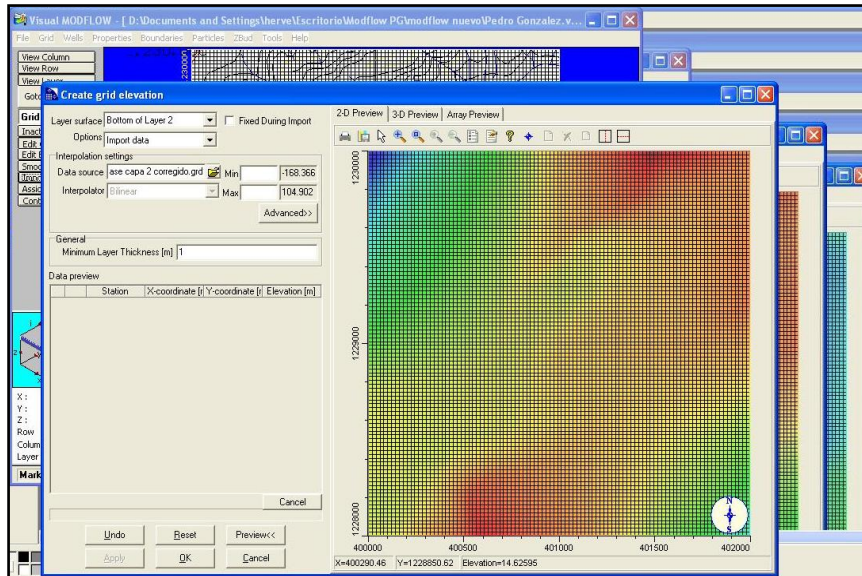


Figura 4.27.- Geometría del acuífero en *Visual ModFlow 4.2* del Sector Pedro González-El Salado, base capa 2. Fuente propia.

La figura 4.28 muestra la discretización transversal del acuífero y la intercalación entre las siete capas definidas.

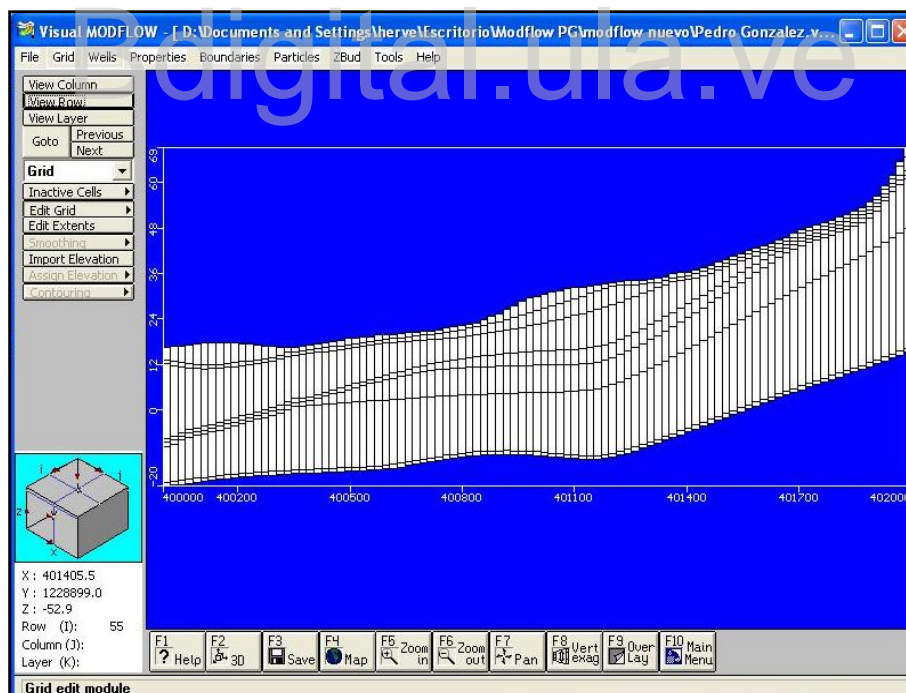


Figura 4.28.- Sección transversal modelo y capas en *Visual ModFlow 4.2* del sector Pedro González - El Salado. Fuente propia.

- Definición de la extensión del modelo.

Para definir la extensión del modelo se delimitó los bordes del acuífero y asignó por medio de la opción del programa *Visual ModFlow 4.2*, *inactive cells* aquellas zonas que por sus condiciones físicas no presentaron flujo de agua; así se inactivaron las celdas ubicadas en zonas montañosas y donde no se tuvo información sobre el acuífero (parte oeste de la zona de estudio), éste es un procedimiento similar al blanqueo realizado en *Surfer 8.0*. La figura 4.29 muestra las celdas en verde inactivas y las celdas blancas activas.

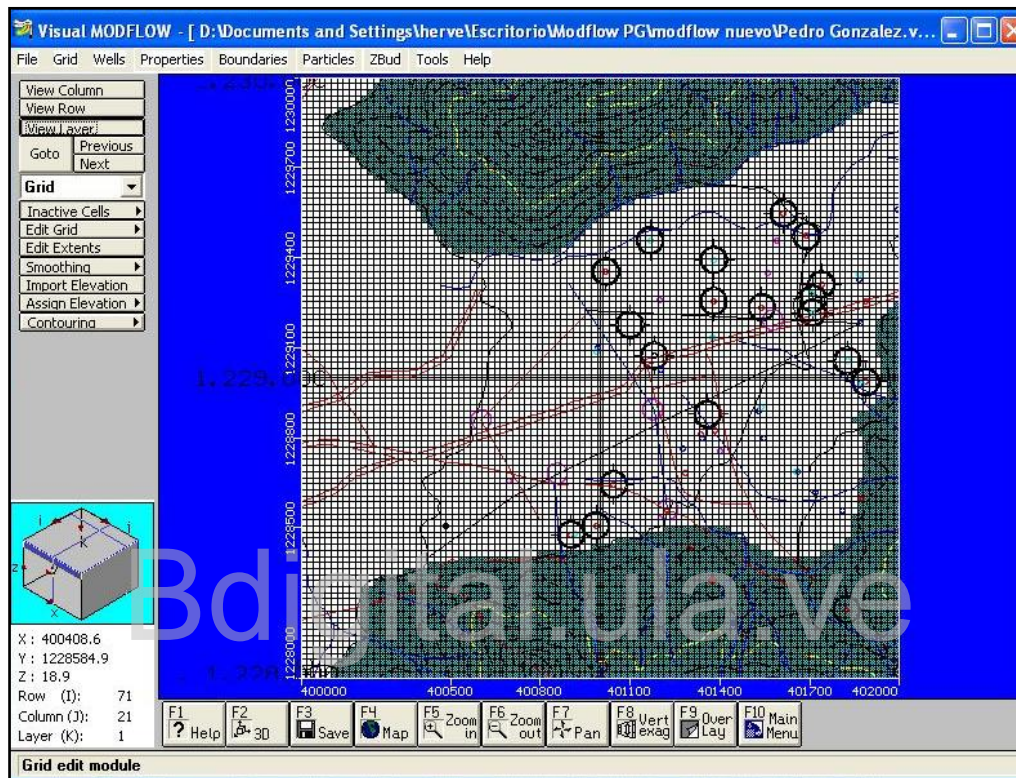


Figura 4.29.- Celdas inactivas en el modelo matemático de Pedro González. Fuente propia.

- Definición de las propiedades del acuífero.

Las propiedades que se asignaron al acuífero fueron la conductividad hidráulica, el almacenamiento específico (*Conductivity* y *Storage*) y la porosidad, estas propiedades son específicas para cada tipo de material y por ende para cada una de las capas.

Para asignar estas propiedades se dibujó el polígono alrededor del área a la cual se quería asignar, por capas: la conductividad hidráulica, utilizando *conductivity* del menú *properties* del programa y el almacenamiento específico fue asignado por medio de la opción *Storage* que también aparece en el menú.

La permeabilidad se consideró igual en *x* y *y* (horizontalmente), y menor en sentido vertical, a razón de $K_x/K_z=10$, esto es debido a que la depositación del material se hace en sentido vertical, consolidándose este a medida que transcurre el tiempo, por lo que los espacios vacíos presente entre los granos cada vez es menor y, por ende, disminuye la permeabilidad, mientras en las direcciones horizontales esta permanece igual.

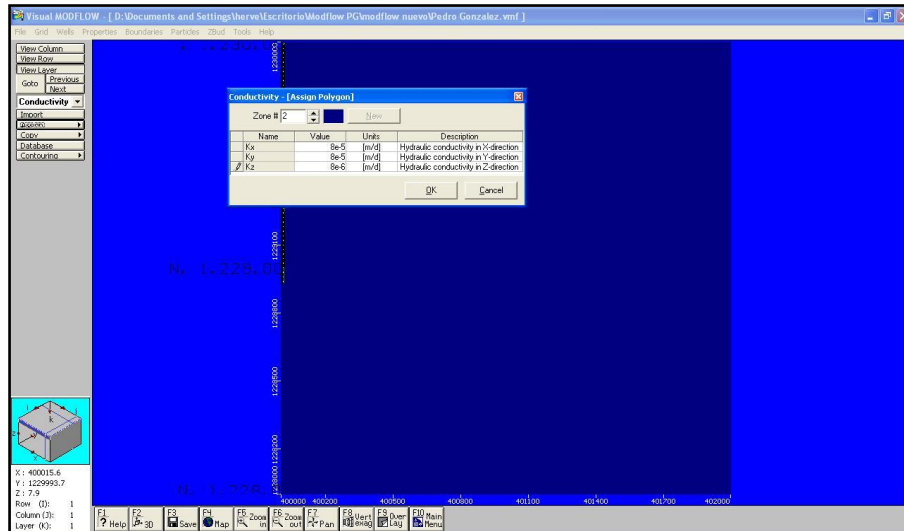


Figura 4.30.- Asignación de K para cada una de las capas. Fuente propia.

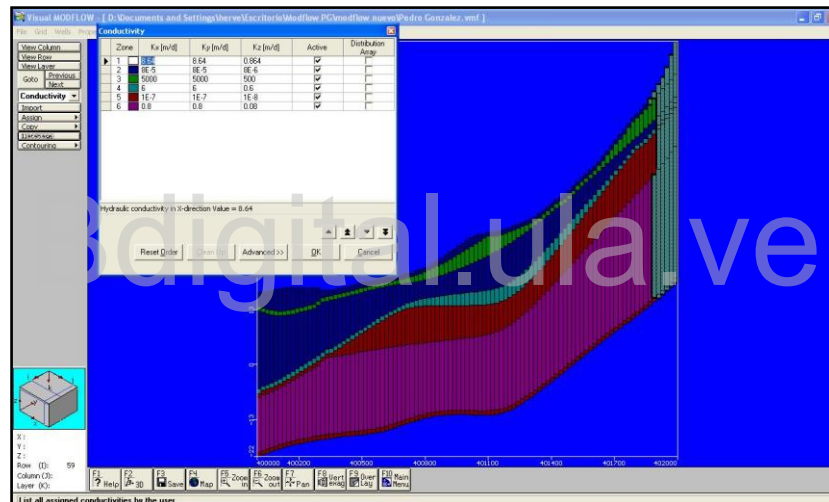


Figura 4.31.- Vista de la permeabilidad en corte transversal. Fuente propia.

Con esta orientación, *Visual Modflow 4.2.* no permite discontinuidades entre las capas, por lo que los lentes de material presentes en el acuífero, no pueden ser presentados tal y como se proponen en el modelo, por esta razón, se procedió a asignar manualmente a cada una de las filas y columnas de todas las capas la conductividad que mejor representó el modelo del acuífero.

Por otra parte, los valores de almacenamiento corresponden al almacenamiento específico (S_s), Rendimiento específico (S_y), Porosidad efectiva (P_{eff}) y Porosidad total (P_{tot}), los cuales se asignaron en función de las capas y el tipo de material, a excepción del S_s y S_y que se consideraron constantes en toda el área de estudio.

Los diferentes coeficientes de almacenamiento se obtuvieron a partir de pruebas de bombeo a caudal constante realizadas en el acuífero y por recopilación de estudios previos, donde se definió el acuífero como confinado, por ello el valor 1×10^{-5} .

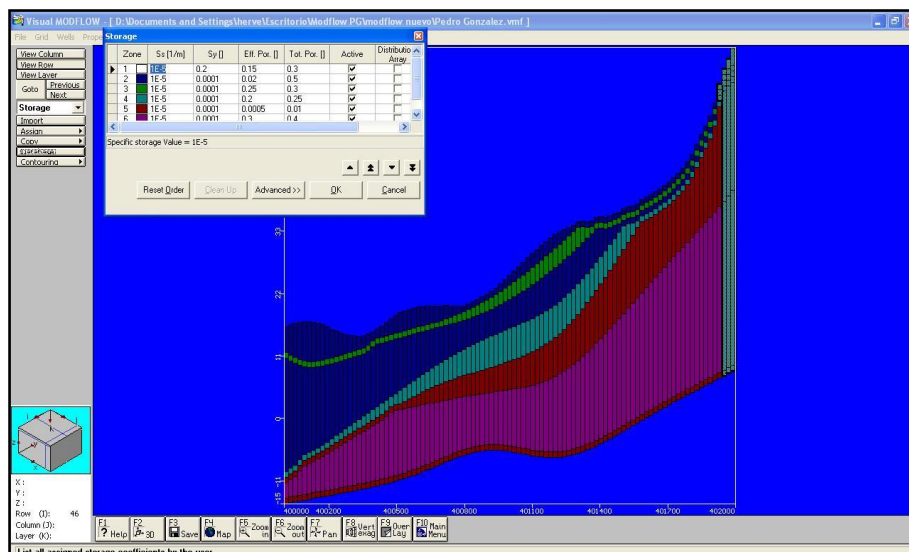


Figura 4.32.- Porosidad asignada para cada capa vista en corte transversal. Fuente propia.

4.4.15.3.- Definición de los pozos de observación.

Los pozos de observación o calibración presentaron los niveles iniciales con los que el programa realizó la calibración y modelado; se utilizaron 12 pozos de la campaña del 2007 y 2008 que son los que presentan datos actuales del estado del nivel piezométrico del acuífero. Los datos tomados de estos pozos fueron: nombre, ubicación, profundidad, y nivel del agua. Los pozos fueron ubicados uno a uno a través de la opción *Add Obs* del menú *Head Observation Well*, introduciendo las coordenadas y el nivel estático.

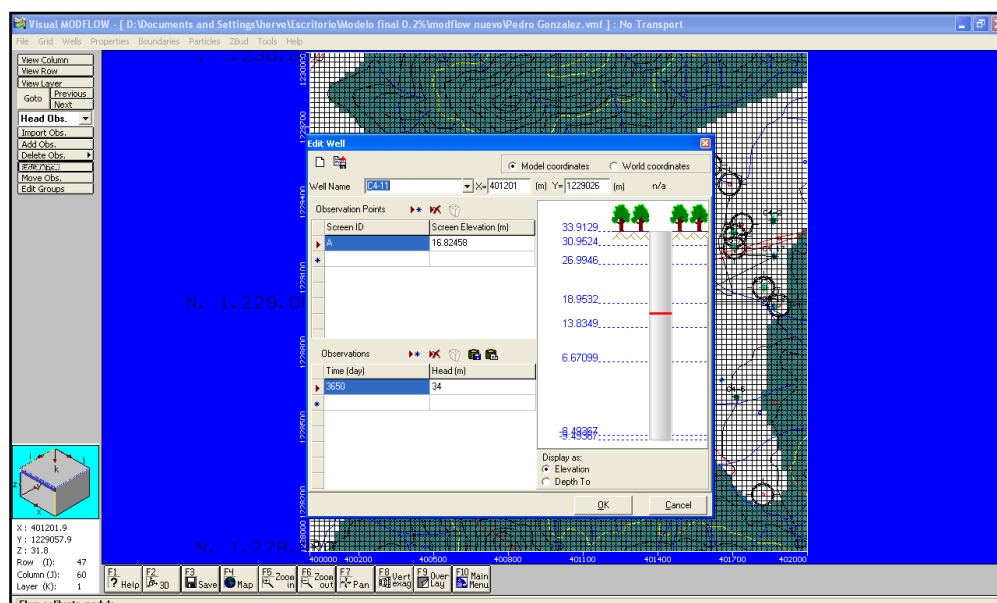


Figura 4.33.- Pozos de calibración asignados en *Visual ModFlow 4.2*. Fuente propia.

4.4.15.4.- Asignación de condiciones de borde (*Boundaries*).

En el acuífero se definió una condición de borde para limitar el área en estudio, se estableció en el programa como una carga constante (*Constant Head*) donde se asignó como una línea en el límite oeste del modelo, utilizando la opción *Assign line* para definirlo. Estas condiciones de borde fueron asignadas obedeciendo al hecho de que los límites activos del acuífero presentaron características específicas que se asemejan a las condiciones que las opciones del programa ofrecen.

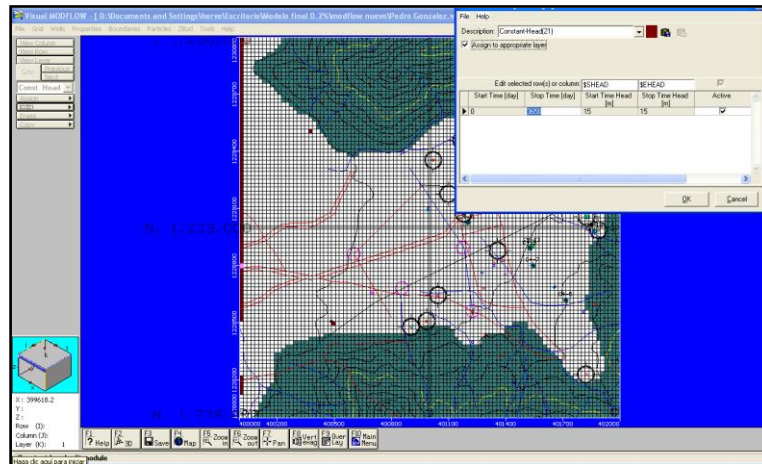


Figura 4.34.- Condiciones de borde en *Visual ModFlow 4.1*. Fuente propia.

4.4.15.5.- Asignación de la recarga del acuífero.

La recarga neta anual promedio del sitio producto de la precipitación, se determinó en etapas anteriores mediante el balance hídrico, la cual es de 14,6 mm/año, siendo escasa por infiltración directa o percolación debido al tipo de material que se presenta en las primeras capas, por ello, según la recopilación geológica y los SEV realizados se designó en la primera capa un lente de material permeable, grava, por donde se estima se produzca parte de la recarga. (Ver Figura 4.35)

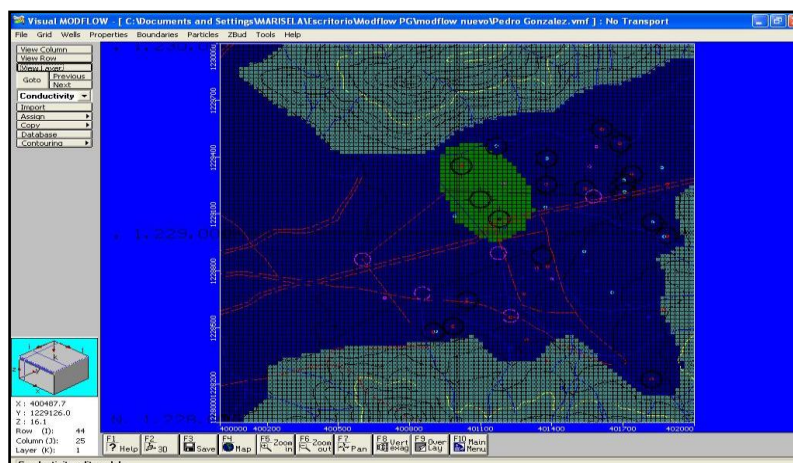


Figura 4.35.- Zona de recarga por precipitación. Fuente propia.

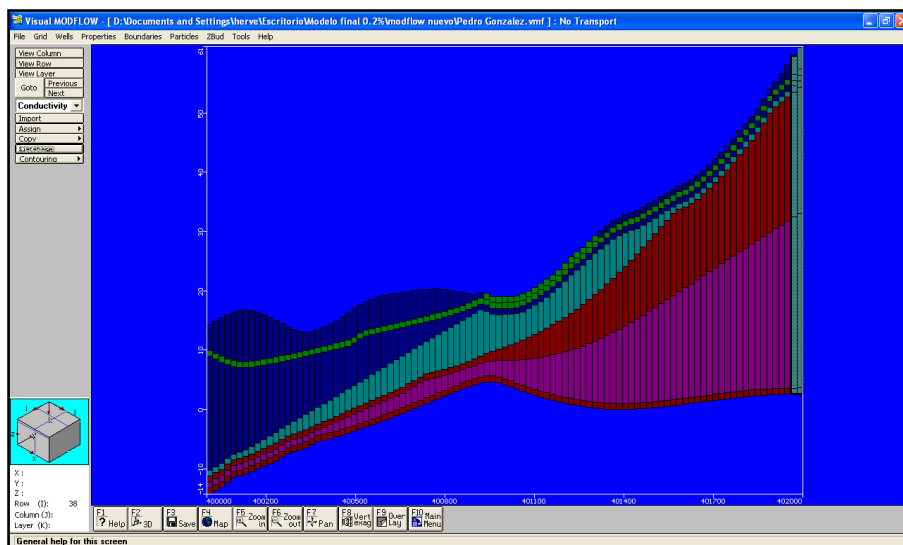


Figura 4.36.- Corte transversal de la zona de recarga por precipitación. Fuente propia.

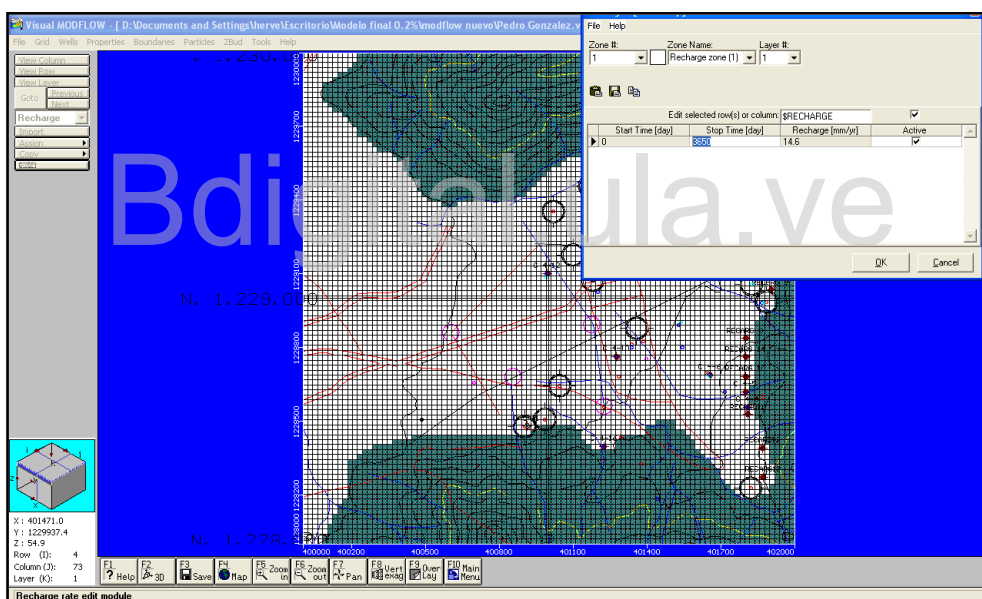


Figura 4.37.- Asignación de la recarga por precipitación. Fuente propia.

La recarga del acuífero por flujo subterráneo afluente fue establecida al modelo por medio de la opción *Assign Line* del menú *Recharge*, donde se creó dos zonas de posible recarga en el piedemonte de los Cerros Chico y Tragaplata, hacia el este del área en estudio, según análisis del mapa piezométrico y determinación de la recarga en el sector. Para el noreste del acuífero del sector de Pedro González se ubicó seis pozos de recarga con un caudal de $28,96 \text{ m}^3/\text{d}$, recargando por la capa seis (calizas) y para la zona sureste se crearon ocho pozos cada uno de ellos con un bombeo de $45,14 \text{ m}^3/\text{d}$.

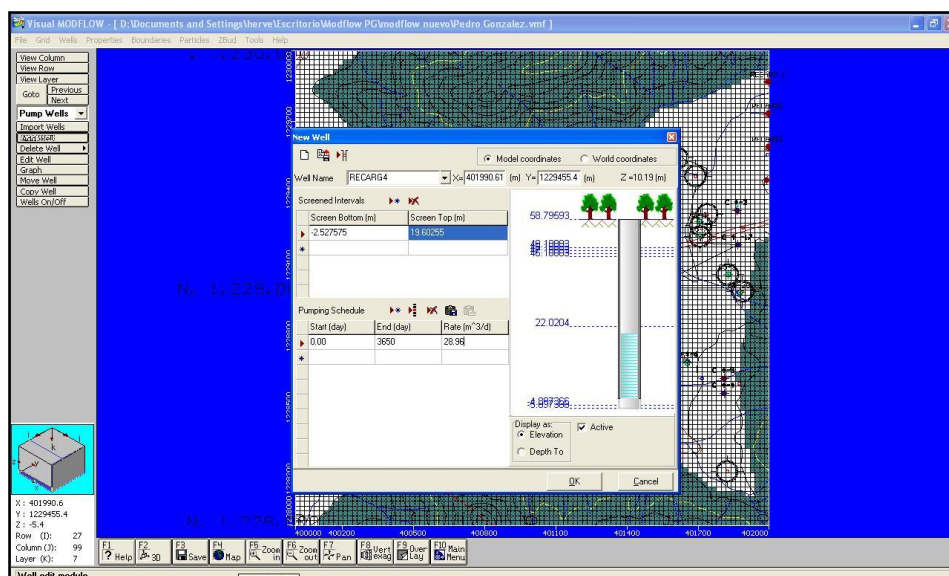


Figura 4.38.- Pozos de recarga asignada en *Visual Modflow 4.2*. Fuente propia.

4.4.15.6.- Pozos de bombeo.

Los pozos de bombeo presentaron los caudales de extracción, mostrando un flujo de descarga que se produce como efecto de la explotación del acuífero. Los pozos utilizados fueron los de la campaña del 2007 y 2008 que contaban con esta información.

Tabla 4.7. Pozos de bombeo a ser introducidos en *Visual Modflow 4.2*.

ID	Coordenadas		Q	Q
	Este	Norte	(L/s)	(m³/d)
C4-2	401863	1229326	3,00	259,20
C4-4	401810	1228556	0,58	50,11
C4-5	401718	1228619	0,26	22,46
C4-6	401656	1228688	0,86	74,30
C4-10	401274	1228763	0,09	7,95
C4-11	401201	1229026	0,13	10,97
C4-12	400993	1229101	0,55	47,52
C4-16	401225	1228396	0,46	39,74
C4-17	401867	1229181	0,98	84,67
C5-5	401379	1229392	0,30	25,92
C5-11	400912	1228480	0,13	10,97

Fuente propia.

Los datos tomados de estos pozos fueron: nombre, ubicación, profundidad de rejilla (definida en función del nivel piezométrico) y el caudal.

Los pozos fueron ubicados uno a uno (al igual que los objetivos de calibración) a través de la opción *Add Obs* del menú *Pumping Well*, introduciendo las coordenadas y el caudal.

4.4.15.7.- Comportamiento del acuífero.

Para conocer su comportamiento se manejaron dos escenarios a saber:

- Calibración con condiciones reales en el sistema acuífero
- Simulaciones con variaciones de bombeo, aumentando los caudales de extracción y ubicando nuevos pozos de bombeo.

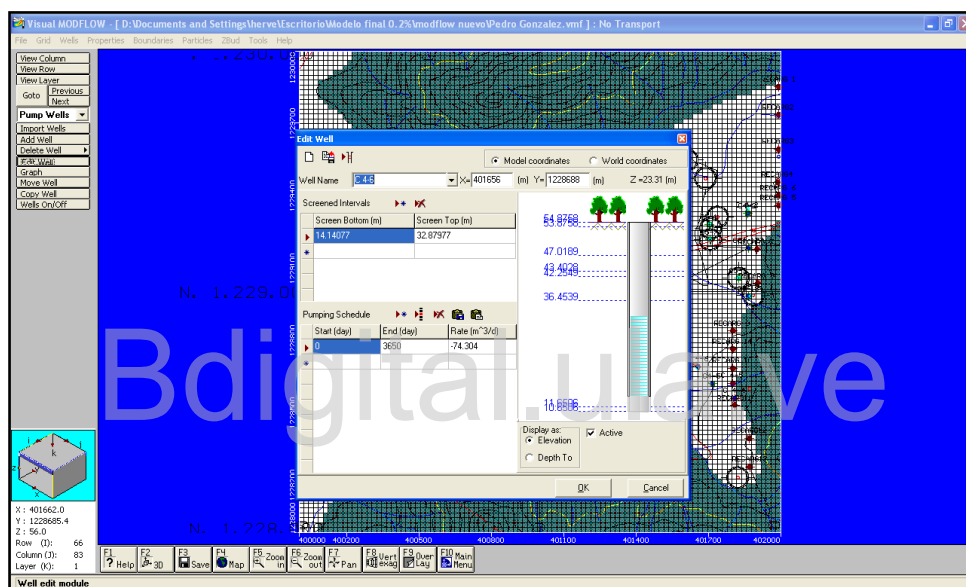


Figura 4.39.- Pozos de bombeo asignados en *Visual Modflow 4.2*.

4.4.15.8.- Calibración.

En esta fase se modificaron los parámetros de entrada del modelo hasta que los resultados del mismo correspondieron a las condiciones reales del sitio, específicamente los datos de permeabilidad para cada una de las capas consideradas. Además, se asignó un valor de nivel inicial uniforme a todo el modelo seleccionando *Initial Heads* en el menú de *Properties*, donde se hizo clic en *Database* y cambio el valor de los niveles iniciales en reiteradas oportunidades y condiciones de frontera. Este procedimiento se llevó a cabo hasta obtener la convergencia de la solución. Una vez alcanzado este punto dependiendo de la combinación de conductividades hidráulicas el modelo será más o menos similar a las cargas medidas. Para ello se expande el folder *Output* visualizando el nivel piezométrico.

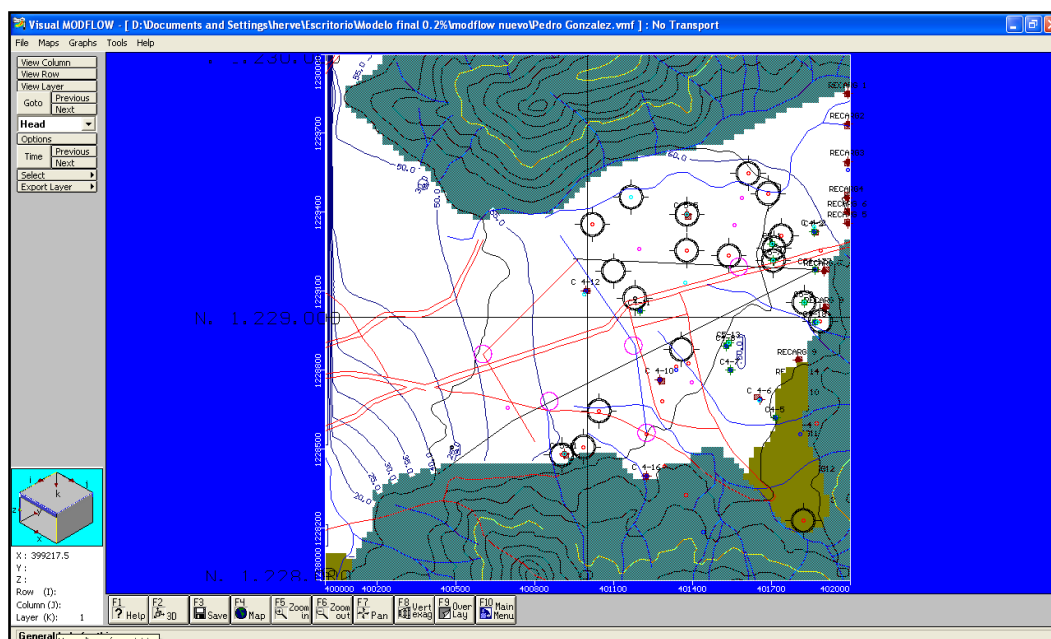


Figura 4.40.- Output generado en *Visual Modflow 4.2* para el sector de Pedro González – El Salado.

Para conocer las estadísticas de calibración se graficó la distribución de niveles calculados versus la distribución de niveles observados usando puntos de observación designado por el modelo. Para esto, en el módulo de salida, *Graphs/Calibration/Head*, y se examinó el gráfico generado hasta lograr un error promedio cuadrático (RMS) aceptable para el modelo, o un error promedio cuadrático normalizado menor de 10%.

4.4.15.9.- Visualización del modelo.

Para la visualización del modelo en tres dimensiones el programa tiene la opción *3D* en el menú inferior, a través del cual fue posible obtener imágenes del modelo mostrando características específicas. El programa también permitió observar cortes verticales y horizontales del modelo en cualquier ubicación (ver Figura 4.41).

4.4.15.10.- Escenarios planteados.

Simulaciones con variaciones de bombeo:

- Aumentando al doble los caudales de extracción
- Ubicando nuevos pozos de bombeo.

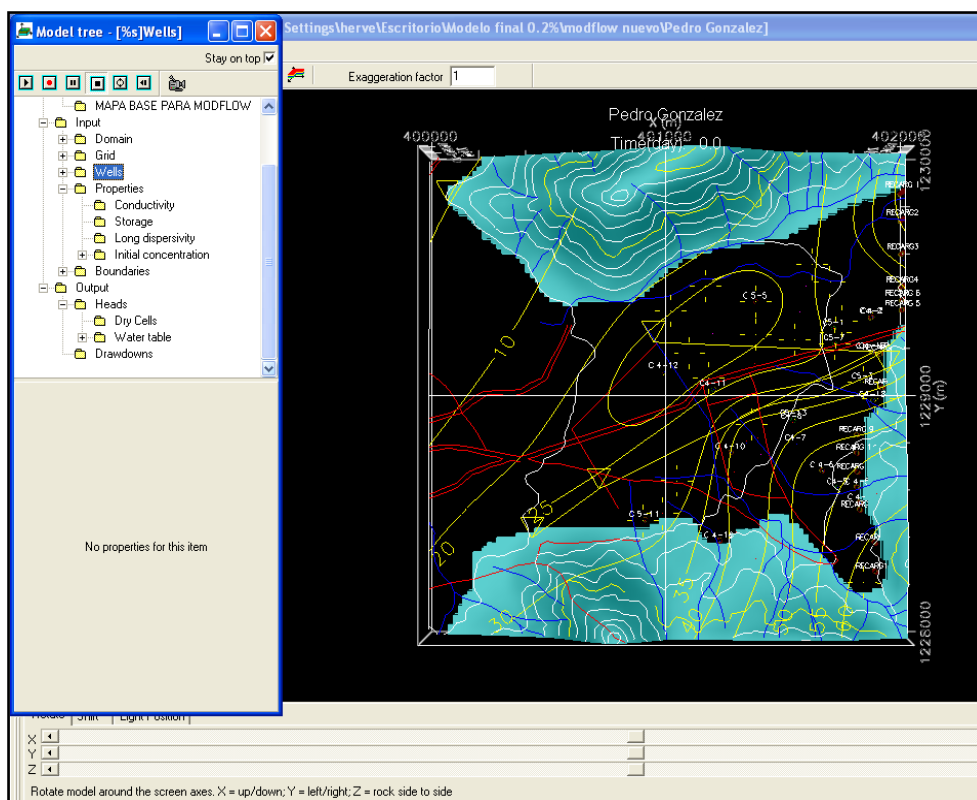


Figura 4.41.- Visualización del modelo en 3D. Fuente propia.

Bdigital.ula.ve

CAPITULO 5.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.- Revisión fotogeológica.

Por medio de la revisión de las fotografías aéreas e imágenes satelitales se identificaron las características físico-geomorfológicas que representan los dos sectores del área en estudio. En términos generales la topografía observada es de zonas bajas con algunos relieves montañosos en diversos sectores de la zona a considerar.

Se visualizaron los elementos en el valle del sector Pedro González, (ver Figura 5.1) el cual se encuentra rodeado por cerros más o menos elevados, cuyas pendientes son medias, caracterizados por presentar textura más suave y color más claro, distribuidos en forma convergente hacia el valle principal. Hacia el oeste del fotomontaje, correspondiente al municipio Gómez, se aprecian algunos relieves montañosos en los que se identifican una sucesión de conos de deyección que suprayacen a la planicie litoral (cordón litoral), cerrados quizás por acción de los vientos alisios que transportaron las arenas. De igual forma se originaron algunas ciénagas producto de la evaporación causada por acción de estos vientos; diferenciándose éstas por su textura y por los tonos de grises que van de claro a oscuros, indicando estos últimos zonas de humedad. Entre los conos de deyección se diferencian algunos glaciares de acumulación, comunes en climas semiáridos, que posiblemente se fueron formando debido a que, de los cursos de agua, se desprendieron de manera individual las partículas que no fueron conducidas por los drenajes tipo uno. Asimismo, se presentan pequeños conos que se ubican sobre los glaciares y que parecen haberse acumulado luego de la formación de los mismos. En la costa se observan varias generaciones de acumulaciones de cordones litorales. En ellas interactúa la capa freática con el nivel de agua del mar, experimentando una subida y bajada de nivel del agua, formándose varias ciénagas pequeñas, que representan según las tonalidades de grises, zonas de humedad.

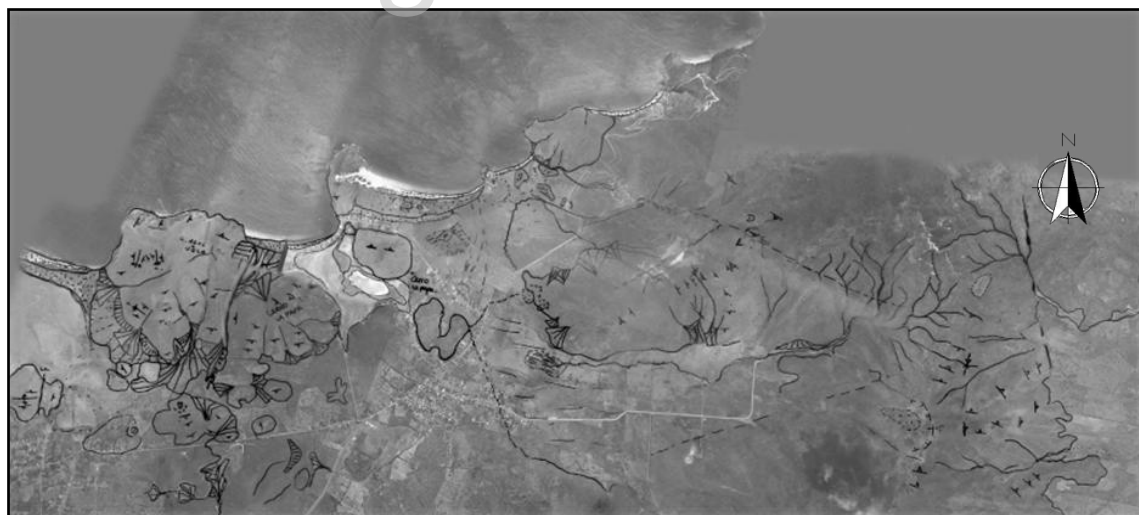


Figura 5.1.- Fotomontaje del sector de Pedro González – El Salado, municipio Gómez, con su respectiva interpretación. Modificado de Díaz, A. y Monteagudo, N. (2009).

La vegetación se muestra de media a escasa, siendo más densa en los cerros Chico y Tragaplata. La red hidrográfica es de tipo dendrítica y los cursos de quebradas son relativamente cortos, tributarios a una corriente principal que cruza el área paralelo al valle de Pedro González. Estas quebradas y ríos parecen ser intermitentes, ya que no se observa continuidad en el trazado de la erosión que estos producen en el terreno. En la zona se encuentra una pequeña laguna (Laguna La Playa) y el mar es observado al noroeste de la zona, identificados por la textura y brillo característico de los cuerpos de agua. Se observa una moderada a alta resistencia a la erosión y/o meteorización en las rocas o afloramientos presentándose éstos como cuerpos masivos.

Las diferentes texturas y brillos en las fotografías permiten identificar rocas metamórficas variadas en los cerros y diferenciar la zona del valle principal cuya textura es más suave y los colores son más claros. En cuanto a estructuras geológicas, se aprecian al oeste y este de la zona en estudio. En la parte occidental del área se observan fallas con dirección norte-sur atravesando dos pequeños cerros. En la parte nororiental se representan también dos posibles fallas con dirección noroeste-sureste. A su vez se visualizó una zona con cárcavas de tipos estructurales y erosivos activos, por contener casi nada de vegetación y por seguir los planos de foliación de la roca existente, lo que se puede observar al norte de Pedro González y El Salado.

En el mismo orden de ideas, con ayuda de las imágenes satelitales de los sectores La Fuente - Paraguachí y el programa gratuito *Google Earth* se dedujeron las siguientes características (ver Figura 5.2).

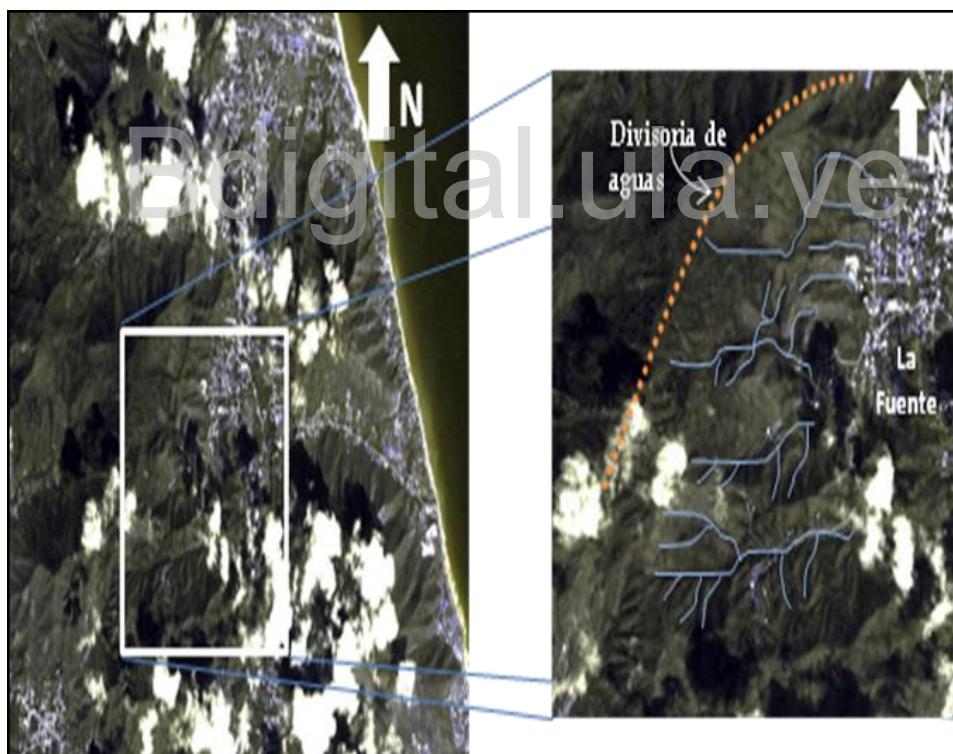


Figura 5.2.- Patrón de drenajes característico de La Fuente - Paraguachí. Imágenes *Spot 5* LPAIS (2008), Tomado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009).

Las zonas de menor pendiente se encuentran al pie de los cerros Matasiete y Guayamurí (al este del sector) y los cerros El Mico y Tragaplata (al oeste del municipio Antolín del Campo), formando una especie de valle amplio entre ellos (La Fuente – Paraguachí), constituido por sedimentos aluviales y

fluviales, los cuales provienen en parte de las zonas más elevadas, así como de depósitos de antiguas playas en la zonas más costeras.

Las zonas más elevadas presentan relieve con pendientes pronunciadas pudiendo estar conformados por rocas de tipo metamórfico en su mayor parte, los cuales por observaciones en campo, reflejan una alteración y diaclasamiento importante; donde su red de drenaje es de tipo dendrítico y en parte orientado por el sistema de fracturas presentes en las rocas, cuyo torrentoso drenaje causado por las lluvias que ocasionalmente caen sobre esta región, han producido una serie de valles profundos que han sido cubiertos por sedimentación actual. También se puede apreciar un drenaje paralelo y se presenta en algunas zonas donde las corrientes principales y secundarias corren en la misma dirección y sentido, siendo característico de superficies bien desarrolladas con una cierta inclinación y de zonas de falla.



Figura 5.3.- Principales fallas de la zona La Fuente - Paraguachí. Tomado de Imágenes *Spot 5* LPAIS (2008), y modificado por Terán, M. y Vásquez, P. (2009).

Al examinar la tectónica del sector tal como se muestra en la Figura 5.3, se observó una dirección principal de fracturación, representado por una falla de rumbo aproximado norte - sur (Falla Matasiete), aparentemente normal que limita la vertiente occidental del Cerro Matasiete, y otra falla asumida (Falla Los Micos), que no se aprecia de manera relevante en las imágenes observadas, que limita el piedemonte de los cerros El Mico y Tragaplata. Según Terán, M. y Vásquez, P. (2009) este conjunto de fallas son posiblemente contemporáneas a las intrusiones ígneas presentes (Trondhjemitita de Matasiete y el Gneis de Guayacán), originando una especie de graben o depresión tectónica que permitió el posterior depósito de los sedimentos que forman el acuífero del valle donde actualmente están presentes las poblaciones de La Fuente y Paraguachí.

En el municipio Antolín del Campo, según COPLANARH (1974), las fluctuaciones del nivel del mar en estos planos costeros se ven reflejados, en niveles más antiguos constituidos por la alta playa antigua que se extienden desde Manzanillo hasta La Fuente, encontrándose también en el piedemonte oriental del Cerro Matasiete, entre Agua de Vaca y Los Robles, y al norte de Porlamar con una altura máxima de 70 metros sobre el nivel del mar, y se piensa que se trata de depósitos regresivos originados cuando la costa oriental de la isla experimentaba un levantamiento paulatino. Estos niveles de playas antiguas se han englobado por los geólogos bajo el nombre de Arenas de Falca datadas del Plio – Pleistoceno, encontrados de manera transgresiva a lo largo del cordón litoral.

5.2.- Geología de superficie.

La geología encontrada en el área de estudio corresponde a las siguientes formaciones:

- **Asociación Metamórfica Juan Griego (Pensilvaniense – Cretácico).**

Unidad media (Kjg²): sus afloramientos presentan esquistos micáceos muy diaclasados con presencia de vetas de cuarzo, con meteorización en algunas zonas mostrándose por sus colores rojizos. Según Rekowski y Rivas (2005), la parte inferior de la unidad está representada por una secuencia de esquistos cuarzo micáceo grafitoso sin granate visible, seguido por una secuencia de esquistos con grandes cristales de moscovita y granate, con o sin grafito, para terminar con cuarcita grafitosa bandeada y prominentes afloramientos de mármol (Vignali, 1979). Taylor (1960) describe la unidad como una sucesión de esquistos cuarzoso y de cuarcita impura, cuya mayor parte es granítica y que la litología predominante es un esquisto cuarzo muscovítico con cantidades menores de clorita y magnetita, abundando las capas de cuarcita grafitica, las cuales en la parte inferior de la unidad tienden a ser masivas, mientras que en la parte superior aparecen como delgadas capas intercaladas con el esquisto.

Unidad inferior (PMj1): El afloramiento localizado en el sector de La Fuente – Paraguachí por Terán, M. y Vásquez, P. (2009), se encontraba con un grado de alteración alto, con colores marrones y grises. La roca es compacta de grano fino a medio y superficie untuosa, con minerales de cuarzo, mica, feldespato y grafito, con esquistosidad evidente. También se observaron algunas diaclasas, vetas de cuarzo y grafito de 1 – 3 centímetros de espesor y micropliegues (ver Figura 5.4).

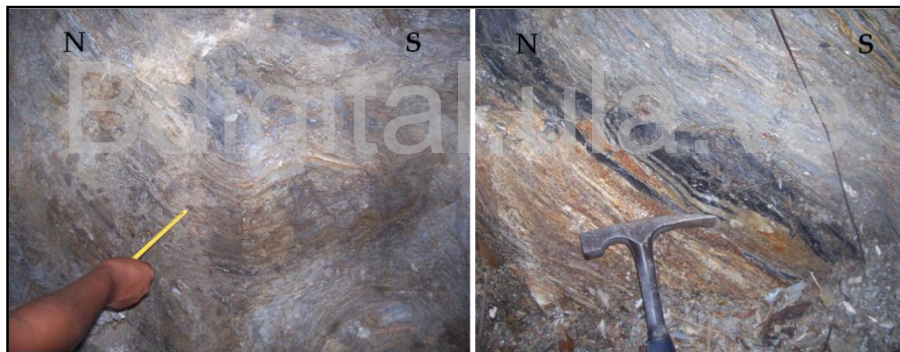


Figura 5.4.- Micropliegues y vetas de cuarzo y grafito presentes en el afloramiento en el sector de La Fuente Paraguachí. Coordenadas: 406250E, 1223959N a una altitud de 36 msnm. Tomado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009).

Rekowski y Rivas (2005), describen para la parte inferior de esta unidad una secuencia de esquistos cuarzo micáceo grafitoso sin granate visible, seguido por una secuencia de esquistos con grandes cristales de muscovita y granate, con o sin grafito, para terminar con cuarcita grafitosa bandeada y prominentes afloramientos de mármol (Vignali, 1979).

