

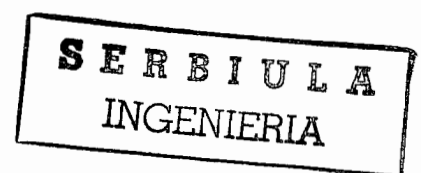
GB1001
D 87.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
MÉRIDA, VENEZUELA



**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS RESERVAS DE
AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO DE LOS LLANOS
DE CALABOZO, ESTADO GUÁRICO,
CON EL APOYO DE TÉCNICAS NUCLEARES**

REALIZADO POR: DURÁN Z., DOUGLAS R.
LOBO V., CARLOS L.



TUTORES ACADÉMICOS: HERVÉ JÉGAT
MARISELA UZCÁTEGUI

TUTOR INDUSTRIAL: FERNANDO DECARLI

MÉRIDA, NOVIEMBRE DE 2004



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
MÉRIDA, VENEZUELA

**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS RESERVAS DE
AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO DE LOS LLANOS
DE CALABOZO, ESTADO GUÁRICO,
CON EL APOYO DE TÉCNICAS NUCLEARES**

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

MÉRIDA, NOVIEMBRE DE 2004

DEDICATORIA

Esta obra se la dedico a Dios y mi Familia, quienes son los que me han apoyado durante toda mi carrera y me han acompañado durante toda mi vida. Por Ustedes, todo...

Carlos Lobo

Dedico esta obra primeramente a Dios y a todas aquellas personas que jamás dudaron de la realización de la misma, en especial a quienes me brindaron su apoyo desde todo punto de vista, a mis padres, mis hermanos y mi familia en general. A mi querida y amada compañera Rona Rivas.

Que Dios los consagre...

Douglas Durán

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar el mayor de los agradecimientos a todas aquellas personas que nos ofrecieron su apoyo en las diversas etapas durante el desarrollo de esta obra.

Al profesor Hervé Jegat, tutor principal de este trabajo por su apreciable y generosa colaboración, además de su orientación técnica.

También a la profesora Marisela Uzcátegui, al profesor Oscar Odreman, al profesor Jorge Carrero, y al profesor Francisco Bongiorno, quienes de manera magnánima nos brindaron en todo momento su colaboración y asesoramiento técnico.

Al personal del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT – ULA.).

Al Licenciado Fernando Decarli, tutor industrial, por su valiosa colaboración y al personal de la Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología del Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN – Caracas).

Al personal del Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN) de Calabozo, Estado Guárico.

Al Licenciado Demetrio Fraile y al personal de la Asociación de Productores del sistema de Riego Río Guárico (APROSIGUA).

Al Lic. Néstor Duarte y al personal de la Dirección de Asuntos Nucleares (DAN) del Ministerio de Energía y Minas. Caracas.

Al Ingeniero Samuel Hernández, experto en Hidrología Isotópica de proyecto Desarrollo Uribante – Caparo (DESURCA).

Al ingeniero Javier Guarnizo, personal asignado para asuntos nucleares en Latinoamérica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Al ingeniero Marco Elrich, asesor del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación de las reservas de agua subterránea del acuífero de los Llanos de Calabozo, en el Estado Guárico, el cual se encuentra emplazado en el subsuelo de los terrenos del Sistema de Riego Río Guárico, dentro de un área de estudio que abarca una superficie 4.030 Km² aproximadamente.

Para el estudio de las características geológicas del acuífero, se utilizaron datos de pozos perforados en el área, mediante los cuales se determinó que las rocas dentro del cual está emplazado el acuífero pertenecen a depósitos sedimentarios del Cuaternario. En términos generales, el reservorio está conformado por una alternancia de capas de gravas, arenas, limos y arcillas, en proporciones variables. El sustrato rocoso del acuífero esta conformado por rocas de la Formación Roblecito del Oligoceno.

La evaluación del acuífero se realizó mediante la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual, a través de la aplicación de técnicas geoestadísticas que sirvieron para el estudio y mapeo de las propiedades de cada una de las unidades estratigráficas que conforman el acuífero, y a su vez, mediante la aplicación de técnicas de hidrología isotópica, que en conjunto con los métodos hidrogeológicos tradicionales, contribuyeron al desarrollo de un modelo de recarga y movimiento del flujo de agua subterránea dentro del acuífero.

Las reservas calculadas para el reservorio en base a los datos piezométricos del año 2003 se ubican aproximadamente en 18.000 millones de m³ de agua, cantidad que se obtuvo a partir del volumen de roca permeable saturada y a una porosidad eficaz de 20%, estimada en base a las características litológicas de los materiales permeables del acuífero.