- **Complejo Metaofiolítico de Paraguachí (Jurásico – Cretácico?).**

Metamáficas de la Rinconada: Unidad II (MplrII): está constituido por una variedad de rocas, entre las que se encuentran principalmente esquistos y gneises con diferente composición mineral. Además, esta unidad también presenta Esquisto Muscovítico con foliación bien marcada y los principales minerales que lo constituyen son granate, feldespato y mica biotita. (Tomado de: Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997). En campo el afloramiento estudiado, por Terán y Vásquez (2009), se encontró altamente meteorizado, presentando una coloración de gris oscuro a verdoso y algunas zonas oxidadas.

La roca se muestra masiva, con una textura moteada, superficie rugosa, de grano medio a grueso y bastante meteorizada a colores pardo-rojizos. Entre los minerales presentes se pueden mencionar principalmente: cuarzo, feldespato, mica biotita, piroxenos, algunos cristales de granate y la presencia de arcillas producto de la meteorización de las rocas máficas. La deformación de la roca se encuentra ligada directamente a la presencia de diaclasas y fracturas.



Figura 5.5.- Afloramiento del Complejo Metamórfico de Paraguachí, sector Guiriguire al borde del Cerro Boquerón. Coordenadas: 405385E, 1227014N a una altitud de 43 msnm. Tomado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

Unidad III (MplrIII): se caracteriza por una variedad de rocas entre las cuales se pueden encontrar esquistos y gneises con muy variadas características y composiciones. Por lo observado en campo la unidad presenta gneis, que según el análisis de mano tomado de Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007), contiene cuarzo, granate y muscovita. Por la serie composicional la roca es de un protolito máfico. En los afloramientos se observó la roca de color gris oscuro a verdoso y bastante alterada a colores gris oscuro y negro; presenta zonas oxidadas. La roca está diaclasada y contiene vetas de cuarzo entre las grietas. La deformación en los afloramientos es evidente por cambios drásticos en la foliación producto de una posible falla.

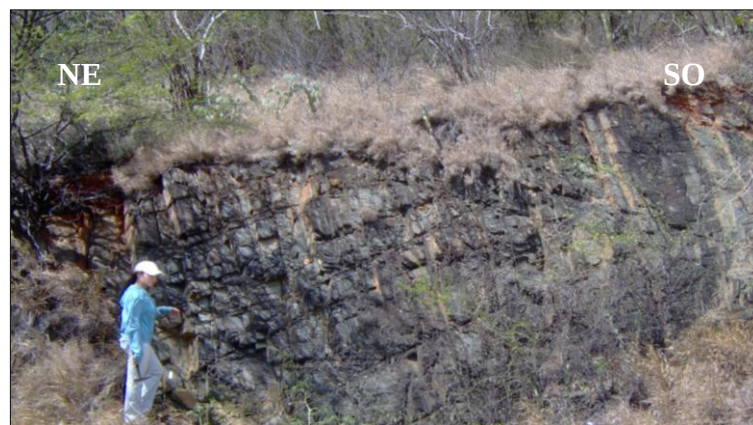


Figura 5.6.- Afloramiento de las Metamáficas de la Rinconada, Unidad III. Carretera Juan Griego - Pedro González. Coordenadas: 397895E, 1227460N. Tomado de Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007)



Figura 5.7.- Muestra de mano de las Metamáficas de la Rinconada, Unidad III. Carretera Juan Griego-Pedro González. Tomado de Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007).

De Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007), los análisis petrográficos (ver Figura 5.8) demuestran la presencia de los siguientes minerales, encontrando granate, micas, entre estas, muscovita y clorita, siendo ésta última la más dominante, cuarzo y minerales opacos, presentando una textura gnéisica y poiquiloblástica. Clasificando a la roca como un gneis granatífero.

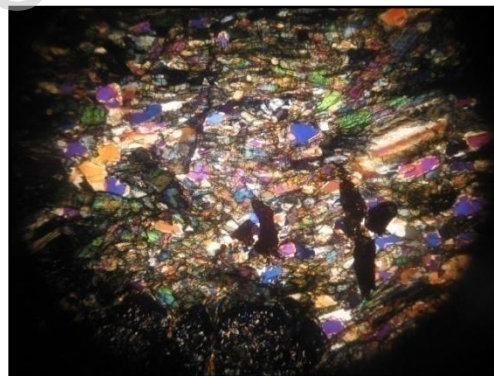


Figura 5.8.- Sección fina gneis granatífero de las Metamáficas de La Rinconada, Unidad III. Tomado de Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007)

Metaultramáficas de Cerro El Copey (Mpec): Por lo observado en campo (ver Figura 5.9), según Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007) esta unidad está compuesta por serpentinita de color verde claro, la cual se presenta pulida y brillante evidenciando una zona de fricción; también está presente la pirolusita, de color negro y expuesto de forma dendrítica; la magnesita se encuentra de color blanco, el cual es producto de la alteración de la roca. Pueden aparecer asociados el crisotilo y cloritocita en forma de vetas. En los afloramientos de ésta unidad, las rocas son compactas, de color gris a gris oscuro, siendo una roca ultramáfica, con un grado de cristalinidad baja, con una textura mayormente nematoblástica y cierta tendencia de los minerales dando una textura foliada.



Figura 5.9.- Muestra de mano de las Metaultramáficas de Cerro El Copey. Carretera Pedro González - Manzanillo. Coordenadas 400379E, 1230393N. Tomado de Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007)

- **Rocas Metagraníticas (Cretácico?).**

Gneis de Guayacán (Kg): Rekowski y Rivas (2005) describen, a nivel de afloramiento, que es una roca con textura gneílica, diaclasada, de grano grueso, que presenta bandas alternas de color verde y blanco que meteorizan a gris claro, con cristales de plagioclasas y cuarzo entre 0,5-1 cm, los cuales se presentan distribuidos irregularmente y algunas veces orientados definiendo la foliación.



Figura 5.10.- Afloramiento de la Metatrondjemita de Matasiete, Sector de Paraguachí. Coordenadas: 407714E, 1227603N, altitud de 15 msnm. Tomado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

Metatrondjemita de Matasiete (Km): Aflora en el área occidental de los cerros Guayamurí y Matasiete, extendiéndose hacia el norte en los cabos El Tirano, Cabo Blanco y Punta Montadero en la zona oriental de la Isla de Margarita (Tomado de González de Juana, *et al.* 1980). Se observó un afloramiento en el Sector de Paraguachí, el cual presenta un grado de alteración bajo, con una

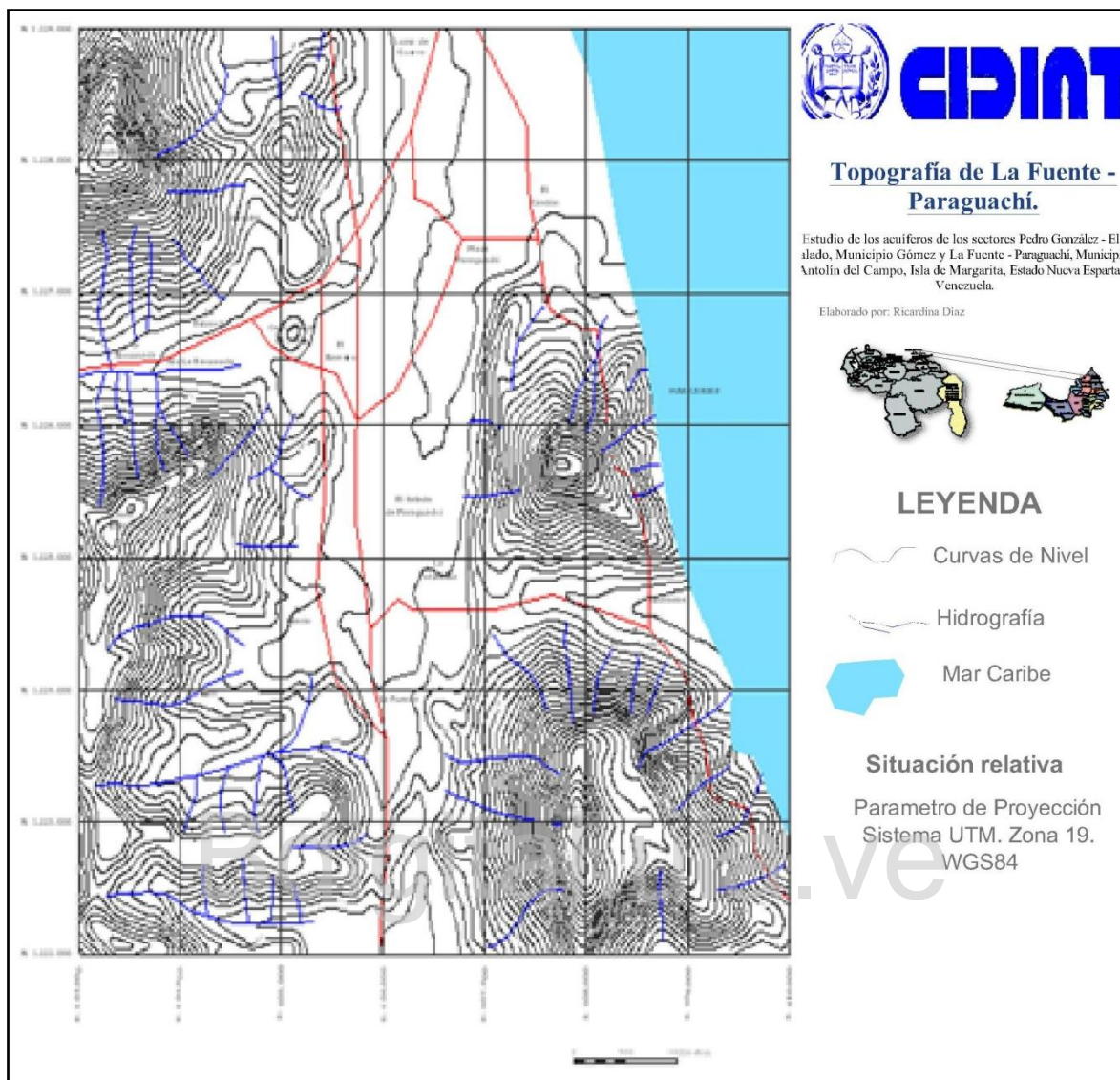


Figura 5.12.- Topografía del sector La Fuente Paraguachí, municipio Antolín del Campo. Modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

5.4.- Modelo digital del terreno

Por ser generado a partir del mapa base, permite visualizar el área de estudio en tres dimensiones, detallando las elevaciones topográficas y la red hidrográfica, la cual descende de las zonas montañosas.

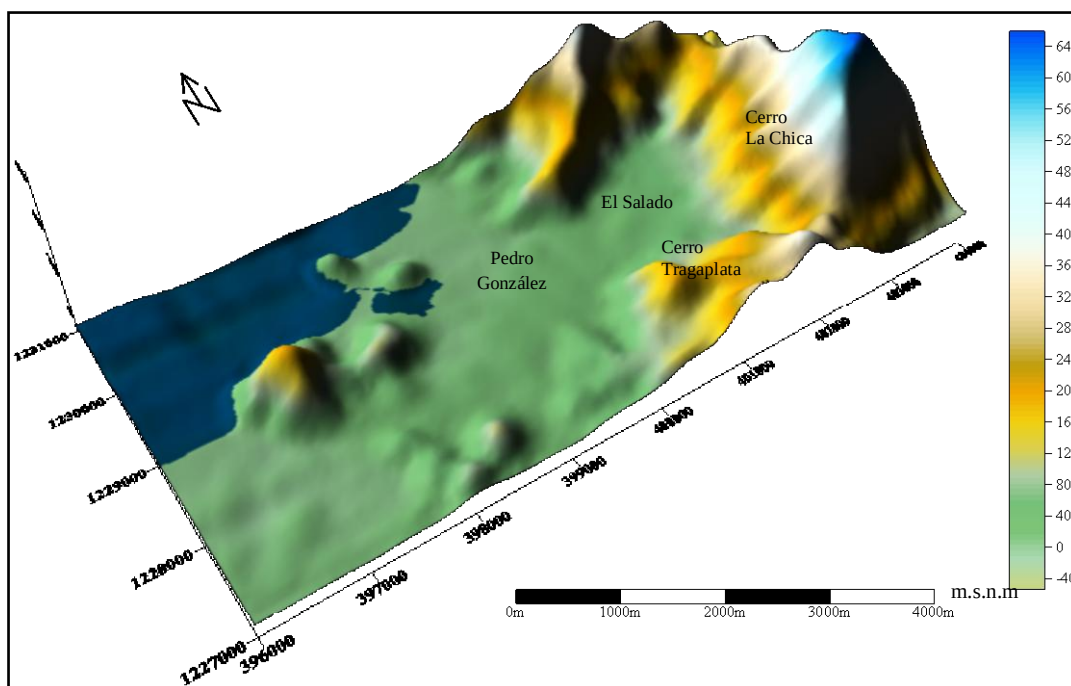


Figura 5.13. Modelo digital del terreno del sector Pedro González – El Salado. Fuente propia.

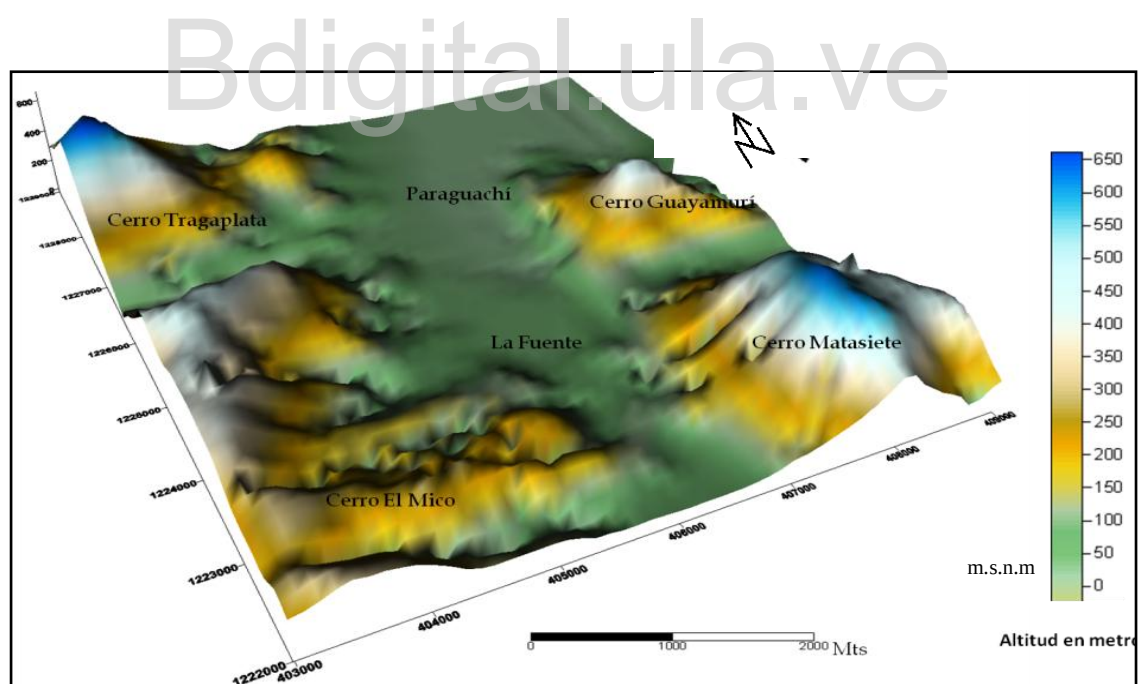


Figura 5.14. Modelo digital del terreno del sector La Fuente - Paraguachí. Modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009).

5.5.- Caracterización geológica.

5.5.1- Geofísica.

Los perfiles geológicos son el resultado directo de la interpretación hecha a los perfiles geoelectricos, arrojados durante la inversión matemática de cada sondeo eléctrico vertical procesado, donde se definieron litologías tomando en cuenta los valores de resistividad mostrados por el programa utilizado y comparándolos con valores de referencia estimados en estudios de acuíferos con métodos similares y de esta manera se estableció una escala de valores de resistividad que se ajustaron tanto a las características de los materiales presentes en el subsuelo como a la existencia de fluidos en los poros de los mismos. Esto se hizo basándose en la recopilación geológica, información litológica de pozos y levantamiento geológico de superficie. Toda esta información fue integrada para definir los rangos de resistividades y litologías presentes en el área de estudio en función de la geología y los SEV realizados en la zona (ver Tabla 5.1). Recalcando que según la información que se recopiló en el sector de Pedro González fueron procesados y analizados los 13 SEV elaborados por Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010) ya que los resultados obtenidos no eran concordantes con la conceptualización litológica del acuífero. En La Fuente Paraguachí se validó la información tomada de Terán, M. y Vásquez, P. (2010).

Es necesario acotar que en el área no se contó con suficiente información litológica de pozos que permitiera obtener una mayor calibración de la tabla de resistividades obtenidas.

Tabla 5.1. Rango de resistividades para suelos y litología aplicada en el sector de Pedro González – El Salado.

<i>Tipo de material</i>	<i>Resistividad en Ωm</i>
<i>Agua de mar</i>	0.2
<i>Arcilla</i>	2 - 50
<i>Arenas saturadas salobres</i>	0.5 – 10
<i>Arenas saturadas dulces</i>	20 – 120
<i>Arenas secas</i>	100 – 600
<i>Gravas</i>	600 – 10000
<i>Esquistos alterados</i>	100 – 300
<i>Esquistos sanos</i>	300 – 3000
<i>Calizas</i>	300-10000
<i>Gneis alterados</i>	100 -1000
<i>Gneis, granitos sanos</i>	1000 – 10000
<i>Bloques igneos – metamórficos</i>	> 100000

Fuente: modificado de Astier, 1972.

5.5.2.- Secciones hidrogeológicas.

5.5.2.1.- Pedro González – El Salado.

En el sector de Pedro González se realizaron cinco secciones geológicas de acuerdo a la distribución de los 13 SEV elaborados por Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010), integrando los más próximos entre sí, para relacionar los materiales que se encuentran formando parte del acuífero y definir su geometría (ver Figura 5.15). Estas secciones permiten ver la evolución lateral de las unidades litológicas resultantes de los sondeos, perforaciones y observaciones de campo. Se utilizó el programa *IPI2Win* para su elaboración a través de los datos de resistividad aparente de cada uno de los sondeos de manera que se pueda dar una interpretación vinculada de ellos. Con este programa se llevo a cabo las pseudo – secciones de resistividad aparente y secciones de resistividad verdadera, comparándola con la Tabla 5.1 definiendo así la litología.

Se consideró que los SEV tomados en consideración para cada sección, tuvieran en superficie aproximadamente la misma cota y a poca distancia de separación.

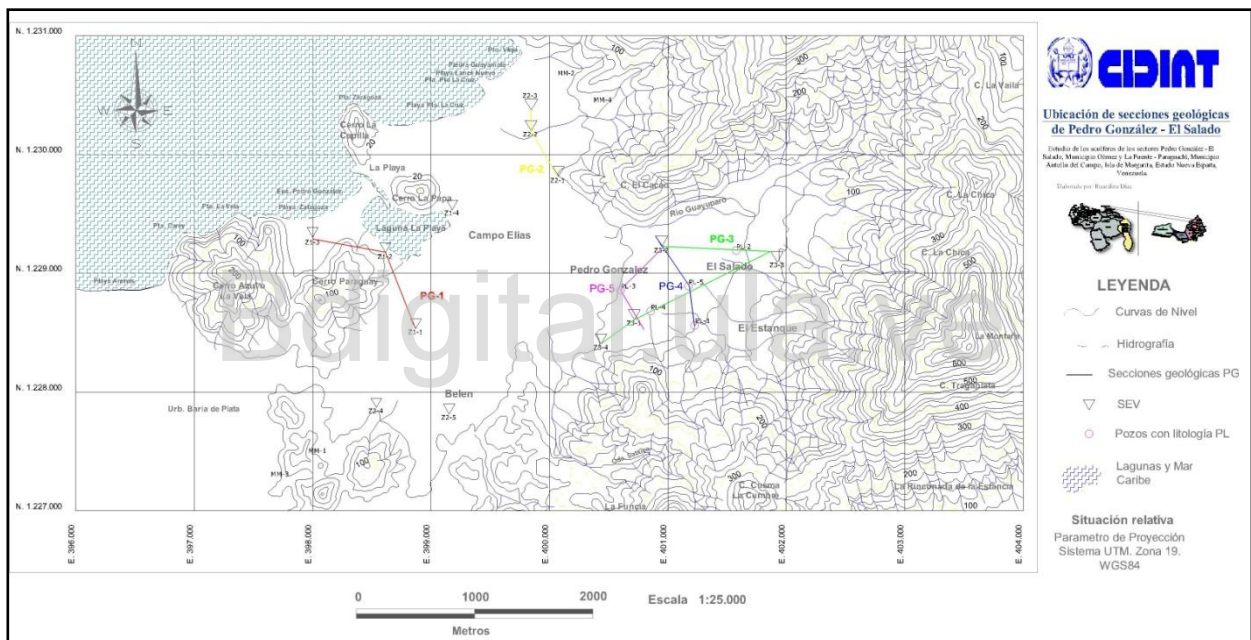


Figura 5.15.- Distribución de las secciones – geoeléctricas del sector Pedro González – El Salado.
Fuente propia.

- **Sección geológica PG-1.**

Se encuentra ubicada en la ensenada de Pedro González, entre el Cerro Paraguay y la laguna La Playa, en el municipio Gómez, y está formado por los sondeos SEV₁₋₃ (coordenadas 397951.62E, 1229385.81N), SEV₁₋₂ (coordenadas 398567.72E, 1229257.24N) y SEV₁₋₁ (coordenadas 398823.26E, 1228616.82N) (ver Figura 5.15), en el cual existe una intercalación de materiales arcillosos y arenosos pertenecientes a los depósitos cuaternarios de origen fluvial y aluvial (Qp) que están distribuidos a lo largo de todo el Valle de Pedro González; al mismo tiempo al SE de la sección se aprecia claramente una primera capa de arcillas, posteriormente una de calizas, luego la presencia de un bloque ígneo metamórfico, y a 21.8 m aproximadamente la existencia de gneis (ver Figura 5.16).

Este cambio se explica considerando que en el sector oriental de la Isla de Margarita, es típica la presencia de secuencias metamórficas conformadas por esquistos y gneis cuarzo feldespáticos, esquistos cuarzo micáceo granatífero, esquistos grafitosos y gneis anfibólicos con cuerpos ultramáficos y gneises trondhjemíticos entre las unidades feldespáticas y no feldespáticas, mientras que la unidad grafitosa le suprayacen esquistos de bajo grado y mármoles. Así mismo la presencia de secuencia flysch del primer ciclo sedimentario que a su vez se encuentra truncada por erosión y recubierta por un segundo ciclo sedimentario representada por facies de calizas intercaladas en lutitas y areniscas.

Aunado a esto, se observa claramente al NO de la sección la presencia de agua de mar, situación que era de esperarse, en virtud que el SEV₁₋₃ se realizó a unos 200 m de la costa. Es preciso indicar que para esta sección no se contó con información de niveles piezométricos en la zona, ya que no existen pozos perforados alrededor.

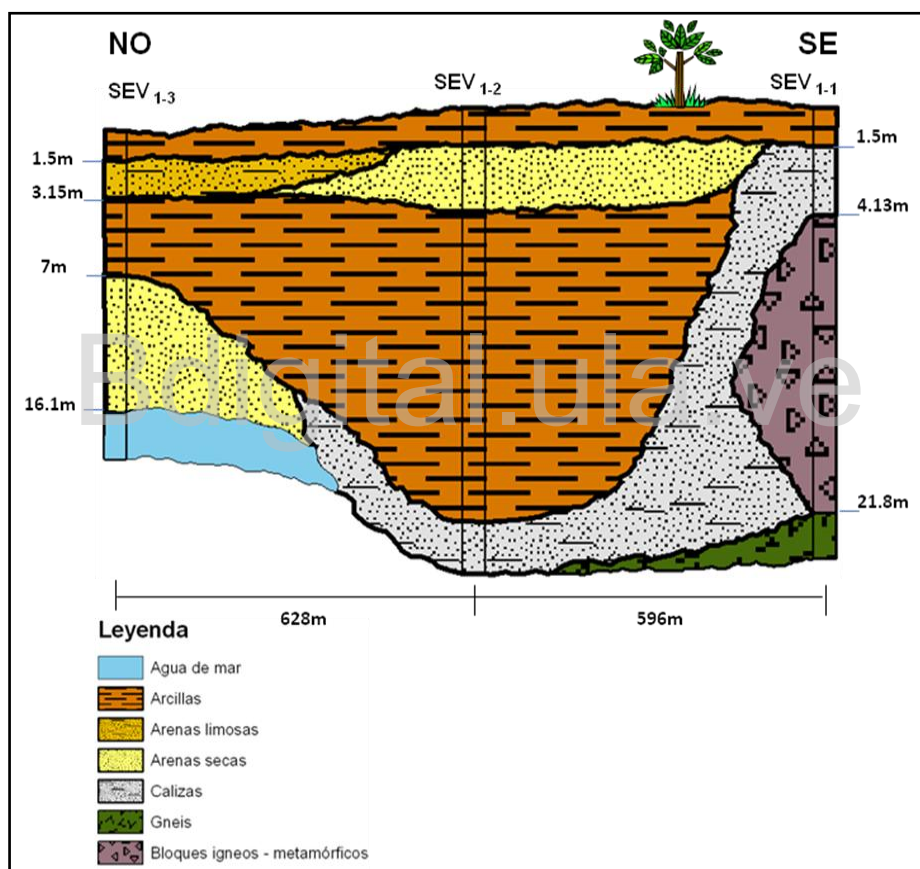


Figura 5.16.- Sección geológica PG-1. Fuente propia.

- **Sección geológica PG – 2.**

Se encuentra ubicada al norte de Campo Elías, en el municipio Gómez (ver Figura 5.15), y está formado por los sondeos SEV₂₋₃ (coordenadas: 399791.99E, 1230466.38N), SEV₂₋₂ (coordenadas: 399795.70E, 1230284.98N) y SEV₂₋₁ (coordenadas: 400029.14E, 1229898.41N).

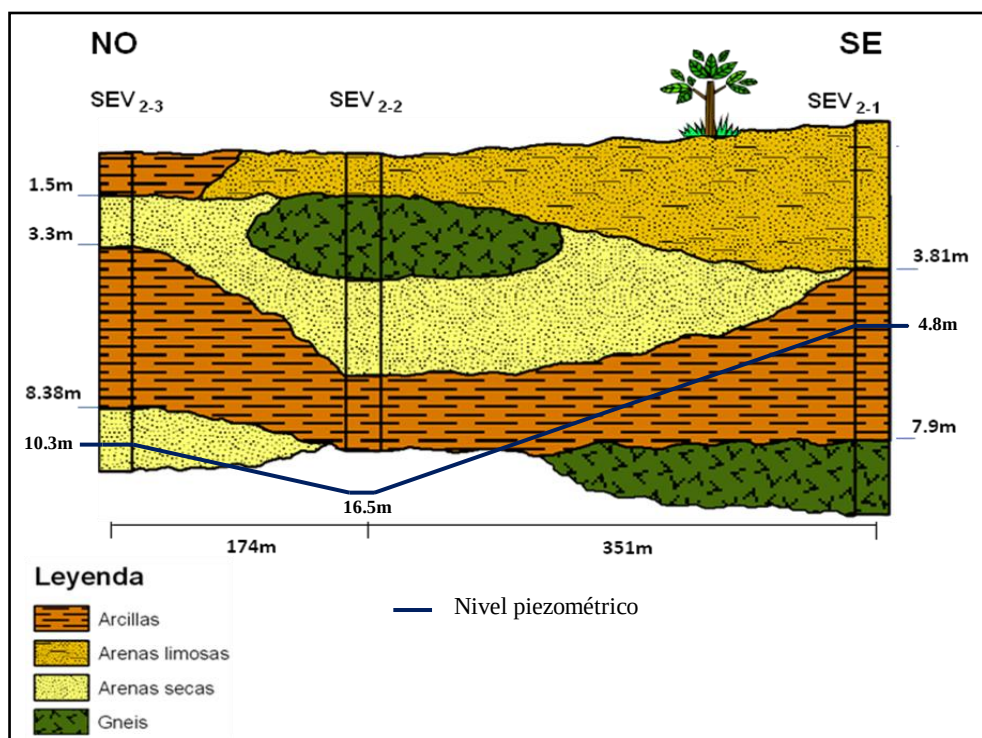


Figura 5.17.- Sección geológica PG – 2. Fuente propia.

En la sección de la Figura 5.17 existe una intercalación en la vertical de materiales fino-grueso-fino pertenecientes a depósitos fluviales y aluviales, depositándose en primer lugar sedimentos arcillosos al NO y areno limosos al SE, seguido de arenas secas con la presencia de un lentejón impermeable de gneis, luego una capa de arcilla y por último hacia el SE de la sección gneis, material que era de esperarse por la cercanía de este sondeo al Cerro El Cacao, donde predominan según levantamiento de campo y estudio de afloramientos las rocas Metamáficas de la Rinconada, las cuales consisten esencialmente de gneis anfibólicos intercalados con esquistos micáceo-carbonáceos; localmente se presentan cuerpos masivos no foliados de eclogitas paragoníticas- anfibólicas y anfibolitas masivas de color negro, y las Metaultramáficas de Cerro El Copey, unidad que está compuesta por serpentinita, peridotita serpentinizada, metadunita y metapiroxenita y por observaciones de afloramientos en la zona donde fue realizada la sección se apreció que esta unidad está compuesta por serpentinita de color verde claro, la cual se encuentra pulida y brillante evidenciando una zona de fricción, indicando la presencia del corrimiento; también está presente la pirolusita, de color negro y expuesta de forma dendrítica, la magnesita se encuentra de color blanco, la cual es producto de la alteración de la roca. Pueden aparecer asociados el crisotilo y cloritocita en forma de vetas.

Por otra parte se consideraron los pozos existentes en la zona y los niveles piezométricos medidos los cuales corresponden a la campaña del 2001 en el sector de Pedro González (Ver Anexo III, Tabla III.1), definiéndose hacia el NO el acuífero como libre y al SE confinado, esto en función de la presión hidrostática.

- **Sección geológica PG – 3.**

Se encuentra ubicado en el Salado de Pedro González, municipio Gómez, y está formado por los sondeos SEV₃₋₄ (coordenadas: 400435E, 1228461N), SEV₃₋₁ (coordenadas: 400717E, 1228666N), SEV₃₋₃ (coordenadas: 401923E, 1229153N) y SEV₃₋₂ (coordenadas: 400948E, 1229282N) (ver Figura 5.15), en el cual existe una alternancia de materiales, depositándose en primer lugar sedimentos arcillosos y hacia el tramo NE gravas por encima de ellos, luego arenas secas con la presencia de gneis y por último calizas donde en algunos sectores se puede apreciar en sus últimas capas gneis correspondientes al Gneis de Guayacán (ver Figura 5.18).

- **Sección geológica PG - 4**

Se encuentra ubicado en el Salado de Pedro González, municipio Gómez, y está formado por el sondeo SEV₃₋₂ (coordenadas 400948E, 1229282N) y perfiles litológicos P_{L-5} (coordenadas 401175E, 1228893N) y P_{L-1} (coordenadas 401225E, 1228561N) (ver Figura 5.15), en el cual se aprecia una depositación uniforme del material, encontrándose capas de gravas, arcillas arenas, gneis y calizas. Esta sección representa el material que compone el acuífero en el sector de Pedro González, formado por depósitos fluviales y aluviales que sobreyacen a rocas Metamáficas de la Rinconada, Metaultramáficas del Cerro El Copey y al Gneis de Guayacán (ver Figura 5.19). Asimismo al examinar los niveles piezométricos establecidos en la sección geológica PG – 4, tomados de la campaña 2007 (ver Anexo III, Tabla III.4) indican la existencia de un acuífero confinado.

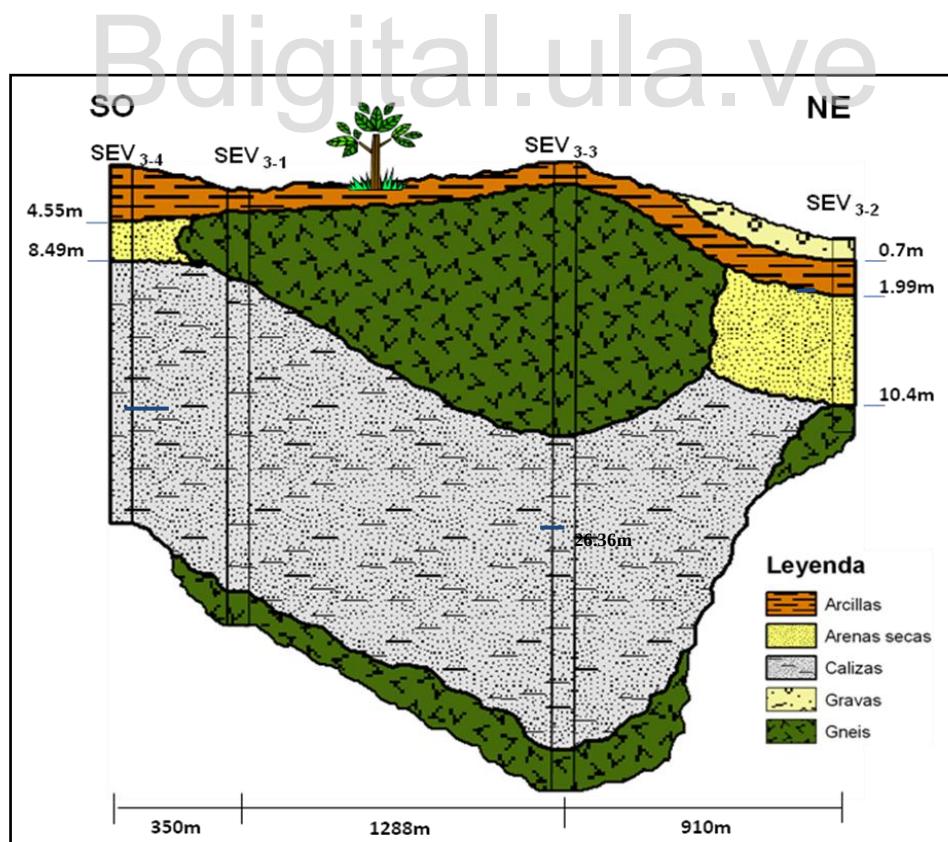


Figura 5.18.- Sección geológica PG – 3. Fuente propia

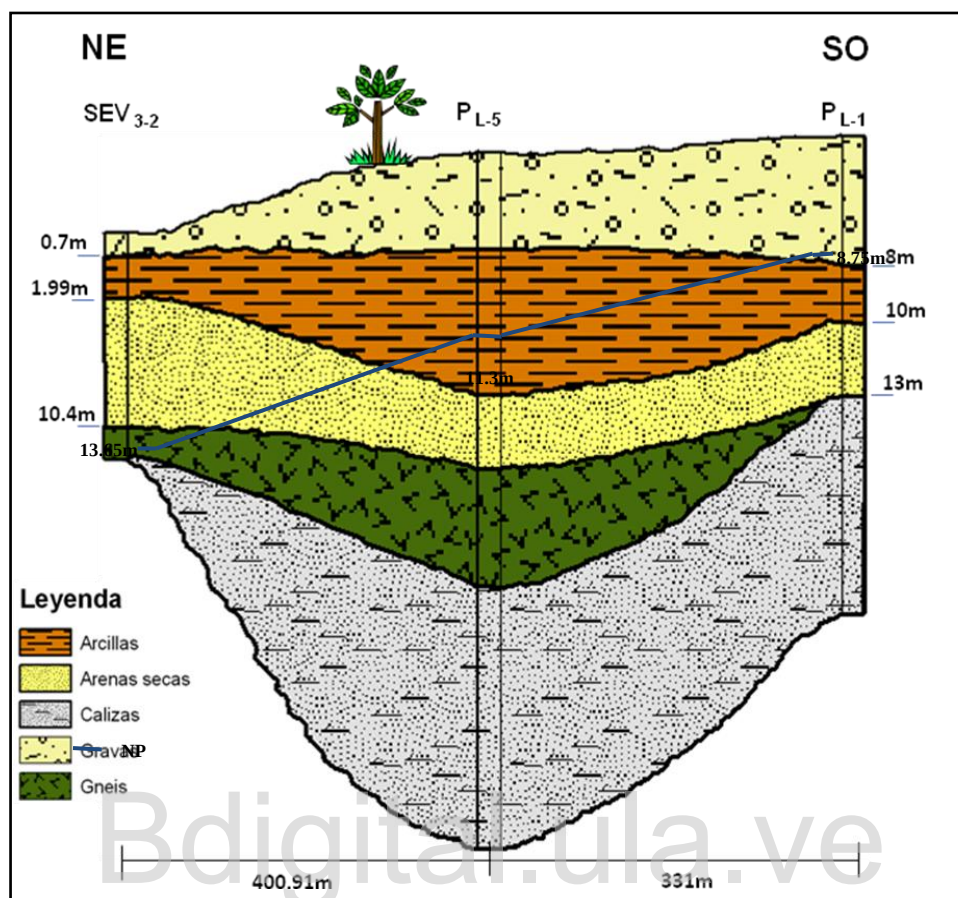


Figura 5.19.- Sección geológica PG – 4. Fuente propia.

- **Sección geológica PG – 5.**

Se encuentra ubicado en el sector de Pedro González, municipio Gómez, y está formado por los sondeo SEV₃₋₂ (coordenadas 400948E, 1229282N) y SEV₃₋₁ (coordenadas 400717E, 1228666N) y el perfil litológico P_{L-3} (coordenadas 400602E, 1228860N) (ver Figura 5.15), en el cual existe una depositación uniforme del material, encontrándose capas de gravas, arcillas, arenas secas las cuales se truncan hacia el gneis suprayaciendo a las calizas, tal como se observó en la sección 04. (Ver Figura 5.20). Es de hacer notar que para dicha sección no se contó con información de niveles cercanas a el sondeo SEV₃₋₁ ni al perfil litológico P_{L-3}.

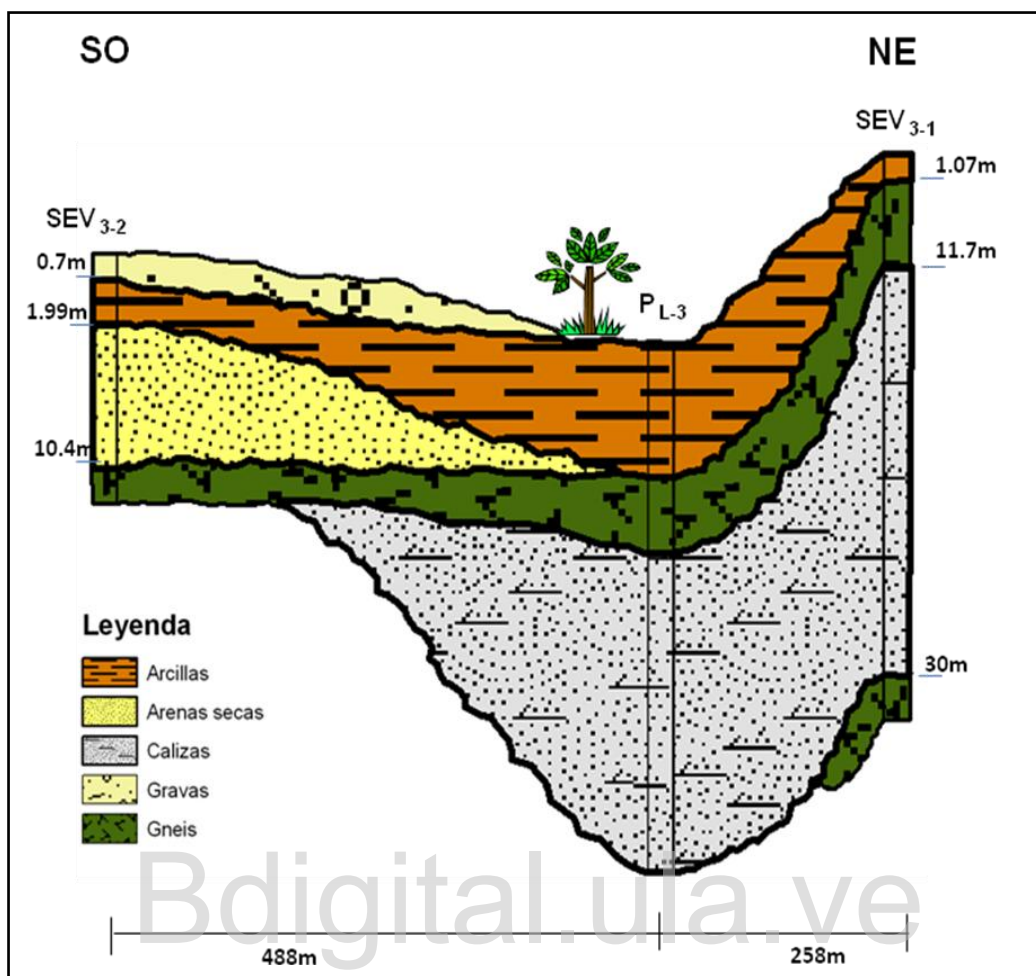


Figura 5.20.- Sección geológica PG – 5. Fuente propia.

5.5.2.2.- La Fuente - Paraguachí.

El siguiente mapa muestra las direcciones que se tomaron para realizar las secciones geológicas, con la integración de sondeos eléctricos próximos entre sí, para relacionar los materiales que se encuentran conformando el acuífero y su geometría en el sector de La Fuente Paraguachí (ver Figura 5.21). Es importante destacar que en esta zona se validó la información de Terán, M. y Vásquez, P. (2009), quienes desarrollaron la exploración geofísica con suma precisión.

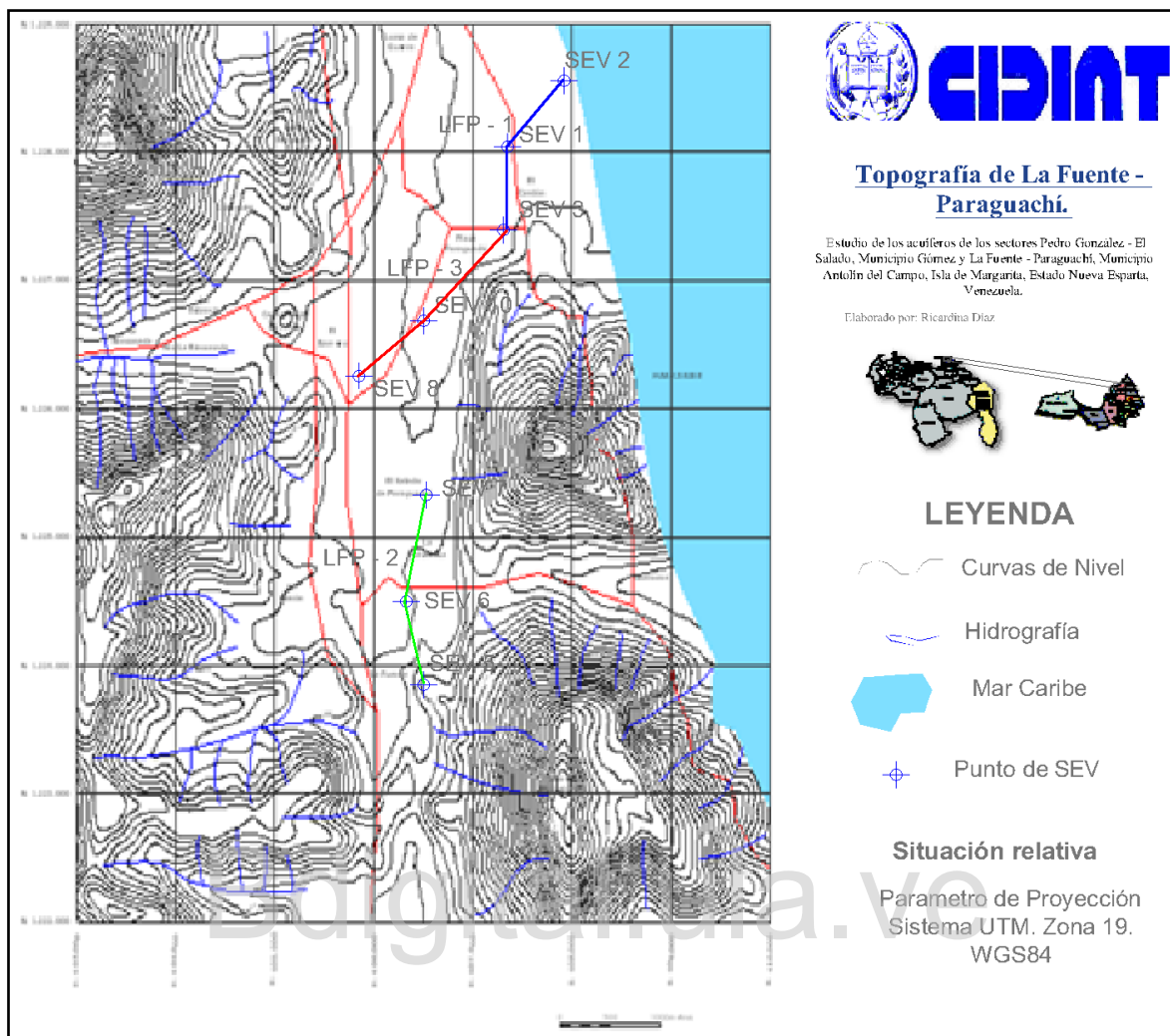


Figura 5.21.- Ubicación de las secciones geológicas en el sector La Fuente – Paraguachí. Modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

- **Sección geológica LFP – 1.**

En esta sección tomada de Terán, M. y Vásquez, P. (2009) se pueden distinguir espesores considerables de material poroso - permeable con capas de resistividades que van de 15 a 100 ohm-m, consideradas como capas saturadas con agua poco salobre, sin embargo, el sondeo 1 muestra una capa con resistividades bajas de alrededor de 1.25 ohm-m que pueden ser asociadas a aguas más salobres. Cabe resaltar que esta sección se encuentra cercana a la línea de costa. Los niveles saturados se muestran generalmente sobre materiales permeables, no alcanzando los niveles arcillosos, que en su mayoría se presentan de manera superficial, por lo que el acuífero en esta zona podría considerarse como libre (ver Figura 5.22).

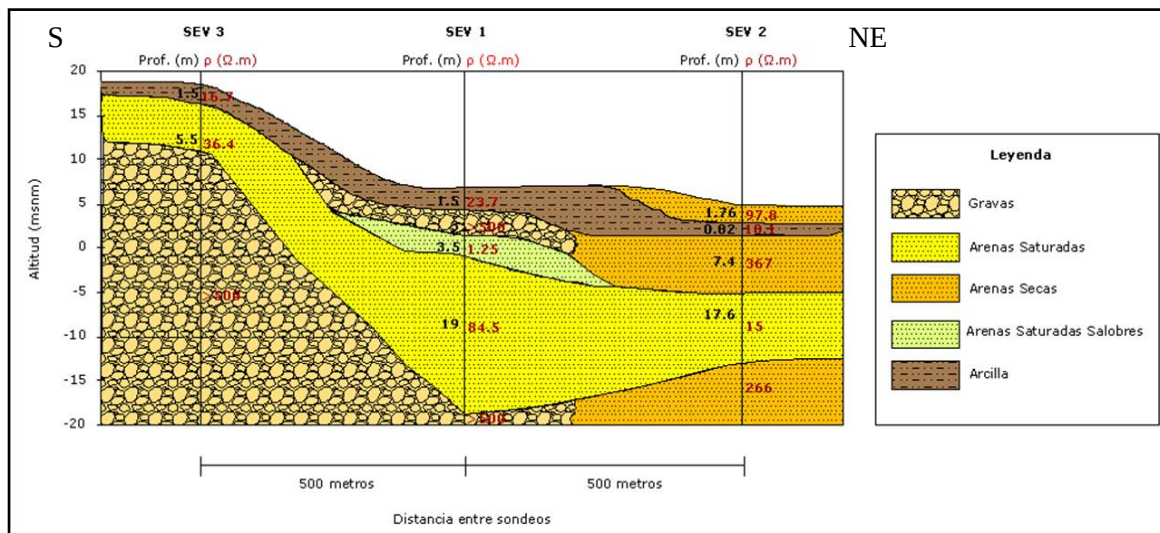


Figura 5.22.- Sección geológica LFP-1, modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

- **Sección geológica LFP-2.**

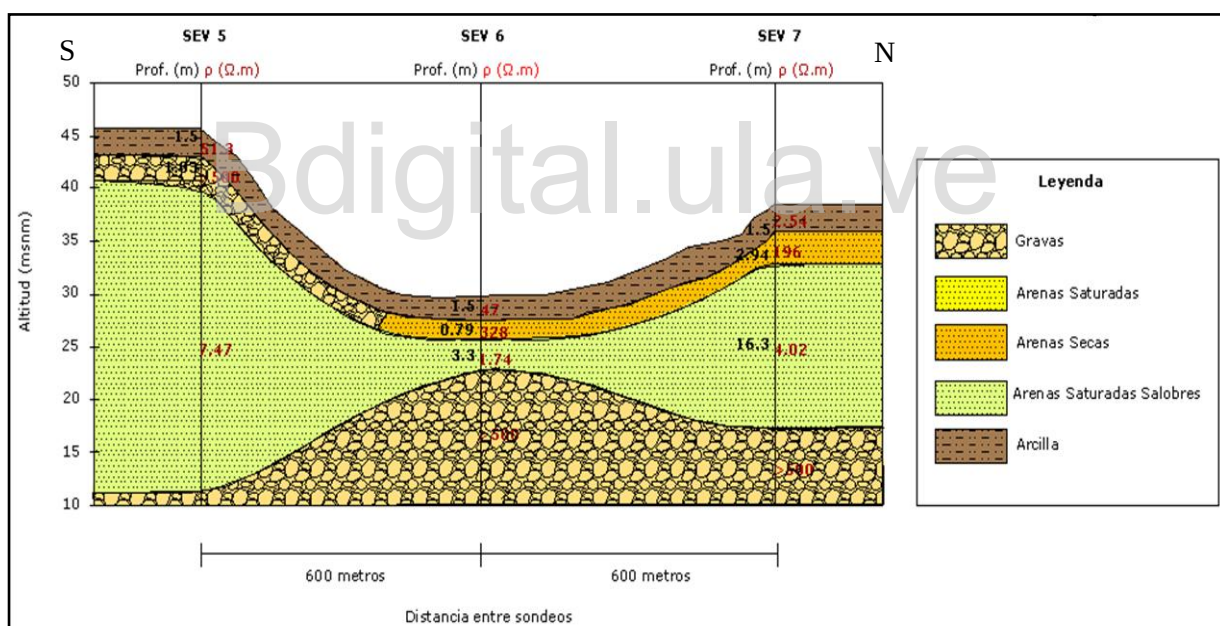


Figura 5.23.- Sección Geológica LFP-2, modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009).

Esta sección en particular de Terán, M. y Vásquez, P. (2009) muestra una capa saturada con valores de resistividad del orden de 1.5 a 7.5 ohm-m los cuales son consideradas como arenas saturadas salobres y de esta manera se demuestra que los valores de resistividad bajos no solo están presentes en las arenas próximas a la costa sino que también se presentan en lugares lejanos donde la salinidad pudiera tener un origen diferente (ver Figura 5.23). En esta sección se aprecia la condición de acuífero libre.

- **Sección geológica LFP-3.**

En esta sección tomada de Terán, M. y Vásquez, P. (2009) se aprecian capas saturadas que presentan diferentes características a pesar de que se ubican en el mismo sector (Paraguachí), tales como capas de arenas saturadas salobres más alejadas de la zona costera y algunas capas menos salobres para las arenas presentes más al norte del sector. Se observa un alto topográfico que pareciera mantener seco el material permeable donde se llevo a cabo la realización del sondeo 10 (ver Figura 5.24).

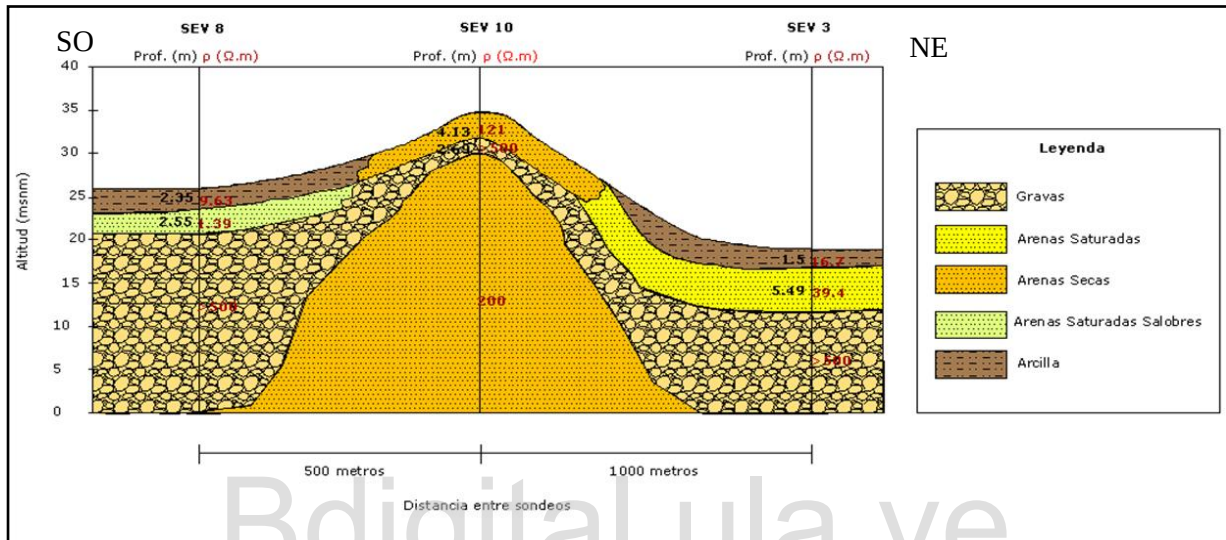


Figura 5.24.- Sección Geológica LFP-3, modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

5.6.- Inventario de pozos.

Con la actualización del inventario de pozos se logró depurar los datos en el área de estudio y englobar la información básica referente a los mismos la cual se describe a continuación.

5.6.1.- Sector Pedro González – El Salado

- Campaña Noviembre del año 2001, C1: Se monitorearon 32 pozos distribuidos en el área entre los sectores Pedro González y el Salado, la información que contienen corresponde a ubicación de los pozos, propietario, elevación del terreno, profundidad del pozo, niveles estáticos y/o dinámicos del agua, pH y conductividad, uso y estado del pozo, temperatura, color y olor del agua, entre otros. Se hace necesario destacar que de ellos 13 se encontraban inactivos y algunos de ellos no presentaron información completa de varios de sus datos. (Ver Anexo III, Tabla III.1)
- Campaña Marzo del año 2005, C2: El número de pozos inventariado fue de 32, cuya información permitió conocer la ubicación, elevación, estado del pozo, nivel estático y/o dinámico, conductividad, pH y salinidad. (Ver Anexo III, Tabla III.2)

- Campaña Mayo del año 2006, C3: Los datos contienen información referente a 20 pozos con: ubicación, temperatura, pH, conductividad, alcalinidad, sílice e iones mayoritarios, como HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , SiO_2 . (Ver Anexo III, Tabla III.3)
- Campaña Febrero del año 2007, C4: Se inventariaron 22 pozos, tomando datos de ubicación, elevación del terreno, profundidad de los pozos, niveles estáticos y/o dinámicos, caudales, pH, conductividad y salinidad, además de características hidráulicas del acuífero. Esta campaña fue realizada por la Escuela de Ingeniería Geológica de la Universidad de los Andes. (Ver Anexo III, Tabla III.4)
- Campaña del año 2008, C5: realizada los meses de abril y octubre por el Ministerio del Ambiente y en julio por la Escuela de Ingeniería Geológica en el marco de esta investigación, se monitorearon 20 pozos, considerando datos de ubicación, cota topográfica, profundidad de los pozos, niveles estáticos y/o dinámicos, caudales, temperatura, pH, salinidad, dureza, OD, RAS, conductividad y TSD. (Ver Anexo III, Tabla III.5)
- Campaña del año 2009, C6: se inventariaron 10 pozos tomando datos de ubicación, cota topográfica, profundidad de los pozos, niveles estáticos y/o dinámicos, temperatura, pH, dureza, RAS, OD, salinidad, conductividad y TSD. (Ver Anexo III, Tabla III.6)
- Campaña del año 2010, C7: se inventariaron 10 pozos tomando datos de ubicación, cota topográfica, profundidad de los pozos, niveles estáticos y/o dinámicos, temperatura, pH, dureza, RAS, OD, salinidad, conductividad y TSD. Además se incluyeron los pozos visitados en julio de este año en el marco de esta investigación. (Ver Anexo III, Tabla III.7)

5.6.2.- Sector La Fuente - Paraguachí

- Campaña Julio del año 2005, C1: El número de pozos inventariados fue de 13, cuya información permitió conocer la ubicación, elevación, pH, conductividad, salinidad, TSD, Calcio, magnesio, sulfato, cloruro, potasio, bicarbonato, alcalinidad total, sodio y estado del pozo. (Ver Anexo III, Tabla III.8)
- Campaña del año 2006, C2: Se monitorearon 13 pozos en el área, incluyendo datos referente a ubicación, propietario, pH, conductividad, salinidad, total de sólidos disueltos, calcio, magnesio, sulfato, cloruro, bicarbonato y alcalinidad total. Por otra parte, para este año Michael, J. en su estudio de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca La Fuente Paraguachí recopiló muestras de agua de 23 pozos, de donde se obtuvieron datos de ubicación, pH, conductividad, Eh, temperatura, total de sólidos disueltos, HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , SiO_2 . (Ver Anexo III, Tabla III.9)
- Campaña Abril - Mayo del año, 2007 C3: En esta campaña se monitorearon 15 pozos distribuidos en el área, la información que contienen corresponde a ubicación de los pozos, propietario, elevación del terreno, niveles estáticos y/o dinámicos del agua, pH, conductividad, salinidad y total de sólidos disueltos. Resaltando que algunos de ellos no presentó información completa de varios de sus datos. Cabe resaltar que la data recopilada incluyó datos de laboratorio, análisis bacteriológicos y características físicas del agua que son presentadas en los apéndices, pero que no están incluidos sus análisis en esta investigación. (Ver Anexo III, Tabla III.10)
- Campaña julio del año 2007, C4: Se monitorearon 25 pozos, donde se determinó ubicación de los mismos, elevación del terreno, niveles estáticos y caudales. Cabe destacar que en esta

campaña se realizaron mediciones de pH y CE pero no pudo obtenerse los datos, a pesar que la misma fue realizada por la Escuela de Ingeniería Geológica. (Ver Anexo III, Tabla III.11)

- Campaña del año 2008, C5: se monitorearon 18 pozos en campañas realizadas por el Ministerio del Ambiente durante los meses de abril y octubre, y en julio como parte de esta investigación se corroboraron esos mismos pozos y se agregaron dos más a la data, tomando coordenadas de ubicación, cota topográfica, nivel estático y/o dinámico, caudales, salinidad, temperatura, pH, OD, conductividad y TSD. Destacando que algunos de los pozos no presentan información completa de varios de sus datos, ya que la misma era inexistente. (Ver Anexo III, Tabla III.12)

5.7.- Parámetros hidrogeológicos.

Haciendo uso del programa GWW se obtuvo un valor de transmisividad de 108 m²/d (ver Figura 5.25) en el pozo 21, lugar donde se llevó a cabo la prueba de bombeo en el Salado de Pedro González (ver Figura 5.26).

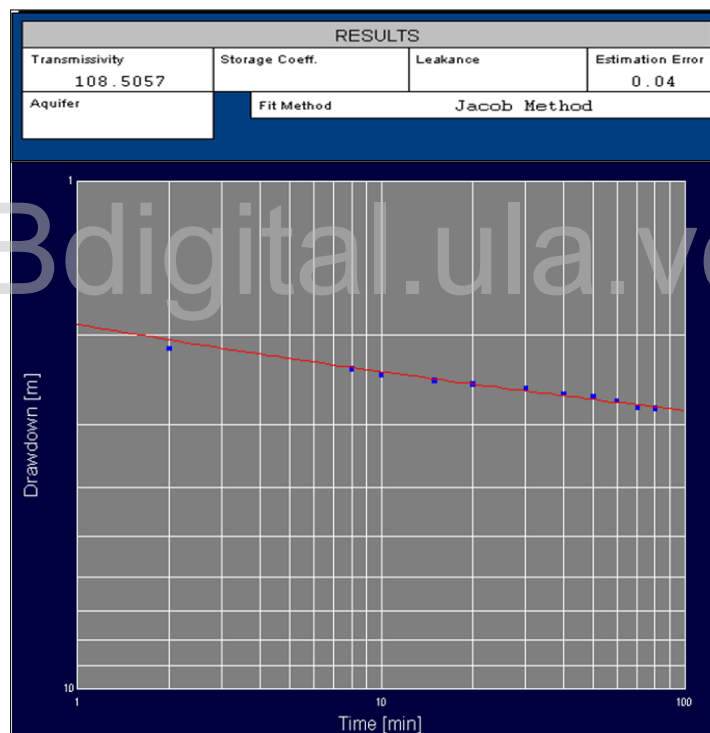


Figura 5.25.- Resultado de la prueba de bombeo realizada en el pozo C5-21 en el sector de Pedro González – El Salado, según el método de Jacob en el programa GWW.

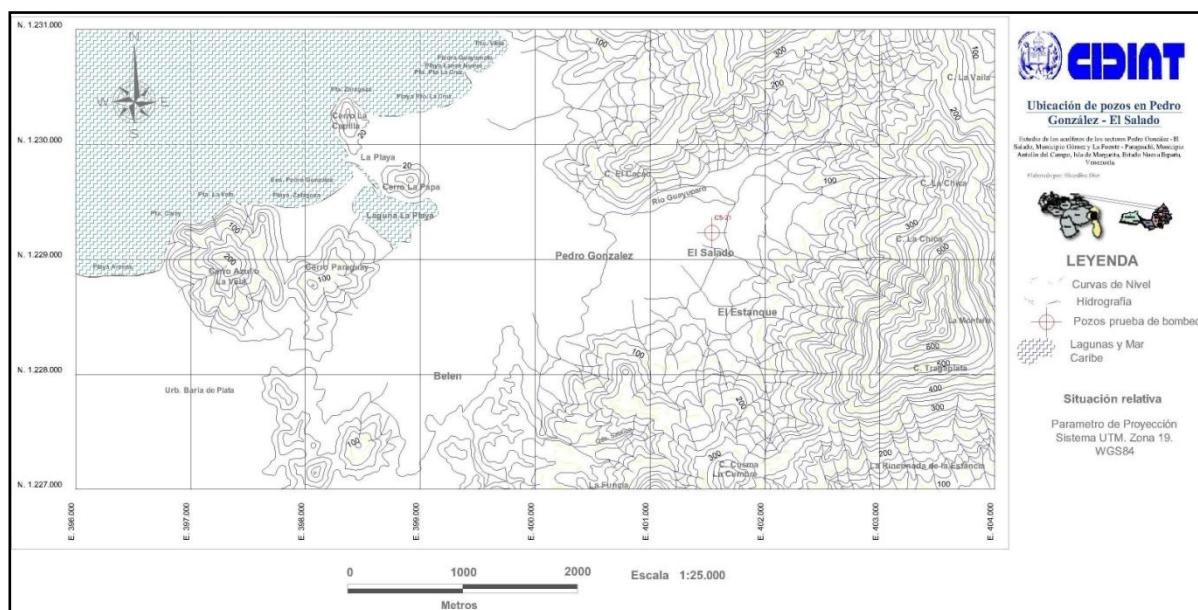


Figura 5.26.- Ubicación del pozo C5-21 en el Salado de Pedro González. Fuente propia.

Este parámetro hidrogeológico permitió determinar el S calculado de la siguiente manera, empleando la Ecuación 4.1:

$$2,8m = \frac{259,2 \text{ m}^3/\text{d}}{4\pi \cdot 108,5057 \text{ m}^2/\text{d}} \ln \left(\frac{2,25 * \frac{108,5057 \text{ m}^2}{\text{d}} * 0,0417 \text{ d}}{(0,05\text{m})^2 * S} \right)$$

Resultando un coeficiente de almacenamiento de 8.16×10^{-6} . Lo que indica que el acuífero en el sector de Pedro González – El Salado es de tipo confinado.

En La Fuente – Paraguachí no se contó con pruebas de bombeo que permitiesen definir el acuífero mediante estos datos en campo.

5.8.- Mapa de ubicación de pozos

En este mapa se muestra los pozos de las 7 campañas que fueron recopilados en el inventario previamente elaborado, donde se pudo observar su ubicación dentro del área de estudio, concentrándose éstos en El Salado y en menor proporción en la población de Pedro González, limitando el desarrollo de la investigación a estos sectores (ver Figura 5.27).

En el mismo orden de ideas se aprecia el mapa del sector La Fuente Paraguachí, visualizándose la mayor concentración de pozos en la zona sur, hacia La Fuente, por constituir un valle donde el agua escurre con mayor facilidad, tanto superficial como subterráneamente, desde sus alrededores, que constituyen las mayores elevaciones (ver Figura 5.28).

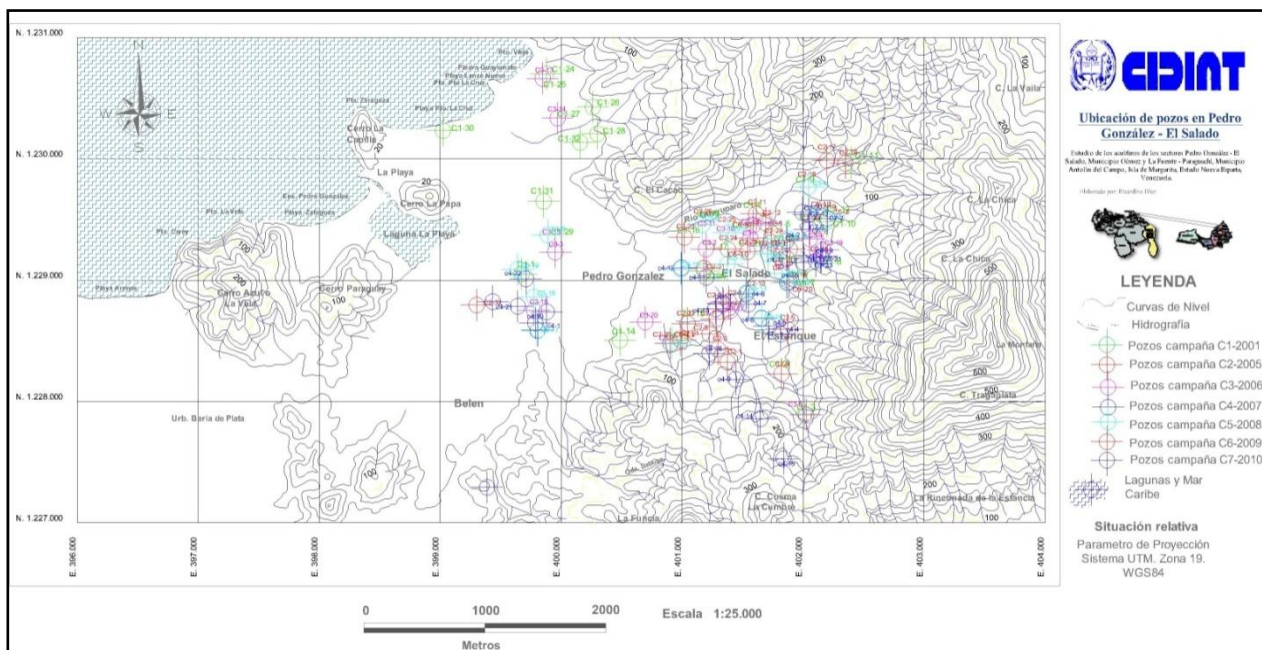


Figura 5.27.- Ubicación de pozos en el sector de Pedro González, estado Nueva Esparta. Fuente propia.

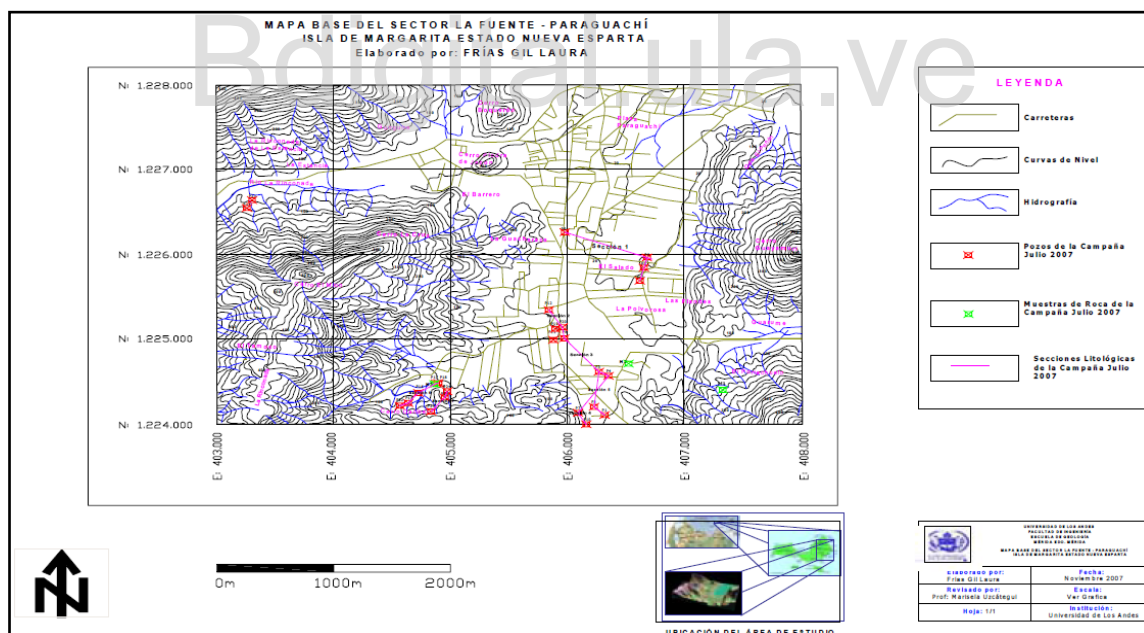


Figura 5.28.- Ubicación de pozos en el sector La Fuente Paraguachí, estado Nueva Esparta. Elaborado por Frías, L. (2007)

5.9.- Superficies piezométricas.

En la Figura 5.29, se observa la altura de la capa de agua sobre el nivel del mar para las 4 campañas (2001, 2005, 2007 y 2008) donde se pudieron medir niveles piezométricos, mostrando una apreciable variación en el transcurso del tiempo en el sector de Pedro González – El Salado.

En este sentido, en el mapa de la campaña C1-2001 se observa que la superficie piezométrica presenta menores cotas en dirección noroeste, donde el gradiente hidráulico es menor, y aumenta la altura piezométrica hacia el este donde las isopiezas se presentan más o menos paralelas y cercanas entre sí, indicando una permeabilidad menor por ende un gradiente hidráulico mayor. Por la razón anterior el flujo subterráneo lleva una dirección sureste – noroeste.

En la campaña C2-2005 la piezometría muestra un comportamiento irregular hacia el este, diferenciándose dos picos, uno en el sureste con un valor superior a los 95 m, y otro al noreste con oscilaciones cercanas a los 60 m., la menor piezometría se registra en dirección noroeste entre los 5 m por debajo del nivel del mar. Cabe resaltar que hacia el este del área se tiene el mayor número de pozos, donde los que se encuentran al noreste está activos y su cota es baja a diferencia de la zona sureste, donde las cotas piezométricas son más elevadas y algunos de los pozos presentes estaban inactivos.

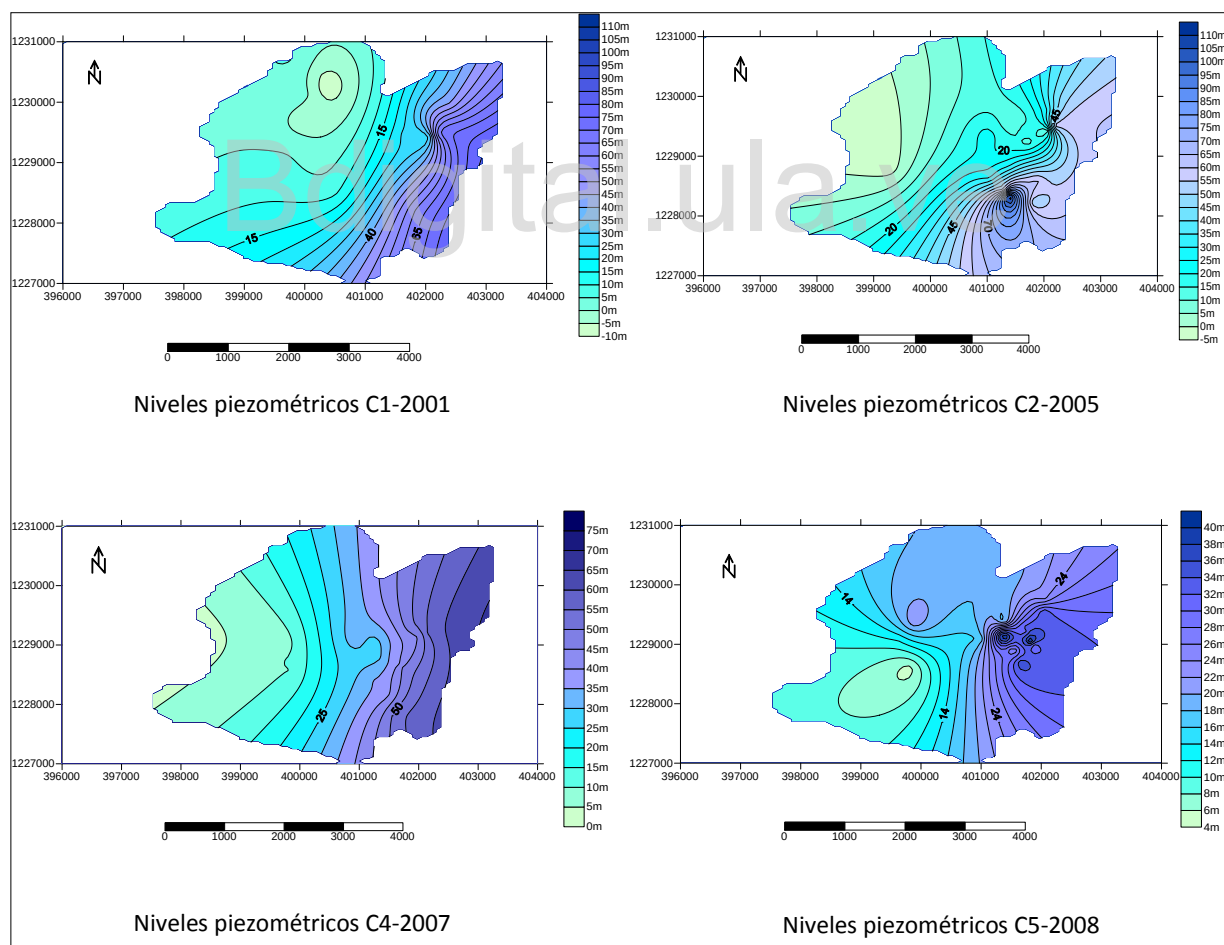


Figura 5.29.- Variación de niveles piezométricos en el sector de Pedro González – El Salado. Campañas 2001, 2005, 2007 y 2008. Fuente propia.

El mapa piezométrico C4-2007, presenta una variación relativamente uniforme, con un descenso de los niveles piezométricos en dirección de este a oeste.

Para la campaña C5-2008 el mapa piezométrico muestra variaciones en cuanto a permeabilidad y gradiente hidráulico se refiere, además de la piezometría. Los mayores valores se presentan al este, donde está la mayor concentración de pozos, con una disminución en dirección suroeste.

Al examinar los 4 mapas (ver Figura 5.29) de una manera general para el año 2001 y 2005 el flujo subterráneo presenta una dirección sureste – noroeste, donde los niveles del agua del acuífero estaban bajos respecto a los niveles actuales, exceptuando que en el año 2005 aparece un pozo C2-1, en el que el nivel del agua es muy alto en comparación a todos los niveles medidos, esto posiblemente a que dicho pozo se ubica a 120msnm, está inactivo y el nivel estático medido fue de 7.2 m. Para los años 2007 y 2008, se nota un aumento de los niveles y una dirección de flujo este – suroeste.

En el mismo orden de ideas, en el sector de La Fuente - Paraguachí, entre los años 2007, 2008 y 2009, ha existido una variación en los niveles de agua del acuífero claramente apreciables (ver Figura 5.30).

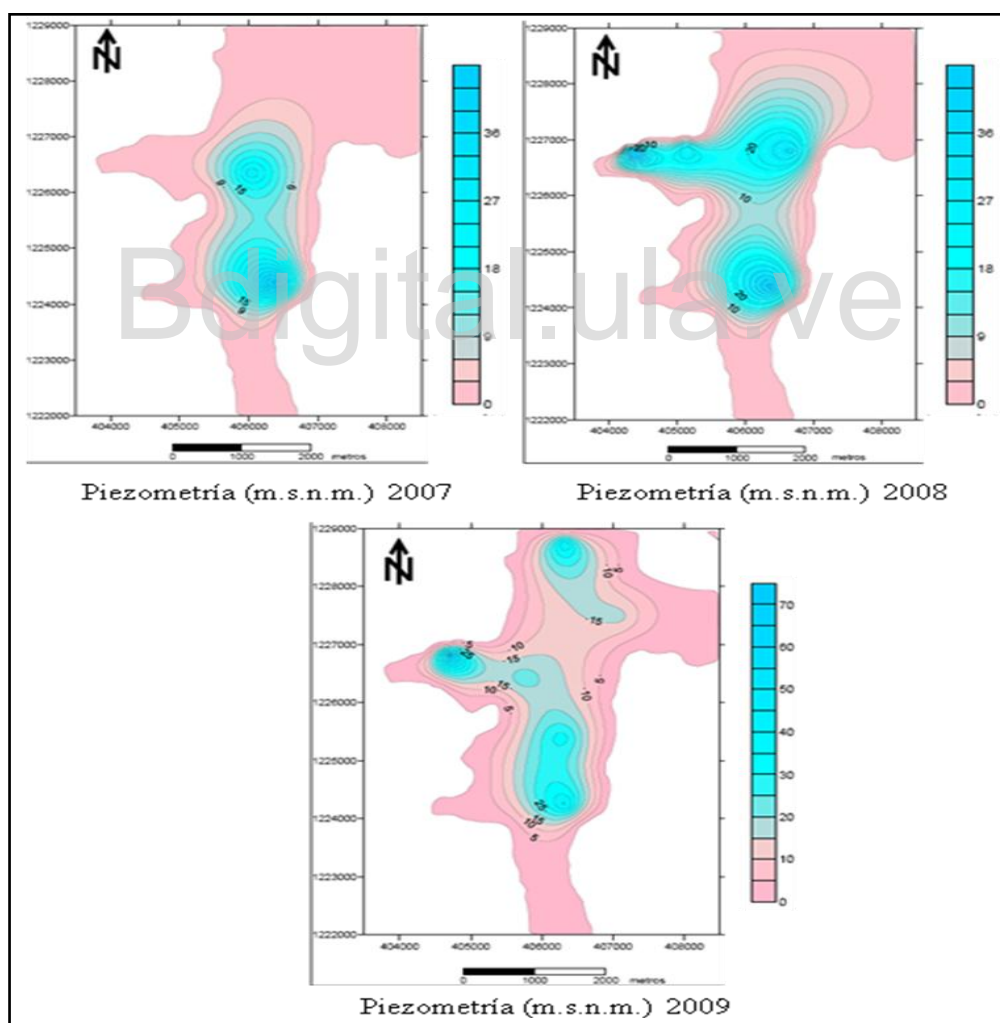


Figura 5.30- Variación de niveles piezométricos en el sector La Fuente - Paraguachí. Modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

Para la campaña del año 2007 se consideran los mayores niveles piezométricos hacia la parte media de los centros poblados La Fuente y Paraguachí, observándose que al sur de la zona la permeabilidad es menor y el gradiente hidráulico mayor. A diferencia del norte del área (en el sector Paraguachí) donde por la separación de las curvas se aprecia una mayor permeabilidad por ende un menor gradiente hidráulico. En el 2008 se visualiza que existió un aumento de la superficie piezométrica, exponiendo unos picos en el sector de La Rinconada, donde tal como se observa en La Fuente, por la cercanía de las curvas la permeabilidad del material es menor por tanto el gradiente hidráulico es mayor. Y en la zona de Paraguachí se evalúa el mismo comportamiento que el 2007, pero con aumento de los niveles. En la piezometría del año 2009, las menores cotas piezométricas se encuentran en los sectores Paraguachí y La Fuente y los mayores resaltan en La Rinconada. En este mapa se distinguen variaciones respecto a las otras campañas debido posiblemente a que los datos no son extraídos directamente de los pozos, sino del procesamiento e interpretación de los SEV realizados en el área de estudio. En general, en La Rinconada y La Fuente se apreciaron los mayores gradientes hidráulicos y niveles piezométricos, debido posiblemente a la cercanía a la zona de recarga y que existía menor explotación de pozos, caso contrario del centro poblado de Paraguachí donde se encontraba la mayor explotación de el acuífero.

5.10.- Modelo de recarga del acuífero.

La recarga está representada por la cantidad de agua que se infiltra al acuífero por precipitación y por flujos subterráneos, cada uno de los cuales es calculado a continuación:

5.10.1.- Pedro González - El Salado.

5.10.1.1.- Balance Hídrico.

Para conocer la cantidad de agua en mm que infiltra en el acuífero producto de las precipitaciones, se obtuvo la siguiente información.

Tabla 5.2.- Datos de precipitación de la estación Pedro González.

	Precipitación (mm)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1986	35,0	13,8	42,0	0,0	22,0	48,6	37,0	89,6	59,8	60,0	51,6	80,4	539,8
1987	13,6	0,2	5,0	0,0	72,0	73,8	153,4	136,2	27,8	15,8	69,0	115,8	682,6
1988	77,6	68,0	29,2	0,0	15,6	37,6	81,8	159,8	42,8	103,8	74,8	164,2	855,2
1989	45,4	51,2	35,2	5,8	0,2	152,4	32,8	20,0	32,8	69,2	135,6	68,0	648,6
1990	124,4	76,0	5,8	27,8	32,0	81,8	135,8	105,4	16,0	43,8	128,8	103,5	881,1
1991	66,7	24,0	16,8	16,6	3,2	47,6	56,8	51,5	35,5	35,8	258,0	225,6	838,1
1992	71,9	61,1	4,2	0,0	23,6	41,3	118,9	27,4	98,3	71,8	75,9	98,3	692,7
1994	22,6	34,6	0,2	6,8	19,7	19,1	38,1	9,3	1,9	49,6	19,2	11,8	232,9
1995	21,8	5,8	11,7	19,2	0,0	13,2	49,4	119,8	103,0	27,8	25,6	9,3	406,6
1996	32,8	6,1	0,0	0,0	21,3	34,2	55,4	15,5	46,7	13,2	22,7	65,0	312,9
1997	74,0	50,3	0,0	0,2	9,2	68,8	45,9	23,1	2,3	82,1	32,6	14,2	402,7
2003	3,9	6,9	0,0	0,0	8,0	38,9	39,8	43,6	20,7	10,2	138,5	39,0	349,5
2004	142,8	68,1	6,5	12,6	14,5	25,9	30,9	50,0	122,9	58,1	185,0	134,6	851,9
2005	101,8	43,7	3,9	3,6	1,5	38,7	39,8	64,4	30,0	106,6	125,0	245,7	804,7
2006	189,4	101,8	15,1	0,0	8,8	27,2	112,3	36,4	30,0	92,6	87,4	84,2	785,2

Fuente: Fuente: SINAIHME

Por medio del método de *Thornthwaite*, se calculó la evapotranspiración, determinando una serie de parámetros, entre ellos, índice de calor mensual e índice de calor anual (ver Tabla 5.3).

Tabla 5.3.- Índice de calor mensual y anual en el cector de Pedro González – El Salado de 1986 a 2006.

Año	Índice de calor mensual												Indice de calor anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1986	12,6	12,7	12,6	12,8	13,0	12,8	13,0	13,1	13,0	12,8	12,1	13,1	12,81
1987	13,2	12,6	12,8	13,5	13,4	13,9	13,7	14,0	13,8	13,4	13,6	13,4	13,45
1988	13,6	13,4	13,7	13,4	13,8	13,9	14,0	13,6	13,9	14,1	13,1	11,2	13,48
1989	11,5	13,0	13,1	12,6	13,3	12,4	12,6	13,2	12,9	12,7	11,5	10,7	12,46
1990	10,7	11,4	12,2	13,3	13,3	13,1	13,4	13,6	13,9	13,4	13,1	12,9	12,86
1991	13,1	11,9	12,4	12,8	12,9	12,7	12,9	12,9	13,3	12,9	12,1	11,2	12,61
1992	11,4	11,4	11,9	13,4	13,9	13,6	13,4	14,1	13,1	13,6	13,2	12,1	12,94
1994	11,6	11,9	12,5	13,6	13,3	13,0	13,1	13,5	13,9	13,9	13,4	13,1	13,06
1995	11,7	12,8	12,9	13,7	14,2	13,6	13,8	14,2	13,7	13,6	13,5	13,4	13,43
1996	12,6	13,2	12,7	14,1	17,7	13,3	13,1	13,5	13,5	14,5	13,5	12,5	13,69
1997	12,3	12,0	12,4	13,6	14,2	11,4	11,9	12,7	14,5	13,1	13,2	12,9	12,86
2003	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,4	13,1	13,1	13,15
2004	13,1	13,2	13,4	13,5	13,5	13,1	13,9	13,1	13,1	13,5	13,6	13,2	13,37
2005	13,2	13,3	13,2	3,0	7,7	14,1	14,2	14,5	14,3	13,7	13,6	13,1	12,33
2006	13,0	13,4	13,8	14,3	14,5	14,5	13,9	14,1	14,4	13,9	13,7	13,8	13,94

Fuente: Propia.

Luego, la evapotranspiración corregida ET_c, para meses reales y horas de sol máximas según la latitud, como se aprecia en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4.- Evapotranspiración corregida ET_c en el Sector de Pedro González – El Salado de 1986 a 2006.

Año	Evapotranspiración corregida (ET _c)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	148,0	136,7	154,8	153,5	163,4	158,1	163,4	161,7	153,1	153,5	142,1	149,5
1987	151,5	135,8	155,9	157,2	165,5	164,9	167,7	166,8	157,5	156,7	150,3	151,0
1988	154,0	140,0	161,0	156,7	168,1	164,4	169,5	164,6	158,0	160,5	147,5	138,6
1989	142,0	138,3	157,9	152,0	165,3	156,1	161,3	162,2	152,8	152,8	138,6	135,9
1990	136,8	129,9	152,2	156,0	165,2	160,2	165,6	164,3	158,0	156,8	147,6	148,7
1991	151,3	132,7	153,6	153,6	163,0	157,7	163,0	160,5	154,8	154,0	142,1	139,1
1992	141,3	129,9	150,5	156,8	169,1	162,8	166,0	167,3	153,5	158,0	148,0	144,2
1994	142,5	132,1	153,9	157,6	165,1	159,3	163,8	163,8	158,0	159,7	148,8	149,9
1995	142,8	136,9	156,3	158,4	170,8	162,7	168,1	168,1	157,1	158,0	149,5	151,0
1996	147,8	139,2	155,0	160,5	190,4	160,9	164,1	163,7	155,9	163,0	149,5	146,1
1997	146,8	132,9	153,5	158,1	170,4	149,8	156,3	159,1	161,3	155,1	148,0	148,7
2003	151,2	138,9	157,7	155,1	164,2	160,2	164,2	161,6	153,9	156,3	147,5	149,5
2004	151,1	139,2	159,3	157,2	166,4	160,1	169,0	161,5	153,8	157,1	149,9	150,2
2005	151,8	139,9	158,4	76,4	127,1	165,9	170,9	169,9	160,6	158,6	150,5	149,7
2006	150,2	140,3	161,4	161,8	172,1	167,9	169,0	167,2	160,9	159,2	150,7	153,4

Fuente: Propia.

Posteriormente, el cálculo de la evapotranspiración potencial ETP, se realizó a partir de la anterior y el coeficiente de escorrentía C_e .

Tomando en cuenta lo anterior para definir el C_e , al examinar el mapa de pendientes (ver Figura 5.31), se obtuvieron tres pendientes; una despreciable, para las zonas bajas, de 5%; otra para las zonas medias de 15% y la última para las zonas altas de 40%.

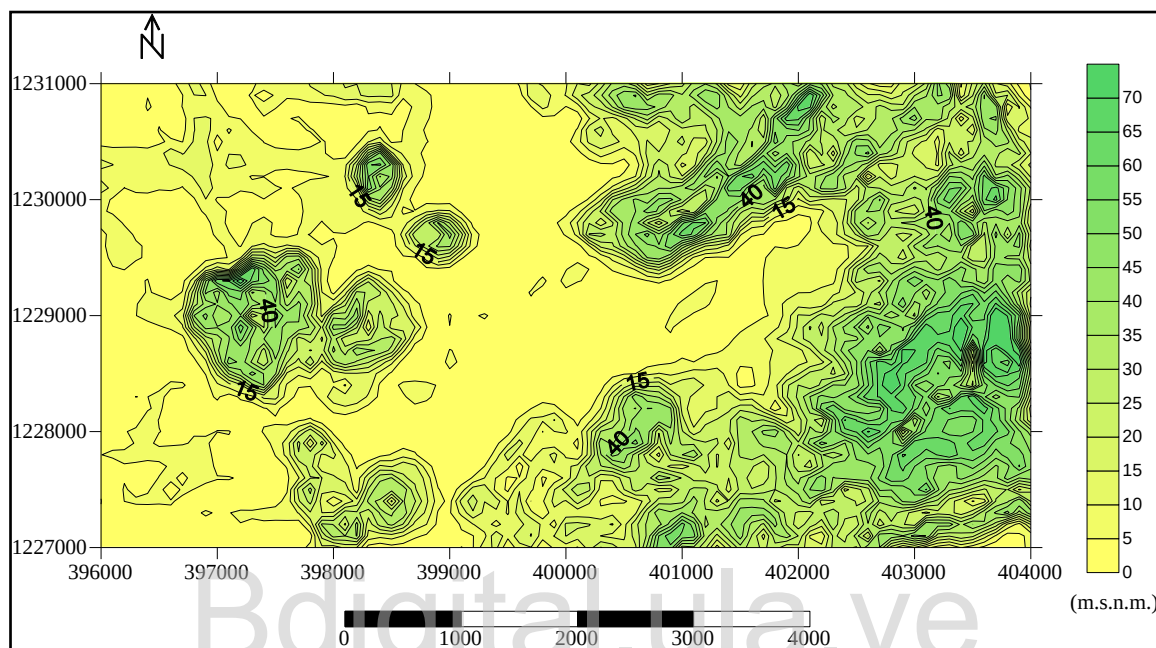


Figura 5.31.- Pendientes del Sector Pedro González-El Salado. Fuente propia.

El tipo cobertura vegetal observada en la zona fue, de pastos y vegetación ligera en las áreas de pendiente despreciable y media; y de hierbas y grama para las zonas de pendientes altas.

El tipo de suelo, en las zonas de despreciable y mediana pendiente, se observó impermeable y para las zonas de pendientes altas, el suelo observado es semipermeable, ya que en ellas se encuentran aflorantes los cuerpos rocosos fracturados y/o meteorizados. No obstante existen áreas pertenecientes a las pendientes despreciables con suelos permeables y semipermeables, aunque en mayor proporción se apreció la existencia de material impermeable, por tanto se decidió determinar el coeficiente de escorrentía para la peor situación de permeabilidad existente en la zona.

Tomando en cuenta lo anterior, el C_e para cada zona es, según la Tabla 5.5.:

Tabla 5.5.- Resultados de coeficientes de escorrentía.

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA Ce						
Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente del Terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		50%	20%	5%	1%	
Sin Vegetación	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
Cultivos	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
Pastos Vegetación Ligera	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
Hierba - Grama	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Bosques Densa Vegetación	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05



Zona baja



Zona media



Zona alta

Fuente: Modificado de fundamentos del ciclo hidrológico. José Leoncio Pérez Machado. 1976. UCV.

Al examinar la Tabla 5.5 se aprecia que se obtuvo para la zona baja, media y alta el mismo Ce, con un valor de 45%.

Ahora bien, con esta información se obtuvo la ETP (ver Tabla 5.6) y la escorrentía (ver Tabla 5.7)

Tabla 5.6.- Valores de ETP para el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006.

	ETP (mm)											
Año	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1986	81,4	75,2	85,1	84,4	89,9	87,0	89,9	88,9	84,2	84,4	78,1	82,3
1987	83,3	74,7	85,7	86,4	91,0	90,7	92,2	91,7	86,6	86,2	82,7	83,1
1988	84,7	77,0	88,6	86,2	92,5	90,4	93,2	90,5	86,9	88,3	81,1	76,3
1989	78,1	76,1	86,8	83,6	90,9	85,9	88,7	89,2	84,1	84,0	76,2	74,7
1990	75,2	71,4	83,7	85,8	90,8	88,1	91,1	90,3	86,9	86,2	81,2	81,8
1991	83,2	73,0	84,5	84,5	89,7	86,8	89,7	88,2	85,2	84,7	78,2	76,5
1992	77,7	71,4	82,8	86,3	93,0	89,5	91,3	92,0	84,4	86,9	81,4	79,3
1994	78,4	72,7	84,6	86,7	90,8	87,6	90,1	90,1	86,9	87,8	81,8	82,4
1995	78,5	75,3	86,0	87,1	93,9	89,5	92,5	92,4	86,4	86,9	82,2	83,1
1996	81,3	76,6	85,2	88,3	104,7	88,5	90,3	90,0	85,7	89,6	82,2	80,3
1997	80,7	73,1	84,4	87,0	93,7	82,4	86,0	87,5	88,7	85,3	81,4	81,8
2003	83,1	76,4	86,7	85,3	90,3	88,1	90,3	88,9	84,6	86,0	81,2	82,2
2004	83,1	76,6	87,6	86,4	91,5	88,1	93,0	88,8	84,6	86,4	82,4	82,6
2005	83,5	76,9	87,1	42,0	69,9	91,2	94,0	93,5	88,3	87,2	82,8	82,3
2006	82,6	77,2	88,8	89,0	94,7	92,3	93,0	92,0	88,5	87,6	82,9	84,4

Fuente: Propia.

Tabla 5.7.- Valores de escorrentía para el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006.

	Escorrentía (mm)											
Año	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1986	15,8	6,2	18,9	0,0	9,9	21,9	16,7	40,3	26,9	27,0	23,2	36,2
1987	6,1	0,1	2,3	0,0	32,4	33,2	69,0	61,3	12,5	7,1	31,1	52,1
1988	34,9	30,6	13,1	0,0	7,0	16,9	36,8	71,9	19,3	46,7	33,7	73,9
1989	20,4	23,0	15,8	2,6	0,1	68,6	14,8	9,0	14,8	31,1	61,0	30,6
1990	56,0	34,2	2,6	12,5	14,4	36,8	61,1	47,4	7,2	19,7	58,0	46,6
1991	30,0	10,8	7,6	7,5	1,4	21,4	25,6	23,2	16,0	16,1	116,1	101,5
1992	32,4	27,5	1,9	0,0	10,6	18,6	53,5	12,3	44,2	32,3	34,2	44,2
1994	10,2	15,6	0,1	3,1	8,9	8,6	17,1	4,2	0,9	22,3	8,6	5,3
1995	9,8	2,6	5,3	8,6	0,0	5,9	22,2	53,9	46,4	12,5	11,5	4,2
1996	14,8	2,7	0,0	0,0	9,6	15,4	24,9	7,0	21,0	5,9	10,2	29,3
1997	33,3	22,6	0,0	0,1	4,1	31,0	20,7	10,4	1,0	36,9	14,7	6,4
2003	1,8	3,1	0,0	0,0	3,6	17,5	17,9	19,6	9,3	4,6	62,3	17,6
2004	64,3	30,6	2,9	5,7	6,5	11,7	13,9	22,5	55,3	26,1	83,3	60,6
2005	45,8	19,7	1,8	1,6	0,7	17,4	17,9	29,0	13,5	48,0	56,3	110,6
2006	85,2	45,8	6,8	0,0	4,0	12,2	50,5	16,4	13,5	41,7	39,3	37,9

Fuente: Propia.

De este modo se obtuvo la evapotranspiración real ETR, que respondió a la condición:

Si $ETP > Pe$; $ETR = Pe + \text{almacenamiento}$

Si $ETP < Pe$; $ETR = ETP$

Tabla 5.8.- Valores de ETR real para el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006.

Año	ETR (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	19,3	7,6	23,1	0,0	12,1	26,7	20,4	49,3	32,9	33,0	28,4	44,2
1987	7,5	0,1	2,8	0,0	39,6	40,6	84,4	74,9	15,3	8,7	38,0	63,7
1988	42,7	37,4	16,1	0,0	8,6	20,7	45,0	87,9	23,5	57,1	41,1	76,3
1989	25,0	28,2	19,4	3,2	0,1	83,8	18,0	11,0	18,0	38,1	74,6	37,4
1990	68,4	41,8	3,2	15,3	17,6	45,0	74,7	58,0	8,8	24,1	70,8	56,9
1991	36,7	13,2	9,2	9,1	1,8	26,2	31,2	28,3	19,5	19,7	78,2	76,5
1992	39,5	33,6	2,3	0,0	13,0	22,7	65,4	15,1	54,1	39,5	41,7	54,1
1994	12,4	19,0	0,1	3,7	10,8	10,5	21,0	5,1	1,0	27,3	10,6	6,5
1995	12,0	3,2	6,4	10,6	0,0	7,3	27,2	65,9	56,7	15,3	14,1	5,1
1996	18,0	3,4	0,0	0,0	11,7	18,8	30,5	8,5	25,7	7,3	12,5	35,8
1997	40,7	27,7	0,0	0,1	5,1	37,8	25,2	12,7	1,3	45,2	17,9	7,8
2003	2,1	3,8	0,0	0,0	4,4	21,4	21,9	24,0	11,4	5,6	76,2	21,5
2004	78,5	37,5	3,6	6,9	8,0	14,2	17,0	27,5	67,6	32,0	82,5	74,0
2005	56,0	24,0	2,1	2,0	0,8	21,3	21,9	35,4	16,5	58,6	68,8	82,3
2006	82,6	56,0	8,3	0,0	4,8	15,0	61,8	20,0	16,5	50,9	48,1	46,3

Fuente: Propia.