A su vez, ha sido propuesto un modelo hidrogeológico matemático sobre la base del modelo conceptual, el cual permitirá en estudios posteriores realizar simulaciones del flujo subterráneo, que servirían par representar el comportamiento del acuífero, y a su vez, poder realizar predicciones bajo condiciones definidas del comportamiento del mismo en el futuro.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
INDICE DE ANEXOS	x
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
Introducción	2
Objetivos	2
Limitaciones y Alcances	3
CAPITULO II. ASPECTOS GENERALES	5
2.1) Ubicación y Descripción del Área de Estudio	6
2.2) Metodología Aplicada	7
2.2.1) Revisión bibliográfica	7
2.2.2) Interpretación de Información Geográfica obtenida con Sensores Remotos	8
2.2.3) Trabajo de Campo	8
2.2.4) Trabajo de Laboratorio	9
2.2.5) Revisión de la Información de Pozos	9
2.2.6) Elaboración del Mapa Base	13
2.2.7) Elaboración del Modelo Digital del Terreno	13
2.2.8) Elaboración de Secciones Transversales	13
2.2.9) Elaboración de la Base de Datos	14
2.2.10) Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual	14
2.2.11) Elaboración del Modelo de Recarga	14
2.2.12) Calculo de Reservas del Acuífero	15
2.2.13) Elaboración del Modelo Hidrogeológico Matemático	15
2.3) Marco Teórico Conceptual	15
2.3.1) Geoestadística	15
2.3.2) Variable Regionalizada	16
2.3.3) Análisis Geoestadístico de un Fenómeno Natural	17
2.3.3.1) Análisis Estructural	17
El Variograma	17
2.3.3.2) Selección del Modelo	18
Método de Ajuste al Sentimiento	19
Modelos de Variogramas Teóricos más comunes	20
2.3.3.3) Estimación o Interpolación	24
El Krigeado	24
Clasificación de las unidades geológicas en relación con las aguas	
2.3.4) subterráneas	25
Acuíferos	25
Acuitardos	25

	Acuicludeos	26
	Acuifudos	26
2.3.5)	Tipos de Acuiferos	26
	Acuifero Libre	26
	Acuiferos Confinados	26
	Acuiferos Semiconfinados	27
2.3.6)	Niveles Piezométricos	29
2.3.7)	Estructura Hidrogeológica	29
2.3.8)	Trazadores y Transporte	30
2.3.9)	Tipos de Trazadores	30
2.3.10)	Trazador de Agua	31
2.3.11)	Los Isótopos en el Ciclo Hidrológico	32
2.3.12)	Hidrología Isotópica. Técnicas Isotópicas que se utilizan en Hidrología	33
2.3.13)	Isótopos	35
2.3.14)	Número Atómico	35
2.3.15)	Masa Atómica	35
2.3.16)	Número de Masa Atómica	36
2.3.17)	Isótopos del Hidrógeno	36
	Protio	37
	Deuterio	37
	Tritio	37
2.3.18)	Isótopos del Oxígeno	38
	Oxígeno 16	38
	Oxígeno 18	38
2.3.19)	Vida media de un Isótopo Radiactivo	39
2.3.20)	Espectrometría de Masas	39
CAPITULO III. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL Y LOCAL		40
3.1)	Características Geológicas de la Cuenca Oriental de Venezuela	41
3.1.1)	Ubicación y Extensión Geográfica	41
	Subcuenca de Maturín	42
	Subcuenca de Guárico	42
3.1.2)	Estratigrafía Regional de la Subcuenca de Guárico	44
3.1.2.1)	Paleozoico	44
3.1.2.1.1)	Cámbrico	44
	Formación Hato Viejo (Cámbrico Temprano)	44
	Formación Carrizal	45
3.1.2.2)	Mesozoico	45
3.1.2.2.1)	Cretácico	46
	Formación Canoa (Aptiense – Albéense)	46
	Formación Tigre (Cenomaniense – Maastrichtiense)	47
3.1.2.3)	Cenozoico	48
3.1.2.3.1)	Terciario	48
3.1.2.3.1.1)	Eoceno – Oligoceno	48
	Formación La Pascua (Eoceno Tardío)	48
	Formación Roblecito	49

3.1.2.3.1.2)	Mioceno	50
	Formación Chaguaramas (Mioceno)	50
3.1.2.3.1.3)	Cuaternario	51
	Formación Mesa (Pleistoceno)	51
	Depósitos Aluviales (Holoceno)	52
3.1.3)	Geología Estructural Regional de la Subcuenca de Guárico	54
3.1.4)	Resumen del Proceso Evolutivo de la Subcuenca de Guárico	57
3.1.4.1)	Paleozoico	59
3.1.4.1.1)	Cámbrico	59
3.1.4.1.2)	Orogénesis Herciniana o Permo-Triásica	59
3.1.4.2)	Mesozoico	60
3.1.4.2.1)	Triásico - Jurásico	60
3.1.4.2.2)	Cretácico	60
3.1.4.2.3)	Orogénesis Laramidiana o del final del Cretácico	62
3.1.4.3)	Cenozoico	62
3.1.4.3.1)	Paleoceno - Eoceno medio	63
3.1.4.3.2)	Eoceno Superior - Oligoceno	63
3.1.4.3.3)	Oligoceno - Mioceno	64
3.1.4.3.4)	Plioceno	65
3.1.4.3.5)	Cuaternario	65
3.2)	Características Geológicas del Área de Estudio	66
3.2.1)	Información obtenida de los Estudios de Superficie	66
3.2.1.1)	Descripción de las Características Geológicas de Superficie	67
3.2.1.2)	Descripción del Afloramiento Rocoso	68
	Facies Arcillosas R3	68
	Facies Arenosas R2	68
	Facies Arcillosas R1	69
3.2.1.3)	Análisis Paleontológicos	69
	Resultados de los Análisis Paleontológicos	70
3.2.2)	Información obtenida con los Datos de Pozos	76
3.2.2.1)	Marco Estratigráfico Local	76
3.2.2.1.1)	Descripción de las Unidades Delimitadas	77
	Unidad M1	77
	Unidad M2	77
	Unidad M3	77
	Unidad M4	77
	Unidad M5	78
	Unidad M6	78
	Formación Roblecito	78
3.2.2.1.2)	Columnas Estratigráficas Locales	79
	Pozo GU5258077A	79
	Pozo GU5258032N	79
3.2.2.2)	Interpretación de Perfiles Eléctricos	82
3.2.2.2.1)	Identificación de Electrofacies	83
	Barras de Desembocadura / Barras de Marea	84
	Canales Distributarios / Canales de Marea	84