Finalmente, la infiltración o recarga del acuífero por lluvias corresponde a los valores que se aprecian en la Tabla 5.9.

Los valores obtenidos de infiltración indican que no existe una recarga directa a el acuífero por precipitación, ya que la misma es muy baja, con un promedio para los 15 años en estudio de 14,6 mm/año. No obstante, existen períodos en los cuales podría presentarse esta recarga pero de forma mínima en las zonas que corresponden a un material permeable en las primeras capas o períodos en los cuales es totalmente inexistente.

Tabla 5.9.- Recarga por infiltración en mm/anuales en el sector de Pedro González – El Salado de 1986 al 2006.

Año	Recarga (mm)			
	<i>P (mm)</i>	<i>ETR (mm)</i>	<i>Esc (mm)</i>	<i>Infiltración (mm)</i>
1986	539,8	296,9	242,9	0,0
1987	682,6	375,4	307,2	0,0
1988	855,2	456,3	384,8	14,1
1989	648,6	356,7	291,9	0,0
1990	881,1	484,6	396,5	0,0
1991	838,1	349,7	377,1	111,3
1992	692,7	381,0	311,7	0,0
1994	232,9	128,1	104,8	0,0
1995	406,6	223,6	183,0	0,0
1996	312,9	172,1	140,8	0,0
1997	402,7	221,5	181,2	0,0
2003	349,5	192,2	157,3	0,0
2004	851,9	449,2	383,4	19,3
2005	804,7	389,8	362,1	52,8
2006	785,2	410,3	353,3	21,6
Promedio	619,0	325,8	278,5	14,6

Fuente: propia.

La recarga del acuífero está fuertemente influenciada por el carácter impermeable de la zona no saturada, así como de las condiciones climáticas debido a la aridez en el área de estudio, ya que existe un déficit hídrico durante la mayor parte del año, esto tomando en cuenta el periodo de tiempo considerado en esta investigación (1986-2006).

5.10.1.2.- Flujo subterráneo afluente.

El caudal que entra subterráneamente al acuífero del Sector Pedro González-El Salado, fue calculado con la ecuación de Darcy, donde se dividió en dos tramos la zona de recarga, esto por observaciones de campo, análisis fotogeológico, y los mapas topográfico y piezométrico, siendo ubicada al pie de monte de los Cerros La Chica y Tragaplata, al este y sureste del área de estudio, siguiendo la dirección de las líneas de flujo, tal como se aprecia en la línea roja de la Figura 5.32.

En este caso para el sector de Pedro González se empleó la campaña de medición del año 2007, por representar los datos más completos.

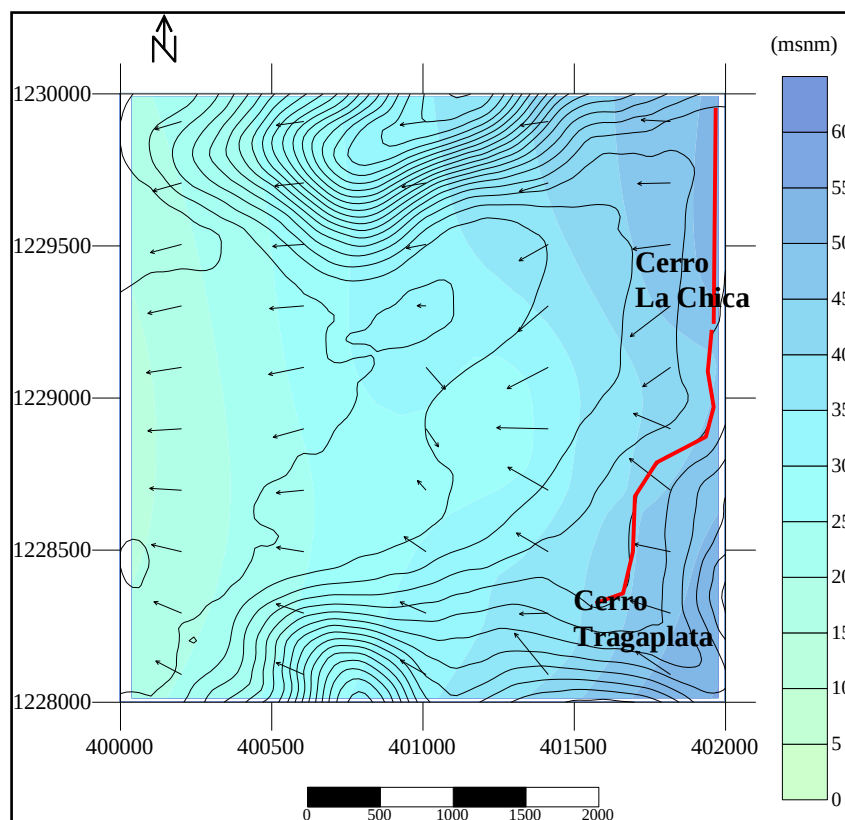


Figura 5.32.- Superposición de mapa topográfico, piezométrico y de líneas de flujo del sector Pedro González-El Salado. La línea roja indica la zona de recarga. 2007. Fuente propia.

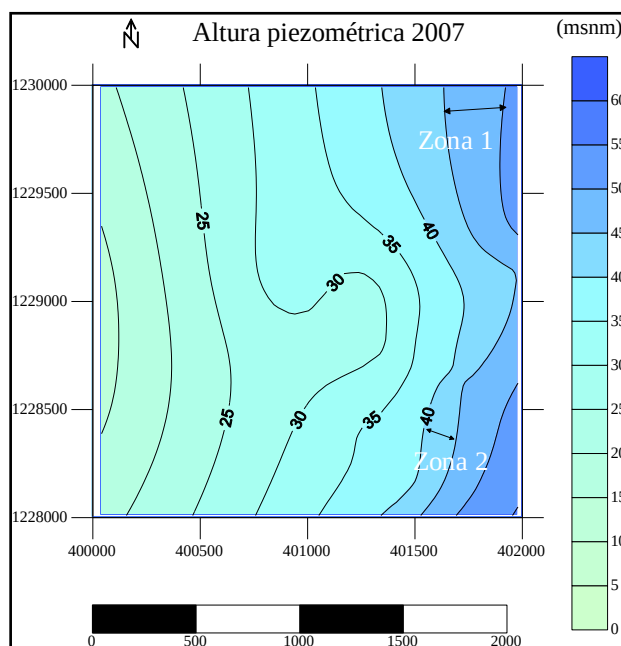


Figura 5.33.- Superficie piezométrica 2007 del sector Pedro González-El Salado. Fuente propia.

El gradiente hidráulico se calculó con dos curvas isopiezas (ver Figura 5.33), cuyas cotas fueron: para la zona 1, 50 y 45 msnm y una distancia entre ellas de 250 m y para la zona 2, 45 y 50 msnm y una distancia entre ellas de 187.5 m, ubicadas en la zona de recarga.

$$\text{Zona 1: } \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{50m - 45m}{250m} = 2 * 10^{-2} \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

$$\text{Zona 2: } \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{45m - 40m}{187.5m} = 2.67 * 10^{-2} \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

Resultando un gradiente de 2×10^{-2} para la zona 1 y 2.67×10^{-2} para la zona 2.

El área de recarga se calculó con el espesor medio del acuífero, el cual se tomó como un valor promedio de 15 m por observaciones de las secciones estratigráficas generadas y la longitud de la línea definida en función de las zonas de recarga (ver Figura 5.32).

Zona 1:

$$A = 724m * 15m = 10860m^2$$

Zona 2:

$$A = 1127m * 15m = 16905m^2$$

El valor tomado para la permeabilidad fue de 8×10^{-1} m/d, de la Tabla 4.5, ya que el material del acuífero corresponde a calizas, que aunque presentan una porosidad secundaria y no es válida la ley de Darcy se asumirá como válida para este acuífero fisurado.

Por tanto el caudal de recarga por flujo subterráneo afluente resultante a partir de la Ecuación 4.11 es:

$$\text{Zona 1: } Q = 173.76m^3 / d = 2.01l / s$$

$$\text{Zona 2: } Q = 361.09m^3 / d = 4.18l / s$$

$$Q = 534.85m^3 / d = 6.19l / s$$

5.10.1.3.- Descargas del acuífero.

El mapa de caudales representa la cantidad o volumen de agua que se extrae por medio de los pozos y esta expresado en litros por segundo (l/s). Atendiendo a estas consideraciones en la Figura 5.33 se puede decir que los mayores caudales en el año 2007 son extraídos al noreste y suroeste del área de estudio, donde se concentran el mayor número de pozos, convirtiéndose en la zona de mayor explotación de aguas subterráneas en el área, aunque en general, los valores de explotación son bajos, variando de 0,2 a 3 l/s. Es pertinente mencionar que estas aguas son utilizadas en su mayor parte para satisfacer las necesidades de sus propietarios, entre ellas uso doméstico y riego.

No obstante para el año 2008 se presentan los mayores valores en la región nor-central (ver Figura 5.35), aunque en general se aprecia una clara disminución de los caudales extraídos, con un rango que oscila entre 0,1 y 0,3 l/s.

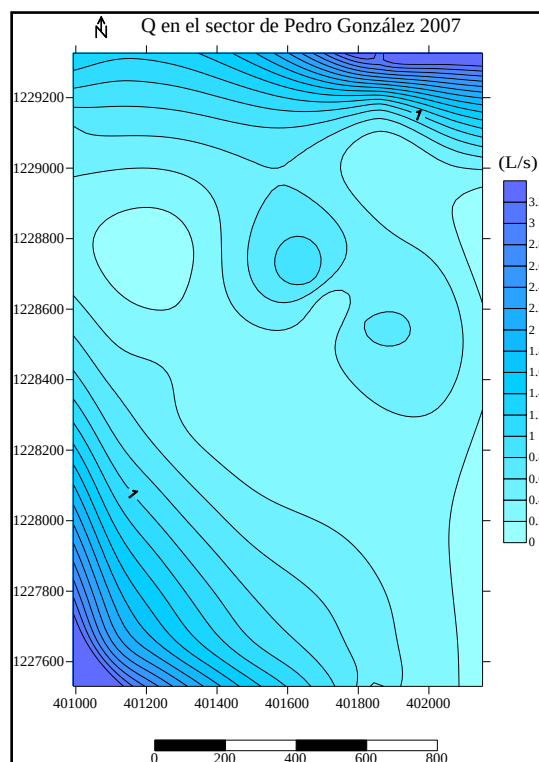


Figura 5.34.- Caudales en l/s extraídos en el sector Pedro González - El Salado para la campaña del año 2007. Fuente propia.

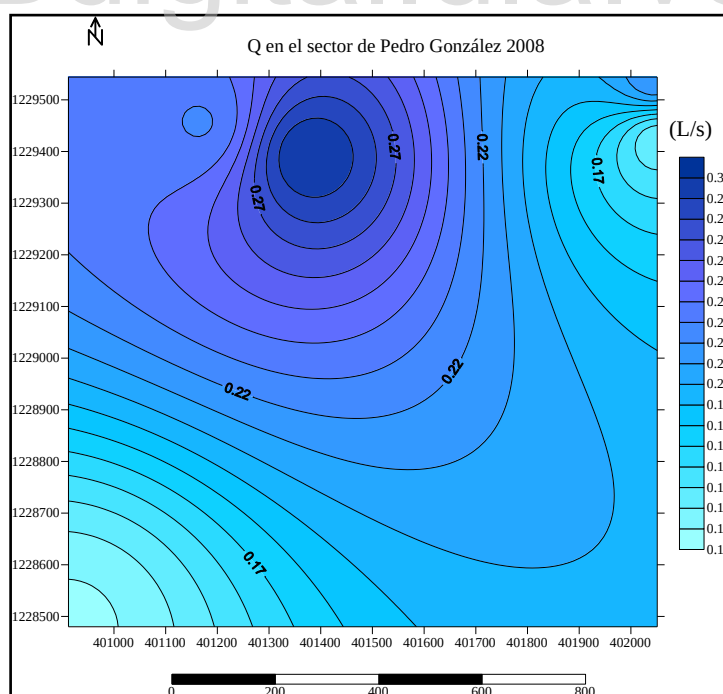


Figura 5.35.- Caudales en l/s extraídos en el sector Pedro González-El Salado para la campaña del año 2008. Fuente propia.

5.10.2.- La Fuente – Paraguachí.

5.10.2.1.- Balance Hídrico.

Tabla 5.10.- Datos de precipitación de la estación Paraguachí.

	Precipitación (mm)											
Año	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1986	39,2	8,8	48,4	0,0	18,8	43,2	30,8	58,0	27,6	57,6	45,8	69,0
1987	16,6	0,0	4,8	0,0	5,6	25,8	149,4	119,2	27,2	15,8	66,8	101,4
1988	82,2	33,6	33,0	0,0	13,8	32,0	79,2	81,2	13,4	71,6	56,2	132,8
1989	43,8	60,2	53,6	3,6	0,0	100,4	23,0	47,6	31,0	35,6	114,8	69,4
1990	111,8	31,0	5,0	36,6	8,4	62,2	65,2	38,4	9,2	21,2	45,2	58,2
1991	42,2	8,6	9,4	4,8	1,6	16,8	17,0	35,8	35,2	35,2	115,6	97,0
1992	12,8	25,6	3,2	0,0	27,2	41,0	67,4	5,0	37,8	39,8	35,6	42,4
1994	24,4	30,2	0,0	4,0	16,8	28,2	65,0	51,0	0,4	50,0	29,2	18,0
1995	35,7	2,8	11,6	13,2	0,0	9,6	54,4	120,8	118,3	98,0	36,2	44,0
1996	30,2	0,0	0,0	0,0	25,4	97,4	112,4	14,2	51,8	13,4	54,8	70,0
1997	89,0	52,0	0,0	0,0	0,8	66,8	26,8	21,4	1,8	34,4	23,6	17,0

Fuente: SINAIHME

Por medio del método de *Thornthwaite*, se calculó la evapotranspiración, determinando una serie de parámetros, entre ellos, índice de calor mensual e índice de calor anual (ver Tabla 5.11.).

Tabla 5.11.- Índice de calor mensual y anual en el sector La Fuente – Paraguachí.

	Índice de calor mensual												Índice de calor anual
Año	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	
1986	12,56	12,70	12,63	12,85	12,99	12,78	12,99	13,14	12,99	12,85	12,13	13,07	12,81
1987	13,21	12,56	12,85	13,50	13,36	13,94	13,72	14,02	13,80	13,43	13,65	13,36	13,45
1988	13,65	13,36	13,72	13,43	13,80	13,87	14,02	13,65	13,87	14,09	13,14	11,23	13,48
1989	11,50	12,99	13,14	12,56	13,28	12,42	12,63	13,21	12,92	12,70	11,50	10,68	12,46
1990	10,68	11,44	12,21	13,28	13,28	13,14	13,36	13,58	13,87	13,43	13,14	12,92	12,86
1991	13,14	11,92	12,42	12,85	12,92	12,70	12,92	12,92	13,28	12,92	12,13	11,23	12,61
1992	11,44	11,44	11,92	13,43	13,94	13,58	13,43	14,09	13,07	13,65	13,21	12,13	12,94
1994	11,64	11,85	12,49	13,58	13,28	12,99	13,07	13,50	13,87	13,94	13,36	13,14	13,06
1995	11,71	12,78	12,92	13,72	14,24	13,58	13,80	14,24	13,72	13,65	13,50	13,36	13,43
1996	12,56	13,21	12,70	14,09	17,73	13,28	13,14	13,50	13,50	14,54	13,50	12,49	13,69
1997	12,35	11,99	12,42	13,65	14,17	11,44	11,85	12,70	14,47	13,14	13,21	12,92	12,86

Fuente: Propia.

Luego, la evapotranspiración corregida ET_c, para meses reales y horas de sol máximas según la latitud, como se aprecia en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12.- Evapotranspiración corregida ETc en La Fuente – Paraguachí

	Evapotranspiración corregida (ETc)											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	148,0	136,7	154,8	153,5	163,4	158,1	163,4	161,7	153,1	153,5	142,1	149,5
1987	151,5	135,8	155,9	157,2	165,5	164,9	167,7	166,8	157,5	156,7	150,3	151,0
1988	154,0	140,0	161,0	156,7	168,1	164,4	169,5	164,6	158,0	160,5	147,5	138,6
1989	142,0	138,3	157,9	152,0	165,3	156,1	161,3	162,2	152,8	152,8	138,6	135,9
1990	136,8	129,9	152,2	156,0	165,2	160,2	165,6	164,3	158,0	156,8	147,6	148,7
1991	151,3	132,7	153,6	153,6	163,0	157,7	163,0	160,5	154,8	154,0	142,1	139,1
1992	141,3	129,9	150,5	156,8	169,1	162,8	166,0	167,3	153,5	158,0	148,0	144,2
1994	142,5	132,1	153,9	157,6	165,1	159,3	163,8	163,8	158,0	159,7	148,8	149,9
1995	142,8	136,9	156,3	158,4	170,8	162,7	168,1	168,1	157,1	158,0	149,5	151,0
1996	147,8	139,2	155,0	160,5	190,4	160,9	164,1	163,7	155,9	163,0	149,5	146,1
1997	146,8	132,9	153,5	158,1	170,4	149,8	156,3	159,1	161,3	155,1	148,0	148,7

Fuente: Propia.

Posteriormente, el cálculo de la evapotranspiración potencial ETP, se realizó a partir de la anterior y el coeficiente de escorrentía Ce. Tomando en cuenta lo anterior para definir el Ce, al examinar la Figura 5.36, se observa que las zonas de menor pendiente se encuentran al pie de los cerros, formando una especie de valle amplio entre ellos (La Fuente – Paraguachí), donde se encuentra uno de los acuíferos en estudio, el cual presenta una pendiente bastante baja y uniforme, considerándose de suave y de 5 %.

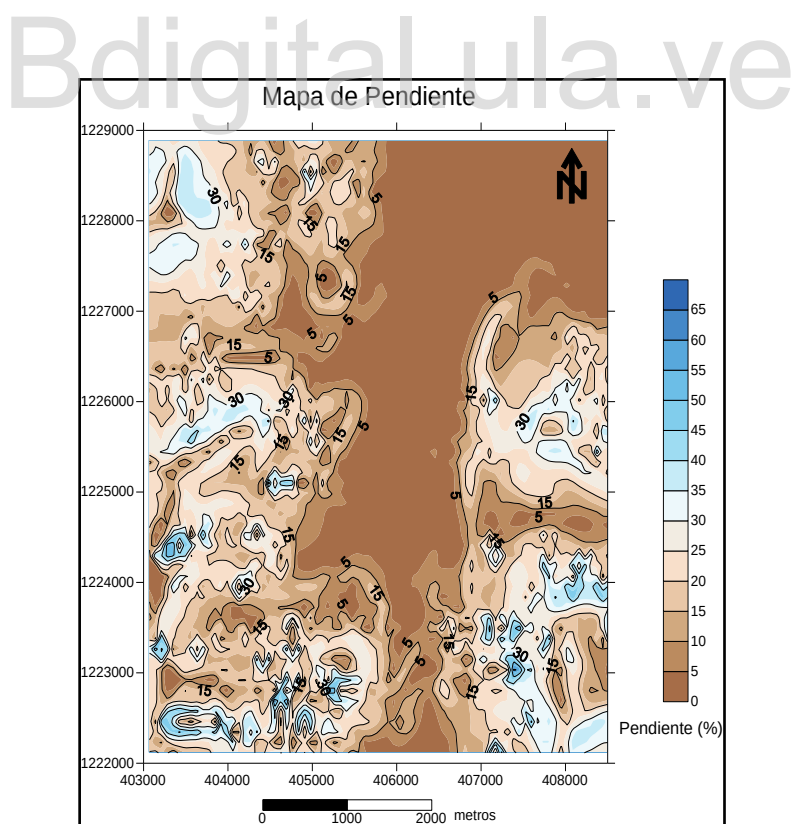


Figura 5.36.- Pendientes del sector La Fuente y Paraguachí. Tomado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

El tipo cobertura vegetal que se observó en la zona fue de pastos y vegetación ligera.

El tipo de suelo según las secciones generadas en el área de estudio y por observaciones en campo corresponde a impermeable, ya que según los SEV los dos primeros metros pertenecen a suelos arcillosos.

Tomando en cuenta lo anterior, el Ce para cada zona es, según la tabla 5.13 de 0.5:

Tabla 5.13. Resultados de coeficientes de escorrentía.

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA Ce						
Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente del Terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		50%	20%	5%	1%	
Sin Vegetación	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
Cultivos	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
Pastos Vegetación Ligera	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
Hierba - Grama	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Bosques Densa Vegetación	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

Fuente: Modificado de fundamentos del ciclo hidrológico. José Leoncio Pérez Machado. 1976. UCV.

Ahora bien, con esta información se obtuvo la ETP (ver Tabla 5.14) y la escorrentía (ver Tabla 5.15)

Tabla 5.14. Valores de ETP para La Fuente – Paraguachí de 1986 a 1997.

Año	ETP (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	74,0	68,4	77,4	76,8	81,7	79,1	81,7	80,8	76,6	76,7	71,0	74,8
1987	75,8	67,9	78,0	78,6	82,7	82,4	83,8	83,4	78,8	78,3	75,1	75,5
1988	77,0	70,0	80,5	78,4	84,1	82,2	84,7	82,3	79,0	80,2	73,7	69,3
1989	71,0	69,2	78,9	76,0	82,6	78,0	80,7	81,1	76,4	76,4	69,3	67,9
1990	68,4	65,0	76,1	78,0	82,6	80,1	82,8	82,1	79,0	78,4	73,8	74,4
1991	75,7	66,3	76,8	76,8	81,5	78,9	81,5	80,2	77,4	77,0	71,1	69,5
1992	70,7	64,9	75,2	78,4	84,5	81,4	83,0	83,6	76,7	79,0	74,0	72,1
1994	71,3	66,1	76,9	78,8	82,6	79,7	81,9	81,9	79,0	79,8	74,4	74,9
1995	71,4	68,5	78,2	79,2	85,4	81,4	84,1	84,0	78,6	79,0	74,7	75,5
1996	73,9	69,6	77,5	80,3	95,2	80,5	82,0	81,8	77,9	81,5	74,7	73,0
1997	73,4	66,5	76,8	79,0	85,2	74,9	78,1	79,5	80,6	77,6	74,0	74,4

Fuente: Propia.

Tabla 5.15.- Valores de escorrentía para el sector de La Fuente – Paraguachí de 1986 a 1997.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
1986	19,6	4,4	24,2	0,0	9,4	21,6	15,4	29,0	13,8	28,8	22,9	34,5
1987	8,3	0,0	2,4	0,0	2,8	12,9	74,7	59,6	13,6	7,9	33,4	50,7
1988	41,1	16,8	16,5	0,0	6,9	16,0	39,6	40,6	6,7	35,8	28,1	66,4
1989	21,9	30,1	26,8	1,8	0,0	50,2	11,5	23,8	15,5	17,8	57,4	34,7
1990	55,9	15,5	2,5	18,3	4,2	31,1	32,6	19,2	4,6	10,6	22,6	29,1
1991	21,1	4,3	4,7	2,4	0,8	8,4	8,5	17,9	17,6	17,6	57,8	48,5
1992	6,4	12,8	1,6	0,0	13,6	20,5	33,7	2,5	18,9	19,9	17,8	21,2
1994	12,2	15,1	0,0	2,0	8,4	14,1	32,5	25,5	0,2	25,0	14,6	9,0
1995	17,9	1,4	5,8	6,6	0,0	4,8	27,2	60,4	59,2	49,0	18,1	22,0
1996	15,1	0,0	0,0	0,0	12,7	48,7	56,2	7,1	25,9	6,7	27,4	35,0
1997	44,5	26,0	0,0	0,0	0,4	33,4	13,4	10,7	0,9	17,2	11,8	8,5

Fuente: Propia.

De este modo se obtuvo la evapotranspiración real ETR, que respondió a la condición:

Si $ETP > P_e$; $ETR = P_e + \text{almacenamiento}$

Si $ETP < P_e$; $ETR = ETP$

Tabla 5.16.- Valores de ETR para el sector de La Fuente – Paraguachí de 1986 a 1997.

Año	ETR (mm)											
	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1986	19,6	4,4	24,2	0,0	9,4	21,6	15,4	29,0	13,8	28,8	22,9	34,5
1987	8,3	0,0	2,4	0,0	2,8	12,9	74,7	59,6	13,6	7,9	33,4	50,7
1988	41,1	16,8	16,5	0,0	6,9	16,0	39,6	40,6	6,7	35,8	28,1	66,4
1989	21,9	30,1	26,8	1,8	0,0	50,2	11,5	23,8	15,5	17,8	57,4	34,7
1990	55,9	15,5	2,5	18,3	4,2	31,1	32,6	19,2	4,6	10,6	22,6	29,1
1991	21,1	4,3	4,7	2,4	0,8	8,4	8,5	17,9	17,6	17,6	57,8	48,5
1992	6,4	12,8	1,6	0,0	13,6	20,5	33,7	2,5	18,9	19,9	17,8	21,2
1994	12,2	15,1	0,0	2,0	8,4	14,1	32,5	25,5	0,2	25,0	14,6	9,0
1995	17,9	1,4	5,8	6,6	0,0	4,8	27,2	60,4	59,2	49,0	18,1	22,0
1996	15,1	0,0	0,0	0,0	12,7	48,7	56,2	7,1	25,9	6,7	27,4	35,0
1997	44,5	26,0	0,0	0,0	0,4	33,4	13,4	10,7	0,9	17,2	11,8	8,5

Fuente: Propia.

Finalmente, la infiltración o recarga del acuífero por precipitación se aprecia en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17.- Recarga por infiltración en mm/anuales.

Año	Recarga (mm)			
	<i>P (mm)</i>	<i>ETR (mm)</i>	<i>Esc (mm)</i>	<i>Infiltración (mm)</i>
1986	447,2	223,6	223,6	0,0
1987	532,6	266,3	266,3	0,0
1988	629,0	314,5	314,5	0,0
1989	583,0	291,5	291,5	0,0
1990	492,4	246,2	246,2	0,0
1991	419,2	209,6	209,6	0,0
1992	337,8	168,9	168,9	0,0
1994	317,2	158,6	158,6	0,0
1995	544,6	272,3	272,3	0,0
1996	469,6	234,8	234,8	0,0
1997	333,6	166,8	166,8	0,0
<i>Promedio</i>	464,2	232,1	232,1	0,0

Fuente: Propia.

Los valores obtenidos de infiltración indican que no existe una recarga directa a el acuífero por precipitación, ya que la misma es nula, razón por la cual los habitantes del sector se abastecen del agua proveniente de tierra firme, embalses Clavellinos y del sistema Turimiquire del estado Sucre, y del acuífero del sector. Además estos valores de precipitación se ven afectados por la ETR del lugar y la existencia de una capa impermeable superficial continua que recubre el acuífero, afectando la posibilidad que el agua penetre por infiltración, por esta razón se considera que la recarga del acuífero es por flujo subterráneo proveniente de los alrededores del sector.

5.10.2.2.- Recarga subterránea.

El caudal que se infiltra subterráneamente al acuífero de La Fuente - Paraguachí, fue calculado con la ecuación de Darcy.

La zona de recarga, que por observaciones de campo y análisis de mapas piezométricos y topográficos, se asume es la ubicada al pie de monte de los Cerros Guayamuri al este, Matasiete al sureste y el Cerro Mico al oeste (ver Figura 5.37), definiéndose así dos zonas para su cálculo, la zona 1, al este de La Fuente – Paraguachí y la zona 2, al oeste.

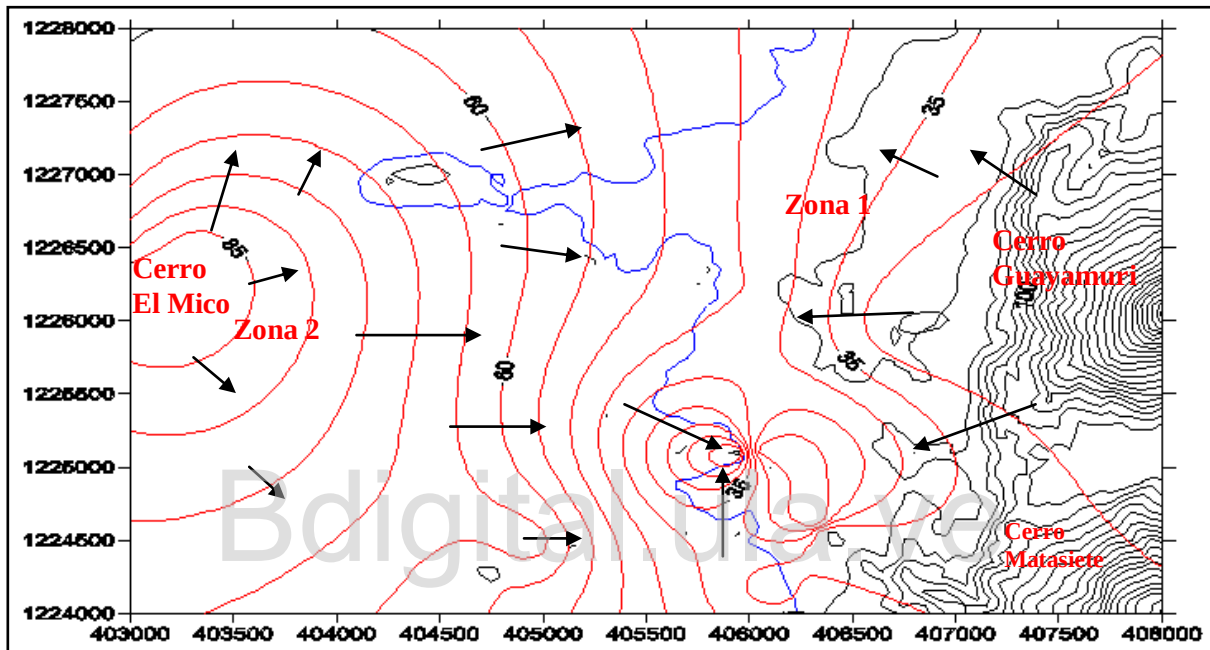


Figura 5.37- Mapa piezométrico para calcular el gradiente hidráulico. Modificado de Frías, L. (2007).

El gradiente hidráulico se calculó con dos curvas isopiezas (ver Figura 5.36), cuyas cotas fueron: para la zona 1, 35 y 30msnm y una distancia entre ellas de 500m y para la zona 2, 85 y 80msnm y una distancia entre ellas de 750m.

$$\text{Zona 1: } \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{35m - 30m}{500m} = 1 \times 10^{-2} \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

$$\text{Zona 2: } \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{85m - 80m}{750m} = 6,7 \times 10^{-3} \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

Resultando un gradiente de 1×10^{-2} para la zona 1 y $6,7 \times 10^{-3}$ para la zona 2.

El área de recarga se calculó con el espesor del material permeable, considerando las secciones geológicas del sector La Fuente – Paraguachí, con un promedio estimado en 28 m, valor que se diferencia notoriamente del empleado en Frías, L. (2007) que fue de 40,4 m. Respecto a la longitud del piedemonte por donde se supone la recarga, para la zona 1, se calculó en 8000m, y para la zona 2, 6000m, ubicados en las cercanías del cerro El Mico.

Zona 1:
 $A = 8000m * 28m = 224000m^2$

Zona 2:
 $A = 6000m * 28m = 168000m^2$

El valor tomado para la permeabilidad fue de 1m/d, de la Tabla 4.5, ya que los materiales del acuífero son depósitos fluviales (aluviones del cuaternario) que contienen arena limosa, arena y grava.

Por tanto el caudal de recarga por flujo subterráneo afluente resultante a partir de la Ecuación 4.11 es:

Zona 1: $Q = 2240m^3 / d = 25,91l / s$

Zona 2: $Q = 1120m^3 / d = 12,96l / s$

$Q = 38.87l / s$

Por tanto el caudal de recarga por flujo subterráneo afluente resultante es de 38,9 l/s.

5.10.2.3.- Descargas del acuífero

La litología o tipo de materiales presentes en el área del acuífero no reúne las características más adecuadas para que se realice la explotación de aguas subterráneas (sin embargo, son aprovechables para satisfacer las necesidades de los usuarios de los pozos), es por ellos que la producción de estos es tan baja, variando entre 0,2 a 2 l/s, siendo notablemente baja hacia la parte central, y los extremos noreste y suroeste del acuífero con valores entre 1,2 – 2,1 l/s (ver Figura 5.37).

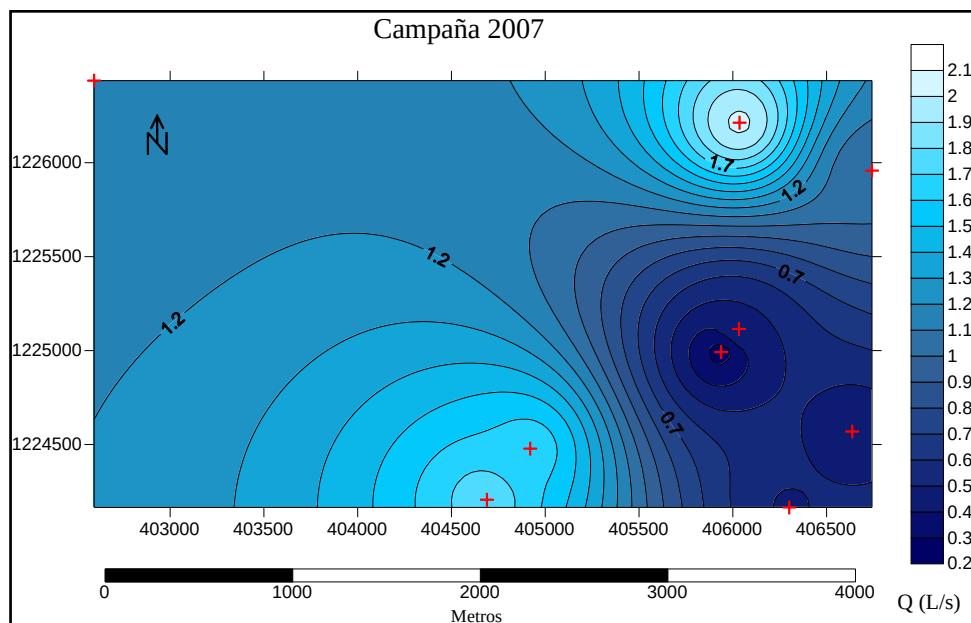


Figura 5.38.- Caudales de extracción para los pozos del sector La Fuente – Paraguachí de la campaña julio – 2007. Fuente: propia.

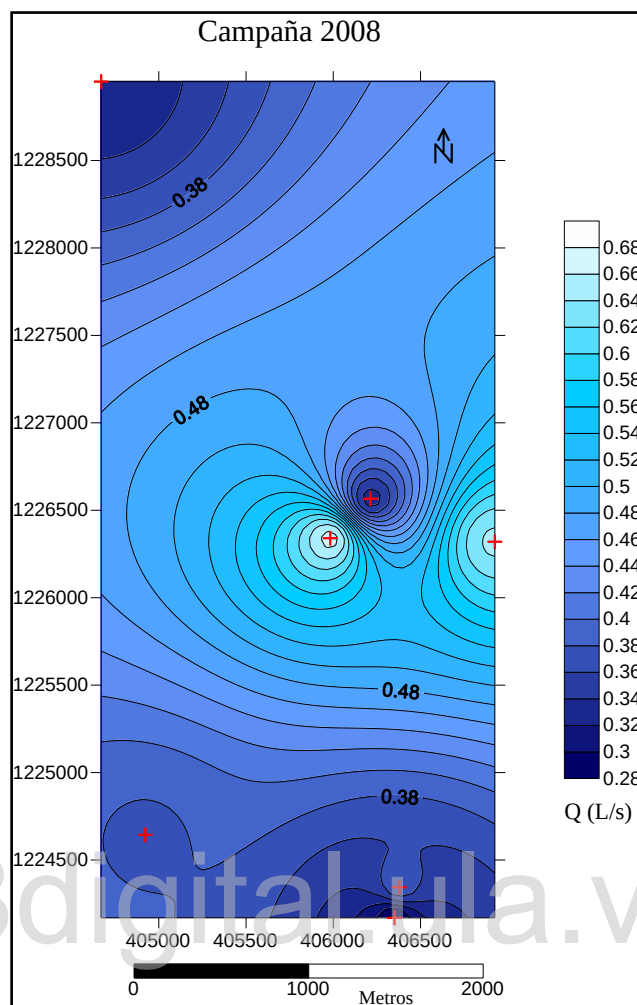


Figura 5.39.- Caudales de extracción para los pozos del sector La Fuente – Paraguachí de la campaña abril – 2008. Fuente: propia.

5.11.- Hidrología Isotópica:

5.11.1.- Sector de Pedro González El Salado, municipio Gómez.

A partir de la ubicación de los sitios de muestreo en el mapa topográfico del área en estudio (ver Figura 5.40) y el gráfico de la distribución isotópica de las muestras de agua del informe emitido por el laboratorio de Agua y Suelo CIDIAT – ULA (ver Tabla 5.18 y Figura 5.41) se pudieron obtener los siguientes resultados:

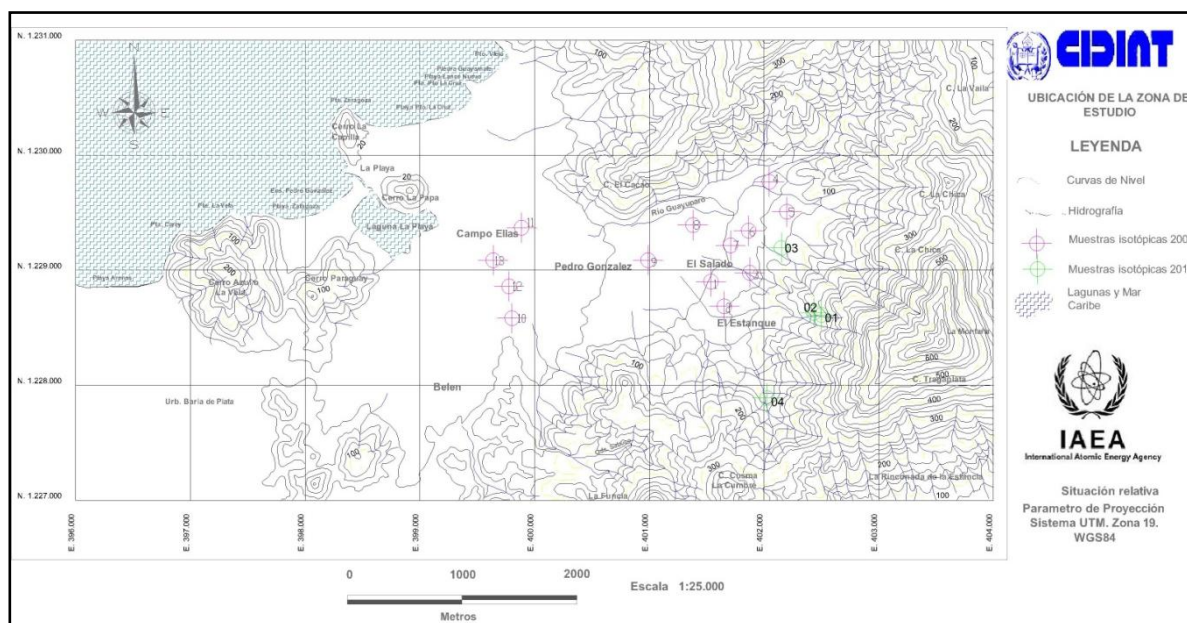


Figura 5.40.- Topografía del sector de Pedro González – El Salado, con la ubicación del muestreo isotópico para el año 2008 y 2010. Fuente propia.

Tabla 5.18.- Reporte de resultados de isótopos estables del agua en el sector de Pedro González El Salado, en el muestreo del año 2008.

#ID	d ² H‰ Valor reportable	d ² H‰ Desviación Estándar	d ¹⁸ O‰ Valor reportable	d ¹⁸ O‰ Desviación Estándar
1	-6,75	0,49	-1,75	0,06
2	-7,55	1,55	-2,23	0,06
3	-8,55	0,78	-2,45	0,17
4	-2,86	0,08	-1,28	0,32
5	-7,00	2,26	-1,99	0,1
6	-6,90	0,10	-2,36	0,01
7	-6,25	0,78	-1,81	0,11
8	-7,03	1,58	-1,89	0,42
9	-10,15	0,49	-1,98	0,71
10	-5,30	0,85	-1,9	0,11
11	-7,57	0,81	-1,63	0,08
12	-6,10	0,28	-1,43	0,04
13	-7,57	1,05	-1,46	0,05

Fuente: Laboratorio de Agua y Suelo, Coordinación de Programa de investigación, CIDIAT-ULA.

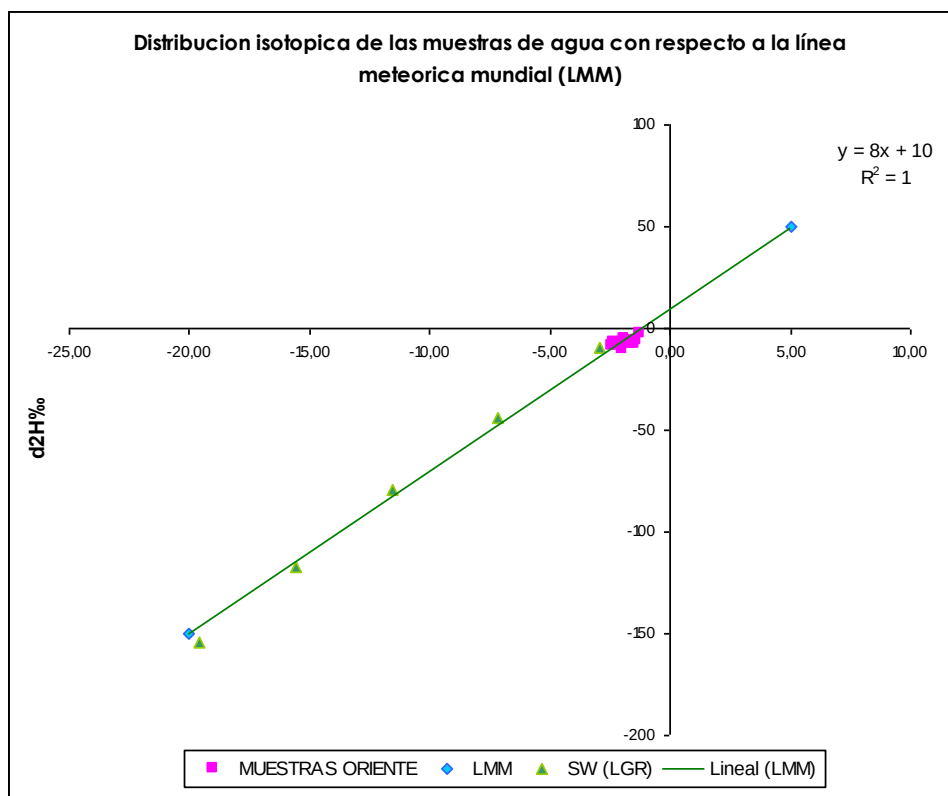


Figura 5.41.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2008 en el Sector de Pedro González. Fuente: propia.

En la figura 5.42 se aprecia de forma general que los grupos de la recta meteórica se distribuyen espacialmente en el tercer cuadrante, manteniendo sus características isotópicas. Por lo tanto, las entradas y salidas de características isotópicas similares corresponden a un mismo flujo de agua. En vista de esto, fue necesario modificar la escala del gráfico para apreciar las diferencias obteniéndose la siguiente discretización y por ende tipos de agua.

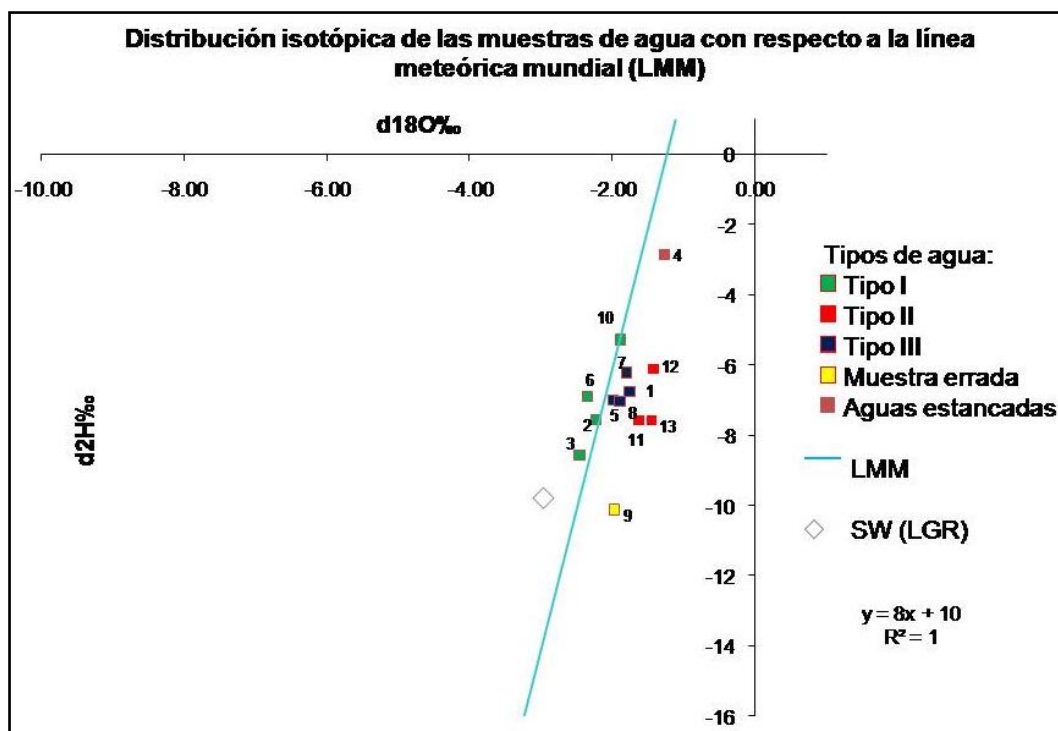


Figura 5.42.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2008 en el sector de Pedro González - El Salado. Fuente: propia.

Agua tipo I: corresponden a las muestras 2, 3, 6 y 10, son aguas de recarga local por encontrarse por encima de la LMM y comparándolas con la LML, indican que su recarga es por precipitación que se infiltran y forma parte del almacenamiento subterráneo.

Agua tipo II: Por otra parte las muestras 11, 12 y 13 expresan que son aguas evaporadas y aunque pudiesen generar incertidumbre, por observaciones de campo se aprecian que son aguas almacenadas en tanques receptores expuestas a la radiación solar, evaporadas, que luego se usan para riego e infiltran el suelo y forman parte del almacenamiento subterráneo, ya que en el área donde se encuentran estos pozos corresponden en superficie a capas de material permeable.

Agua tipo III: las muestras 1, 5, 7 y 8 son una mezcla entre aguas de precipitaciones locales y las evaporadas (tipo II). A diferencia de la I08-9 que presenta un comportamiento errado ya que según la Figura 5.42 correspondería a aguas con comportamiento geotermal, pero por su ubicación en el área de estudio según la hipótesis planteada deberían ser de recarga local, por tanto esta muestra se descartó para el análisis por la imprecisión de su resultado, considerando un desacierto en el muestreo o inexactitud en los análisis del laboratorio. Y la muestra identificada con el código 4 corresponde a aguas estancadas y según información en campo es un pozo abandonado.

Para corroborar los datos del 2008 se analizó el reporte emitido por el laboratorio para el año 2010 (ver Tabla 5.19) obteniendo los siguientes resultados mostrados en la figura 5.43.

Tabla 5.19.- Reporte de resultados de isótopos estables del agua en el sector de Pedro González El Salado, en el muestreo del año 2010.

#ID	$d^2 H\text{‰}$ Valor reportable (por mil)	$d^2 H\text{‰}$ Desviación Estándar	$d^{18} O\text{‰}$ Valor reportable (por mil)	$d^{18} O\text{‰}$ Desviación Estándar
I10-01	-6,95	0,07	-2,30	0,27
I10-02	-7,73	0,21	-2,70	0,06
I10-03	-8,83	0,10	-2,46	0,02
I10-04	-6,26	0,68	-2,29	0,10

Fuente: Laboratorio de Agua y Suelo, Coordinación de Programa de investigación, CIDIAT-ULA

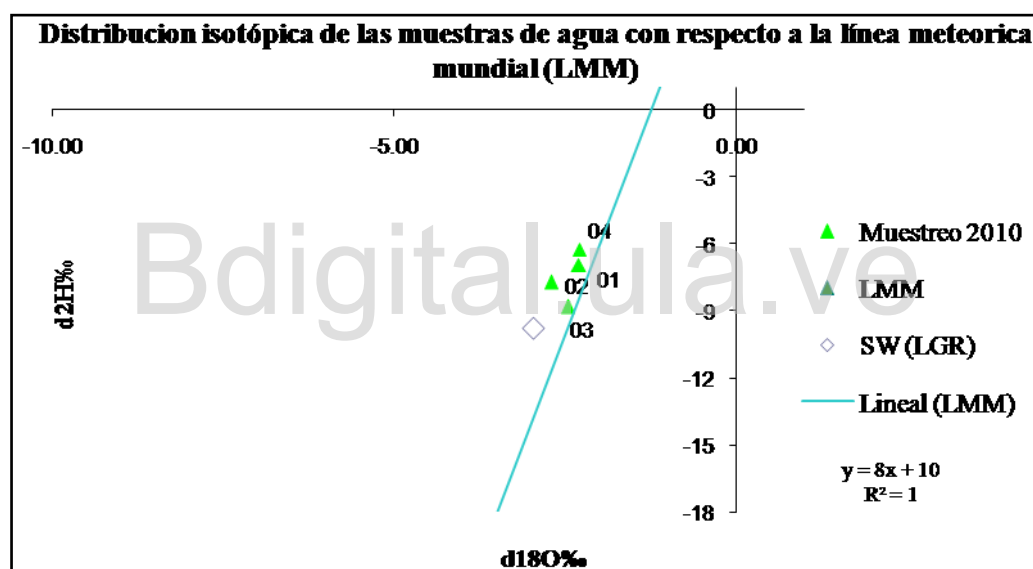


Figura 5.43.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2010 en el sector de Pedro González. Fuente: propia.

En la Figura 5.43 se puede apreciar que corresponde a un mismo tipo de agua, corroborando la idea que el acuífero de Pedro González se recarga por precipitación.

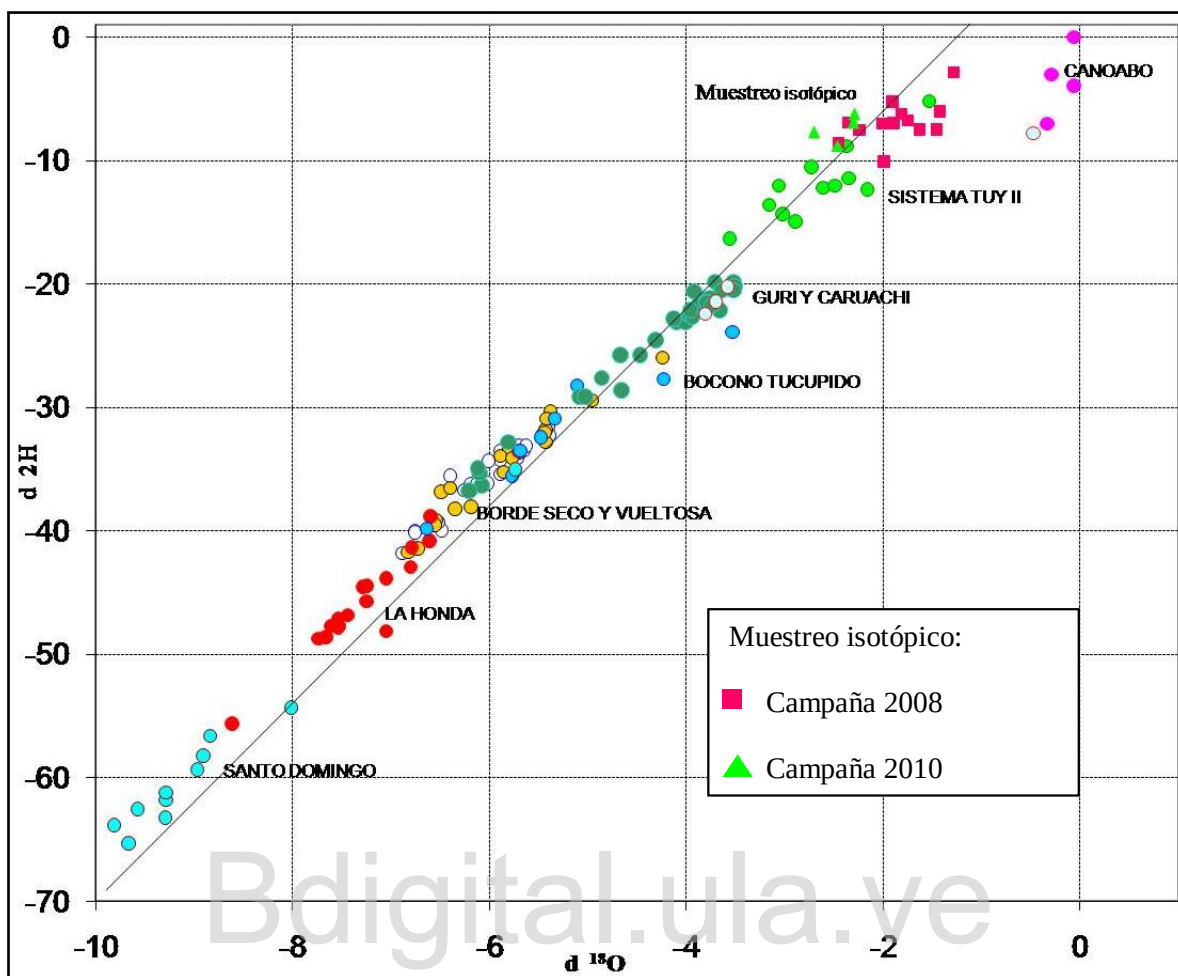


Figura 5.44.- Ubicación del muestreo isotópico del año 2008 y 2010 en Pedro González en el gráfico de la composición isotópica de las aguas en presas y embalses de Venezuela, proyecto VEN 8/016.

Ubicando las muestras obtenidas en Pedro González y comparándolas con la composición isotópica de la LML elaborada con las muestras tomadas en presas y embalses de Venezuela (ver Figura 5.44), esta agua corresponde al Sistema Tuy II, específicamente al embalse de Taguaza, quien se encuentra a una cota de 290 m. Definiendo que la recarga del acuífero de Pedro González se produce por precipitación y posterior infiltración a esta cota de elevación, es decir, la recarga no se produce en la zona de estudio sino a una elevación mayor y luego por flujo subterráneo llega hasta el sector estudiado.

5.11.2.- Sector La Fuente – Paraguachí, municipio Antolín del Campo.

Respecto al informe emitido por el laboratorio de Agua y Suelo CIDIAT – ULA (ver Tabla 5.20) y el gráfico de la distribución isotópica de las muestras de agua (ver Figura 5.45) se pudo constatar lo siguiente.

Tabla 5.20.- Reporte de resultados de isótopos estables del agua en el sector La Fuente – Paraguachí, en el muestreo del año 2008.

#ID	$d^2 H\text{‰}$ Valor reportable (por mil)	$d^2 H\text{‰}$ Desviación Estándar	$d^{18} O\text{‰}$ Valor reportable (por mil)	$d^{18} O\text{‰}$ Desviación Estándar
1	-8.6	0.754983444	-1.71	0.05
2	-13.05	1.060660172	-3.24	0.09
3	-9.9	0.848528137	-2.08	0.06
4	-10.95	0.070710678	-2.74	0.18
5	-11	0.424264069	-1.53	0.06
6	-4.65	0.353553391	-1.37	0.03
7	-2.1	0.848528137	-0.83	0.05
8	-11.25	0.777817459	-1.96	0.02
9	-9.4333333	0.929157324	-1.62	0.27
10	-13.4333333	0.709459888	-2.34	0.25
11	-14.4	0.989949494	-2.97	0.35
12	-11.85	0.636396103	-2.06	0.16
13	-11.55	0.494974747	-1.92	0.20
14	-10.2333333	0.945163125	-1.61	0.15
15	-8.4	0.707106781	-1.20	0.18
16	-11.45	1.909188309	-1.94	0.22
17	-8.6733333	1.627923012	-2.19	0.07
18	-7	0.707106781	-1.93	0.26
19	-8.75	0.070710678	-1.41	0.24
20	-7	0.707106781	-1.81	0.66

Fuente: Laboratorio de Agua y Suelo, Coordinación de Programa de investigación, CIDIAT-ULA.

Visualizando la figura 5.45 se observó que la gran mayoría corresponden a aguas evaporadas, situación que no debería presentarse en el sector, lo cual nos indica el posible error en el protocolo de muestreo, debido a la presencia de burbujas en el envase colector al momento de recolectar las muestras, el transporte de las mismas del sector a Mérida, donde se encuentra el laboratorio y el tiempo que esperaron para ser analizadas. Razones por las cuales estos datos no serán analizados ya que pudieron evaporarse en los envases de recolección por lo que se recomienda realizar una nueva campaña de muestreo isotópico en este sector.

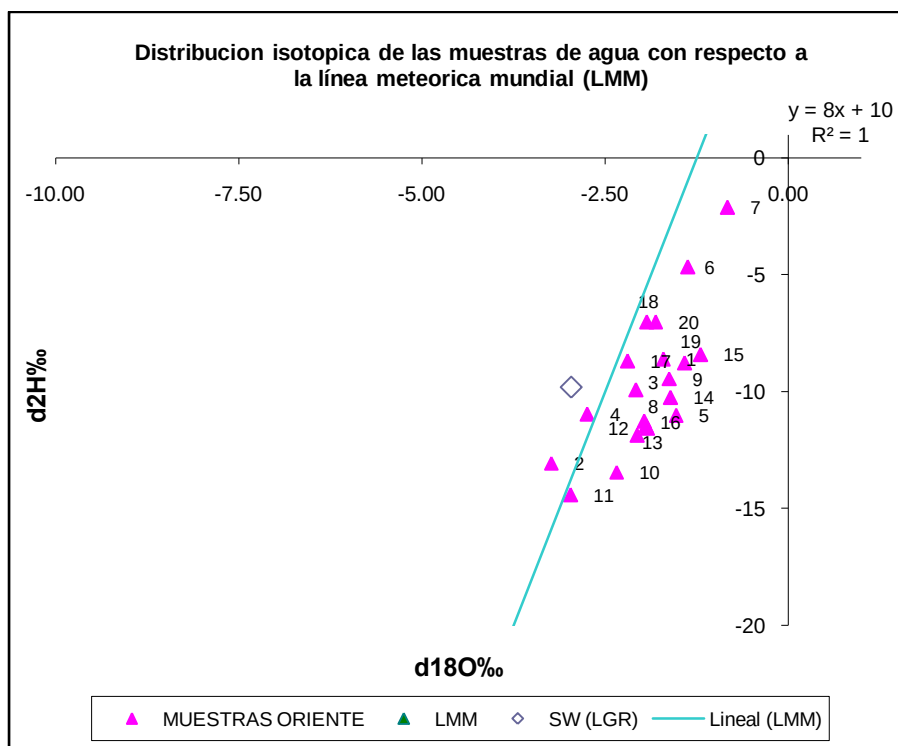


Figura 5.45.- Distribución isotópica de muestras de agua de la campaña del 2008 en el sector La Fuente - Paraguachí. Fuente: propia.

5.12.- Mapas hidrogeoquímicos.

5.12.1.- Sector Pedro González – El Salado.

5.12.1.1.- CE.

Debido a que se tienen valores de conductividades eléctricas en pozos de 6 campañas de medición, se presenta en la Figura 5.46 esta recopilación para comparar cada una de ellas y tener una idea del comportamiento general en la zona y su evolución en el tiempo.

Se observa en el mapa de la campaña del 2001 que la conductividad eléctrica oscila de modo general en un rango de 1000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$, sin embargo se denotan dos puntos de interés, uno por debajo de ese rango, que corresponden a aguas de manantial con valores de 289 y 338 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ y los mayores valores que se presentan al norte del área en estudio superando los 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$. Se aprecia que la mayoría de las campañas presentan valores dentro del intervalo de fondo. En el año 2005, 2007, 2008 y 2009, se evalúa un progresivo aumento de la CE con una distribución de estos mayores valores al norte y suroeste del área en estudio, a diferencia del 2006 donde se visualizan los mayores rangos de CE al noreste y suroeste del sector.

Sin embargo, llama la atención el aumento de la conductividad en pozos ubicados en las zonas de menor topografía con un intervalo de 3000 a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y la existencia de valores anómalos en pozos que no están cercanos a la costa con conductividades mayores a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

De acuerdo a los resultados al noroeste del área indican que el aumento de la de CE posiblemente se deba a su cercanía a la costa.

De una manera general, la conductividad de las aguas en el sector Pedro González-El Salado ha aumentado en el transcurso del tiempo, a pesar que la distribución de las aguas más conductivas ó menos conductivas ha variado su posición en la zona.

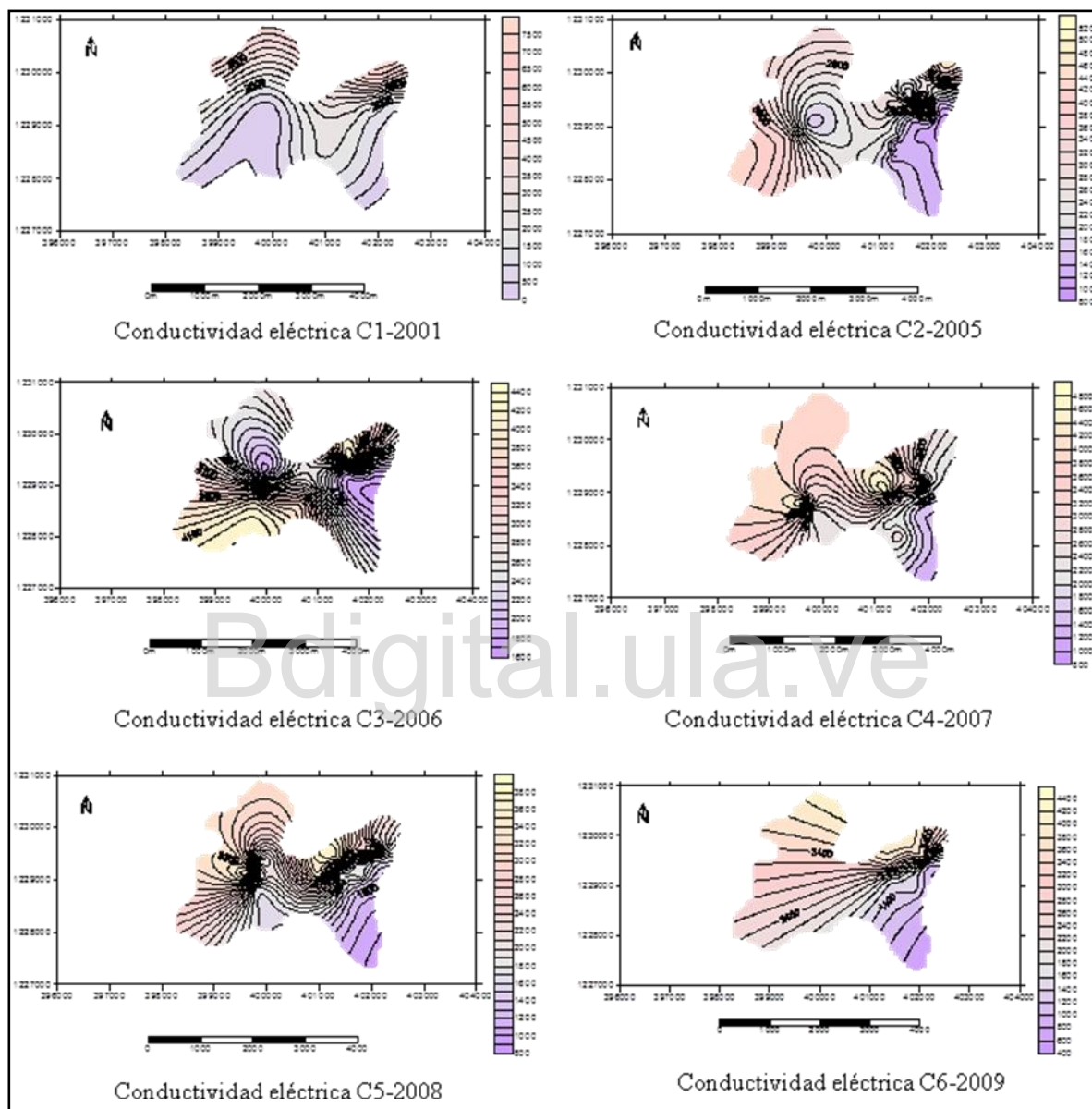


Figura 5.46.- Conductividad eléctrica en el sector de Pedro González – El Salado para las campañas del 2001, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009. Fuente propia.

Con esta orientación se visualiza en la Figura 5.47 la variación de la CE en la campaña de 2008, donde existen altos valores, en un rango de 3000 a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en zonas alejadas de la costa, de 2000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los puntos topográficamente más altos y los menores valores entre 1000 y 2000 distribuidos en la zona del muestreo. Situación que se explica con detalle en el Apartado 5.15.

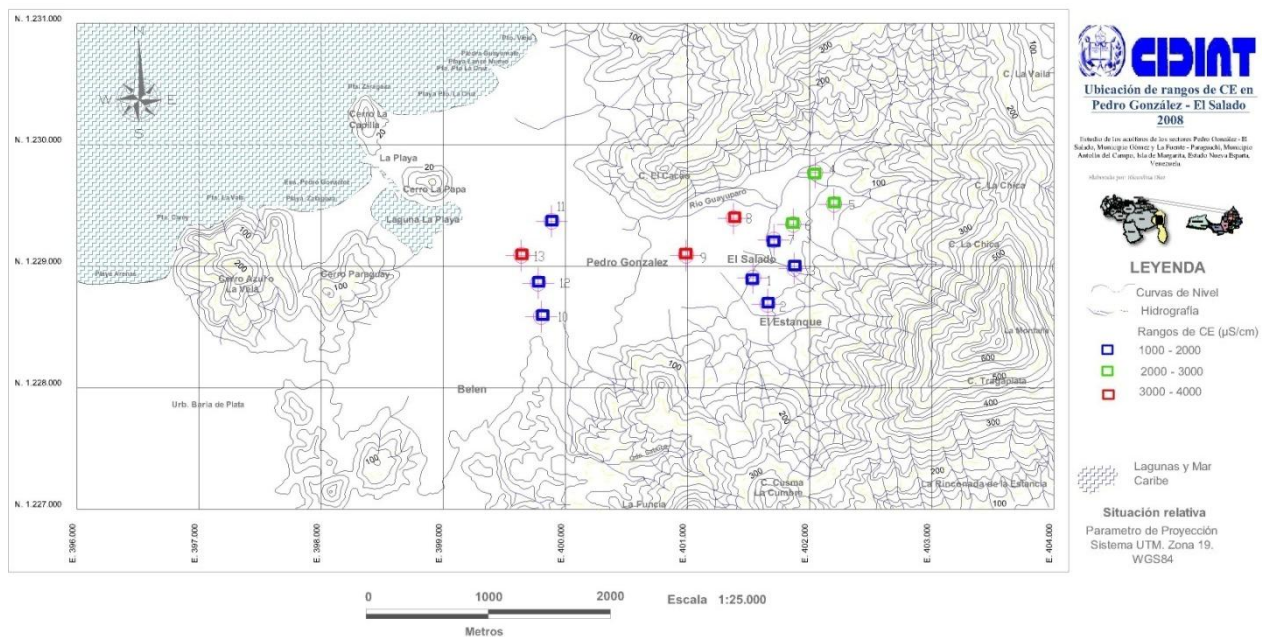


Figura 5.47.- Variación de la CE en el sector de Pedro González – El Salado para las campañas del 2008. Fuente propia.

5.12.1.2.- pH.

La Figura 5.48 permite visualizar el pH medido en diversas campañas donde en términos generales se aprecia que se mantiene dentro del rango aceptable y permisible, donde las aguas más básicas se presentan al este de la zona. Además, se observa que los valores de pH disminuyen a través del tiempo, alcanzando aguas con pH de 7.1 a 7.3 en la actualidad.

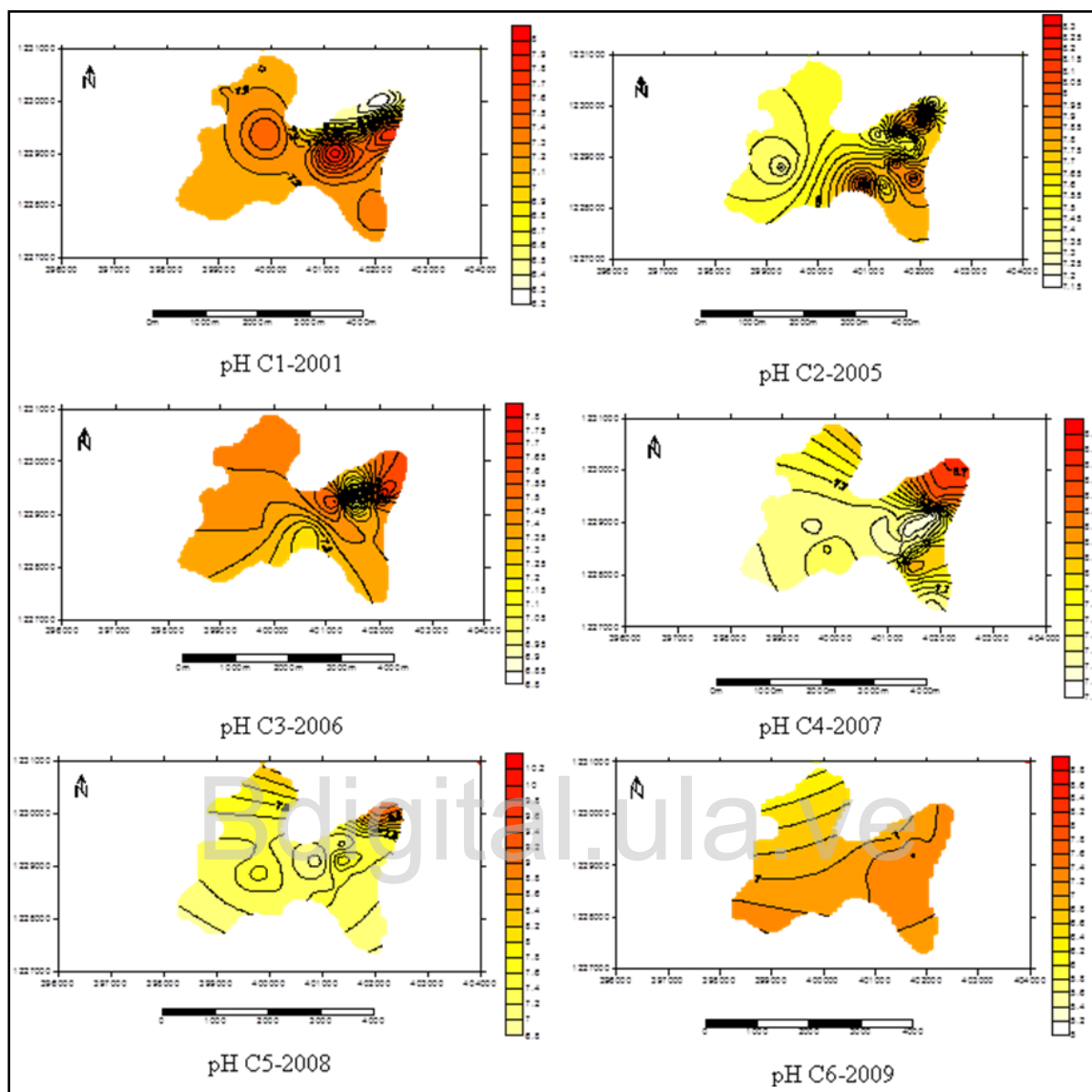


Figura 5.48.- ph presentados en las campañas de 2001, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009 en el sector de Pedro González – El Salado. Fuente propia.

5.12.1.3.- Salinidad.

Al examinar los mapas presentados en la figura 5.49, cabe destacar como a través de los años ha existido un aumento notorio de la salinidad en el Sector de Pedro González – El Salado, ubicando sus mayores valores al norte del área en estudio.

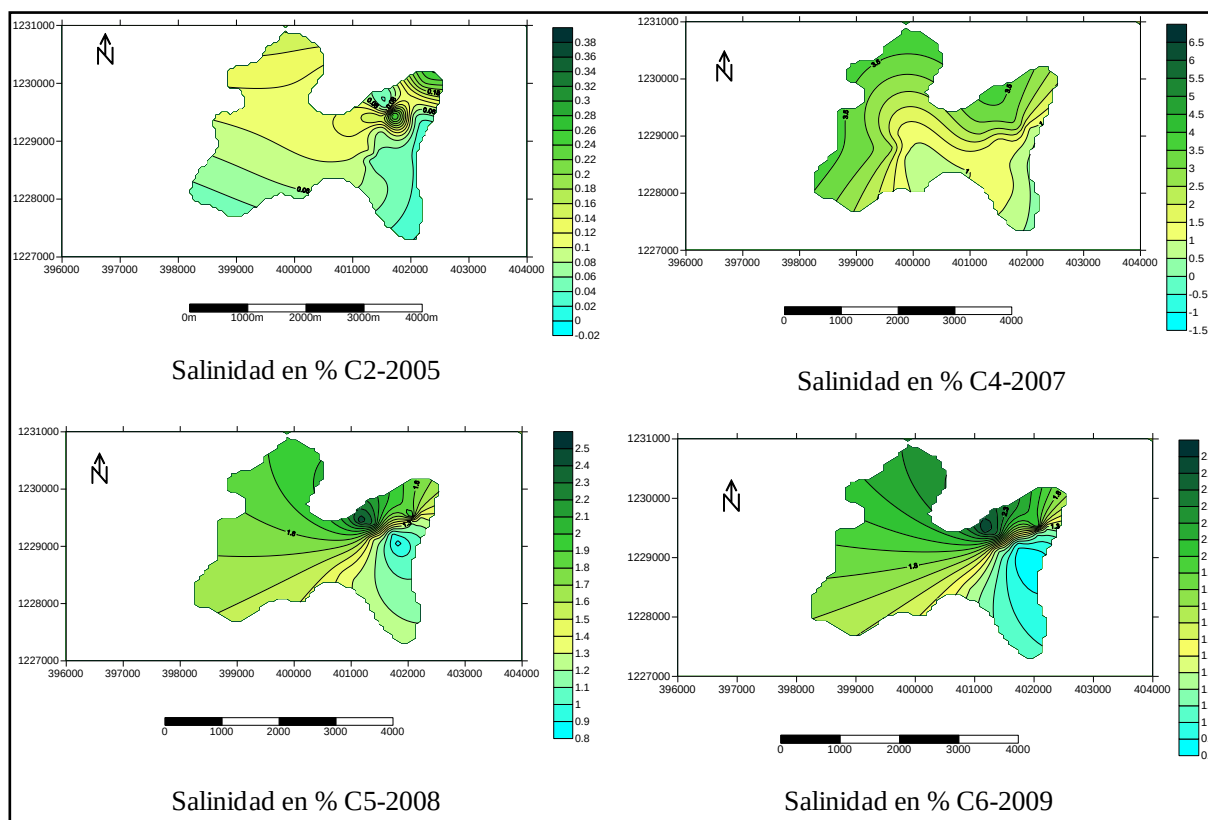


Figura 5.49.- % de salinidad en el sector de Pedro González – El Salado para las campañas del 2005, 2007, 2008 y 2009. Fuente propia.

5.12.2.- Mapas hidrogeoquímicos sector La Fuente – Paraguachí.

5.12.2.1.- CE.

Los mapas de CE que se aprecian en la Figura 5.50 permiten distinguir la variación a lo largo de las distintas campañas recopiladas, específicamente en los años 2005, 2006, 2007 y 2008.

Para la campaña 2005 los valores se encuentran en el orden de 1330 – 3520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente (ver Figura 5.50). Siendo el sector Paraguachí la zona donde se presentan los valores más elevado, posiblemente se deba a su proximidad a la costa, trayendo como consecuencia que el agua dulce este siendo contaminada por agua proveniente del mar, sin embargo, hacia la población de La Fuente se muestran algunos valores elevados de CE, que ya no pudieran estar asociados a la intrusión de agua del mar, por su lejanía, sino a la presencia de minerales en solución proveniente de las rocas que se encuentran en la zona.

Respecto a la campaña 2006 no presenta cambios bruscos respecto a la campaña anterior (2005), oscilando entre 1255 – 4010 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrándose los más elevados en la zona de Paraguachí.

En el 2007 se presenta, en general, una disminución en los valores, comparándolos con los mostrados en la campaña de 2006, los cuales se encuentran comprendidos en un rango de 1307 – 3400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Para la campaña 2008 a diferencia del anterior muestra un alza en los valores de conductividad eléctrica, presentándose estos en pozos alejados de la línea de costa, donde posiblemente no exista influencia de la intrusión marina, sino de la disolución de minerales presentes en las rocas altamente alteradas que afloran en esta zona (ver Figura 5.50).

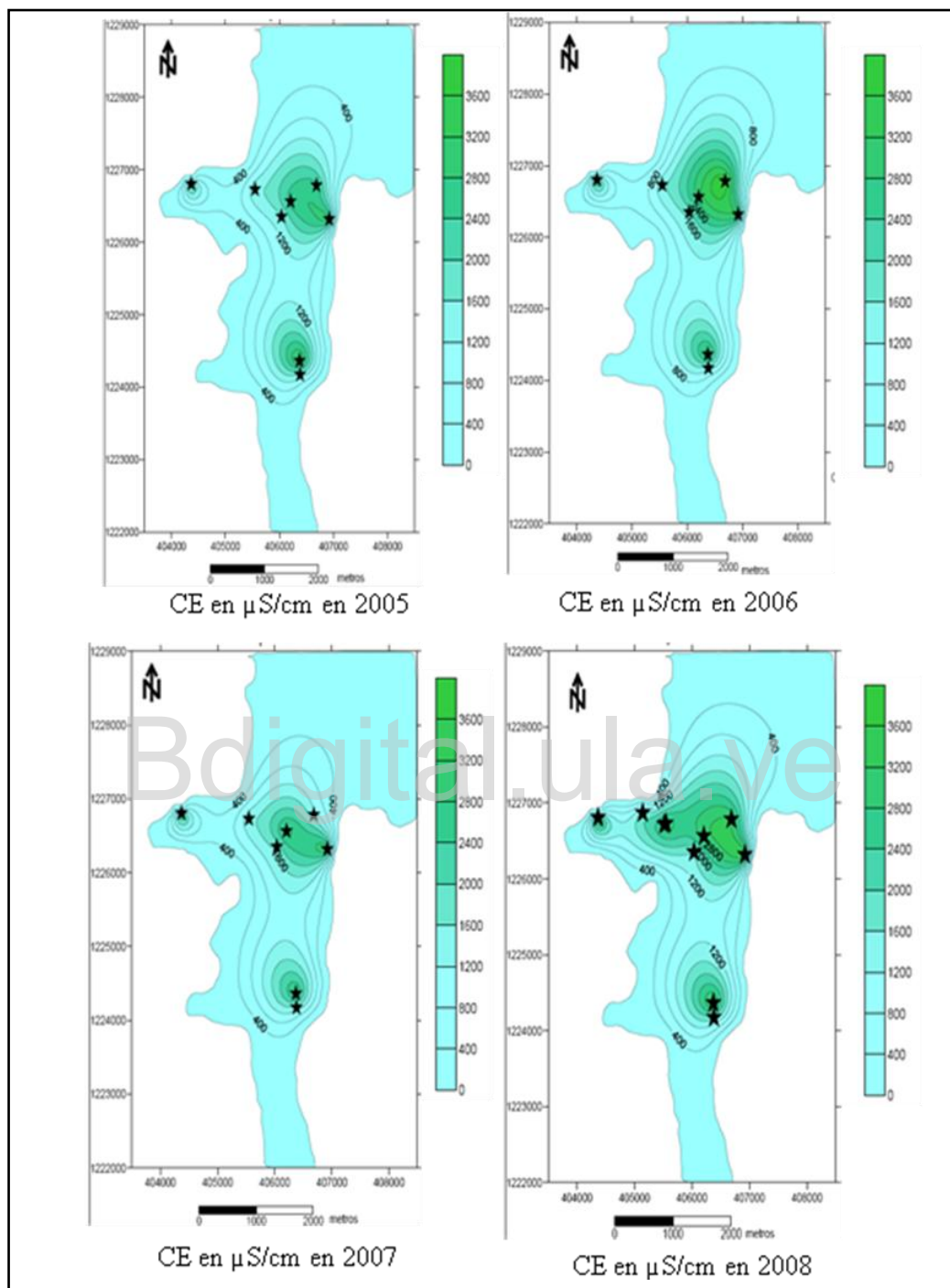


Figura 5.50.- CE en el sector de La Fuente Paraguachí para las campañas del 2005, 2006, 2007 y 2008. Modificado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

5.12.2.2.- pH.

Los valores de pH en el sector muestran una variación entre 6.3 y 8.0 con fluctuaciones dentro de ese rango para los años de campaña, con pH neutros que tienden a la alcalinidad, producto del HCO_3^- .

Cabe destacar que como la recarga es por flujo subterráneo la variación de pH pudiera obedecer a la composición mineralógica del material.

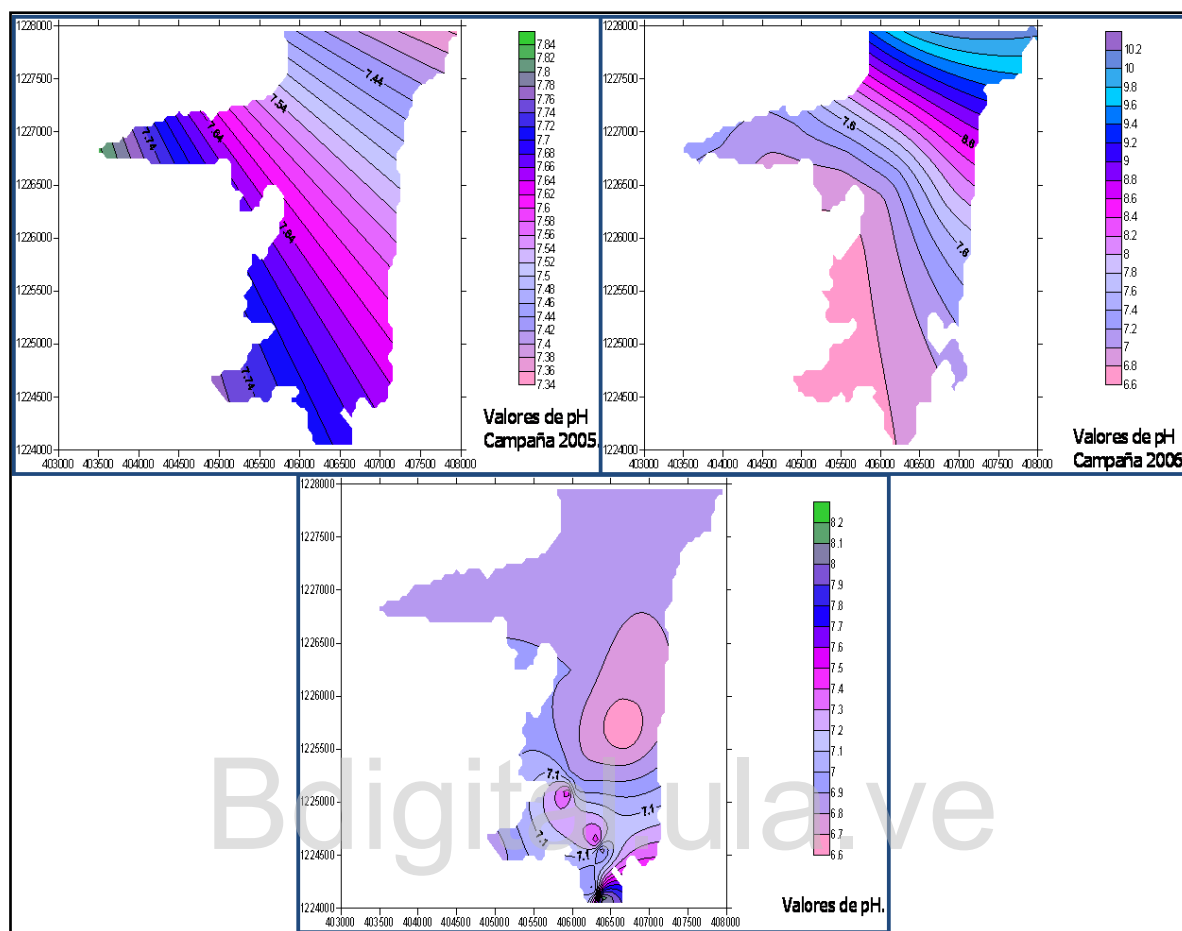


Figura 5.51.- pH en el sector de La Fuente - Paraguachí para las campañas del 2005, 2006 y 2007.

5.13.- Diagramas hidroquímicos.

Los estudios físico-químicos del agua son un instrumento imprescindible para la determinación de la calidad del agua, ya que sirven para identificar y cuantificar muchas características y la posible aparición de contaminantes. Debido a que en el área en estudio, el agua subterránea es utilizada para riego y consumo humano, se realizaron diferentes análisis, los cuales permitirán tener un amplio y completo conocimiento de los parámetros evaluados y así ofrecer una mejor interpretación de la calidad del agua en la zona de estudio, siendo presentados y analizados a continuación.

5.13.1.- Pedro González – El Salado.

Con esta orientación el diagrama de Piper del sector Pedro González - El Salado (ver Figura 5.52), muestra que las aguas del acuífero son de tipo cloruradas magnésicas, con la particularidad de los pozos C3-1, C3-3, C3-8, que son bicarbonatadas magnésicas y los pozos C3-10, C3-13, C3-14 y C3-16 que corresponden a cloruradas sódicas.

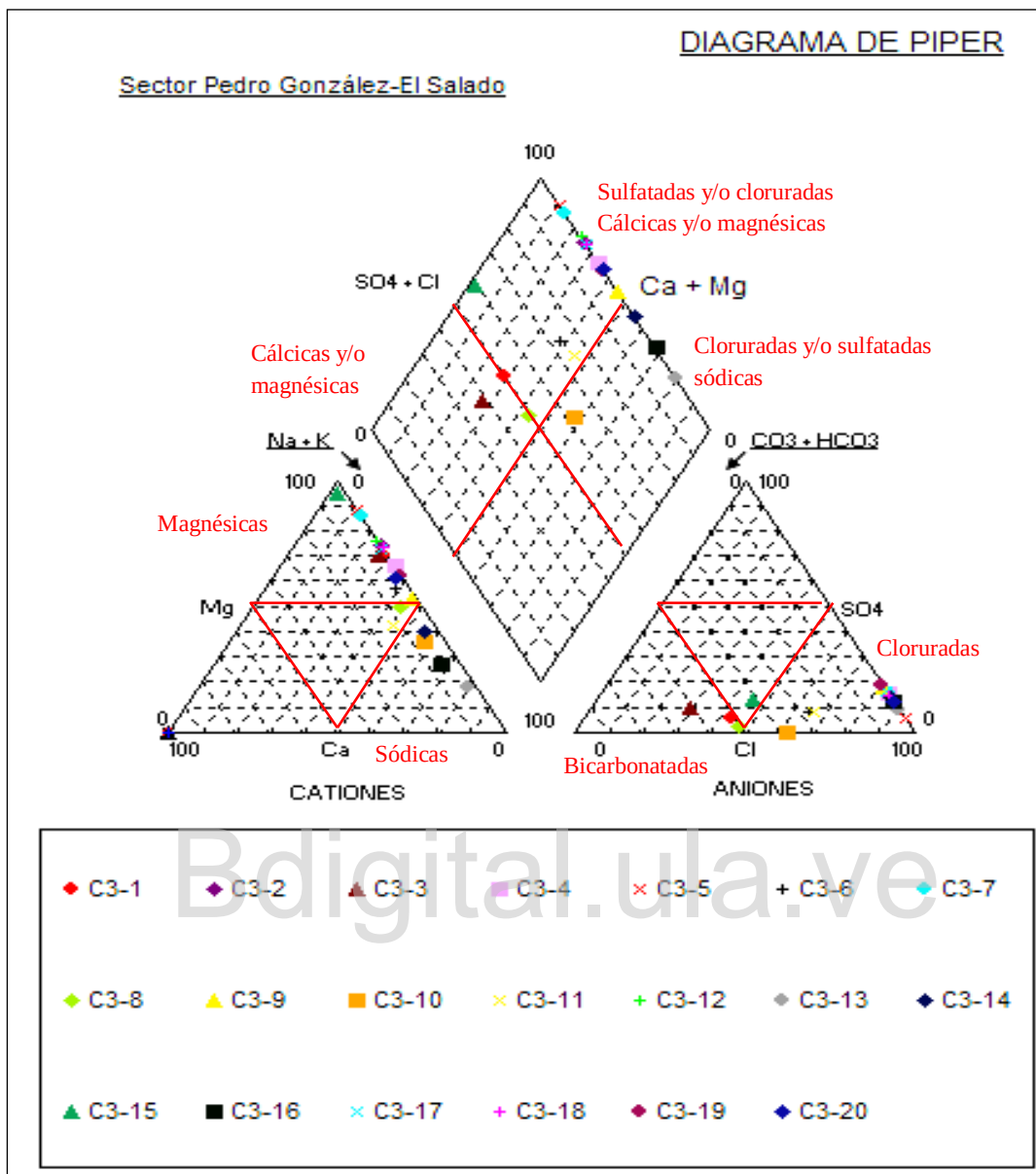


Figura 5.52.- Resultado del diagrama de Piper para aguas del sector Pedro González - El Salado. Campaña C3- 2006. Fuente: propia.

Estas agua son el resultado de procesos de interacción agua – roca sobre diversos tipos de materiales, en el caso de las cloruradas magnésicas, podría sugerir la influencia en materiales ultramáficos además de sales cloruradas sobre la composición de las aguas subterráneas o incluso podría ser producto de procesos de mezcla de aguas jóvenes con aguas más antiguas.

Respecto a las bicarbonatadas magnésicas, de acuerdo con Jalali (2005), este grupo de aguas posiblemente debe su alto contenido en magnesio a los procesos de interacción agua-roca sobre materiales ultramáficos, mientras que los iones de bicarbonato podrían estar siendo incorporados por procesos de recirculación en estas agua, permitiendo de esta manera que haya mayor interacción entre

el agua y la atmósfera lo cual según el autor es sostenible con los registros de Eh obtenidos en la zona que confirman las condiciones oxidantes en dicho sistema.

Las aguas tipo bicarbonatadas magnésicas, provienen de los altos topográficos donde están presente rocas máficas que hacen un importante aporte de magnesio en solución, además de considerables adiciones del CO₂ de la atmósfera, y disolución de rocas del Grupo Juan Griego compuestas en parte por minerales de calcita de las cuales adquieren su características química de aguas bicarbonatadas (por la lixiviación de los carbonatos).

Por otra parte, las aguas de tipo cloruradas sódicas, se dividen en dos grupos, las muestras C3-10 y C3-16 que fueron captadas en pozos lejanos a la costa y adyacentes a una unidad litológica del Gneis de Guayacán, la cual está compuesta principalmente de minerales félsicos y entre ellos plagioclasa sódica, la cual por procesos de meteorización podría estar influyendo en la composición química en esta agua. Y, las muestras C3-13 y C3-14 que deban su composición a su cercanía a la costa, los cuales posiblemente tengan influencia de las aguas marinas.

Es conveniente destacar que el grupo de aguas clorurada magnésica está asociado con altas concentraciones de nitrato que implican la presencia de contaminación por riego y actividad antrópica propia de las zonas de agricultura en el área de estudio debido a lo estipulado en el decreto 883 emitido por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. El nitrato es una especie altamente soluble en el agua la cual no es absorbida por minerales de arcilla en los suelos incluso tiene capacidad para lixiviar gradiente abajo a lo largo de la trayectoria de flujo del agua subterránea y bajo condiciones aeróbica (Cardona et al., 2004).

El diagrama de Schoeller (ver Figura 5.53) muestra la misma composición del diagrama de Piper, pero representado en un diagrama de columnas verticales, en las que las mayores concentraciones se encuentran en los iones de magnesio y cloruro. Este alto contenido en magnesio, probablemente procede de la continua disolución de los minerales que conforman la litología de las cabeceras (rocas ígneas ultramáficas) donde ocurre la infiltración inicial, además de la influencia de los complejos rocosos de origen ígneo los cuales contienen ciertos minerales que podrían aportar cantidades apreciables de cloruros, aunado a la influencia de un proceso de aporte local, mezcla con aguas marinas y disolución de evaporitas en algunos sectores.

En un estudio de la variación de la concentración del ión cloruro en función de la distancia al borde costero tomado de Rodríguez (2000) en la cuenca Pedro González (ver Figura 5.54) la tendencia es muy clara, se observa un aumento de la concentración de cloruros a medida que se acerca a la línea de costa, o si se quiere una disminución de la cantidad de cloruros a medida que nos acercamos a los altos topográficos.

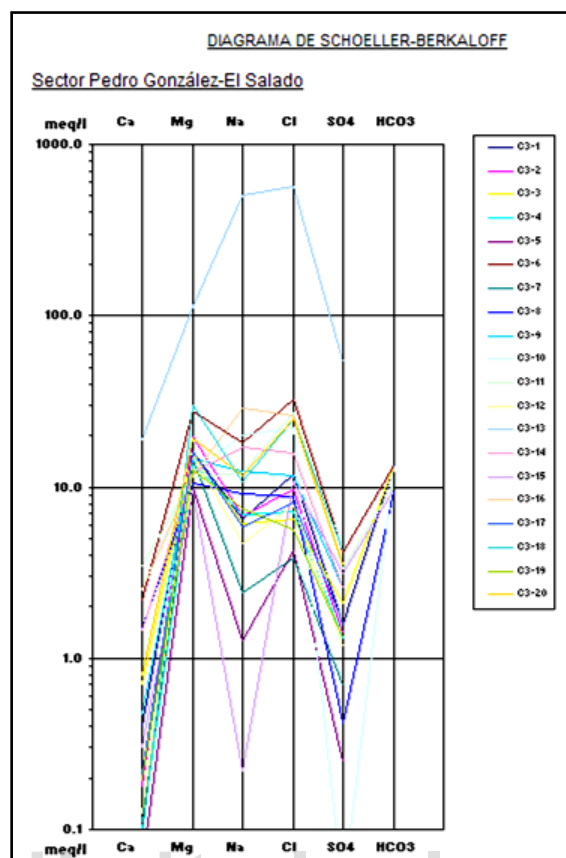


Figura 5.53.- Resultado del diagrama de Shoeller - Berkaloff para aguas del sector Pedro González-El Salado. Campaña C3 - 2006. Fuente: propia.

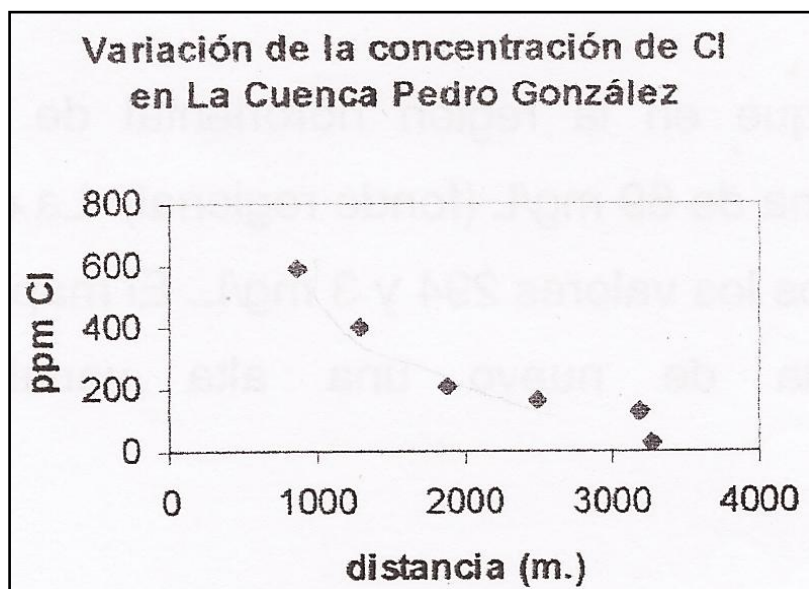


Figura 5.54.- Variación de la concentración de cloruros en función de la distancia al borde costero en la cuenca Pedro González. Rodríguez (2000)

El diagrama de Wilcox (ver Figura 5.55), se distinguen 4 grupos de agua en el Sector Pedro González-El Salado, uno C3-S1 que corresponde a alto peligro de salinización del suelo pero bajo peligro de alcalinización. Y el resto se ubican en muy alto peligro de salinización del suelo y bajo, medio y alto peligro de alcalinización del suelo.

De este modo esta agua no debe usarse en suelos de drenaje deficiente y los cultivos deben ser muy tolerantes a las sales. En algunos sectores deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario, específicamente en aquellos de textura fina (arcillosos y franco – arcillosos). Además son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo, esto para aquellos lugares donde el peligro de alcalinización del suelo va de medio a alto.