	Depósitos de Intercanales / Interbarras	84
3.2.2.2.2)	Interpretación del Ambiente Sedimentario	86
	Descripción del Ambiente Deltáico	86
	Modelo de Sedimentación de los Depósitos Cuaternarios de los Llanos de Calabozo	89
CAPITULO VI. EVALUACIÓN DEL MEDIO FÍSICO - GEOGRÁFICO		90
4.1)	Características Generales del Área de Estudio	91
4.1.1)	Características Fisiográficas	91
4.1.2)	Características de la Red Hidrográfica Principal	91
4.1.3)	Características Geomorfológicas	93
4.1.4)	Características de los Suelos	95
4.1.4.1)	Clasificación Textural de Suelos	97
4.1.4.2)	Clases Texturales de los Suelos del Sistema de Riego Río Guárico	98
4.1.5)	Ubicación del Área de Estudio dentro de las Provincias Hidrogeológicas de Venezuela	101
4.2)	Interpretación de Información Geográfica obtenida con Sensores Remotos	103
4.2.1)	Principios sobre Sensores Remotos	103
4.2.2)	Interpretación de Fotografías Aéreas	104
	Sector No. 1: Límite sur del Embalse del Río Guárico	105
	Sector No. 2: Llanura del Río Guárico	106
4.2.3)	Interpretación de Imágenes de Satélite	110
4.2.3.1)	Utilidad de las imágenes de Satélite	110
4.2.3.2)	Características del Sistema Satelital LANDSAT	110
4.2.3.3)	Interpretación de Imagen de Satélite LANDSAT en color real (Pancromático)	111
4.2.3.4)	Interpretación de Imagen de Satélite LANDSAT en falso color (Procesada Digitalmente)	114
CAPITULO V. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL		116
5.1)	Definición de Modelo Hidrogeológico Conceptual	117
5.2)	Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual	117
5.2.1)	Mapa Base	117
5.2.2)	Secciones Transversales	118
5.2.3)	Base de Datos	119
5.2.4)	Mapas de Contorno y Superficies en 3D	121
	Obtención de los Variogramas Experimentales y los Variogramas Teóricos Ajustados	122
5.2.4.1)	Obtención de los Mapas y de las Superficies en 3D	126
5.2.4.2.1)	Modelo Digital del Terreno	127
5.2.4.2.2)	Mapa de Contornos y Superficie 3D de la base de la Unidad M1	129
5.2.4.2.3)	Mapa de Contornos y Superficies 3D de la base de la Unidad M2	131
5.2.4.2.4)	Mapa de Contornos y Superficies 3D de la base de la Unidad M3	133
5.2.4.2.5)	Mapa de Contornos y Superficies 3D de la base de la Unidad M4	135
5.2.4.2.6)	Mapa de Contornos y Superficie 3D de la base de la Unidad M5	137
5.2.4.2.7)	Mapa de Contornos y Superficie 3D de la base de la Unidad M6	139
5.2.4.2.8)	Visualización en 3D del Modelo Hidrogeológico Conceptual	141

5.3)	Niveles Piezométricos	142
5.4)	Métodos de Clasificación de Acuíferos	147
5.5)	Clasificación del Acuífero de los Llanos de Calabozo	148
5.6)	Modelo de Recarga del Acuífero	148
	Aplicación de las Técnicas Isotópicas en el Acuífero de los Llanos de	
5.6.1)	Calabozo	149
5.6.2)	Mapa de Vectores de la Superficie Piezométrica	151
CAPITULO VI. CALCULO DE RESERVAS		153
6.1)	Importancia del Cálculo de las Reservas	155
6.2)	Espesor de Roca Permeable Saturada	155
6.2.1)	Mapa de Espesor de Roca Permeable Saturada	156
6.3)	Porosidad Total y Efectiva del Acuífero	158
6.4)	Pruebas de Bombeo	160
6.5)	Conductividad Hidráulica	160
6.6)	Transmisividad	161
	Determinación de los valores de Conductividad Hidráulica y	
6.7)	Transmisividad	162
6.7.1)	Prueba de Recuperación del pozo GU5458037A	163
6.8)	Calculo de Reservas	166
6.8.1)	Cálculo de Volúmenes de Roca Permeable Saturada	166
6.8.2)	Calculo del Volumen de Agua	167
CAPITULO VII. MODELO HIDROGEOLÓGICO MATEMÁTICO		168
7.1)	Definición del Modelo Hidrogeológico Matemático	169
7.2)	Discretización del Medio	170
7.3)	Elaboración del Modelo Matemático	171
7.3.1)	Asignación de Superficies	171
7.3.2)	Desactivación de Celdas	171
7.3.3)	Obtención de Cortes Transversales	172
7.3.4)	Visualización del Modelo Matemático en 3D	177
7.4)	Interpretación de los Cortes Transversales	186
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		187
	Conclusiones	188
	Recomendaciones	191
BIBLIOGRAFÍA		192
ANEXOS		197