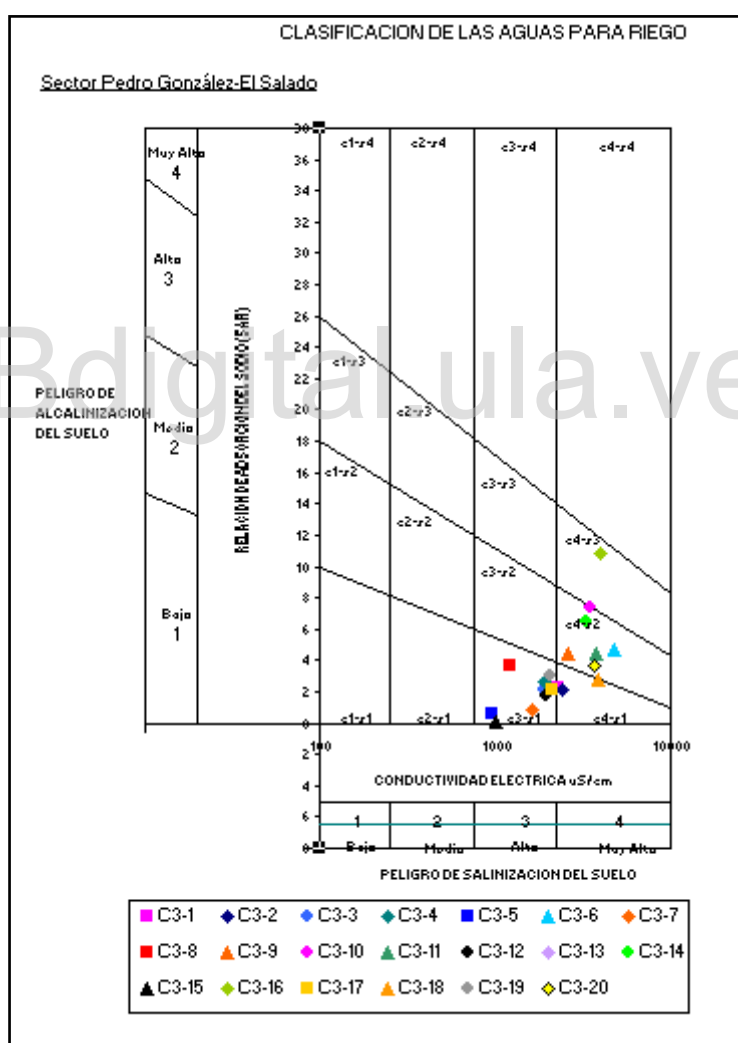


Figura 5.55.- Resultado del Diagrama de Wilcox en el sector Pedro González - El Salado. Campaña C3 – 2006. Fuente: propia.

5.13.2.- La Fuente – Paraguachí.

En la Figura 5.56 se identifican la tipificación de las aguas presentes en el sector La Fuente – Paraguachí de las campañas 2005, 2006 y 2007, donde para el año 2005 en función al Diagrama de Piper se clasifican en cloruradas magnésicas a excepción de una muestra la P9 que corresponde a bicarbonatada magnésica.

Igualmente en la campaña 2006 se clasifican en cloruradas magnésicas a excepción de las muestras P5, P6, P7, P8 y P9 que corresponden a bicarbonatadas magnésicas.

Y en el año 2007 se clasifican en bicarbonatadas magnésicas a excepción de las muestras P1, P2, P4, y P12 que corresponden a cloruradas magnésicas.

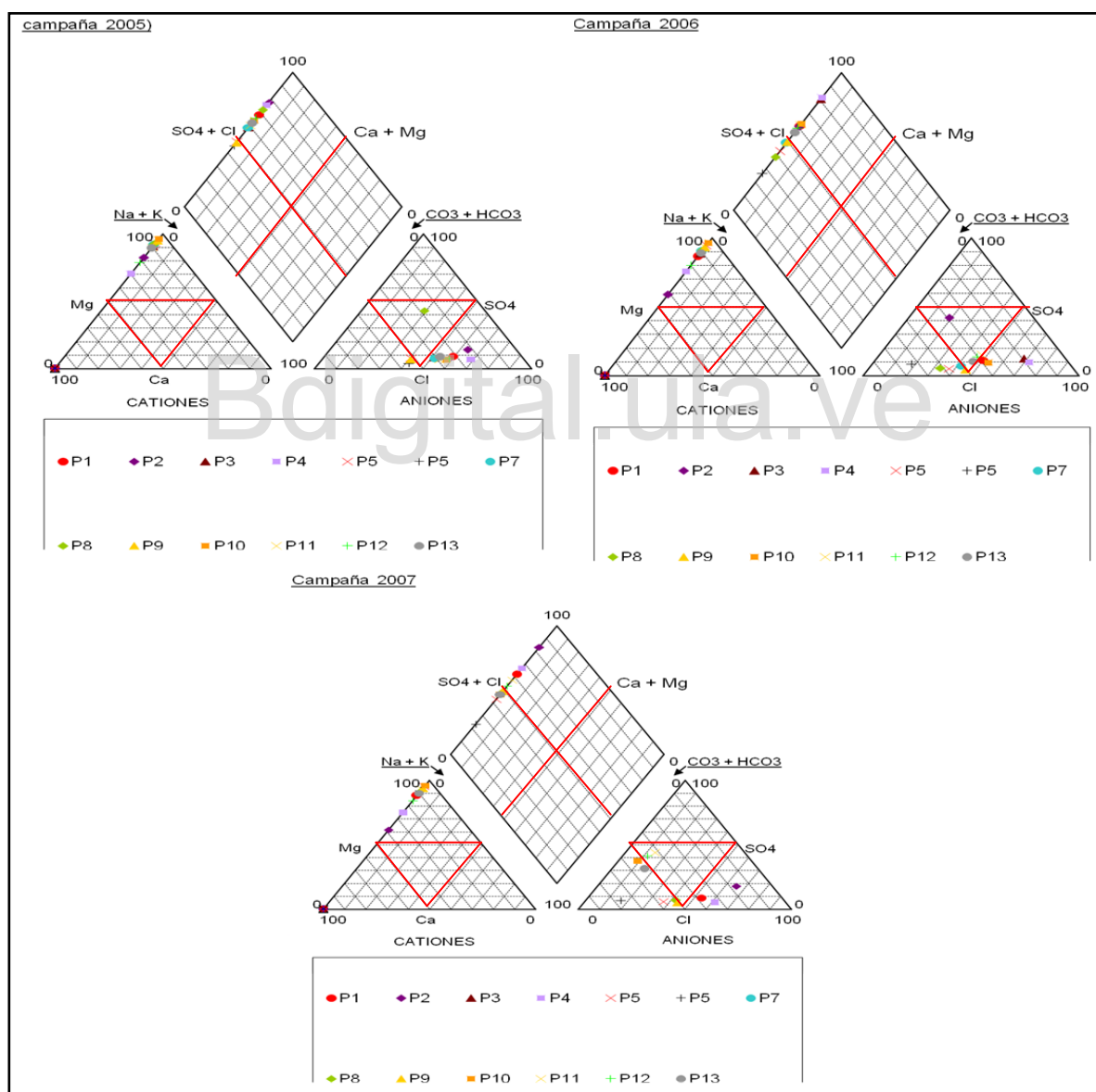


Figura 5.56.- Resultado del diagrama de Piper para aguas de La Fuente - Paraguachí. Campaña 2005, 2006 y 2007. Fuente: propia.

Dentro de este marco se analiza la figura 5.57 donde los diagramas de Schoeller muestran la distribución de los iones mayoritarios que permitieron clasificar el tipo de agua presente en La Fuente – Paraguachí, acentuándose para las tres campañas el anión cloruro y el catión magnesio, ratificando la existencia de aguas cloruradas magnésicas. Aunque también se distingue la presencia mayoritaria del anión bicarbonato en algunas muestras destacándose estas aguas como bicarbonatadas magnésicas. Vale la pena resaltar que en las tres campañas se aprecia un comportamiento similar a excepción de una muestra que presenta un aumento del ión sulfato. En relación al ión sodio es importante resaltar que no se conto con este dato de allí el comportamiento del mismo en la figura 5.57.

Sobre la base de las ideas expuestas se puede decir, que en general, las aguas son ricas en magnesio, pudiendo ser consecuencia de que en toda la zona afloran rocas ricas en minerales de magnesio, tales como las que conforman el Grupo La Rinconada y muchas otras rocas ultramáficas constituidas por olivino, biotita, hornblenda y augita. Por otra parte, también los complejos metamórficos de la zona aportan magnesio al tener presente serpentinita, talco, diópsido y tremolita. Con referencia al ión cloruro cabe mencionar que la mayor parte de las muestras se encuentran cerca de complejos rocosos de origen ígneo del Grupo La Rinconada, el cual tiene como minerales presentes el apatito, micas y las hornblendas que pueden aportar cierta cantidad de cloruros en solución. Y otras muestras pueden verse influenciadas por su cercanía a la costa.

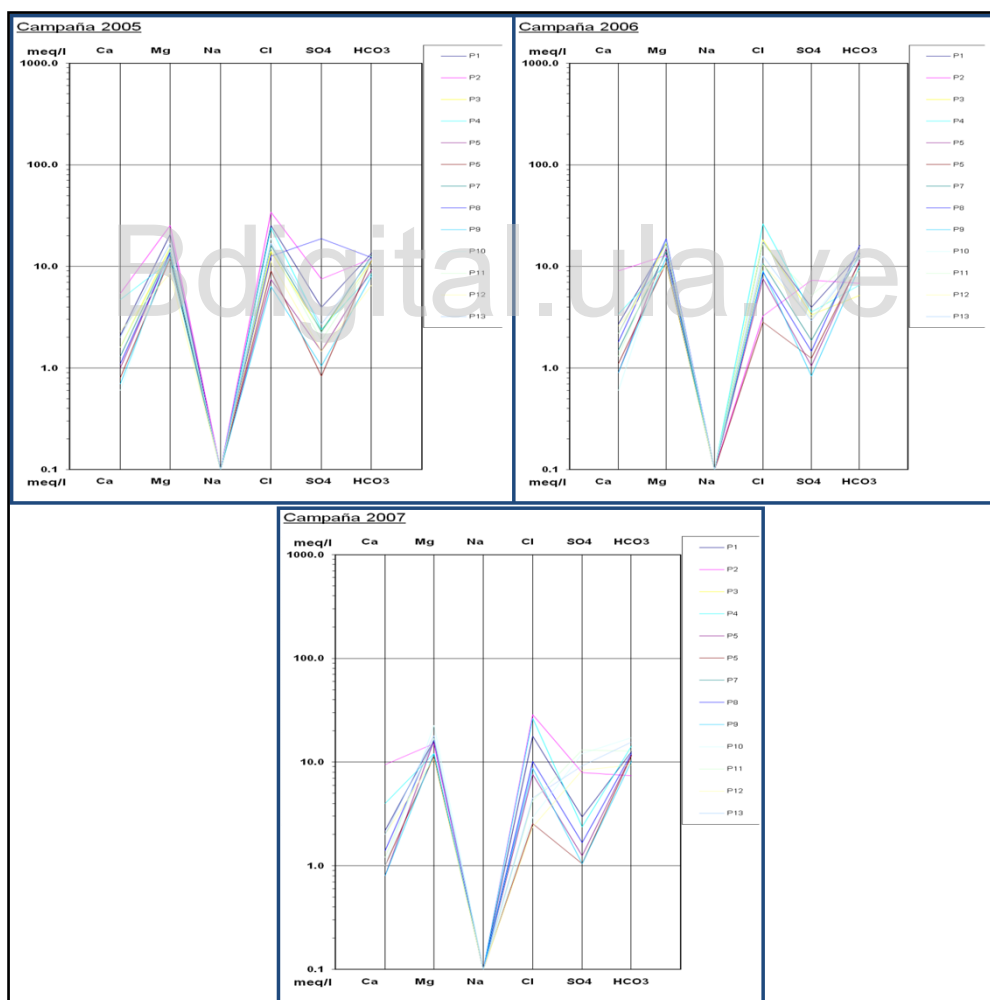


Figura 5.57.- Resultado del Diagrama de Shoeller-Berkaloff para aguas del sector La Fuente - Paraguachí. Campaña 2005 – 2006 - 2007. Fuente: propia.

En un estudio de la variación de la concentración del ión cloruro en función de la distancia al borde costero tomado de Rodríguez (2000) de diversas cuencas estudiadas en la Isla de Margarita, se observa específicamente para la cuenca La Fuente – Paraguachí (ver Figura 5.58) que la tendencia no está clara, puede que allí se involucren efectos locales de la litología con una invasión de agua de mar. Según Rodríguez, estas variabilidades en el comportamiento caracterizan un estado donde las concentraciones de Cl^- son bajas, otro donde puede haber fluctuaciones, y por último acentuados valores cerca de la costa; indica un proceso de contaminación de los pozos por un ataque de agua de mar, concordante posiblemente con un exceso de bombeo, el cual podría bajar la tabla de agua dulce local, cambiando la dirección y magnitud en los gradientes de agua subterránea. También puede contribuir, aunque en menor grado, las lluvias de las zonas costeras y partículas de material sólido existentes en la atmósfera (Custodio y Llamas, 1976).

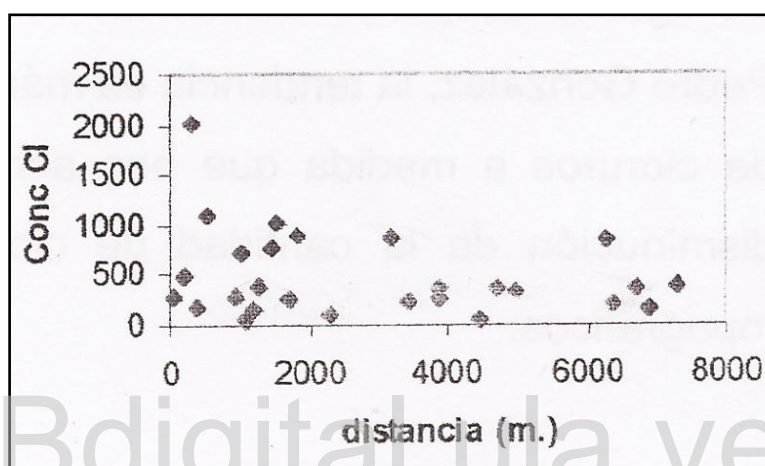


Figura 5.58.- Variación de la concentración de cloruros en función de la distancia al borde costero en la cuenca La Fuente – Paraguachí. Rodríguez (2000)

En relación a los bicarbonatos ninguna de las muestras presenta valores anómalos. Davis y de Wiest (1971) indican que la existencia de grandes cantidades de bicarbonato de las aguas subterráneas deben su presencia al dióxido de carbono procedente de la atmósfera, del suelo y la disolución de rocas carbonáticas.

Otros gráficos a considerar son los diagramas de Wilcox (ver Figura 5.59) donde en términos generales el agua presente en el sector posee un nivel de conductividad eléctrica que va de alto a muy alto y baja relación de absorción del sodio, clasificándose de acuerdo a este diagrama en aguas en C3-S1 y C4-S1, lo que conlleva que solo deben usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

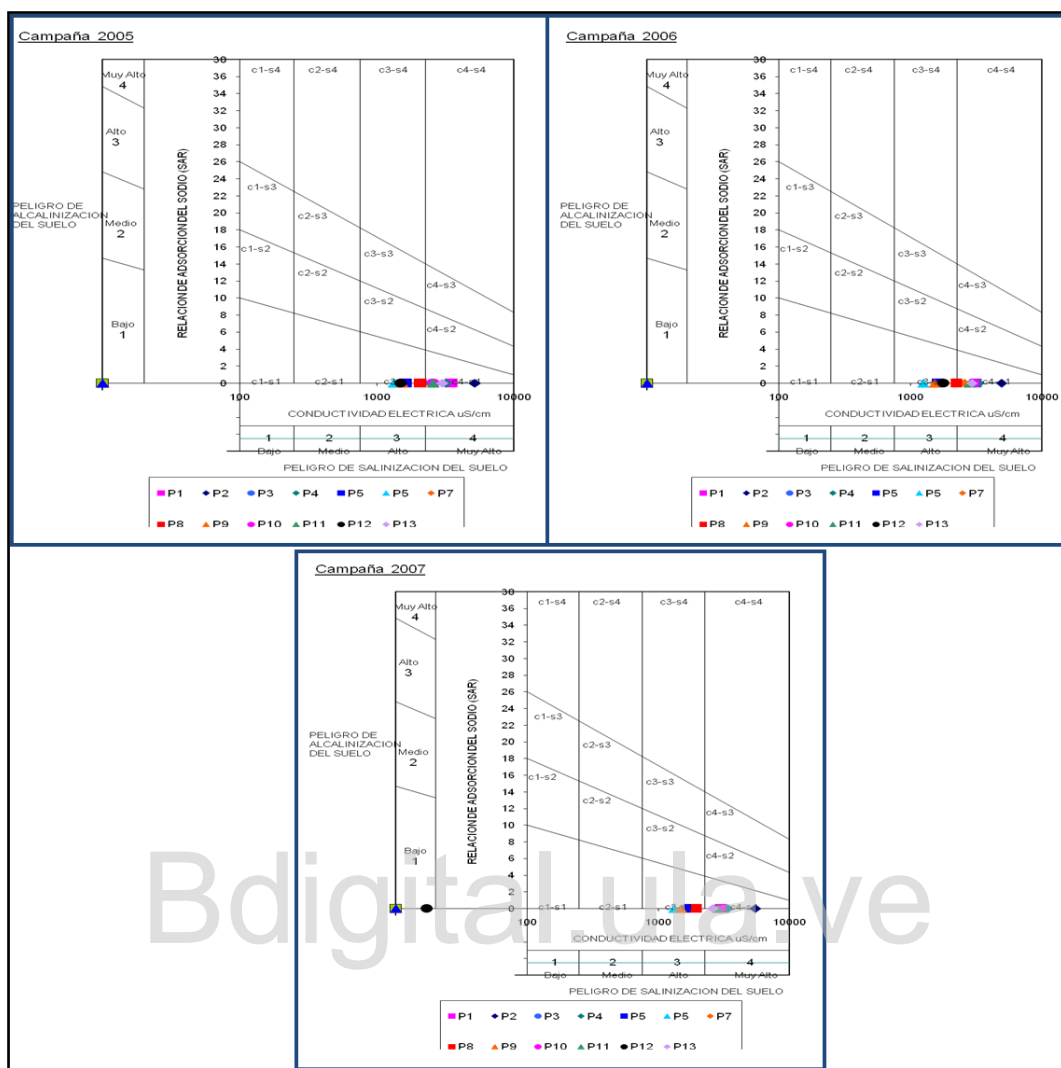


Figura 5.59.- Resultado del Diagrama de Wilcox en el Sector La Fuente - Paraguachí. Campañas 2005 – 2006 - 2007. Fuente: propia.

5.14.- Modelo hidrogeológico conceptual.

El modelo hidrogeológico conceptual de la Figura 5.60 permitió observar en tres dimensiones la configuración del acuífero ubicado en el Sector Pedro González- El Salado, generando una aproximación de las condiciones reales de sedimentación que han tenido lugar en la zona de estudio. En síntesis, se puede decir que el área está conformada por 7 capas que de tope a base se presentan de la siguiente manera: arcilla, grava, arcilla, arena, gneis, caliza y gneis, esto a partir de las correlaciones estratigráficas establecidas en el lugar de acuerdo a la integración de la información de SEV realizados en el sitio, pozos con litología y levantamiento de campo. Cabe destacar que al definir estas capas, en algunas zonas, se observó la presencia de lentes gruesos de material tanto permeable como impermeable, existiendo discontinuidades en las capas, por lo que se le asignó un valor mínimo de 1m en aquellos lugares en los cuales la capa desaparecía, para tener un modelo de capas continuas que pudiera ser usado en *Visual Modflow 4.2*.

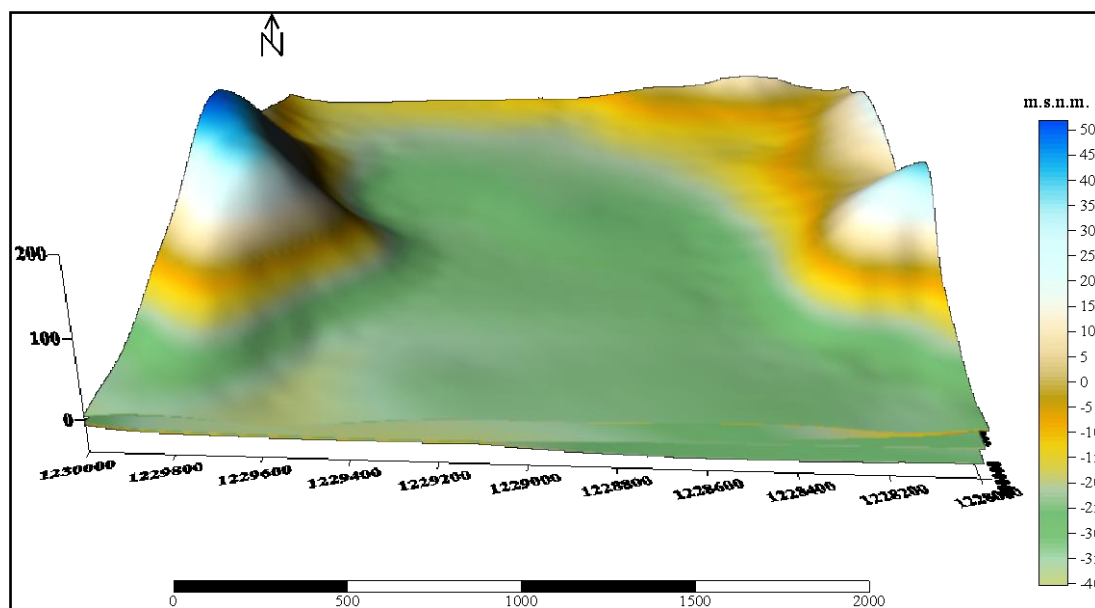


Figura 5.60.- Modelo hidrogeológico del acuífero del sector de Pedro González – El Salado. Fuente Propia.

El modelo hidrogeológico del sector La Fuente – Paraguachí de Terán, M. y Vásquez, P. (2009), muestra la configuración vertical de las capas que forman parte del acuífero, tomando en consideración un promedio de las profundidades aproximadas de las capas que caracterizan el mismo a partir de los SEV en la zona. Este refleja una capa de material arcilloso superficial de alrededor de 2 metros de espesor aproximadamente, seguido de esto un material permeable que algunos casos se encuentra no saturado y por debajo del cual se ubica el nivel piezométrico que en promedio tiene una altitud de 32 msnm para todo el acuífero (ver Figura 5.61). Todo esto da indicio de que el acuífero puede tener un comportamiento en su gran parte de acuífero libre.

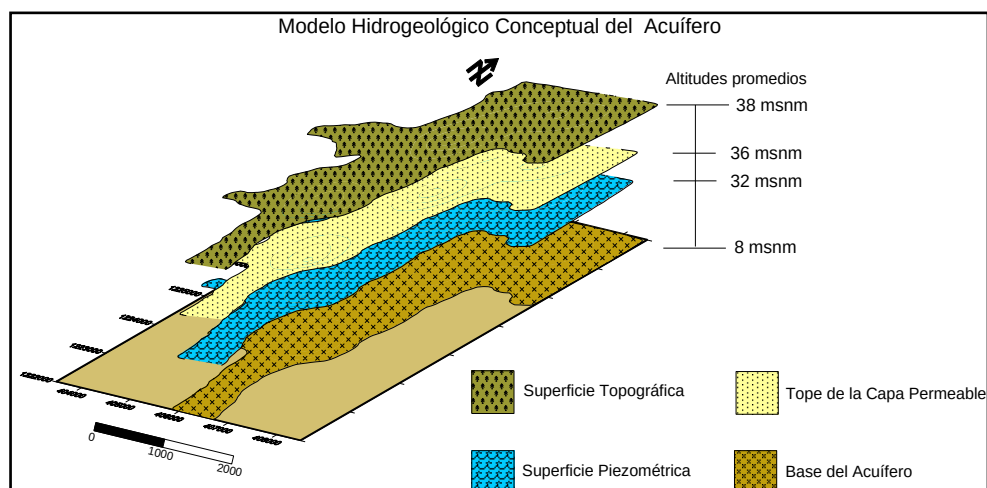


Figura 5.61.- Modelo hidrogeológico del acuífero del sector La Fuente - Paraguachí. Tomado de Terán, M. y Vásquez, P. (2009)

5.15.- Modelo matemático del acuífero.

El modelo matemático del acuífero del sector Pedro González – El Salado creado en *Visual MODFLOW 4.2* permitió representar matemáticamente la hidrología subterránea del área, utilizando ecuaciones fundamentales de flujo y conservación de masa, para simular el flujo en determinado régimen, en este caso permanente y el tiempo de simulación de 3650 días, basándose en observaciones y mediciones reales e interpretaciones/extrapolaciones, a fin de mejorar el conocimiento hidrogeológico del área de estudio y contribuir en el manejo de sus aguas subterráneas.

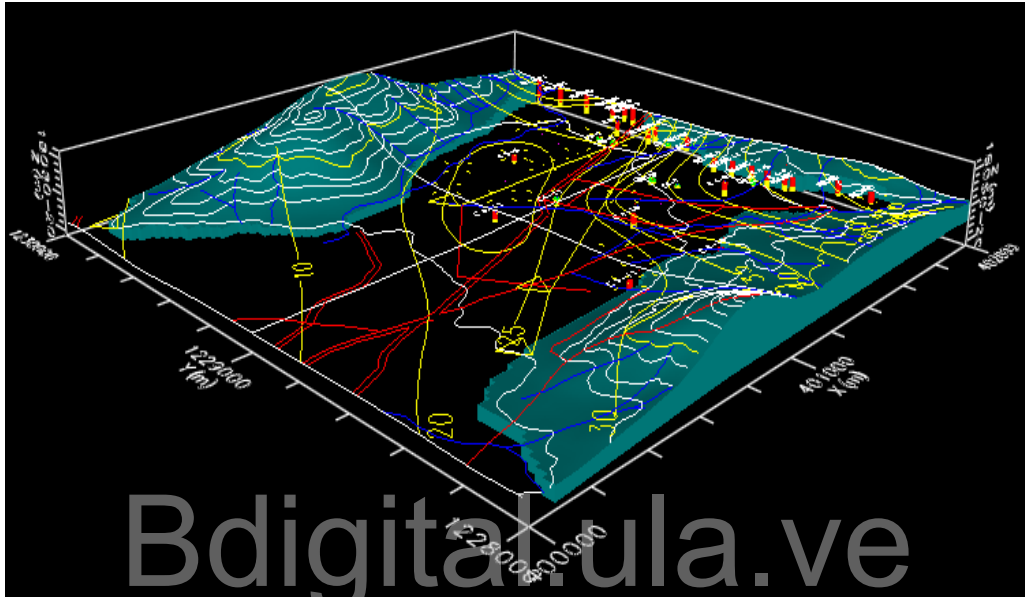


Figura 5.62.- Modelo tridimensional de la geometría del Acuífero en el *Visual ModFlow 4.2*.
Fuente propia.

Para la construcción del mallado se asignaron 99 filas y 99 columnas con coordenadas mínima de 400000 E, 1228000N, y máxima 402000E, 1230000N, para siete capas presentándose de tope a base: arcilla, grava, arcilla, arena, gneis, caliza y gneis. Reduciéndose el área específicamente al sector de Pedro González que es donde se encuentra la mayor cantidad de información recopilada.

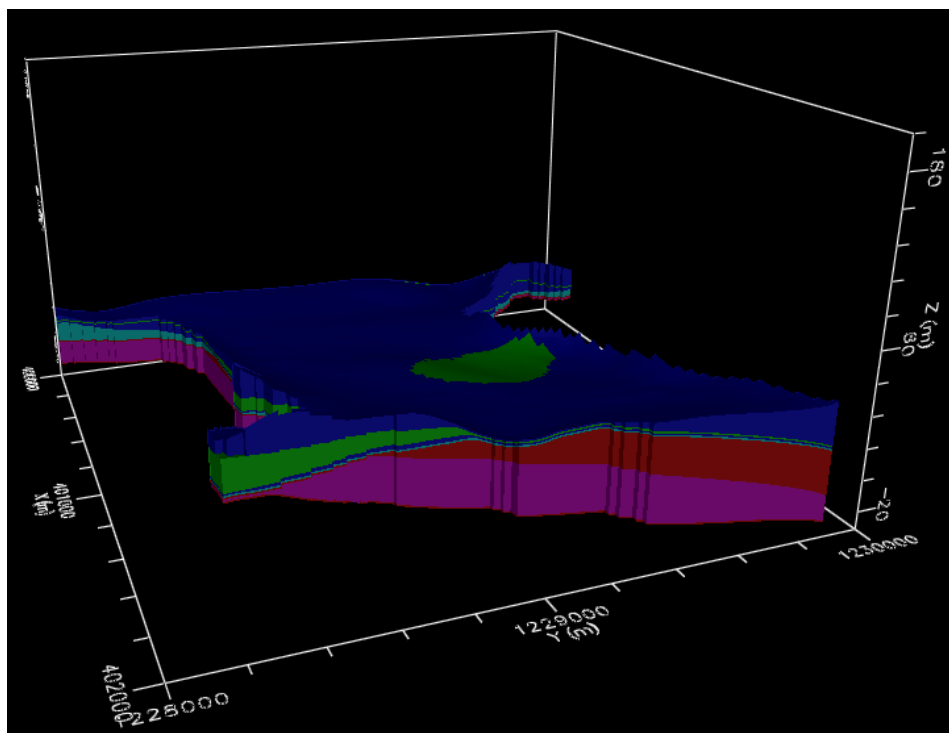


Figura 5.63.- Modelo tridimensional con visualización de las distintas capas en *Visual ModFlow 4.2*. Fuente propia.

El tipo de acuífero es confinado, confirmado esto por los valores de coeficiente de almacenamiento correspondiente a 1×10^{-5} obtenidos de la prueba de bombeo, así mismo la geometría del acuífero y la interacción de las zonas permeables e impermeables con el nivel piezométrico permiten confirmar esta aseveración.

El acuífero se encuentra ubicado en las calizas fracturadas que corresponde a la capa seis del modelo. La recarga por precipitación directa, se produce en un área muy pequeña en superficie de la zona en estudio, que corresponde a una capa de material permeable (ver Figura 5.63), siendo de 14.6 mm/año e indirecta a través del flujo subterráneo proveniente de los cerros La Chica y Tragaplata, confirmado por los análisis isotópicos realizados en la zona. Esta recarga fue dividida en dos zonas, una al noreste del acuífero, específicamente en la capa de calizas, donde se crearon seis pozos con un valor uniforme de 0.33 l/s para cada uno de ellos, y otra al sureste, con ocho pozos, y un valor de recarga de 0.52 l/s (ver Figura 5.64).

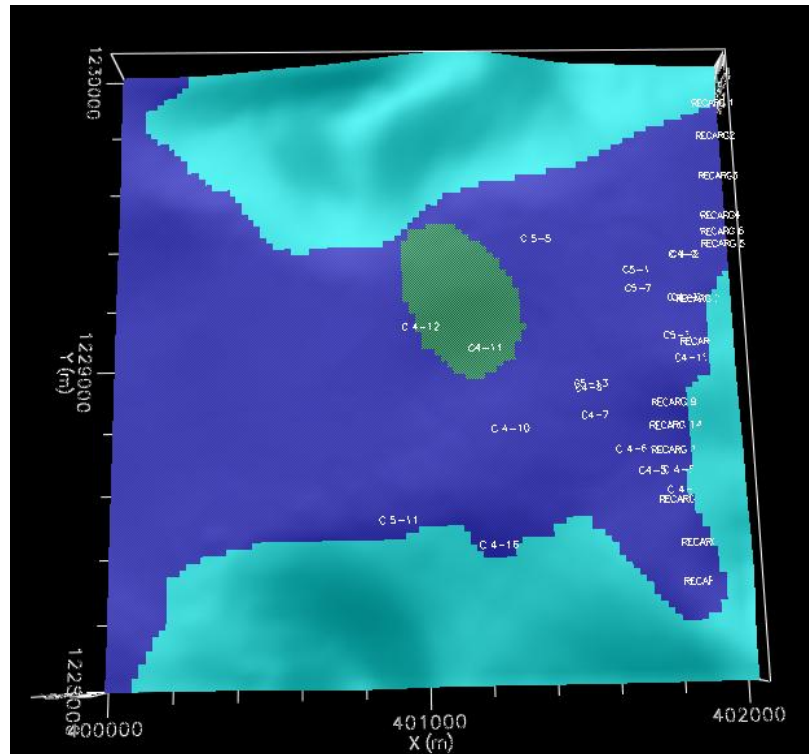


Figura 5.64.- Vista en planta donde se produce la recarga directa por precipitación en el área de color verde. *Visual ModFlow 4.2.* Fuente propia.

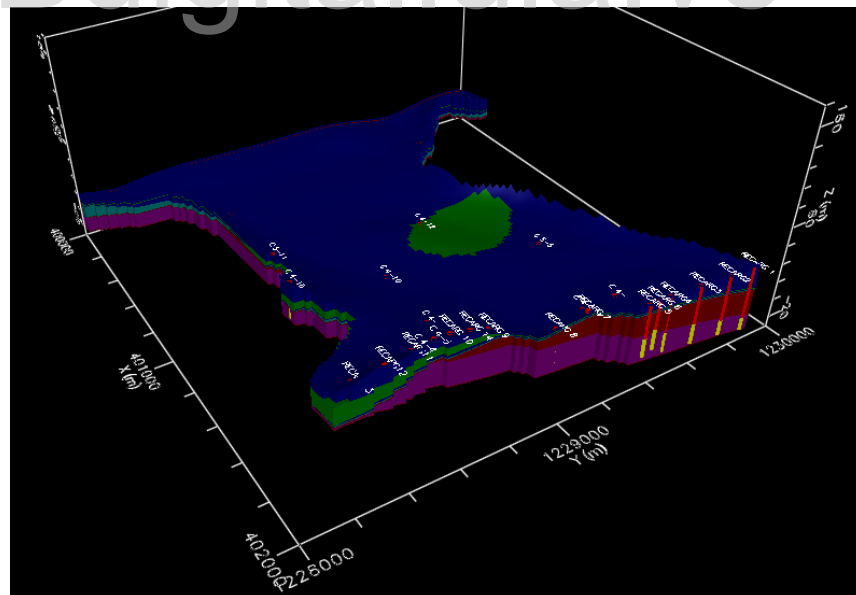


Figura 5.65.- Vista de los pozos de recarga por flujo subterráneo. *Visual ModFlow 4.2.* Fuente propia.

Al establecer el comportamiento del acuífero se manejaron dos escenarios, uno en condiciones reales del sistema y otro con variaciones del bombeo, aumentando los caudales de extracción y ubicando nuevos pozos de bombeo. Para la calibración del modelo en condiciones reales, se modificaron en

reiteradas oportunidades los parámetros de entrada, específicamente los datos de conductividad hidráulica en cada una de las capas. Además, se asignó un valor de nivel inicial uniforme de 43 m, esto a fin de mantener el equilibrio en el sistema, ya que el mismo está en régimen permanente y de esta manera limitar el acuífero por el lado oeste del modelo generado.

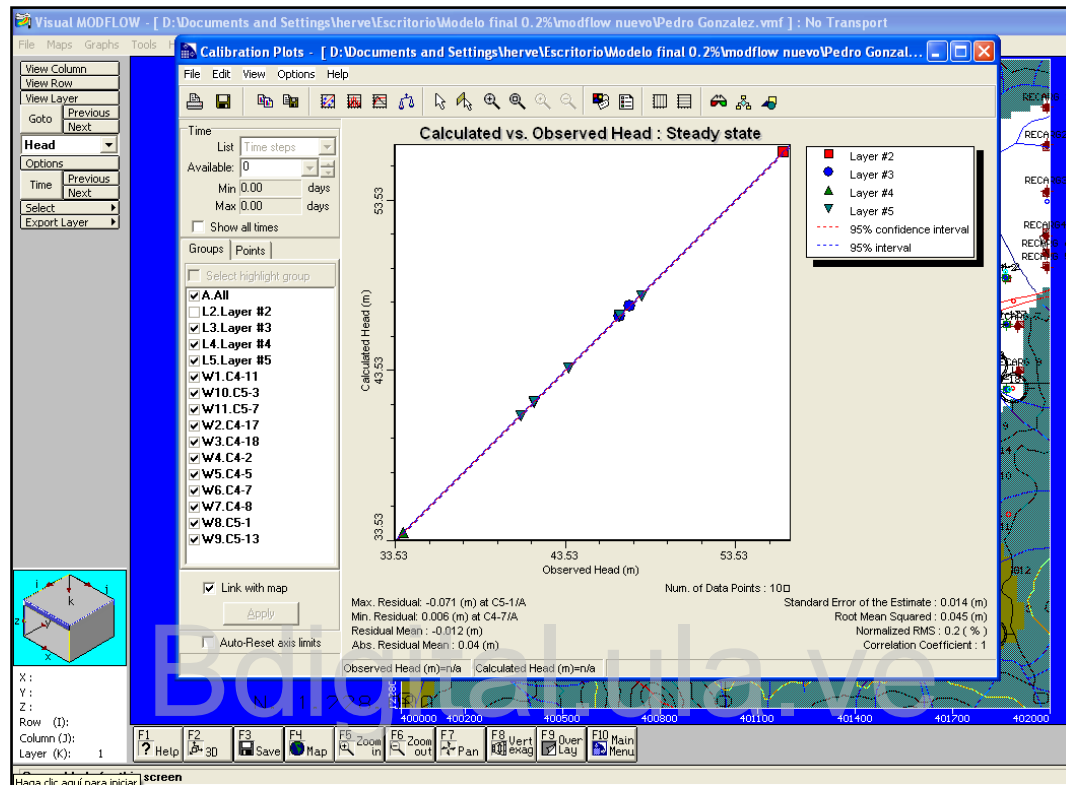


Figura 5.66.- Calibración del modelo, representando gráficamente las cargas calculadas respecto las observadas. *Visual ModFlow 4.2*. Fuente propia.

Graduando el modelo se logro obtener un error normalizado RMS del 0.2% lo cual es un valor aceptable para la calibración del mismo ya que este valor debe ser siempre inferior al 10%.

Los resultados obtenidos del modelo se muestran a continuación, en la capa 1 (ver Figura 5.66 y 5.67) se aprecia como disminuyen los niveles piezométricos, haciendo imposible la explotación en las primeras capas permeables, destacándose al SE y NO del área en estudio.

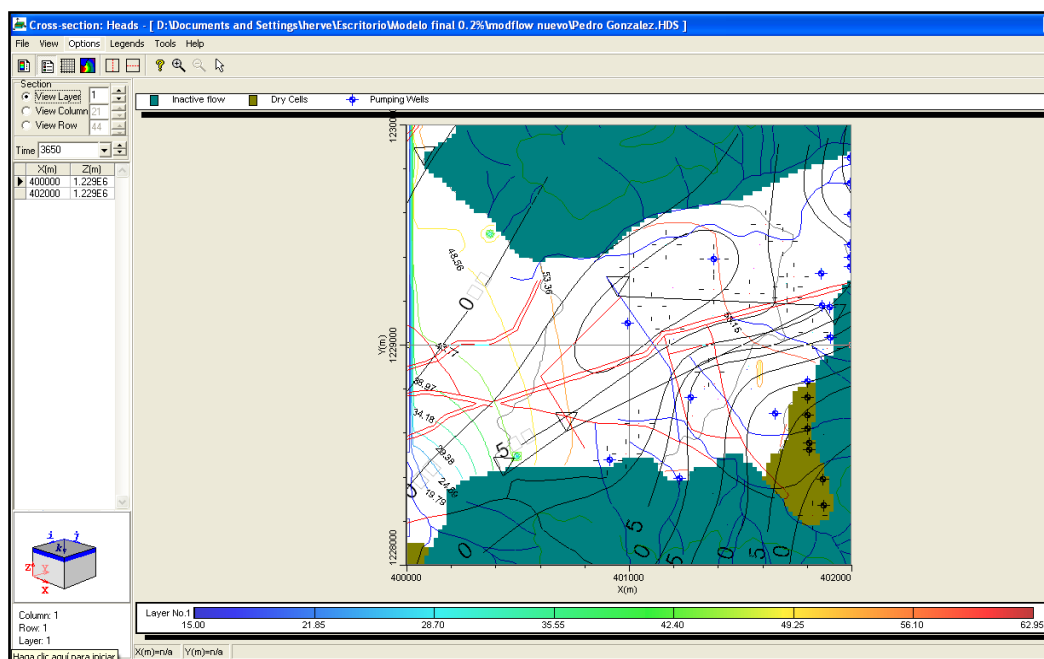


Figura 5.67- Datos de salida del modelo luego de su calibración para la capa 1 en *Visual ModFlow 4.2*. Fuente propia.

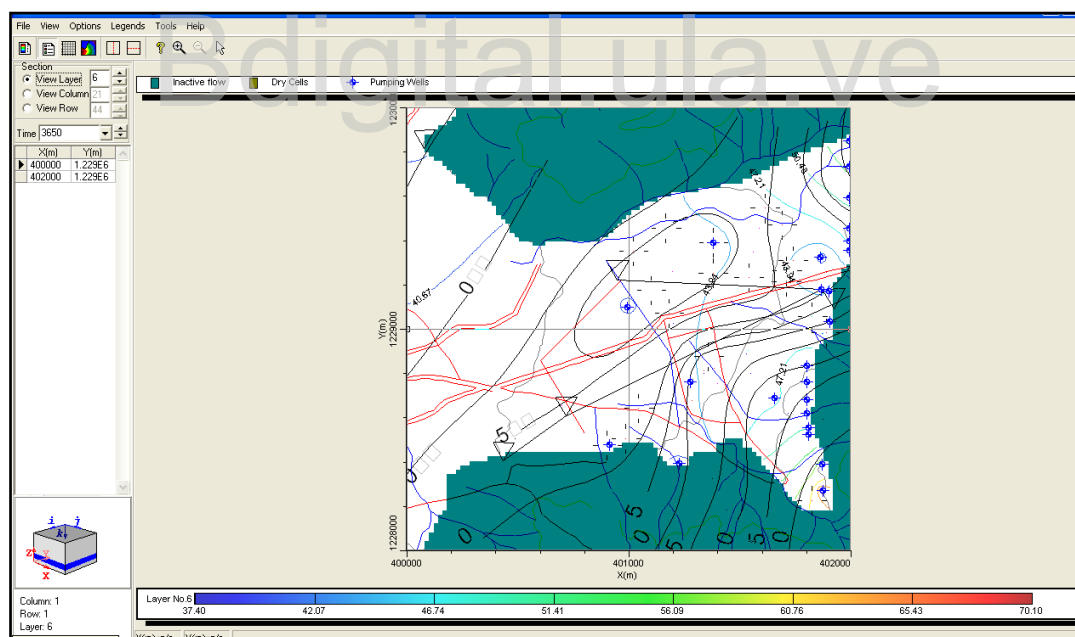


Figura 5.68.- Datos de salida del modelo luego de su calibración para la capa 6 en *Visual ModFlow 4.2*. Fuente propia.

Respecto a los escenarios que incluían un aumento de caudales estos fueron los valores considerados. (Ver Tabla 5.21)

Tabla 5.21.- Pozos de bombeo a ser introducidos en *Visual Modflow 4.2.* para el escenario de aumento de caudales.

<i>ID</i>	<i>Coordenadas</i>		<i>Q</i>	<i>Q</i>
	<i>Este</i>	<i>Norte</i>	<i>(L/s)</i>	<i>(m3/d)</i>
C4-2	401863	1229326	6.00	518.40
C4-5	401718	1228619	0.52	44.93
C4-6	401656	1228688	1.72	148.61
C4-10	401274	1228763	0.18	15.90
C4-11	401201	1229026	0.25	21.94
C4-12	400993	1229101	1.10	95.04
C4-16	401225	1228396	0.92	79.49
C4-17	401867	1229181	1.96	169.34
C5-5	401379	1229392	0.60	51.84
C5-11	400912	1228480	0.25	21.94

Fuente propia.

Tanto para el escenario 1, aumento de caudales, como el escenario 2, creación de nuevos pozos se obtuvo que los niveles en el acuífero disminuyen drásticamente llegando a agotarse el recurso, situación que no se escapa de la realidad y podría presentarse, ya que son pocos los pobladores que solicitan permisología para la explotación del recurso, llegando a hacerlo de forma indiscriminada, sin ningún tipo de control o políticas de explotación del mismo, solo en función de sus necesidades aunado a que la recarga es lenta ya que es por flujo subterráneo en su mayor parte. Por tal motivo en el sector es necesario crear políticas de extracción de agua para cada pozo, con el fin de mantener el nivel de agua del acuífero y evitar la sobreexplotación del mismo.

En función de toda la información recopilada se aprecia como en Pedro González – El Salado las muestras de agua en la campaña 2008 presentan un incremento en CE, y por tanto sales disueltas, a medida que se encuentran en la parte más baja de la cuenca, en un rango de 3000 a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en zonas alejadas de la costa; distinguiéndose en las zonas topográficamente más altas de muestreo valores de 2000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al NE del sector ya que al SE presenta valores aceptables entre 1000 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este escenario llama claramente la atención, presentándose un aumento progresivo de la CE de los puntos topográficamente más altos a los más bajos, pero solo en una zona del área de estudio.

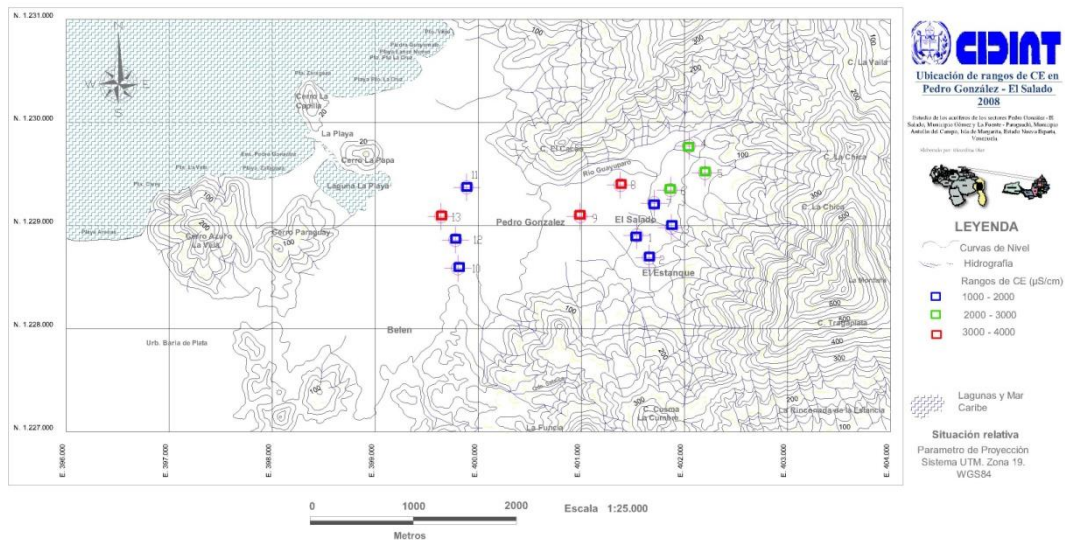


Figura 5.69.- Distribución y comparación del muestreo isotópico del año 2008 en el sector Pedro González – El Salado respecto a la conductividad eléctrica. Fuente propia.

Esta situación puede ser producto de la influencia del clima árido en la zona sobre sus aguas subterráneas, debido posiblemente a la contribución de especies o sólidos disueltos por procesos tales como, alta evaporación, presencia de evaporitas, lenta circulación del agua subterránea, entre otros.

La influencia de la evaporación en el aumento de iones en las aguas, se debe principalmente a que las sales contenidas en el agua de lluvia, se concentran en la superficie como consecuencia de los altos valores de evaporación, sales estas que pueden percolar posteriormente hasta zonas más profundas motivado por las subsiguientes precipitaciones.

Otro factor es la presencia de evaporitas, presentes por donde circulan las aguas recolectada para las muestras 8 y 9, ya que estas pueden ser parcialmente disueltas por la circulación de las aguas subterráneas hacia los acuíferos, lo cual aumenta significativamente la cantidad de sólidos disueltos en las aguas y por tanto la CE. Además, es posible que estas altas concentraciones de CE sean debidas a continuos procesos de enriquecimiento de halita como consecuencia de la solución y posterior infiltración de sales en períodos lluviosos anteriores, desde los puntos más altos topográficos a los puntos más bajos, recordando que según el análisis isotópicos, la recarga proviene de la precipitación que ocurre a 290 m de altura en los cerros de los alrededores y por posterior infiltración llega a el acuífero.

Jalali (2005) señala en estudios en el área que el aumento de la CE para la zona se atribuye a un mayor aporte de sodio en las aguas producto de los procesos de meteorización en sedimentos provenientes del Gneis de Guayacán, que también forma parte de la litología que compone la cuenca y que a su vez está adyacente a dichos pozos.

Esto confirma que en la zona el aumento de la CE no es debida a un emplazamiento lateral de agua de mar en los acuíferos costeros que pudiese ser consecuencia del excesivo bombeo de dichos pozos, sino de la interacción agua – roca en el sector, específicamente por la influencia de la litología (Gneis de Guayacán).

Información que se ratifica con el análisis hidroquímico indicando que son aguas cloruradas magnésicas en mayor proporción, otro grupo cloruradas sódicas y en menor proporción bicarbonatadas magnésicas, de igual manera aumenta el contenido de cloruros y disminuye el de bicarbonatos, pasando de ser aguas bicarbonatadas magnésicas en las zonas topográficamente altas (áreas de recarga) a aguas tipo cloruradas magnésicas en las zonas más bajas y cloruradas sódicas las más cercanas a la línea de costa por la posible influencia del excesivo bombeo y las que se encuentran en la zona de contacto con las evaporitas.

Bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.- Conclusiones

Una vez finalizada la presente investigación se han determinado algunas conclusiones que se presentan a continuación:

El análisis fotogeológico realizado reflejó, de manera general, las características principales del área de estudio. En las fotos aéreas se observó la presencia de estructuras geológicas: fallas y corrimientos atravesando principalmente las zonas altas, distribución de la red hidrográfica de forma dendrítica y la presencia de cuerpos de agua. Los afloramientos muestran cuerpos masivos resistentes a la erosión, cuyas texturas y brillo indican la presencia de rocas metamórficas.

En el área en estudio, las rocas metamórficas predominan en volumen con respecto a las sedimentarias, consistiendo las secuencias metamórficas en esquistos y gneis cuarzo feldespáticos, esquistos cuarzo – micáceos - granatíferos, esquistos grafitosos y gneis anfibólicos con cuerpos ultramáficos y gneis trondhjemíticos entre las unidades feldespáticas y no feldespáticas, mientras la unidad grafitosa le suprayacen esquistos de bajo grado y mármoles.

Sector La Fuente – Paraguachí.

Las mayores cotas están representadas por los cerros Matasiete y Guayamurí, a 640 m y 480 m respectivamente, al este de La Fuente – Paraguachí, y al oeste por los cerros El Mico y Tragaplata a 460 m y 660 m. También se presentan pequeñas colinas hacia la parte norte de la zona de estudio y las menores elevaciones en la parte central donde se asientan las poblaciones de La Fuente y el Salado de Paraguachí distribuyéndose los pozos en estos sectores.

En La Fuente – Paraguachí no existe una recarga directa al acuífero por precipitación, ya que la misma es nula, debido a la elevada ETR del lugar y la existencia de una capa impermeable superficial continua que recubre el acuífero.

La recarga del acuífero de La Fuente – Paraguachí es por flujo subterráneo proveniente de los alrededores del sector, ubicada al pie de monte de los Cerros Guayamuri al este, Matasiete al sureste y el Cerro Mico al oeste, siendo de 38.9 L/s.

La explotación de aguas subterráneas en el sector es baja, variando entre 0,2 a 2 l/s, siendo notablemente baja hacia la parte central, y los extremos noreste y suroeste del acuífero con valores entre 1,2 – 2,1 l/s, sin embargo, los caudales de extracción son aprovechables para satisfacer las necesidades de los usuarios de los pozos.

Las aguas presentes en el acuífero de La Fuente – Paraguachí se clasifican en bicarbonatadas magnésicas en las zonas de recarga y cloruradas magnésicas en las zonas terminales de la cuenca, según el diagrama de Piper y el de Schoeller. Corroborando que en la zona las aguas son ricas en magnesio, pudiendo ser consecuencia que en toda la zona afloran rocas ricas en minerales de magnesio, tales como el Grupo La Rinconada y muchas otras rocas ultramáficas constituidas por olivino, biotita, hornblenda y augita. Por otra parte, también los complejos metamórficos de la zona aportan magnesio al tener presente serpentinita, talco, dióxido y tremolita.

Según los diagramas de Wilcox en términos generales el agua presente en el sector posee un nivel de conductividad eléctrica que va de alto a muy alto y baja relación de absorción del sodio, clasificándose

de acuerdo a este diagrama en aguas en C3-S1 y C4-S1, lo que conlleva que solo deben usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

En función de toda la información recopilada y el modelo hidrogeológico del sector La Fuente – Paraguachí generado reflejan una capa de material arcilloso superficial, seguido de esto un material permeable, que algunos casos se encuentra no saturado y por debajo del cual se ubica el nivel piezométrico que en promedio tiene una altitud de 32 msnm para todo el acuífero. Todo esto da indicio de que el acuífero puede tener un comportamiento en su gran de libre.

Sector Pedro González – El Salado.

Las mayores elevaciones se encuentran al este de Pedro González, con alturas que llegan a los 600 msnm, en los cerros Tragaplata y Chico, así mismo las menores se ubican en el centro y oeste del área, donde se asientan las poblaciones de Pedro González, El Salado, y se encuentra la mayor distribución de pozos.

En función de la prueba de bombeo realizada en la zona el acuífero es confinado con un coeficiente de almacenamiento de 8.16×10^{-6} .

La recarga del acuífero está fuertemente influenciada por el carácter impermeable de la zona no saturada, así como de las condiciones climáticas debido a la aridez en el área de estudio, sin embargo, existe una recarga directa a el acuífero por precipitación, con un promedio para los 15 años en estudio de 14,6 mm/año que se produce en algunos sectores donde se presentan en su primera capa material permeable.

El caudal que se infiltra subterráneamente al acuífero del sector Pedro González-El Salado, se divide en dos tramos de recarga, esto definido por observaciones de campo, análisis fotogeológico, y los mapas topográfico, piezométrico y de líneas de flujo, siendo ubicadas al pie de monte de los Cerros La Chica y Tragaplata, al este y sureste del área de estudio, siendo de 6.19 L/s.

Los caudales extraídos han ido disminuyendo al transcurrir los años del estudio, variando entre 0.2 a 3 L/s, valores que se concentran donde están el mayor número de pozos, convirtiéndose en la zona de mayor explotación de aguas subterráneas específicamente en el Salado, aunque en general, los valores de explotación son bajos, cuyas aguas son utilizadas, en su mayor parte, para satisfacer las necesidades de sus propietarios, entre ellas uso doméstico y riego.

Los análisis isotópicos muestran que el agua subterránea en el sector Pedro González – El Salado proceden de una recarga por flujo subterráneo proveniente de la precipitación en los cerros de los alrededores, Chico y Tragaplata, a una cota de 290 msnm, infiltrándose y constituyendo el almacenamiento subterráneo. Así mismo, se puede afirmar que, existen sectores en el área donde la primera capa corresponde a material permeable infiltrándose el agua producto del riego y precipitación a cotas bajas.

De una manera general, la conductividad de las aguas en el sector Pedro González - El Salado ha aumentado en el transcurso del tiempo, debido a su interacción con el medio geológico y al contenido mineralógico de los mismos.

En función del diagrama de Piper y de Schoeller, en el sector Pedro González - El Salado las aguas del acuífero son de tipo cloruradas magnésicas, cloruradas sódicas, y en menor proporción bicarbonatadas magnésicas.

En Pedro González – El Salado, las muestras presentan un incremento en sales disueltas a medida que se encuentran en la parte más baja de la cuenca; de igual manera aumenta el contenido de cloruros y disminuye el de bicarbonatos, pasando de ser aguas bicarbonatadas magnésicas en las zonas topográficamente altas (áreas de recarga) a aguas tipo cloruradas magnésicas en las zonas más bajas y cercanas a la línea de costa.

En el diagrama de Wilcox se distinguen cuatro grupos de agua en el Sector Pedro González - El Salado, uno C3-S1 que corresponde a alto peligro de salinización del suelo pero bajo peligro de alcalinización. Y el resto se ubican en muy alto peligro de salinización del suelo y bajo, medio y alto peligro de alcalinización del suelo. De este modo esta agua no debe usarse en suelos de drenaje deficiente y los cultivos deben ser muy tolerantes a las sales.

La alcalinidad de las aguas subterráneas del Sector Pedro González - El Salado disminuye con el paso del tiempo producto del cambio de pH por la disolución de iones como Mg, Cl, Na, que son los iones de mayor concentración en las aguas subterráneas.

El modelo hidrogeológico conceptual en el Sector Pedro González- El Salado, está conformado por siete capas que de tope a base se presentan de la siguiente manera: arcilla, grava, arcilla, arena, gneis, caliza y gneis, esto a partir de las correlaciones estratigráficas establecidas en el lugar de acuerdo a la integración de la información de SEV realizados en el sitio, pozos con litología y levantamiento de campo.

El modelo hidrogeológico matemático permite la representación física en tres dimensiones del acuífero del sector Pedro González-El Salado, modelado en el programa *Visual ModFlow 4.2*. denotando que el acuífero se encuentra sobre explotado. Debido a las características típicas del clima semi árido su recarga es baja respecto a su explotación, por tanto no debería sobreexplotarse más el acuífero ni construirse nuevos pozos de bombeo.

En términos generales, estas aguas subterráneas tanto en La Fuente – Paraguachí como en Pedro González, adquieren su composición química como consecuencia de procesos de interacción agua - roca con las litologías que dominan la cuenca (Grupo La Rinconada y Gneis de Guayacán) además de la contribución de otros procesos tales como disolución de sales (magnesita, halita, yeso, epsomita y mirabilita), intrusión marina, evaporación y actividades antrópicas.

El ph se encuentra entre 7 y 8 por lo que la alcalinidad en el agua de estos acuíferos es debida enteramente al HCO_3^-

Considerando las condiciones climáticas en la Isla de Margarita anteriormente discutidas, es lógico pensar que la alta tasa de evapotranspiración y baja tasa de precipitación puede provocar la precipitación de sales provenientes del agua de lluvia dado a su vez que la misma pertenece a un ciclo hidrológico costero y por lo tanto su concentración es especies disueltas es bastante alta.

6.2.- Recomendaciones

Complementar los estudios de SEV con otros métodos geofísicos y perforaciones en la zona que permita obtener mayor información sobre la litología de los acuíferos de los sectores Pedro González - El Salado y La Fuente - Paraguachí, con sus respectivos espesores.

Elaborar balances hídricos con los datos actualizados, que incluyan periodos más recientes, y que correspondan a los mismos años de muestreo del agua, para establecer relaciones y/o diferencias entre los periodos de lluvia y sequía y la evolución de las aguas de los acuíferos en estudio.

Generar proyectos de estudios hidrogeoquímicos, en detalle, que incluyan todos los pozos existentes, y abarquen periodos de lluvia y sequía, para establecer la evolución química del agua subterránea en los sectores en estudio a lo largo del tiempo. Además, esta toma de muestras debería hacerse a distintas profundidades en un mismo pozo, para observar si existe algún perfil de mineralización de las aguas.

Tomar medidas preventivas y formular proyectos para la desalinización de las aguas ya que el incremento en la salinidad de las mismas está dejando sin uso amplias zonas acuíferas, dañando los cultivos y reduciendo las reservas hidráulicas.

Realizar campañas informativas a la comunidad sobre, el tiempo adecuado de bombeo según las características hidráulicas de la zona, manejo del reciclado de agua y explotación adecuada del recurso a fin de mantener preservados los acuíferos.

Mantener registros de información general de cada pozo, para así llevar un seguimiento de cada uno de ellos, sirviendo de respaldo para estudios posteriores del acuífero.

Realizar estudios isotópicos bajo un protocolo de muestreo adecuado para definir la procedencia de las aguas del acuífero del sector La Fuente - Paraguachí.

Establecer un control de calidad de las aguas subterráneas que sufren degradación y un constante monitoreo de las mismas.

El MINAMB no debería suministrar mas permisología a los pobladores de la zona para la perforación y posterior extracción de caudales en las zonas, ya que se encuentran sobre explotando el acuífero sin ningún criterio o manejo adecuado del recurso.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aggarwal, P., Gat, J., and Froehlich, K. (2005). *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science*. Springer, IAEA
- Amisial, R. y Jégat, H. (1984). Modelos numéricos en aguas subterráneas. Publicaciones del CIDIAT. Mérida-Venezuela.
- Briceño, A. (2006). Estudio del Grupo La Rinconada en la Parte Nororiental de la Isla de Margarita para identificar la presencia de paragonita y posibles yacimientos de dicho mineral. Informe. Universidad de Oriente.
- Campos, C. y Guzmán, O. (2002). Estratigrafía secuencial y sedimentología de las facies turbidíticas del Flysch Eoceno de la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela.
- Cardona, A; Carrillo, J.; Huizar, R.; Castro, G. (2004) *Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico*. *Environmental Geology* Vol 45, pp. 350-366.
- Casteletti, I. Nociones de mecánica de suelos. Facultad de Ingeniería. ULA.
- Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea (2009). Hidrogeología. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. España.
- Contreras, M. y Uzcátegui, M. (2007). Modelo hidrogeológico matemático del acuífero ubicado en el sector Pedro González - El Salado, municipio Gómez; Isla de Margarita, estado Nueva Esparta. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela.
- COPLANAH. (1974) Estudio geomorfológico de la Isla de Margarita. Inventario Nacional de Tierras. Publicación N° 39. Caracas, Venezuela.
- Corsi, J. (2006). Estudio de los procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición de las aguas subterráneas en la cuenca Pedro Gonzalez, Isla de Margarita. Tesis de grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Custodio, E. y Llamas, M. (2001) Tomo II. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Davies, S y De Wiest, R. (1976). Hidrogeología. Ediciones Ariet.
- Díaz, A. y Monteagudo, N. (2009). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero ubicado en el sector Pedro González - El Salado, municipio Gómez; Isla de Margarita, estado Nueva Esparta. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela.
- Durán, Z., Douglas, R., Lobo, V., Carlos, L. (2004). Evaluación hidrogeológica de las reservas de agua subterránea del acuífero de Los Llanos de Calabozo, estado Guárico, con el apoyo de técnicas nucleares. Tesis de Grado, Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida-Venezuela.
- Edmunds, W., Smedley, P.L (2000). *Residence time indicators in groundwaters Applied Geochemistry* 15, 737-752.

Frías, L. (2007). Modelo hidrogeológico del acuífero ubicado en los sectores La Fuente- Paraguachí, municipio Antolín del Campo. Isla de Margarita- Venezuela. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida.

González de Juana, C., Iturralde, J. & Picard X. (1980). Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Tomo II. Ediciones Fonives, Caracas, 1021 p.

González de Vallejo L. et al, (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall. Madrid. España, pp 264 – 266.

González, Z. (1972) Estudio geológico del extremo N.O. de la parte oriental de la isla de Margarita Edo. Nueva Esparta, Venezuela. Trabajo especial de grado, tesis. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Hernández, S. (2006). Investigación Cerro Verde. Curso de Hidrología Isotópica. CIDIAT. Mérida, Venezuela.

Hrgetic, P. (1986) Texto explicativo de mapa hidrogeológico preliminar del estado Nueva Esparta, serie informe técnico. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas, Venezuela.

Jalali, M. (2005) *Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran. Environmental Geology* Vol 47, pp. 763-772.

Jégat, H. (2001). Aplicaciones de la Geoestadística en Hidrogeología. Presentación en el I Congreso Venezolano de Estudiantes de Geociencias. Mérida, Venezuela.

Linares M. (2003). Evaluación de la disponibilidad del recurso agua subterránea en el acuífero de la Planicie Aluvial del río Motatán. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Geológica. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela.

López, M. y Torres, A. (2008). Evaluación de los riesgos de infiltración de agua del embalse Camburito-Caparo en el sector de Zonas Bajas, estado Barinas. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida.

Maresch, V. (1973). Metamorfismo y estructura de Margarita Nororiental, Venezuela. Boletín de Geología, volumen XII, N 22, pp. 172.

MARNR (1979). Inventario de aguas subterráneas en la Isla de Margarita. Porlamar - Nueva Esparta.

Michael, J. (2006). Estudio de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la Cuenca La Fuente Paraguachí, Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central De Venezuela. Caracas. CD.

Ministerio de Energía y Minas. (1997) Léxico Estratigráfico de Venezuela. Tomo II. Ediciones FONINVES. Caracas, Venezuela.

Mook, P. (2002). Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico principios y aplicaciones. UNESCO, IAEA, INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Madrid, España.

Pérez, J. (1976). Fundamentos del ciclo Hidrológico. Universidad Central de Venezuela.

Ramírez, A. (2005). Estudio hidrogeológico de acuíferos mediante interpretación de imágenes de satélite y usos de sistema de información geoespacial. Caso estudio: Valle Quibor estado Lara. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Geológica. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela.

Rengel, J. (1959). Historia de abastecimiento de agua para las islas de Margarita y Coche. III Congreso Geológico Venezolano.

Rekowski F. y Rivas L. (2005). Integración geológica de la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela.

RGR Ingeniería. (2001) Inventario de Pozos del estado Nueva Esparta.

Rodríguez, D. (2000). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la zona La Fuente-Paraguachí, Isla de Margarita, Venezuela. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas. (Tesis no publicada).

Rubicundo, M. y Velasco, R. (2010). Caracterización geológica del acuífero ubicado en el sector de Pedro González, Municipio Gómez, Isla de Margarita, estado Nueva Esparta. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela.

Sánchez, M. (2002). Métodos geoestadísticos para la generación de modelos tridimensionales del Subsuelo. Tesis M.S. CIDIAT. Mérida, Venezuela.

Silveira, L. 2002. Elementos de Hidrología. II Curso Hispanoamericano de Hidrología Subterránea. UNESCO-OIEA. Montevideo, Uruguay.

Stalin P. *et al* (2004) Colección de Suelos Agrícolas de Referencia del Estado Nueva Esparta (Isla de Margarita). Centro de Información y Referencia de Suelos. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. UCV. Caracas, Venezuela.

Taylor, G. (1960). Geología de la Isla de Margarita, Venezuela. Congreso Geológico Venezolano. Caracas, Memorias, Tomo II, p. 838-893.

Terán, M. y Vásquez, P. (2009). Caracterización geológica del acuífero ubicado en los sectores La Fuente – Paraguachí, municipio Antolín del campo, Isla de Margarita – estado Nueva Esparta. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela.

Torres, S., Madero, L., Villanueva, J. y Perdomo, R. (2004). Colección de suelos agrícolas de referencia del estado Nueva Esparta (Isla de Margarita). Centro de información y referencia de suelos (CIRS). Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela.

Uzcátegui M. (2004). Evaluación del impacto de una recarga artificial sobre el acuífero del Valle de Quibor. Trabajo de grado para optar al título de Magíster Scientiae en Obras Hidráulicas. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela.

Vargas M., López C., Montero R. (1997). Estudio de reconocimiento de las características hidrogeológicas de la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela. VIII Congreso Geológico Venezolano, Tomo II, pp. 485-491

Vargas, M. (1997). Estudio preliminar de las características hidrogeológicas de la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela.

Vignali, M. (1979). Estratigrafía y Estructura de las Cordilleras Metamórficas de Venezuela Oriental (Península de Araya-Paria e Isla de Margarita). Boletín GEOS, Escuela de Geología y Minas, Universidad Central de Venezuela. No. 25, Venezuela.

Wood, W. y Sanford, W. (1999). *Chemical and isotopic methods for quantifying groundwater recharge in regional semi-arid environment*. *Ground Water* 33, 458-468

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

Domínguez, A. (2002). Principios físicos que rigen el problema de la intrusión salina. [Formato PDF, documento en línea]. Disponible en: aguas.igme.es/igme/publica/libro41/pdf/lib41/in_2.pdf. [Consulta 2010, Septiembre, 20].

Kalipedia (2009). Aguas Subterráneas. [Formato JPG, documento en línea]. Disponible en www.kalipedia.com. [Consulta 2010, Julio, 15].

Leal, R. (2008). Análisis de la Erosividad de la Lluvia en Isla de Margarita (Venezuela) a través de Datos de Precipitación Horaria. [Formato PDF, documento en línea]. Disponible en <http://descargas.cervantesvirtual.com>. [Consulta 2010, Agosto, 20].

Bdigital.ula.ve

ANEXOS

Anexo I. Datos meteorológicos.

Tabla I.1.- Datos de temperatura media anual en °C de la estación Tacarigua.

<i>Año/ Mes</i>	<i>En</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1986	26.6	26.8	26.7	27.0	27.2	26.9	27.2	27.4	27.2	27.0	26.0	27.3
1987	27.5	26.6	27.0	27.9	27.7	28.5	28.2	28.6	28.3	27.8	28.1	27.7
1988	28.1	27.7	28.2	27.8	28.3	28.4	28.6	28.1	28.4	28.7	27.4	24.7
1989	25.1	27.2	27.4	26.6	27.6	26.4	26.7	27.5	27.1	26.8	25.1	23.9
1990	23.9	25.0	26.1	27.6	27.6	27.4	27.7	28.0	28.4	27.8	27.4	27.1
1991	27.4	25.7	26.4	27.0	27.1	26.8	27.1	27.1	27.6	27.1	26.0	24.7
1992	25.0	25.0	25.7	27.8	28.5	28.0	27.8	28.7	27.3	28.1	27.5	26.0
1994	25.3	25.6	26.5	28.0	27.6	27.2	27.3	27.9	28.4	28.5	27.7	27.4
1995	25.4	26.9	27.1	28.2	28.9	28.0	28.3	28.9	28.2	28.1	27.9	27.7
1996	26.6	27.5	26.8	28.7	33.4	27.6	27.4	27.9	27.9	29.3	27.9	26.5
1997	26.3	25.8	26.4	28.1	28.8	25.0	25.6	26.8	29.2	27.4	27.5	27.1
2003	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.7	27.4	27.3
2004	27.4	27.5	27.8	27.9	27.9	27.4	28.5	27.4	27.4	27.9	28.0	27.5
2005	27.5	27.6	27.5	10.3	19.2	28.7	28.9	29.3	29.0	28.2	28.1	27.3
2006	27.2	27.8	28.3	29.0	29.2	29.2	28.5	28.7	29.1	28.4	28.2	28.3

Fuente: SINAIHME

Tabla I.2.- Datos de precipitación anual en mm de la estación Paraguachí.

<i>Año/ Mes</i>	<i>En</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1986	39.2	8.8	48.4	0.0	18.8	43.2	30.8	58.0	27.6	57.6	45.8	69.0
1987	16.6	0.0	4.8	0.0	5.6	25.8	149.4	119.2	27.2	15.8	66.8	101.4
1988	82.2	33.6	33.0	0.0	13.8	32.0	79.2	81.2	13.4	71.6	56.2	132.8
1989	43.8	60.2	53.6	3.6	0.0	100.4	23.0	47.6	31.0	35.6	114.8	69.4
1990	111.8	31.0	5.0	36.6	8.4	62.2	65.2	38.4	9.2	21.2	45.2	58.2
1991	42.2	8.6	9.4	4.8	1.6	16.8	17.0	35.8	35.2	35.2	115.6	97.0
1992	12.8	25.6	3.2	0.0	27.2	41.0	67.4	5.0	37.8	39.8	35.6	42.4
1994	24.4	30.2	0.0	4.0	16.8	28.2	65.0	51.0	0.4	50.0	29.2	18.0
1995	35.7	2.8	11.6	13.2	0.0	9.6	54.4	120.8	118.3	98.0	36.2	44.0
1996	30.2	0.0	0.0	0.0	25.4	97.4	112.4	14.2	51.8	13.4	54.8	70.0
1997	89.0	52.0	0.0	0.0	0.8	66.8	26.8	21.4	1.8	34.4	23.6	17.0

Fuente: SINAIHME

Tabla I.3.- Datos de precipitación anual en mm de la estación Pedro González.

<i>Año/ Mes</i>	<i>En</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1986	35.0	13.8	42.0	0.0	22.0	48.6	37.0	89.6	59.8	60.0	51.6	80.4
1987	13.6	0.2	5.0	0.0	72.0	73.8	153.4	136.2	27.8	15.8	69.0	115.8
1988	77.6	68.0	29.2	0.0	15.6	37.6	81.8	159.8	42.8	103.8	74.8	164.2
1989	45.4	51.2	35.2	5.8	0.2	152.4	32.8	20.0	32.8	69.2	135.6	68.0
1990	124.4	76.0	5.8	27.8	32.0	81.8	135.8	105.4	16.0	43.8	128.8	103.5
1991	66.7	24.0	16.8	16.6	3.2	47.6	56.8	51.5	35.5	35.8	258.0	225.6
1992	71.9	61.1	4.2	0.0	23.6	41.3	118.9	27.4	98.3	71.8	75.9	98.3
1994	22.6	34.6	0.2	6.8	19.7	19.1	38.1	9.3	1.9	49.6	19.2	11.8
1995	21.8	5.8	11.7	19.2	0.0	13.2	49.4	119.8	103.0	27.8	25.6	9.3
1996	32.8	6.1	0.0	0.0	21.3	34.2	55.4	15.5	46.7	13.2	22.7	65.0
1997	74.0	50.3	0.0	0.2	9.2	68.8	45.9	23.1	2.3	82.1	32.6	14.2
2003	3.9	6.9	0.0	0.0	8.0	38.9	39.8	43.6	20.7	10.2	138.5	39.0
2004	142.8	68.1	6.5	12.6	14.5	25.9	30.9	50.0	122.9	58.1	185.0	134.6
2005	101.8	43.7	3.9	3.6	1.5	38.7	39.8	64.4	30.0	106.6	125.0	245.7
2006	189.4	101.8	15.1	0.0	8.8	27.2	112.3	36.4	30.0	92.6	87.4	84.2

Fuente: SINAIHME

Bdigital.ula.ve

Anexo II. Información geológica.

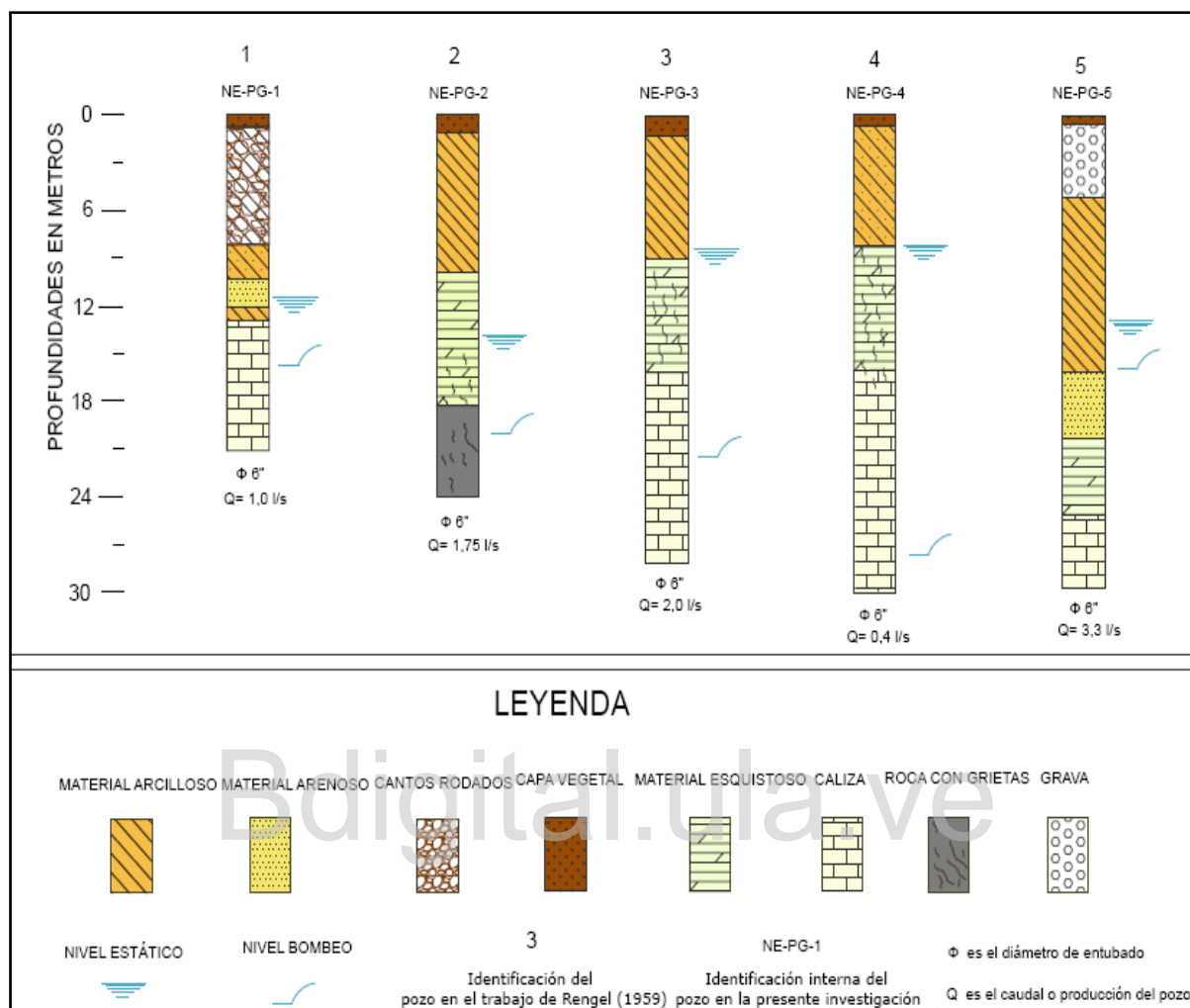


Figura II.1.- Columnas geológicas en el sector Pedro González - El Salado, Municipio Gómez, estado Nueva Esparta. Tomado de Díaz, A. y Monteagudo, N. 2009.

Tabla II.1.- Planilla de datos de campo del sondeo Z1S2. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger		
Fecha: 06/07/2009	Hora: 03:15 pm	Lugar: Carretera Playa Zaragoza frente Laguna La Playa y Cerro La Papa
Sondeo: Z1-S2	Dirección: NO-SE	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco
Norte (UTM): 1229230	Este (UTM): 398615	Elevación: 3 m.s.n.m.
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	20.000	132.500	0.151	27.490	4.149	
5	2	21.000	124.000	0.169	37.700	6.385	
7	2	10.000	120.500	0.083	75.400	6.257	
8	2	9.000	55.000	0.164	98.960	16.193	
9	2	10.000	127.500	0.078	125.660	9.856	
10	2	13.000	141.000	0.092	155.510	14.338	
15	5	41.000	556.000	0.074	137.440	10.135	
20	5	33.000	623.000	0.053	247.400	13.105	
30	5	17.000	654.000	0.026	561.560	14.597	
40	5	12.000	762.000	0.016	1001.380	15.770	
50	5	7.000	611.000	0.011	1566.870	17.951	
60	5	6.000	717.000	0.008	2258.020	18.896	
80	20	11.000	669.000	0.016	989.600	16.271	
100	20	5.000	299.000	0.017	1555.090	26.005	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.2.- Planilla de datos de campo del sondeo Z1S3. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger		
Fecha: 06/07/2009	Hora: 01:18 pm	Lugar: Playa Zaragoza
Sondeo: Z1-S3	Dirección: NE-SO	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco
Norte (UTM): 1229358	Este (UTM): 398000	Elevación: 2 m.s.n.m.
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	51.000	157.500	0.324	27.490	8.902	
5	2	41.000	153.000	0.268	37.700	10.103	
7	2	28.000	133.000	0.211	75.400	15.874	
8	2	16.000	121.000	0.132	98.960	13.086	
9	2	18.000	124.500	0.145	125.660	18.168	
10	2	9.000	108.500	0.083	155.510	12.899	
15	5	13.000	135.000	0.096	137.440	13.235	
20	5	7.000	155.500	0.045	247.400	11.137	
30	5	6.000	236.000	0.025	561.560	14.277	
40	5	7.000	143.000	0.049	1001.380		Valor irregular de I
50	5	8.000	613.500	0.013	1566.870	20.432	
60	5	8.000	514.500	0.016	2258.020	35.110	
80	20	17.000	1324.500	0.013	989.600	12.702	
100	20	3.500	802.000	0.004	1555.090	6.787	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.3.- Planilla de datos de campo del sondeo Z1S4. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS		
Arreglo de Schlumberger		
Fecha: 06/07/2009	Hora: 05:15 pm	Lugar: Frente la entrada de la Playa Puerto Cruz, detrás del Cerro La Papa
Sondeo: Z1-S4	Dirección: NE-SO	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco
Norte (UTM): 1229589	Este (UTM): 399179	Elevación: 7 m.s.n.m.
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	8.000	106.000	0.075	27.490	2.075	
5	2	5.000	109.000	0.046	37.700	1.729	
7	2	3.000	103.000	0.029	75.400	2.196	
8	2	3.000	72.000	0.042	98.960	4.123	
9	2	2.400	83.000	0.029	125.660	3.634	
10	2	2.100	145.000	0.014	155.510		Valor irregular de I
15	2	1.200	102.000	0.012	351.860	4.140	
20	5	9.000	401.000	0.022	247.400	5.553	
30	5	4.000	401.000	0.010	561.560	5.602	
40	5	3.000	666.000	0.005	1001.380	4.511	
50	5	2.000	458.000	0.004	1566.870	6.842	
60	5	1.400	460.000	0.003	2258.020	6.872	
80	20	—	—	—	989.600	—	
100	20	—	—	—	1555.090	—	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.4.- Planilla de datos de campo del sondeo Z2S1. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS		
Arreglo de Schlumberger		
Fecha: 07/07/2009	Hora: 08:35 am	Lugar: Carretera Pedro González - Hotel Hesperia
Sondeo: Z2-S1	Dirección: NE-SO	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco
Norte (UTM): 1229964	Este (UTM): 399987	Elevación: 6 m.s.n.m.
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	24.000	36.500	0.658	27.490	18.076	
5	2	15.000	37.000	0.405	37.700	15.284	
7	2	10.000	34.500	0.290	75.400	21.855	
8	2	3.000	30.000	0.100	98.960		Valor Irregular de ΔV
9	2	5.000	32.000	0.156	125.660	19.634	
10	2	3.500	33.000	0.106	155.510	16.493	
15	2	9.000	199.000	0.045	351.860	15.913	
20	5	12.000	118.000	0.102	247.400	25.159	
30	5	8.000	247.000	0.032	561.560	18.188	
40	5	4.500	161.500	0.028	1001.380	27.902	
50	5	2.500	149.500	0.017	1566.870	26.202	
60	5	3.000	194.000	0.015	2258.020	34.918	
80	20	2.000	591.500	0.003	989.600	3.346	100/429=0,23= 227,6
100	20	2.000	685.500	0.003	1555.090	4.537	100,5/626=0,16= 248,8

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.5.- Planilla de datos de campo del sondeo Z2S2. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger							
Fecha: 07/07/2009	Hora: 10:20 am		Lugar: Campo de entrenamiento Golf - Hotel Hesperia				
Sondeo: Z2-S2	Dirección: NO-SE		Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco				
Norte (UTM): 1230256	Este (UTM): 399846		Elevación: 5 m.s.n.m.				
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500			Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$				
AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	R=ΔV/I (Ohms)	k	ρa=k*(ΔV/I) (Ohms-m)	Observaciones
3	1	96.000	38.000	2.526	27.490	69.448	
5	2	102.500	40.000	2.563	37.700	96.606	
7	2	101.000	24.000	4.208	75.400	317.308	
8	2	102.000	34.200	2.982	98.960	295.144	
9	2	99.000	14.000	7.071	125.660		Valor Irregular de ΔV e I
10	2	46.000	29.000	1.586	155.510		Valor Irregular de ΔV e I
15	5	51.000	25.000	2.040	137.440	280.378	
20	5	49.000	28.000	1.750	247.400	432.950	
30	5	50.000	38.000	1.316	561.560	738.895	
40	5	50.000	46.000	1.087	1001.380	1088.457	
50	5	100.000	141.000	0.709	1566.870	1111.255	
60	5	100.000	158.000	0.633	2258.020	1429.127	
80	20	103.000	206.000	0.500	989.600	494.800	
100	20	50.000	562.000	0.089	1555.090	138.353	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.6.- Planilla de datos de campo sondeo Z2S3. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger							
Fecha: 07/07/2009		Hora:11:55 am		Lugar: Campo de Golf, frente Cerro La Papa, cerca de Playa Puerto Viejo			
Sondeo: Z2-S3		Dirección: NO-SE		Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco			
Norte (UTM): 1230435		Este (UTM): 399846		Elevación: 5 m.s.n.m.			
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500				Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$			

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	R=ΔV/I (Ohms)	k	ρa=k*(ΔV/I) (Ohms-m)	Observaciones
3	1	10.000	29.500	0.339	27.490	9.319	
5	2	2.500	22.000	0.114	37.700	4.284	
7	2	100.000	31.000	3.226	75.400		Valor Irregular de ΔV e I
8	2	100.000	30.500	3.279	98.960		Valor Irregular de ΔV e I
9	2	101.000	186.000	0.543	125.660	68.235	
10	2	100.000	184.000	0.543	155.510	84.516	
15	5	18.500	189.000	0.098	137.440	13.453	
20	5	3.000	115.000	0.026	247.400	6.454	
30	5	5.000	565.500	0.009	561.560	4.965	
40	5	4.000	267.500	0.015	1001.380	14.974	
50	5	2.000	679.500	0.003	1566.870	4.612	
60	20	4.000	493.000	0.008	549.780	4.461	
80	20	5.000	426.000	0.012	989.600	11.615	
100	20	4.000	517.000	0.008	1555.090	12.032	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.7.- Planilla de datos de campo del sondeo Z2S4. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger			
Fecha: 07/07/2009	Hora: 04:40 pm	Lugar: Terreno La Chica - Carretera vía Santa Ana	
Sondeo: Z2-S4	Dirección: NO-SE	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco	
Norte (UTM): 1227871	Este (UTM): 399153	Elevación: 20 m.s.n.m.	
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$	

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	21.000	20.000	1.050	27.490	28.865	
5	2	15.000	157.000	0.096	37.700	3.602	
7	2	19.000	332.500	0.057	75.400	4.309	
8	2	19.000	274.000	0.069	98.960	6.862	
9	2	19.000	177.000	0.107	125.660	13.489	
10	2	20.000	181.000	0.110	155.510	17.183	
15	2	21.000	126.500	0.166	351.860	58.412	
20	5	10.000	230.500	0.043	247.400	10.733	
30	5	3.000	175.000	0.017	561.560	9.627	
40	5	5.000	263.500	0.019	1001.380	19.002	
50	5	12.000	226.500	0.053	1566.870	83.013	
60	5	—	—	—	2258.020	—	
60	20	—	—	—	549.780	—	
80	20	—	—	—	989.600	—	
100	20	—	—	—	1555.090	—	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.8.- Planilla de datos de campo del sondeo Z2S5. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger			
Fecha: 07/07/2009	Hora: 05:40 pm	Lugar: Carretera vía Juan Griego - Bahía de Plata	
Sondeo: Z2-S5	Dirección: NO-SE	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco	
Norte (UTM): 1227923	Este (UTM): 398538	Elevación: 30 m.s.n.m.	
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$	

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	27.000	31.000	0.871	27.490	23.943	
5	2	61.000	225.000	0.271	37.700	10.221	
7	2	17.000	246.500	0.069	75.400	5.200	
8	2	570.000	174.000	3.276	98.960		Valor Irregular de ΔV e I
9	2	552.000	298.000	1.852	125.660		Valor Irregular de ΔV e I
10	2	551.000	203.000	2.714	155.510		Valor Irregular de ΔV e I
15	5	12.000	464.000	0.026	137.440	3.554	
20	5	15.000	324.000	0.046	247.400	11.454	
30	5	10.000	667.000	0.015	561.560	8.419	
40	5	29.000	579.000	0.050	1001.380	50.155	
50	5	13.000	588.000	0.022	1566.870	34.642	
60	5	6.000	605.000	0.010	2258.020	22.394	
80	20	571.000	588.000	0.971	989.600		Valor Irregular de ΔV e I
100	20	585.000	394.000	1.485	1555.090		Valor Irregular de ΔV e I

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.8.- Planilla de datos de campo del sondeo Z3S1. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger							
Fecha: 08/07/2009	Hora: 08:55 am	Lugar: Campo de Beisbol "El Salado"					
Sondeo: Z3-S1	Dirección: NO-SE	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco					
Norte (UTM): 1228666	Este (UTM): 400717	Elevación: 35 m.s.n.m.					
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$					

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	R=ΔV/I (Ohms)	k	ρa=k*(ΔV / I) (Ohms-m)	Observaciones
3	1	5.000	56.000	0.089	27.490	2.454	
5	2	8.000	55.000	0.145	37.700	5.484	
7	2	9.000	65.000	0.138	75.400	10.440	
8	2	9.000	55.000	0.164	98.960	16.193	
9	2	7.500	43.000	0.174	125.660	21.917	
10	2	8.500	66.000	0.129	155.510	20.028	
15	5	7.500	52.000	0.144	137.440	19.823	
20	5	7.500	61.000	0.123	247.400	30.418	
30	5	7.000	58.000	0.121	561.560	67.774	
40	5	8.000	67.000	0.119	1001.380	119.568	
50	5	9.000	68.000	0.132	1566.870	207.380	9,5/369=0,026= 40,3
60	5	13.500	69.000	0.196	2258.020	441.787	18,5/389=0,048= 107,3
80	20	—	—	—	989.600	—	
100	20	—	—	—	1555.090	—	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.9.- Planilla de datos de campo del sondeo Z3S2. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger							
Fecha: 08/07/2009	Hora:10:10 am	Lugar: "El Salado" (Conuco de la señora)					
Sondeo: Z3-S2	Dirección: NO-SE	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco					
Norte (UTM): 1229282	Este (UTM): 400948	Elevación: 31 m.s.n.m.					
Equipos: Voltiamperímetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$					

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	R=ΔV/I (Ohms)	k	ρa=k*(ΔV/I) (Ohms-m)	Observaciones
3	1	10.500	22.000	0.477	27.490	13.120	
5	2	4.000	119.000	0.034	37.700	1.267	
7	2	2.500	121.000	0.021	75.400	1.558	
8	2	3.000	139.000	0.022	98.960	2.136	
9	2	2.500	126.000	0.020	125.660	2.493	
10	2	9.000	130.000	0.069	155.510		Valor Irregular de ΔV
15	5	11.500	162.000	0.071	137.440	9.757	
20	5	15.000	124.000	0.121	247.400	29.927	
30	5	14.500	108.000	0.134	561.560	75.395	
40	5	11.500	146.000	0.079	1001.380	78.876	
50	5	16.000	170.000	0.094	1566.870	147.470	
60	5	—	—	—	2258.020	—	
60	20	—	—	—	549.780	—	
80	20	—	—	—	989.600	—	
100	20	—	—	—	1555.090	—	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.10.- Planilla de datos de campo del sondeo Z3S3. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger		
Fecha: 08/07/2009	Hora:10:50 am	Lugar: "El Salado" al final de la carretera
Sondeo: Z3-S3	Dirección: NE-SO	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco
Norte (UTM): 1229153	Este (UTM): 401923	Elevación: 54 m.s.n.m.
Equipos: Voltiampérmetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	4.000	33.000	0.121	27.490	3.332	
5	2	13.500	32.500	0.415	37.700	15.660	
7	2	1.500	36.500	0.041	75.400		Valor Irregular de ΔV
8	2	10.500	36.000	0.292	98.960	28.863	
9	2	10.000	43.000	0.233	125.660	29.223	
10	2	1.500	38.000	0.039	155.510		Valor Irregular de ΔV
15	5	17.000	198.000	0.086	137.440	11.800	
20	5	19.000	73.500	0.259	247.400	63.954	
30	5	17.500	150.000	0.117	561.560	65.515	
40	5	19.000	125.500	0.151	1001.380	151.603	
50	5	16.500	206.500	0.080	1566.870	125.198	
60	5	13.500	181.000	0.075	2258.020	168.416	
80	20	100.000	390.000	0.256	989.600	253.744	
100	20	100.000	710.000	0.141	1555.090	219.027	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Tabla II.10.- Planilla de datos de campo del sondeo Z3S4. Municipio Gómez.

PLANILLA DE DATOS PARA LEVANTAMIENTOS GEOELÉCTRICOS Arreglo de Schlumberger		
Fecha: 08/07/2009	Hora:12:05 pm	Lugar: "El Salado" siembra de aloe
Sondeo: Z3-S4	Dirección: NE-SO	Operadores: Mariana Rubicondo / Ricardo Velasco
Norte (UTM): 1228461	Este (UTM): 400435	Elevación: 54 m.s.n.m.
Equipos: Voltiampérmetro DCRES 500		Observaciones: (1) $k=(\pi/2)*(((AB/2)^2 - (MN/2)^2) / (MN/2))$ (2) $MN \leq 0,4(AB/2)$

AB/2 (m)	MN (m)	ΔV (mV)	I (mA)	$R=\Delta V/I$ (Ohms)	k	$\rho_a=k*(\Delta V/I)$ (Ohms-m)	Observaciones
3	1	3.000	19.000	0.158	27.490	4.341	
5	2	2.500	17.500	0.143	37.700	5.386	
7	2	4.000	13.000	0.308	75.400		Valor Irregular de ΔV e I
8	2	1.500	24.500	0.061	98.960	6.059	
9	2	1.500	72.000	0.021	125.660	2.618	
10	2	2.000	147.500	0.014	155.510	2.109	
15	5	3.000	161.000	0.019	137.440	2.561	
20	5	10.000	151.500	0.066	247.400	16.330	
30	5	11.500	134.000	0.086	561.560	48.194	
40	5	10.500	106.000	0.099	1001.380		Valor Irregular de I
50	5	5.000	194.500	0.026	1566.870	40.279	
60	20	28.500	358.000	0.080	549.780	43.767	
80	20	24.000	411.000	0.058	989.600	57.787	
100	20	—	—	—	1555.090	—	

Fuente: Rubicondo, M. y Velasco, R. (2010).

Anexo III. Datos del inventario de pozos.

Bdigital.ula.ve

Tabla III.1.- Campaña en Pedro González – El Salado. Noviembre, 2001. C1

No. de Pozo	ID	Propietario	NORTE	ESTE	Elevación (m)	Profundidad (m)	NE (m)	ND (m)	pH	CE (µs/cm)	Diámetro	T (°C)	Sabor	Estado	Observaciones	Uso del Agua
NE6736195N	C1-1	Maria de Mata	1,229,050	399,672	10.57	40	4.54				1,2"			inactivo		
NE6736196N	C1-2	Juan Abrahan	1,228,227	401,822	74.35		14.82							inactivo		
NE6736197N	C1-3	Hacienda El Tanque	1,227,890	402,026	112.99		Manantial	Manantial	7.4	338						Domestico
NE6736209N	C1-4	Brigido Serrano	1,229,547	401,612	39.06		14.59				10"			inactivo	Agua Salobre	
NE6736210N	C1-5	Julio Marin	1,229,471	401,688	39.32	18	11.57				8"			inactivo	Salobre	
NE6736211N	C1-6	Edgar Guerra	1,229,056	401,825	48.34			13.75	7.5	1420	8"	29	dulce	activo		Doméstico y Agrícola
NE6736212N	C1-7	Rafael Mata	1,228,985	401,887	51.30	30					8"					
NE6736213N	C1-8	Dr. Nicolas Wecenchance	1,229,159	402,107	73.96	30		21.63	7.6	1170	10"	28	dulce	activo		Domestico y Agrícola
NE6736214N	C1-9	Francisco Mikuski	1,229,770	402,045	54.94	45	12.23		6.6	5280	8"	30	salobre	activo		Domestico
NE6736215N	C1-10	Wilmer Ocando	1,229,485	402,198	72.05		10.59							activo		
NE6736216N	C1-11	Luis Carreño	1,229,964	402,396	59.86	32	14	22.97	6.5	5580	18"	30	salobre	activo		Domestico y Agrícola
NE6736217N	C1-12	Raul Rodriguez	1,229,509	402,200	71.07	53		40.04	7.6	2000	10"	29	salobre	activo		Domestico y Agrícola
NE6736218N	C1-13	Mario Dambrosio	1,228,477	400,902	33.04	45		26.52	7.3	2060	6"	31	salobre	activo		Domestico y Agrícola
NE6736219N	C1-14	Mario Dambrosio	1,228,507	400,485	21.40		12.42				8"			inactivo	posible contaminación	
NE6736220N	C1-15	Vicente Mata	1,228,644	401,044	29.51		8.86							inactivo	se desconoce	
NE6736221N	C1-16	Vicente Mata	1,229,353	401,019	20.60		10.56				12"			inactivo	abandonado	
NE6736222N	C1-17	Cruz Diaz	1,229,254	401,378	31.61	30	10.88		7.5	2540	12"	30	salobre	activo		Domestico y Agrícola
NE6736223N	C1-18	Freddy Aguilera	1,229,392	401,379	28.92			13.83	7.1	2850		30	salobre	activo		Comercial y Agrícola
NE6736224N	C1-19	Isaac Zacarias	1,229,457	401,166	24.62	30		20.88	6.9	3360	10"	29	salobre	activo		Domestico y Agrícola
NE6736225N	C1-20	Jose Salazar	1,229,216	401,708	42.28	30	14.78		7.4	1850	12"	30	salobre	activo		Domestico y Agrícola
NE6736226N	C1-21	Mercedes Boada	1,229,234	401,539	36.40			13.05	7.4	2430	10"	30	salobre	activo		Domestico y Agrícola
NE6736227N	C1-22	Ian	1,229,310	401,738	43.13						6"			inactivo	Abandonado y sellado	
NE6736228N	C1-23	Abel Ibarra	1,229,420	402,051	62.61	42	32.52				10"					
NE6736230N	C1-24	Hotel Isla Bonita	1,230,702	399,877	7.54	70	3.02				12"			inactivo	Equipo en reparacion	
NE6736231N	C1-25	Hotel Isla Bonita	1,230,664	399,846	6.34	64		3.47	7.2	5280	12"	30	salobre	activo		Comercial
NE6736232N	C1-26	Hotel Isla Bonita	1,230,428	400,262	21.88		27.02				4"			activo		
NE6736233N	C1-27	Hotel Isla Bonita	1,230,335	399,970	11.48		10.3				10"			inactivo	Abandonado	
NE6736234N	C1-28	Hotel Isla Bonita	1,230,207	400,301	18.96		25.67				10"			inactivo	Sin bomba instalada	
NE6736235N	C1-29	Duglas Rosas	1,229,371	399,888	8.98		7.76		7.5	289	8"	30	salobre	activo		Domestico
NE6736236N	C1-30	Hotel Dunes	1,230,233	399,021	1.09	50		10.15	7.2	5590	8"	28	salobre	activo		
NE6736238N	C1-31	Manuel Gonzalez	1,229,648	399,855	3.80		4.89							inactivo	Molino dañado	
NE6736239N	C1-32	Hotel Isla Bonita	1,230,136	400,154	15.21		16.5				4"			inactivo	No tiene bomba	

Tabla III.2.- Campaña en Pedro González – El Salado. Marzo, 2005. C2

<i>Propietario</i>	<i>Id</i>	<i>N° de la Parcela</i>	<i>NORTE</i>	<i>ESTE</i>	<i>Altitud msnm</i>	<i>Estado Actual</i>	<i>Nivel (m) Estático</i>	<i>Nivel (m) Dinámico</i>	<i>Fecha</i>	<i>PH</i>	<i>CE (mS/cm2)</i>	<i>Salinidad (%)</i>
Angel Mata	C2-1	20 A	1,228,324	401,375	120	no activo	7.2		29/03/2005	7.6	1500	0.07
Angello Cappella	C2-2		1,229,255	401,888	76.9	activo		31.1	22/03/2005	7.4	2950	0.14
Daniel Quijada	C2-3		1,228,433	401,295	62	activo	7.5		29/03/2005	7.5	1170	0.07
Domingo Francisco	C2-4	16 A	1,228,824	401,384	32		1.5		29/03/2005	8	1640	0.07
Jonathan Bastidas	C2-5		1,228,595	401,874	79	activo	18		28/03/2005	8.2	1270	0.05
Julian Serrano	C2-6	16A	1,228,812	401,337	46	activo		9.4	22/03/2005	7.6	1950	0.09
Julio Requena	C2-7	16B	1,228,680	401,284	54	activo	16		29/03/2005	7.8	1420	0.06
Luis Zacarias	C2-8		1,228,556	401,225	53	activo	6.5		29/03/2005	7.6	1760	0.08
Juan Abraham	C2-9		1,228,227	401,822	65	no activo	14.82		22/11/2001			
Ana Lista	C2-10		1229279	401704		no activo	2.5		28/03/2005	8.2	1410	0.06
Brigido Serrano	C2-11		1,229,547	401,612	33	no activo	21.95		28/03/2005	8.4	1980	0.09
Victor Julio Marin	C2-12		1,229,471	401,688	31		8.6		28/03/2005	7.4	4800	0.25
Edgar Guerra	C2-13		1,229,056	401,825		activo		13.75	24/11/2001	7.45	1420	
Rafael Mata	C2-14		1,228,985	401,887								
Nicolas Wecenchace	C2-15		1,229,159	402,107		activo		15.1	06/04/2005	7.8	1080	0.04
Francisco Mikuski	C2-16	40	1,229,770	402,045	37	no activo	8		22/03/2005	8.8	2460	0.12
Julio Serrano	C2-17		1,229,985	402,198	50.5	activo	8.6		22/03/2005	6.8	4200	0.21
Luis Carreño	C2-18	77	1,229,964	402,349	53.3	activo		14.35	22/03/2005			
Raul Rodriguez	C2-19	42	1,229,509	402,200	85.7	activo	29		22/03/2005	7.7	1680	0.07
Mario Dambrosio	C2-20		1,228,477	400,902	42	activo				8.5	2080	0.09
Mario Dambrosio	C2-21		1,228,507	400,485	40	no activo	12.42		27/11/2001			
Vicente Mata	C2-22		1,228,644	401,044	38	no activo	8.86		27/11/2001			
Vicente Mata	C2-23		1,229,353	401,019	39	no activo	15.46		07/04/2005	7.5	2870	0.13
Juana Gonzalez	C2-24	15B	1,229,254	401,378		activo		15.2	29/03/2005	7.5	2450	0.11
Freddy Aguilera	C2-25	13	1,229,392	401,379		activo		20.5	31/03/2005	7.3	3240	0.16
Isaac Zacarias	C2-26	9	1,229,457	401,166	35	activo	18.4		29/03/2005	7.3	3010	0.14
Jose Salazar	C2-27	24	1,229,216	401,708	28	activo	14.78			7.41	1850	
Mercedes Boada	C2-28	23	1,229,234	401,539		activo		5.58	31/03/2005	7.5	2120	0.1
IAN	C2-29		1,229,310	401,738		no activo						
Abel Ibarra	C2-30	37	1,229,420	402,051	33	no activo	21.9		28/03/2005	7.7	1610	0.07
Carlos Mata	C2-31		1,229,100	401,180	28	activo	8.3			7.44	1780	
Hnos. Mata Estaba	C2-32		1,228,796	399,302	3		5.32		12/05/1998	7.2	3670	

Tabla III.3.- Campaña en Pedro González – El Salado. Mayo, 2006. C3.