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Ubicación del Área de Estudio.	6
Figura 2.2.	Modelos de Variogramas Teóricos más comunes.	22
Figura 2.3.	Modelo del Variograma Esférico con Pepita y sus elementos.	23
Figura 2.4.	Clasificación de los Acuíferos.	24
Figura 2.5.	Isótopos del Hidrógeno.	36
Figura 3.1.	Cuencas Sedimentarias de Venezuela.	43
Figura 3.2.	Columna Estratigráfica de la Subcuenca de Guárico.	53
Figura 3.3.	Mapa de ubicación de las Secciones Estructurales Regionales de la Subcuenca de Guárico.	55
Figura 3.4.	Sección Estructural Regional A-C en dirección N-S obtenida con interpretación sísmica.	56
Figura 3.5.	Sección Estructural Regional G-E en dirección E-O obtenida con interpretación sísmica.	56
Figura 3.6.	Mapa de ubicación de la Sección estructural O-Ó entre los pozos petroleros G-D-6 y Camáz-1.	58
Figura 3.7.	Sección Estructural O-Ó, donde se visualiza la desaparición de la Formación Chaguaramas hacia la zona del embalse de Guárico.	58
Figura 3.8.	Paleografía del Eoceno Superior en Venezuela Oriental.	63
Figura 3.9.	Paleografía del Oligo – Mioceno en Venezuela Oriental.	64
Figura 3.10.	Fotografía del afloramiento de la Formación Roblecito en la Mesa de Calabozo, donde pueden apreciarse las facies arcillosas R3 y las facies arenosas R2.	72
Figura 3.11.	Fotografía del afloramiento de la Formación Roblecito en la Mesa de Calabozo, donde pueden apreciarse las facies arenosas R2 y las facies arcillosas R1.	73
Figura 3.12.	Fotografía donde se muestra en detalle las estructuras sedimentarias del tipo “riple marks” pertenecientes a las facies arenosas R2.	73
Figura 3.13.	Fotografía de la muestra de roca Nº 1: Arcillitas grises moteadas, pertenecientes a la facies R1 y R3 de la Formación Roblecito en la Mesa de Calabozo.	74
Figura 3.14.	Fotografía de la muestra de roca Nº 2: Areniscas caoliníticas de grano fino, pertenecientes a las facies R2 de la Formación Roblecito en la Mesa de Calabozo.	74
Figura 3.15.	Columna Estratigráfica de la Mesa de Calabozo.	75
Figura 3.16.	Columna Estratigráfica de Pozo GU5258077A.	80
Figura 3.17.	Columna Estratigráfica de Pozo GU5258032N.	81
Figura 3.18.	Esquema de un perfil de Potencial Espontáneo, donde se muestra la ubicación de la línea base de las arcillas.	83
Figura 3.19.	Patrones típicos de los Perfiles de Potencial Espontáneo y Rayos Gamma en Depósitos de Sistemas Deltáicos.	85
Figura 3.20.	Modelo Esquemático de un Sistema Deltáico.	88
Figura 4.1	Fotografía del Río Orituco, tomada sobre el Puente Orituco.	92
Figura 4.2.	Fotografía del Río Guárico, sector Los Arrecifes (Norte del Embalse).	92
Figura 4.3.	Fotografía del Río Guarico, sector Los Andreseros (sur del Embalse).	93
Figura 4.4.	Características Fisiográficas y de la Red Hidrográfica Principal.	94
Figura 4.5.	Distribución Porcentual de los Suelos Permeables e Impermeables del Sistema de Riego Río Guárico.	96
Figura 4.6.	Gráfica del Sistema Internacional de Clasificación Textural de Suelos.	97

Figura 4.7.	Clases Texturales de Suelos predominantes del Sistema de Riego Río Guárico.	98
Figura 4.8.	Provincias Hidrogeológicas de Venezuela.	102
Figura 4.9.	Interpretación Fotogeológica del Sector № 1. Limite Sur del Embalse del Río Guárico.	107
Figura 4.10.	Interpretación Fotogeológica del Sector № 2A. Llanura del Río Guárico.	108
Figura 4.11.	Interpretación Fotogeológica del sector № 2B. Llanura del Río Guárico.	109
Figura 4.12.	Interpretación de imagen de Satélite LANDSAT en Color Real.	113
Figura 4.13.	Interpretación de imagen de Satélite LANDSAT en Falso Color, resultado de la combinación de dos bandas infrarrojas y la banda azul.	115
Figura 5.1.	Mapa Base y Mallado de Secciones Transversales.	118
Figura 5.2.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado del Modelo Digital del Terreno.	122
Figura 5.3.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado de la Base de la Unidad M1.	123
Figura 5.4.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado de la Base de la Unidad M2.	123
Figura 5.5.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado de la Base de la Unidad M3.	124
Figura 5.6.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado de la Base de la Unidad M4.	124
Figura 5.7.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado de la Base de la Unidad M5.	125
Figura 5.8.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado de la Base de la Unidad M6.	125
Figura 5.9.	Mapa de Contornos del Modelo Digital de Terreno.	127
Figura 5.10.	Superficie en 3D del modelo Digital del Terreno. Vista en dirección N 80°E.	128
Figura 5.11.	Superficie en 3D del modelo Digital del Terreno. Vista en dirección N 45°E.	128
Figura 5.12.	Mapa de Contornos de la Base de la Unidad M1.	129
Figura 5.13.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M1. Vista en dirección N 80°E.	130
Figura 5.14.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M1. Vista en dirección N 45°E.	130
Figura 5.15.	Mapa de Contornos de la base de la Unidad M2.	131
Figura 5.16.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M2. Vista en dirección N 80°E.	132
Figura 5.17.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M2. Vista en dirección N 45°E.	132
Figura 5.18.	Mapa de Contornos de la Base de la Unidad M3.	133
Figura 5.19.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M3. Vista en dirección N 80°E.	134
Figura 5.20.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M3. Vista en dirección N 45°E.	134

Figura 5.21.	Mapa de Contornos de de la Base de la Unidad M4.	135
Figura 5.22.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M4. Vista en dirección N 80° E.	136
Figura 5.23.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M4. Vista en dirección N 45° E.	136
Figura 5.24.	Mapa de Contornos de la Base de la Unidad M5	137
Figura 5.25.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M5. Vista en dirección N 80° E.	138
Figura 5.26.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M5. Vista en dirección N 45° E.	138
Figura 5.27.	Mapa de Contornos de la Base de la Unidad M6	139
Figura 5.28.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M6. Vista en dirección N 80° E.	140
Figura 5.29.	Superficie en 3D de la Base de la Unidad M6. Vista en dirección N 45° E.	140
Figura 5.30.	Visualización en 3D del Modelo Hidrogeológico Conceptual. Vista en dirección N 80° E.	141
Figura 5.31.	Visualización en 3D del Modelo Hidrogeológico Conceptual. Vista en dirección N 45° E.	142
Figura 5.32.	Variograma Experimental y Variograma Teórico Ajustado de los Niveles Piezométricos de año 2003.	144
Figura 5.33.	Mapa de Contornos de los Niveles Piezométricos del año 2003.	145
Figura 5.34.	Superficie en 3D de los Niveles Piezométricos del año 2003. Vista en dirección N 80° E.	146
Figura 5.35.	Superficie en 3D de los Niveles Piezométricos del año 2003. Vista en dirección N 45° E.	146
Figura 5.36.	Clasificación de los Acuíferos en relación a las características de la Curva Tiempo - Descenso de las Pruebas de Bombeo.	148
Figura 5.37.	Relación entre las desviaciones isotópicas ($\delta^{18}O$ y δD) en el agua subterránea del Acuífero de los Llanos de Calabozo, estado Guárico.	149
Figura 5.38.	Superposición del Mapa de Niveles Piezométricos con el Mapa de Vectores.	151
Figura 5.39.	Superficie de la Superficie Piezométrica con el Mapa de Vectores. Vista en Dirección N 45° E.	152
Figura 6.1.	Superficie de la Superficie Piezométrica con la Base de la Unidad M1. Vista en Dirección N 45° E.	156
Figura 6.2.	Mapa de Contornos del Espesor de Roca Permeable Saturada.	157
Figura 6.3.	Gráfico de la Prueba de Recuperación del Pozo GU5458037A utilizando el Método de Recuperación de Theis.	164
Figura 6.4.	Mapa donde se muestra la Localización del Pozo GU5458037A.	165
Figura 7.1.	Diferencia entre Modelo Conceptual y Matemático.	169
Figura 7.2.	Discretización mediante el Método de las Diferencias Finitas.	170
Figura 7.3.	Vista en planta de la malla rectangular mostrando las celdas desactivadas utilizadas en Visual Modflow 3.0.	172
Figura 7.4.	Corte en el plano YZ en la Columna 10.	173
Figura 7.5.	Corte en el plano YZ en la Columna 20.	173

Figura 7.6.	Corte en el plano YZ en la Columna 30.	173
Figura 7.7.	Corte en el plano YZ en la Columna 40.	173
Figura 7.8.	Corte en el plano YZ en la Columna 50.	174
Figura 7.9.	Corte en el plano YZ en la Columna 60.	174
Figura 7.10.	Corte en el plano YZ en la Columna 70.	174
Figura 7.11.	Corte en el plano YZ en la Columna 80.	174
Figura 7.12.	Corte en el plano XZ en la Columna 10.	175
Figura 7.13.	Corte en el plano XZ en la Columna 20.	175
Figura 7.14.	Corte en el plano XZ en la Columna 30.	175
Figura 7.15.	Corte en el plano XZ en la Columna 40.	175
Figura 7.16.	Corte en el plano XZ en la Columna 50.	176
Figura 7.17.	Corte en el plano XZ en la Columna 60.	176
Figura 7.18.	Corte en el plano XZ en la Columna 70.	176
Figura 7.19.	Corte en el plano XZ en la Columna 80.	176
Figura 7.20.	Visualización del Modelo Hidrogeológico Matemático en 3D.	177
Figura 7.21.	Corte en 3D según el plano XZ. Coordenada: Y= 950.000m.	178
Figura 7.22.	Corte en 3D según el plano XZ. Coordenada: Y= 960.000m.	178
Figura 7.23.	Corte en 3D según el plano XZ. Coordenada: Y= 970.000m.	179
Figura 7.24.	Corte en 3D según el plano XZ. Coordenada: Y= 980.000m.	179
Figura 7.25.	Corte en 3D según el plano YZ. Coordenada: X= 630.000m.	180
Figura 7.26.	Corte en 3D según el plano YZ. Coordenada: X= 640.000m.	180
Figura 7.27.	Corte en 3D según el plano YZ. Coordenada: X= 650.000m.	181
Figura 7.28.	Corte en 3D según el plano YZ. Coordenada: X= 660.000m.	181
Figura 7.29.	Corte en 3D según el plano YZ. Coordenada: X= 670.000m.	182
Figura 7.30.	Corte en 3D según el plano YZ. Coordenada: X= 680.000m.	182
Figura 7.31.	Corte en 3D según el plano XY. Altitud Z = 60m.	183
Figura 7.32.	Corte en 3D según el plano XY. Altitud Z = 45m.	183
Figura 7.33.	Corte en 3D según el plano XY. Altitud Z = 10m.	184
Figura 7.34.	Corte en 3D según el plano XY. Altitud Z = -10m.	184
Figura 7.35.	Sección Transversal en dirección N 45°E. Vista en dirección Norte.	185
Figura 7.36.	Sección Transversal en dirección N 45°E. Vista en dirección N 45°O.	185