<i>ID</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>	<i>T(°C)</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>ALC</i>	<i>SIO2</i>	<i>CL</i>	<i>SO4</i>	<i>CA</i>	<i>MG</i>	<i>NO3</i>	<i>NA</i>	<i>K</i>	<i>HCO₃</i>
C3-1	1229349	401560	29.5	6.82	2280	690		420	76	8	194	4	150	7.6	842
C3-2	1229258	401196	28.8	7.6	2422	831	40.7	342	67	3.6	238	53	155	4.7	
C3-3	1229231	399952	27	7.4	1900	676	25	228	100	14	192	0.88	140	0	825
C3-4	1229252	402165	28.53	7.5	1885	773	37.7	255	62	2	166	17	160	5.8	
C3-5	1227890	402026	25.15	7.6	965	554	58.9	152	12	1.2	121	4	29	1.6	
C3-6	1229471	401688	30	7.3	4800	670		1148	200	44	334		421	1.8	817
C3-7	1229056	401825	28.9	7.5	1641	734	56	135	33	2.2	177	27	55	3.3	
C3-8	1229159	402107	29	7.4	1227	475		310	20	30	126		209	0.6	580
C3-9	1228477	400902	29.7	6.8	2631	711	43.2	410	122	9.46	175	13.07	282	4	
C3-10	1229392	401379	30	6.9	3460	670		790	2	50	150	27	460	0	817
C3-11	1229457	401166	29.1	7	3770	520		960	160	70	139		280	0	634
C3-12	1229216	401708	29.2	7.5	1950	762	51.8	275	56	2.5	186	38	109	5.2	
C3-13	1230664	399846	27.6	6.8	56495	139	47.3	20247	2606	375	1359	18	11638	940	
C3-14	1230335	399970	30.2	7.1	3341	641	58.2	555	123	29.2	148	27	389	9.5	
C3-15	1229371	399888	32.7	8.17	1000	480		380	150	6	116		5	0	586
C3-16	1229455	401588	30.17	7	4002	554	49.2	922	169	50.1	140	16	664	5.4	
C3-17	1228753	401399	29.33	7.45	2111	942	62.1	290	77	4.2	193	26	136	3.6	
C3-18	1228750	399775	28.74	7.4	3880	900	31.4	890	205	1.8	361	49	246	3.6	
C3-19	1229343	402053	28.9	7.8	2064	803	40.2	198	63	3.9	153	20	173	5.5	
C3-20	1228655	400696	30.17	7.2	3644	554	48	882	167	15.8	273	54	266	3.5	

Fuente: Corsi (2006)

Tabla III.4.- Campaña en Pedro González – El Salado. Febrero, 2007. C4.

ID	NORTE	ESTE	Elevación	Prof.	NE (m)	ND	Cota	Q	pH	CE	Salinidad	Observaciones
			(msnm)	(m)	(m)	(m)	piezométrica	(L/s)		(mS/cm2)	(ppm)	
C4-1	1228587	399804	14	12	5.46		8.54		7.7	2,250	1,130	Agua salobre
C4-2	1229326	401863	61	45	11.12		49.88	3	8.3	2,430	2,800	Bomba inactiva. Agua salada
C4-3	1229145	402004	79	46	37.11		41.89		7.6	2,360	1,190	
C4-4	1228556	401810	72					0.58	8	1,450	810	
C4-5	1228619	401718	62	62	13.2	17.9	48.8	0.26				Bomba
C4-6	1228688	401656	46		10.6	18.86	35.4	0.86	7.5	1,920	1,190	Pozo saltante en épocas de lluvia.
C4-7	1228800	401546	49	30	11		38		7.5	2,400	1,130	
C4-8	1228890	401530	46	20	9.82	12.3	36.18		7.3	2,440	1,190	
C4-9	1228183	401442	48		12.78		35.22		8.2	2,580	1,500	
C4-10	1228763	401274	28					0.092	7.5	2,740	1,400	
C4-11	1229026	401201	34		11.3		22.7		7.6	4,700	2,460	
C4-12	1229101	400993	49	18	11.6		37.4	0.55	7.5	4,560	2,580	Uso del agua: doméstico y de riego.
C4-13	1228800	401338	32	30	4.36		27.64		7.3	2,800	1,420	En épocas de lluvia el pozo es artesiano.
C4-14	1227861	401648	69	18	14.58		54.42		7.8	1,893	1,030	
C4-15	1227530	401837	123		123			0.32	7.5	1,328	690	
C4-16	1228396	401225	45	30	8.75		36.25	0.46	7.5	2,080	1,040	
C4-17	1229181	401867	71	46	26.36	28	44.64	0.98	7.3	5,030	2,680	
C4-18	1228981	401868	71	42	28.95		42.05		7.5	2,270	1,600	
C4-19	1229195	402152	77	40	18.72		58.28	2	8	2,170	1,100	
C4-20	1228647	399785	16	9	5.17		10.83		7.6	2,400	1,250	
C4-21	1228785	399640	17	11	6.34		10.66		7.5	4,880	2,490	
C4-22	1229013	399707	11	16	5.36		5.64		7.5	3,120	1,570	

Tabla III.5.- Campaña en Pedro González – El Salado. Abril y octubre, 2008. C5.

ID	Coordenadas UTM		Cota	Prof	NE	ND	Q	T	Ph	Salinidad	Dureza	OD	RAS	CE	TSD	USO	Estatus
	N	E	msnm	m	(m)	(m)	l/s	(°C)		%	(mg/l)			μS/cm	mg/l		
C5-1	1229279	401704	40		7,5	9,2	-----	27,9	7,57	1,1	850	5,5	0.189	1733	1027	Agrícola, doméstico	Activo
C5-2	1229509	402200	67	53	-----	-----	-----	27,5	7,45	1,2	990	5,5	0.272	2040	1093	Doméstico	Activo
C5-3	1229056	401825	50	-----	9,6	13,3	-----	28	7,46	0,8	950	6,9	0.077	1899	819	Doméstico	Activo
C5-4	1229770	402045	37	45	13,68	-----	-----	29,4	8,56	-----	-----	-----	-----	2340	1470	Abandonado	Inactivo
C5-5	1229392	401379	32	31	15,11	16,02	0.3	22	7,49	2,7	1000	4	5.225	3620	2310	Agrícola, comercial	Activo
C5-6	1229457	401166	35	30	14,64	15,83	-----	22	7,34	2,6	1230	4,2	3.586	3680	3320	Agrícola, doméstico	Activo
C5-7	1229216	401708	42	30	12	14,1	-----	28,3	7,63	0,9	890	5,9	0.326	1854	851	Doméstico	Activo
C5-8	1229420	402051	61	46	28,62	29,3	-----	22	7,54	1,1	880	5,4	0.128	1776	990	Agrícola, doméstico	Inactivo
C5-9	1229371	399888	28	7	6,39	-----	-----	31,4	7,41	-----	-----	-----	-----	1890	1192	Doméstico	Activo
C5-10	1229133	401374	46	33	4,34	7,1	-----	26,6	7,95	1,2	950	4,3	0.128	1915	1143	Agrícola, doméstico	Activo
C5-11	1228480	400912	27	-----	-----	26,78	0.127	22,3	7,66	1,5	810	7,5	0.973	1906	1182	Agrícola	Activo
C5-12	1229544	402045	60	-----	26,13	28,88	0.22	23,1	7,66	2,6	1200	5,6	3.017	3420	2140	Doméstico	Activo
C5-13	1228903	401538	34	-----	8,39	-----	-----	28,1	7,45	-----	-----	-----	-----	1636	1028	Desconocido	Activo
C5-14	1228685	401655	44	-----	8,53	-----	-----	28,4	7,36	-----	-----	-----	-----	1316	830	Desconocido	Activo
C5-15	1229344	401865	60	40	-----	-----	-----	27,5	7,45	-----	-----	-----	-----	2040	1093	Desconocido	Activo
C5-16	1229088	400989	30	-----	13,65	-----	-----	30,4	6,99	-----	-----	-----	-----	3430	2140	Desconocido	Activo
C5-17	1228584	399803	11	6,8	5,85	-----	-----	30,6	7,43	-----	-----	-----	-----	1698	1070	Desconocido	Activo
C5-18	1228860	399777	18	-----	-----	-----	-----	30	7,71	-----	-----	-----	-----	1769	1113	Desconocido	Activo
C5-19	1229088	399639	18	-----	5,49	-----	-----	29,7	7,43	-----	-----	-----	-----	3900	2440	Desconocido	Activo
C5-20	1228980	401875	58	42	27,42	-----	-----	29,6	7,4	-----	-----	-----	-----	1544	965	Desconocido	Activo

Tabla III.6.- Campaña en Pedro González – El Salado. 2009. C6.

ID	Coordenadas UTM		Cota	Prof	NE	ND	T	Ph	Dureza	RAS	OD	Salinidad	CE	TSD	USO	Estado
	N	E	msnm	m	(m)	(m)	(°C)									
C6-1	1229279	401704	40	-----	6.48	8.51	27,8	7.34	840	0.974	5.3	1.2	1939	1219	Agrícola, doméstico	Activo
C6-2	1229509	402200	67	53	-----	-----	28.8	7.33	775	0.227	7.4	1	1593	1002	Doméstico	Activo
C6-3	1229056	401825	50	-----	7.57	8.8	28.2	7.38	760	0.107	5.9	0.8	1530	862	Doméstico	Activo
C6-5	1229392	401379	32	31	15,11	16,02	27.5	7.08	895	5.554	5.7	2.1	3420	2160	Agrícola, comercial	Activo
C6-7	1229216	401708	42	30	12	14,1	27.7	7.17	845	0.091	7	1	1695	1040	Doméstico	Activo
C6-8	1229420	402051	61	46	28,62	29,3	22	7.23	665	0.97	7	0.9	1561	983	Agrícola, doméstico	Inactivo
C6-10	1229133	401374	46	33	4,34	7,1	27.9	7.37	850	0.2	2.6	1	1738	1030	Agrícola, doméstico	Activo
C6-11	1228480	400912	36	-----	-----	15.07	22,3	7.2	800	0.121	3.9	0.9	1614	1018	Agrícola	Activo
C6-12	1229544	402045	60	-----	23.14	27.29	24.9	7.15	1250	2.937	5	1.8	3500	2230	Doméstico	Activo
C6-20	1228980	401875	58	42	27,42	-----	29,2	7.23	-----	0.97	7	0.9	1561	983	Desconocido	Activo

Bdigital.ula.ve

Tabla III.7.- Campaña en Pedro González – El Salado. 2010. C7.

ID	Coordenadas UTM		Cota	Prof	NE	ND	T	Ph	Dureza	RAS	OD	Salinidad	CE	TSD	Q	USO	Estado
	N	E	msnm	m	(m)	(m)	(°C)					%			(l/s)		
C7-2	1229509	402200	67	42	-----	-----	27,1	7.32	775	0.227	3.33	0.7	1694	1067	0.22	Doméstico	Activo
C7-8	1229420	402051	33	42	33.13	33.72	23.3	7.51			4.62	0.7	1547	976	0.3	Agrícola, doméstico	Inactivo
C7-12	1229544	402045	18	52	31.00	28,8	23.7	7.1			4.18	1.9	4150	2620	0.9	Doméstico	Activo
C7-21	1229186	402145		40	19.61	21.19	25.6	7.57			4.43	0.6	1429	904	0.39		
C7-22	1229559	401993			13.46	13.50	25.5	6.75			1.67	1.9	4220	2650			
C7-23	1,229,159	402,107	73.96	30	19.92	20.10	23.9	7.54		1170	5.06	0.3	984	618	1.32	Domestico y Agrícola	Activo

Tabla III.8.- Campaña en La Fuente - Paraguachí. 2005. C1.

ID	PROPIETARIO	Este	Norte	Cota	pH	μS/cm	%S	STD	Calcio	Magnesio	Sulfato	Cloruro	Potasio	Bicarbonato	Alcalinidad	Sodio	Estado
C1-1	Aparicio Albornoz	406379	1224344	49	7.5	3520	1.5	2230	42	251	190	900	2.5	824	675	12.4	Inactivo
C1-2	Carmen Altuve	402796	1226806	90	7.1	5180	2.1	3200	108	307	360	1212	4.2	732	600		Activo
C1-3	Daniel Moya	403986	1226865	72	7.4	2550	1.1	1580	32	185	110	500	1.6	695	570		Activo
C1-4	Iris Amparan	406926	1226320	35	7.88	3320	1.6	2090	94	136	115	850	0.4	519	425		Activo
C1-5	Jesús Bellowin	404978	1227167	69	7.5	1630	0.7	1047	20	168	70	265	0.3	573	470		Activo
C1-6	Jesús Quijada	406351	1224169	35	7.7	1330	0.65	852	16	146	40	320	0.7	720	590		Activo
C1-7	Juan Monasterios	404670	1228951	66	7.4	2600	1.1	1640	26	176	110	575	1.1	787	645		Activo
C1-8	Juan Hernandez	402988	1226620	71	7.4	2080	0.8	1340	22	167	900	450	1.6	744	610		Activo
C1-9	Oscar Dáger	404547	1227103	61	7.5	1530	0.6	910	14	160	50	225	0.7	494	405		Activo
C1-10	Pablo González	406213	1226566	24	7.1	2610	1.1	1650	12	185	105	672	1	720	590		Activo
C1-11	Pedro Luis Rosas	405549	1226730	29	7.3	2590	1	1669	32	173	90	540	1.5	677	555		Activo
C1-12	Ramón Sánchez	405983	1226340	5	6.9	1496	0.6	920	46	104	70	400	2.6	403	330		Activo
C1-13	Sucesión Salazar	404923	1224644	58	7.4	3020	1.2	1900	40	204	130	600	4.1	732	600		Activo

Tabla III.9.- Campaña en La Fuente - Paraguachí. 2006. C2.

ID	ID	PROPIETARIO	Norte	Este	pH	μS/cm	%S	STD	Calcio	Magnesio	Sulfato	Cloruro	Bicarbonato	Alcalinidad
NE6736155C	C2-1	Aparicio Albornoz	1224344	406379	7.62	3140	1.5	1970	54	208	190	620	817	670
NE6736253A	C2-2	Carmen Altuve	1226806	402796	6.95	4920	2.4	3110	180	156	350	116	415	340
NE6736017A	C2-3	Daniel Moya	1226865	403986	7.2	3100	1.4	1950	44	204	160	650	317	260
NE6736107A	C2-4	Iris Amparan	1226320	406926	7.88	3320	1.6	2090	68	128	170	930	403	330
NE6736252A	C2-5	Jesús Bellowin	1227167	404978	7.29	1600	0.7	998	18	182	50	270	708	580
NE6736050C	C2-6	Jesús Quijada	1224169	406351	7.59	1255	0.6	790	22	131	60	100	683	560
NE6736014A	C2-7	Juan Monasterios	1228951	404670	7.16	2580	0.7	1650	30	169	90	380	805	660
NE6736020C	C2-8	Juan Hernandez	1226620	402988	7.32	2230	1	1400	36	226	70	310	988	810
NE6736151A	C2-9	Oscar Dáger	1227103	404547	7.1	1532	0.7	964	18	149	40	320	610	500
NE6736160A	C2-10	Pablo González	1226566	406213	7.29	3050	1.4	1920	12	192	150	630	756	620
NE6736247A	C2-11	Pedro Luis Rosas	1226730	405549	7.08	2840	1.3	1790	26	209	250	590	805	660
NE6736117A	C2-12	Ramón Sánchez	1226340	405983	6.93	1796	0.8	1128	52	125	150	370	561	460
NE6736110A	C2-13	Sucesión Salazar	1224644	404923	7.19	2920	1.4	1840	44	220	140	450	903	740

Tabla III.10.- Campaña en La Fuente - Paraguachí. Abril – Mayo 2007. C3.

ID	ID	PROPIETARIO	Este	Norte	Cota	NE(m)	ND(m)	NP	pH	μS/cm	%S	STD	Calcio	Magnesio	Sulfato	Cloruro	Bicarbonato	Alcalinidad	Sodio
NE6736155C	C3-1	Aparicio Albornoz	406379	1224344	49	3.8	-	45.2	7.43	3020	1.5	1900	44	197	142	630	769	630	11.8
NE6736253A	C3-2	Carmen Altuve	402796	1226806	90	27.95	28.36	62.05	7.9	5480	2.3	2850							
NE6736107A	C3-4	Iris Amparan	406926	1226320	35		16.77	35	8	3400	1.6	2140							
NE6736252A	C3-5	Jesús Bellorín	404978	1227167	69		-	69	7.94	1746	0.7	907							
NE6736050C	C3-6	Jesús Quijada	406351	1224169	35	5.96		29.04	8.01	1311	0.6	762							
NE6736020C	C3-8	Juan Hernandez	402988	1226620	71	8.46		62.54	7.39	1930	1	1217							
NE6736151A	C3-9	Oscar Dáger	404547	1227103	61		-	61	7.41	1504	0.7	948							
NE6736160A	C3-10	Pablo González	406213	1226566	24		17.12	24	7.33	2980	1.5	1870							
NE6736247A	C3-11	Pedro Luis Rosas	405549	1226730	29		7.3	29	7.15	2820	1.4	1770							
NE6736117A	C3-12	Ramón Sánchez	405983	1226340	5	5.95	7.97	-0.95	6.27	1713	0.9	1081							
NE6736110A	C3-13	Sucesión Salazar	404923	1224644	58	15.96		42.04	7.33	2610	1.2	1650							

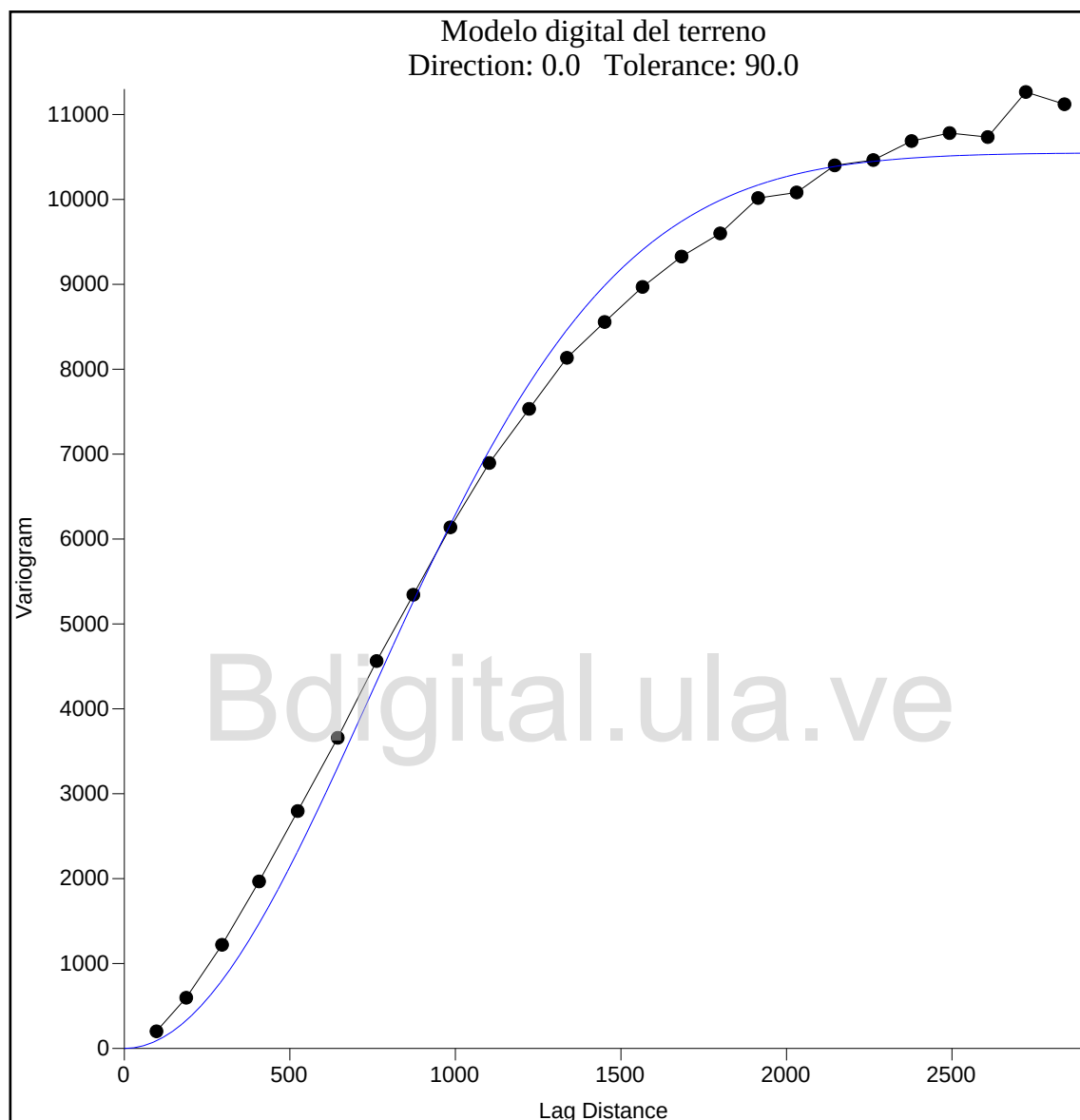
Tabla III.11.- Campaña en La Fuente - Paraguachí. Julio 2007. C4.

Pozo	Este	Norte	Cota	NE	NP	Q (m3/d)	Q(L/s)
P2	406193	1223986	-	4.15		68.52	0.8
P5	406301	1224165	32.5	-	-	42.4	0.5
P7	406367	1224569	32.18	5	27.18	36.2	0.4
P8	406036	1226213	22.86	7.6	15.26	174.5	2.0
P9	406742	1225958	19.8	7.82	11.98	89.2	1.0
P13	406033	1225115	38.9	4.15	34.75	42.7	0.5
P15	405938	1224992	39.5	5.12	34.38	22.7	0.3
P18	402592	1226437	-	-		99.3	1.1
P22	404689	1224206	101.3	14.67	86.63	152.6	1.8
P25	404920	1224478	69	8.4	60.6	142.8	1.7

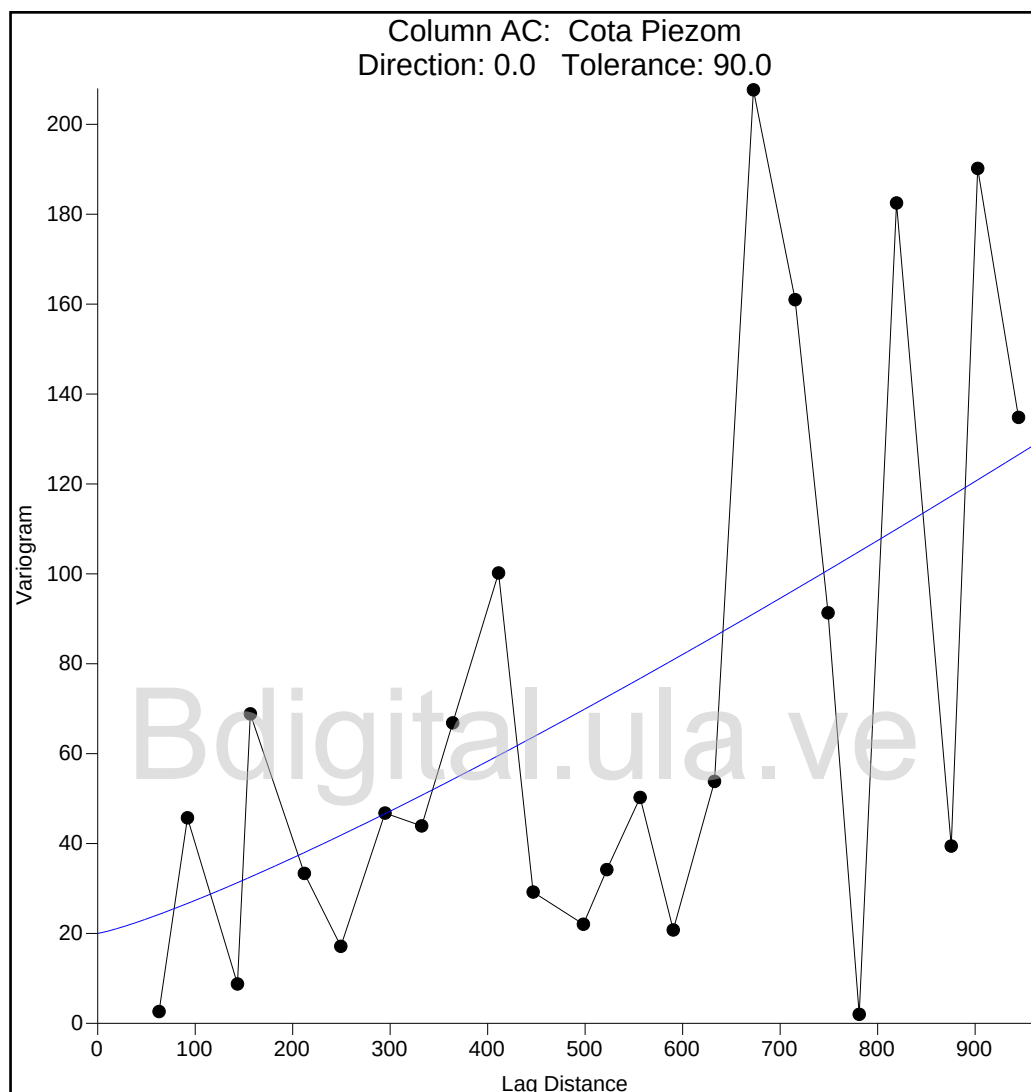
Tabla III.12.- Campaña en La Fuente - Paraguachí. 2008. C5.

<i>ID</i>	<i>PROPIETARIO</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>	<i>Cota</i>	<i>NE</i>	<i>NP</i>	<i>ND</i>	<i>Q (L/S)</i>	<i>T</i>	<i>PH</i>	<i>Salinidad</i>	<i>CE</i>
C5-1	Aparicio Albornoz	1224344	406379	49	2.8	46.2	2.94	0.377	27.50	7.59	1.80	3110
C5-2	Carmen Altuve	1226806	402796	90	4.2	85.8	8.3	-----	22.50	7.19	2.50	4320
C5-4	Iris Amparan	1226320	406926	35	7.14	27.86	7.14	0.645	21.80	8.25	1.50	2950
C5-5	Jesús Bellorín	1227167	404978	69			23.73	-----	26.30	7.46	0.90	1351
C5-6	Jesús Quijada	1224169	406351	35	4.2	30.8	4.35	0.281	21.80	7.45	0.60	1251
C5-7	Juan Monasterios	1228951	404670	66	9.8	56.2	15.8	0.324	21.90	7.25	1.30	2630
C5-8	Juan Hernandez	1226620	402988	71	7.48	63.52	-----	-----	24.80	7.27	1.30	1975
C5-9	Oscar Dáger	1227103	404547	61	21.56	39.44	32.35	-----	22.50	7.48	1.00	1563
C5-10	Pablo González	1226566	406213	24			18.7	0.329	23.80	7.50	1.60	2800
C5-11	Pedro Luis Rosas	1226730	405549	29			12.4		22.90	7.57	1.40	2710
C5-12	Ramón Sánchez	1226340	405983	5			26.75	0.669	26.70	7.43	1.00	1710
C6-14	Eustacio Díaz	1225351	406021	24	3.68	20.32			28.7	6.98		1705
C6-15	Pablo González	1226566	406213	24	18.83	5.17			30.40	6.98		2780
C6-16	Ramón Sánchez	1226340	405983	5					30.00	6.83		1507
C6-17	Sucesión Salazar	1224644	404923	58	15.42	42.58			31.30	6.97		2800
C6-18	Pedro Luis Rosas	1226730	405549	29					31.10	6.99		2590
C6-19	Juan Hernandez	1226620	402988	71	7.32	63.68			29.50	7.00		2340
C6-20	Oscar Dáger	1227103	404547	61					31.30	7.22		1562

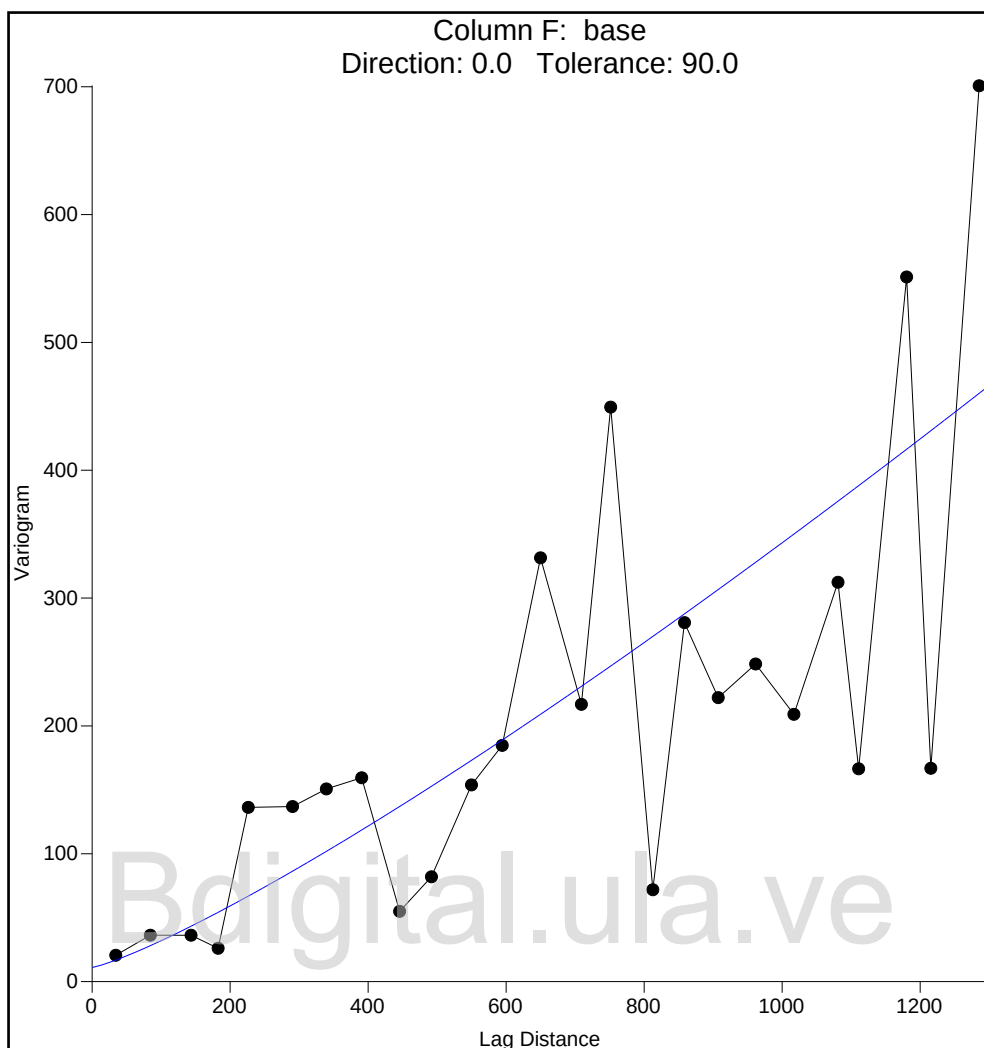
Anexo IV. Variogramas.



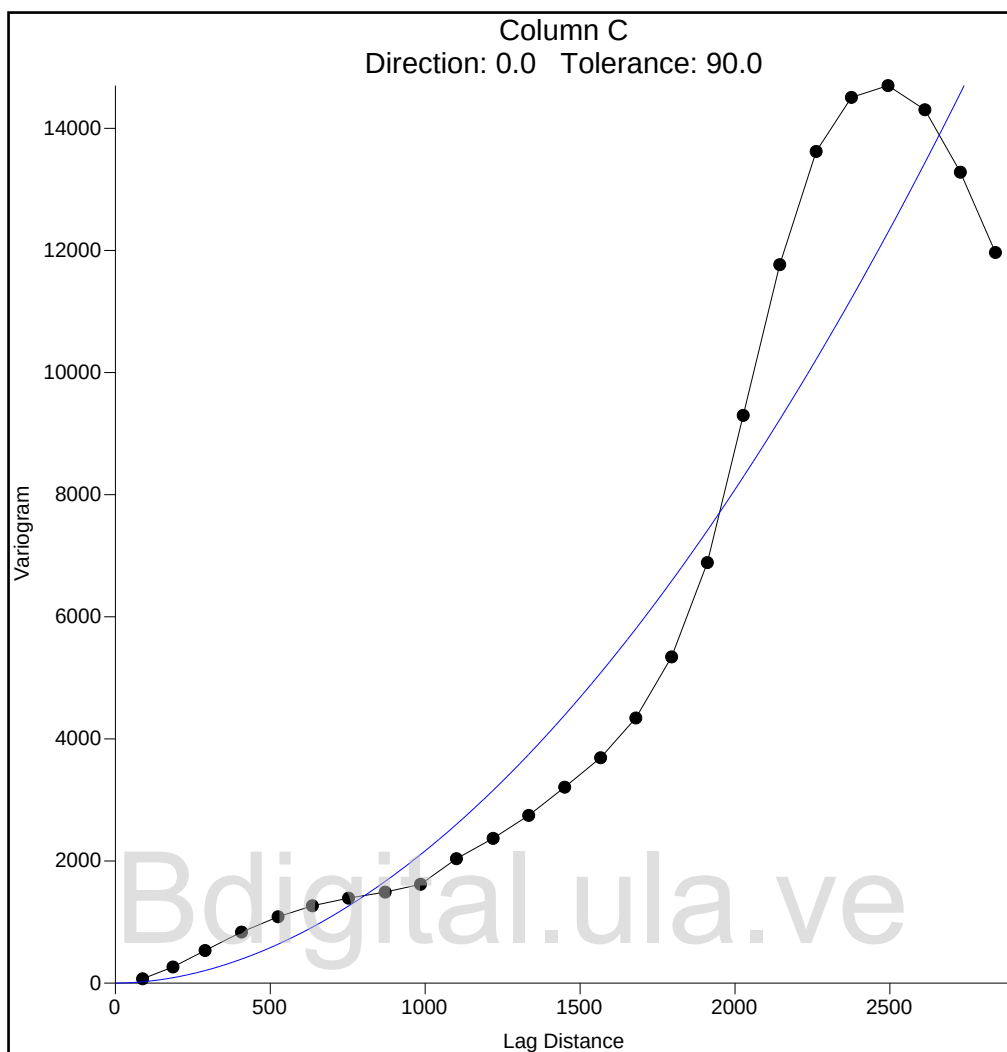
Anexo IV.1.- Variograma del modelo digital del terreno en Pedro González – El Salado, municipio Gómez.



Anexo IV.2.- Variograma del mapa piezométrico 2007 en Pedro González – El Salado, municipio Gómez.



Anexo IV.3.- Variograma del modelo digital de la base del acuífero en Pedro González – El Salado, municipio Gómez.



Anexo IV.4.- Variograma del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero en Pedro González – El Salado, municipio Gómez.

Anexo V. Datos de niveles piezométricos.

Tabla V.1.- Datos de niveles piezométricos para la campaña 2001. Pedro González – El Salado.

ID	Coordenadas		Altitud	NE	Cota Piezométrica
	Este	Norte	msnm	(m)	(m)
C1-1	399,672	1,229,050	10.57	4.54	6.03
C1-2	401,822	1,228,227	74.35	14.82	59.53
C1-4	401,612	1,229,547	39.06	14.59	24.47
C1-5	401,688	1,229,471	39.32	11.57	27.75
C1-9	402,045	1,229,770	54.94	12.23	42.71
C1-10	402,198	1,229,485	72.05	10.59	61.46
C1-11	402,396	1,229,964	59.86	14	45.86
C1-14	400,485	1,228,507	21.40	12.42	8.98
C1-15	401,044	1,228,644	29.51	8.86	20.65
C1-16	401,019	1,229,353	20.60	10.56	10.04
C1-17	401,378	1,229,254	31.61	10.88	20.73
C1-20	401,708	1,229,216	42.28	14.78	27.50
C1-23	402,051	1,229,420	62.61	32.52	30.09
C1-24	399,877	1,230,702	7.54	3.02	4.52
C1-26	400,262	1,230,428	21.88	27.02	-5.14
C1-27	399,970	1,230,335	11.48	10.3	1.18
C1-28	400,301	1,230,207	18.96	25.67	-6.71
C1-29	399,888	1,229,371	8.98	7.76	1.22
C1-31	399,855	1,229,648	3.80	4.89	-1.09
C1-32	400,154	1,230,136	15.21	16.5	-1.29

Fuente: Propia.

Tabla V.2.- Datos de niveles piezométricos para la campaña 2005. Pedro González – El Salado.

<i>ID</i>	<i>Coordenadas</i>		<i>Altitud</i>	<i>NE</i>	<i>Cota Piezométrica</i>
	<i>Este</i>	<i>Norte</i>	<i>msnm</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>
<i>C2-1</i>	401375	1228324	120	7.2	112.8
<i>C2-3</i>	401295	1228433	62	7.5	54.5
<i>C2-4</i>	401384	1228824	32	1.5	30.5
<i>C2-5</i>	401874	1228595	79	18	61
<i>C2-7</i>	401284	1228680	54	16	38
<i>C2-8</i>	401225	1228556	53	6.5	46.5
<i>C2-9</i>	401822	1228227	65	14.82	50.18
<i>C2-11</i>	401612	1229547	33	21.95	11.05
<i>C2-12</i>	401688	1229471	31	8.6	22.4
<i>C2-16</i>	402045	1229770	37	8	29
<i>C2-17</i>	402198	1229985	50.5	8.6	41.9
<i>C2-19</i>	402200	1229509	85.7	29	56.7
<i>C2-21</i>	400485	1228507	40	12.42	27.58
<i>C2-22</i>	401044	1228644	38	8.86	29.14
<i>C2-23</i>	401019	1229353	39	15.46	23.54
<i>C2-26</i>	401166	1229457	35	18.4	16.6
<i>C2-27</i>	401708	1229216	28	14.78	13.22
<i>C2-30</i>	402051	1229420	33	21.9	11.1
<i>C2-31</i>	401180	1229100	28	8.3	19.7
<i>C2-32</i>	399302	1228796	3	5.32	-2.32

Fuente: Propia.

Tabla V.3.- Datos de niveles piezométricos para la campaña 2007. Pedro González – El Salado.

ID	Coordenadas		Altitud	NE	Cota Piezométrica
	Este	Norte	msnm	(m)	(m)
C4-1	399804	1228587	14	5.46	8.54
C4-2	401863	1229326	61	11.12	49.88
C4-3	402004	1229145	79	37.11	41.89
C4-5	401718	1228619	62	13.2	48.8
C4-6	401656	1228688	46	10.6	35.4
C4-7	401546	1228800	49	11	38
C4-8	401530	1228890	46	9.82	36.18
C4-9	401442	1228183	48	12.78	35.22
C4-11	401201	1229026	34	11.3	22.7
C4-12	400993	1229101	49	11.6	37.4
C4-13	401338	1228800	32	4.36	27.64
C4-14	401648	1227861	69	14.58	54.42
C4-16	401225	1228396	45	8.75	36.25
C4-17	401867	1229181	71	26.36	44.64
C4-18	401868	1228981	71	28.95	42.05
C4-19	402152	1229195	77	18.72	58.28
C4-20	399785	1228647	16	5.17	10.83
C4-21	399640	1228785	17	6.34	10.66
C4-22	399707	1229013	11	5.36	5.64

Fuente: Propia.

Tabla V.4.- Datos de niveles piezométricos para la campaña 2008. Pedro González – El Salado.

ID	Coordenadas		Altitud	NE	Cota Piezométrica
	Este	Norte	msnm	(m)	(m)
C5-1	401704	1229279	40	7.5	32.5
C5-3	401825	1229056	50	9.6	40.4
C5-4	402045	1229770	37	13.68	23.32
C5-5	401379	1229392	32	15.11	16.89
C5-6	401166	1229457	35	14.64	20.36
C5-7	401708	1229216	42	12	30
C5-8	402051	1229420	61	28.62	32.38
C5-9	399888	1229371	28	6.39	21.61
C5-10	401374	1229133	46	4.34	41.66
C5-12	402045	1229544	60	26.13	33.87
C5-13	401538	1228903	34	8.39	25.61
C5-14	401655	1228685	44	8.53	35.47
C5-16	400989	1229088	30	13.65	16.35
C5-17	399803	1228584	11	5.85	5.15
C5-19	399639	1229088	18	5.49	12.51
C5-20	401875	1228980	58	27.42	30.58

Fuente: Propia.

APÉNDICES.



Figura A.1.- Fotografía aérea a escala 1:15000 pertenecientes a la misión 040439. Foto 139. Fecha: 11 de septiembre de 1976.



Figura A.2.- Fotografía aérea a escala 1:15000 pertenecientes a la misión 040439. Foto 140. Fecha: 11 de septiembre de 1976.



Figura A.3.- Fotografía aérea a escala 1:15000 pertenecientes a la misión 040439. Foto 141. Fecha: 11 de septiembre de 1976.



Figura A.4.- Fotografía aérea a escala 1:15000 pertenecientes a la misión 040439. Foto 142. Fecha: 11 de septiembre de 1976.



Figura A.5.- Fotografía aérea a escala 1:15000 pertenecientes a la misión 040439. Foto 155. Fecha: 11 de septiembre de 1976.



Figura A.6.- Fotografía aérea a escala 1:15000 pertenecientes a la misión 040439. Foto 156. Fecha: 11 de septiembre de 1976.



Figura A.7.- Imagen satelital pancromática. SPOT – 5. Fecha 12/12/2008. Estado Nueva Esparta.



Figura A.8.- Imagen satelital a color de 4 bandas espectrales. SPOT – 5. Fecha 12/12/2008. Estado Nueva Esparta.

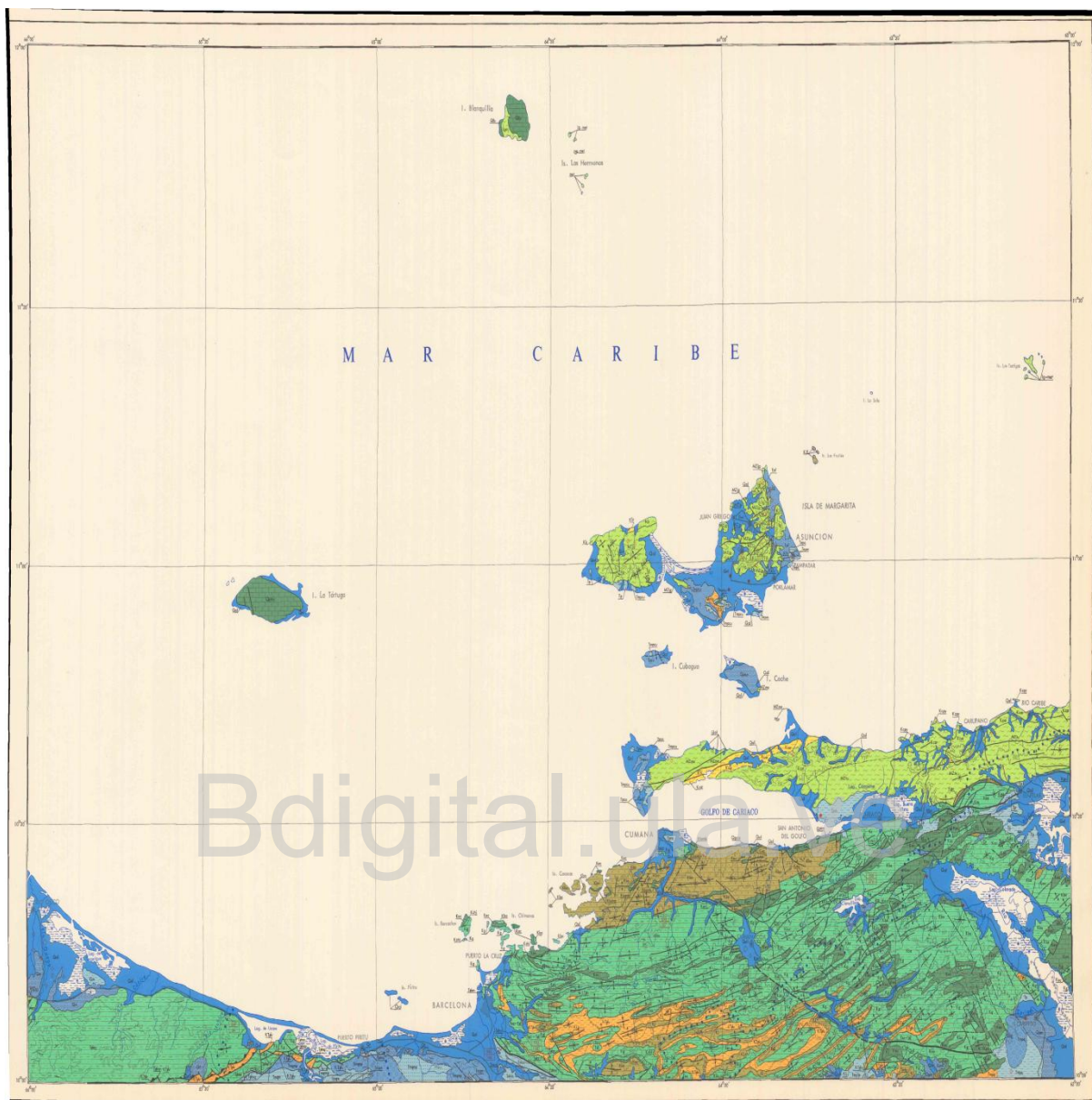


Figura A.9.- Mapa hidrogeológico de la hoja NC - 20 - IV de Puerto La Cruz. Escala 1:50000. Año 1972.