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Listado de Localizaciones de Pozos	10
Tabla 4.1.	Series de Suelos Permeables en las áreas del Sistema de Riego Río Guárico	99
Tabla 4.2.	Series de Suelos Impermeables en las área del Sistema de Riego Río Guárico	100
Tabla 4.3.	Clasificación de las Provincias y Subprovincias Hidrogeológicas de Venezuela	101
Tabla 5.1.	Base de datos elaborada en Microsoft Excel	120
Tabla 5.2.	Base de Datos de los Niveles Piezométricos del año 2003	143
Tabla 5.3.	Clasificación de los Acuíferos en relación a la Tipo de Capa Superficial	147
Tabla 5.4.	Clasificación de los Acuíferos en relación a la Altitud de los Niveles Piezométricos	147
Tabla 6.1.	Porosidades Totales y Efectivas de diversos Materiales Rocosos	159
Tabla 6.2.	Clasificación de Terrenos por la Conductividad Hidráulica	161
Tabla 6.3.	Resultados obtenidos de la Prueba de Recuperación	163
Tabla 6.4.	Cálculo del Volumen de Roca Permeable Saturada	166
Tabla 6.5.	Comparación entre el Volumen Total del Acuífero y el Volumen Total de Roca Permeable	166
Tabla 6.6.	Cálculo del Volumen de Reservas de Agua	167

INDICE DE ANEXOS

Anexo 9.1. Mapa Base a escala 1:100.0000	198
Anexo 9.2. Sección Estratigráfica A – A'	199
Anexo 9.3. Sección Estratigráfica B – B'	200
Anexo 9.4. Sección Estratigráfica C – C'	201
Anexo 9.5. Poligonales levantadas durante la Fase de Campo	202
Anexo 9.6. Pozos donde se realizaron los muestreos para análisis nucleares del agua	205

CAPITULO I
INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La alta demanda de agua para uso industrial, riego y consumo doméstico, que en la última década se ha producido en la región de Calabozo, Estado Guárico, ha traído como consecuencia que los reservorios de aguas superficiales del Sistema de Riego Río Guárico ya no representen una fuente segura de agua para los habitantes y productores agrícolas de esta región. Esto ha originado que en los últimos tres años se haya producido un auge en la perforación de pozos de agua subterránea, lo que a su vez trae como consecuencia que muchas veces se recurra al aprovechamiento de las aguas subterráneas en una forma anárquica.

Con el propósito de obtener una serie de conocimientos técnicos sobre las reservas de agua subterránea del acuífero de los Llanos de Calabozo, se ha desarrollado este proyecto de investigación, el cual posteriormente contribuirá en el diseño de un plan racional de explotación y de una mejor gestión de trabajo por parte de los organismos encargados de la explotación del recurso hídrico subterráneo. Todo esto a su vez podrá contribuir a mediano plazo con el desarrollo sustentable de la región.

Este proyecto de investigación viene a complementar un proyecto piloto denominado *Determinación de la Recarga y Movimiento de Flujo de Agua Subterránea con la aplicación de Técnicas Isotópicas en el Sistema de Riego Río Guárico y en el Valle de Quibor*, código VEN/8/017, el cual es desarrollado por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), dentro del Programa de Cooperación Técnica que lleva a cabo el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) con el MARN, a través de la Dirección de Asuntos Nucleares (DAN) del Ministerio de Energía y Minas (MEM).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Elaborar una Evaluación hidrogeológica de las reservas de agua subterránea del acuífero de los Llanos de Calabozo, Estado Guárico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un mapa base de superficie a escala 1:100.000.
- Realizar análisis paleontológicos a muestras de rocas de la Mesa de Calabozo con el fin de determinar la edad del sustrato rocoso impermeable.
- Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual
- Elaborar un modelo de recarga con el apoyo de técnicas nucleares.
- Calcular las reservas de agua del acuífero.
- Elaborar un modelo hidrogeológico matemático.

OBJETIVO ACADÉMICO

Elaborar el Trabajo Final de Grado con el fin de cumplir con el último requisito exigido por la ilustre Universidad de Los Andes para optar por el título de Ingeniero Geólogo.

LIMITACIONES Y ALCANCES

Una evaluación hidrogeológica comprende la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual, un modelo hidrogeológico matemático y el cálculo de las reservas. Es importante resaltar que dentro de este trabajo los modelos elaborados del acuífero son sólo una representación de la realidad, no es la realidad en sí misma. También es sabido que un medio

físico real, como un acuífero, puede tener varios modelos de representación, y que estos varían de acuerdo con la interpretación que se les dé a los datos disponibles de dicho medio. En este sentido, cabe destacar que los datos se han procesado e interpretado de forma tal que tuvieran que ser sometidos a los menos ajustes posibles, pero a su vez, tratando que la interpretación de los mismos posea el mejor acuerdo con el entorno geológico del acuífero.

Los ajustes realizados fueron sobre todo en lo referente a datos de pozos, dentro de los cuales podemos nombrar: cotas de pozos, homogenización de las litologías entre pozos vecinos, profundidad de las capas del acuífero en algunos pozos, etc., siempre realizados dentro del sentido común y de acuerdo con el marco geológico del área.

Las rocas dentro del cual está emplazado el acuífero pertenecen a depósitos sedimentarios del Cuaternario. Sin embargo, no fue posible dentro de este trabajo determinar si los mismos pertenecen a la Formación Mesa del Pleistoceno, o a los depósitos aluviales del Holoceno, ya que para ello es necesario realizar dataciones absolutas con técnicas como el Carbono 14. Para la datación del sustrato rocoso impermeable se realizaron análisis paleontológicos de muestras de rocas tomadas en afloramientos del mismo, que se encuentran en la zona de la Mesa de Calabozo. Estos análisis comprobaron que el sustrato rocoso está conformado por rocas de la Formación Roblecito del Oligoceno, pero los mismos no representan un registro paleontológico tipo de la formación en esa región, ya que los microfósiles recolectados no se encontraban en su mayoría en buen estado de conservación.

Para la elaboración del modelo de recarga se utilizaron los resultados obtenidos de análisis nucleares que realizó el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en conjunto con el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARN), en una campaña de muestreos realizada dentro del área de estudio. Cabe destacar que no fue obra de los autores de este trabajo la realización del muestreo de aguas y de los análisis nucleares de laboratorio, los autores sólo se encargaron de interpretar los resultados obtenidos, y de integrar dicha interpretación con el entorno geológico del acuífero, para así obtener un modelo de recarga más confiable y con un menor grado de incertidumbre.

CAPITULO II
ASPECTOS GENERALES

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES

2.1) UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la parte sur-occidental del Estado Guárico, en los terrenos del Sistema de Riego Río Guárico que se encuentran aledaños a la ciudad de Calabozo, a 267 Km al sur de la ciudad de Caracas.

Esta área de estudio se extiende aproximadamente 62 Km en sentido norte-sur y 65 Km en sentido este-oeste, ocupando una superficie de 4.030 Km cuadrados. La figura 1.1 muestra la ubicación espacial del área de estudio.

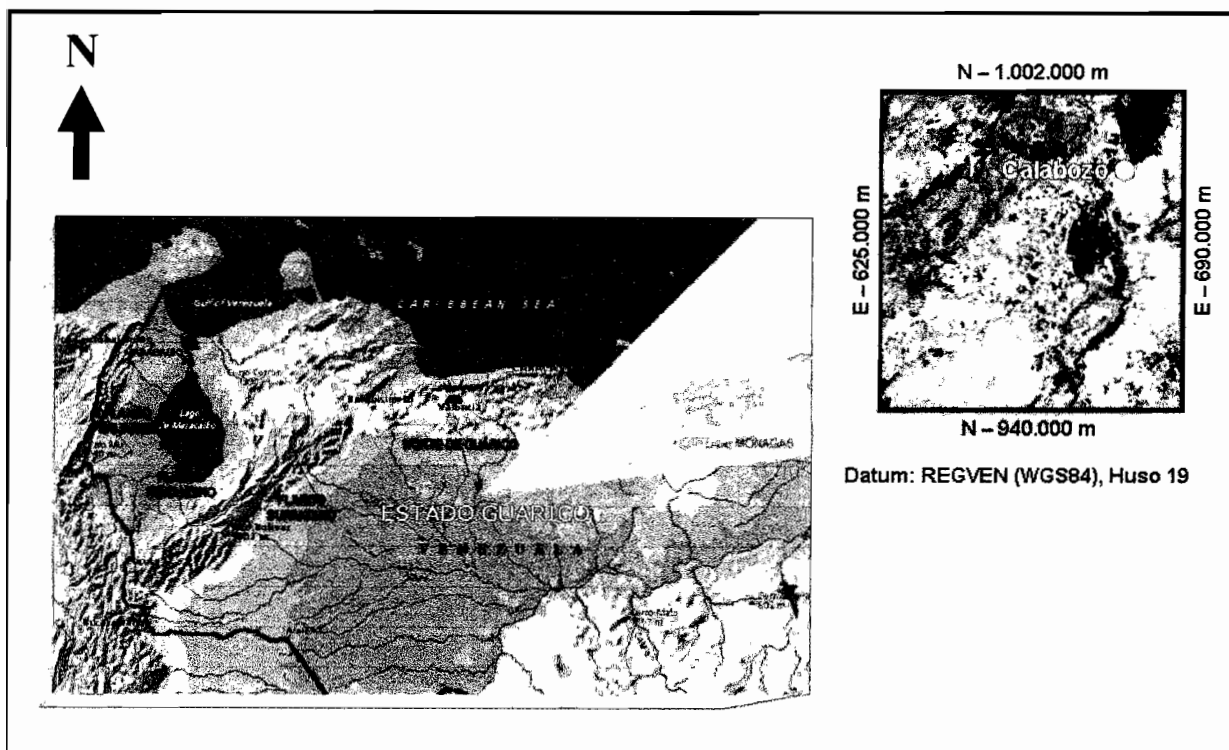


Figura 2.1. Ubicación del Área de Estudio.

2.2) METODOLOGÍA APLICADA

2.2.1) REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa inicial tuvo por objetivo delinear el marco geológico regional de la Subcuenca del Guárico, a través de la revisión, clasificación y esquematización de la documentación disponible sobre los estudios previos realizados en el área de estudio. Se consultaron los archivos del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), del Instituto Nacional de Energía y Minas (INGEOMIN) y del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), de donde se obtuvo la documentación bibliográfica primordial, que sirvió de base para la determinación de las características geológicas e hidrogeológicas generales del área de estudio.

Así mismo, se realizó una recopilación de la cartografía disponible del área de estudio, que sirviera como base para la elaboración de los diversos mapas requeridos en este estudio. Los mapas consultados fueron los siguientes:

- Mapa Geológico – Estructural de Superficie de Venezuela, Ministerio de Minas e Hidrocarburos, hoja: San Juan de Los Morros, referencia: NC-19-II, año 1976, escala 1:500.000, datum La Canoa, huso 19.
- Mapas Topográficos del Instituto Geográfico y Cartográfico Simón Bolívar, hojas: 6641 (Altagracia), 6642 (Los Caros), 6741 (Corozo Pando) y 6742 (Calabozo), año 1965, escala 1:100.000, datum La Canoa, huso 19.
- Ortofotomapa del Instituto Geográfico y Cartográfico Simón Bolívar, hoja: 6742- IV-NO (Calabozo), año 1965, escala 1:25.000, datum La Canoa, huso 19.

2.2.2) INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA OBTENIDA CON SENSORES REMOTOS

Con la finalidad de observar a grandes rasgos las características fisiográficas, geomorfológicas, hidrográficas, edafológicas y geológicas del área de estudio, se elaboró una interpretación detallada de imágenes de satélite y fotografías aéreas disponibles, la cual se describe en el capítulo III. Esto permitió corroborar la información que contenían los diferentes mapas disponibles y de caracterizar el medio geográfico donde se encuentra localizada el área de estudio.

La información obtenida con sensores remotos que fue utilizada en este estudio fue la siguiente:

- Imágenes de Satélite LANDSAT 3 Multiespectral Scanner (MSS), Cuadrante 4–54, del 25 de Febrero de 1978.
- Fotografías Aéreas de la Misión 030558, Embalse del Río Guárico, escala 1:10.000, del año 1970.

2.2.3) TRABAJO DE CAMPO

Se realizó un estudio de campo en los Llanos de Calabozo, con el fin de identificar las características geológicas que presentan los depósitos cuaternarios en la superficie y equipararlas con las características geológicas que presentan estas unidades cuaternarias en el subsuelo.

- Levantamiento de puntos del terreno con el sistema de posicionamiento global (GPS), utilizando el datum SIRGAS–REGVEN (WGS84), huso 19, con la finalidad de corroborar la ubicación de los puntos digitalizados del terreno. Para la elaboración de las poligonales se tomó como punto de referencia la sede del Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN).

- Identificación y descripción de afloramientos rocosos. Para la descripción de los afloramientos se procedió con la siguiente metodología:
 - a) Fotografiar el afloramiento, con su escala y orientación correspondiente.
 - b) Identificación y descripción de elementos estructurales (rumbos, buzamientos y estructuras) en caso de que se presenten.
 - c) Identificación y descripción de elementos litológicos, estructuras sedimentarias y elementos paleontológicos.
 - d) Toma de muestras de rocas para someterlas a análisis paleontológicos.

2.2.4) TRABAJO DE LABORATORIO

Se realizaron análisis paleontológicos de las muestras, con la finalidad de determinar la edad relativa de las rocas aflorantes en la Mesa de Calabozo y del sustrato rocoso del acuífero. El método utilizado es el “lavado de lutitas”, con el cual se obtiene una fracción de la muestra que contiene los microfósiles de la formación, en caso de que existan. El método de análisis paleontológico y los resultados obtenidos en el mismo se describen en el capítulo II.

2.2.5) REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN DE POZOS

Se ejecutó una revisión detallada de información de los pozos ubicados en el área de estudio, especialmente en lo referente a los datos de localización espacial (coordenadas UTM y elevación sobre el nivel del mar), perfiles litológicos, perfiles de potencial espontáneo y niveles piezométricos estáticos, para así poder seleccionar los pozos que poseen los datos más confiables y de mayor similitud con los pozos vecinos.

La base de datos de pozos original, proporcionada por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) constaba de más de seiscientos (600) pozos, pero en total se seleccionaron ciento cuarenta y un (141) pozos que poseen la información básica necesaria, de los cuales se obtuvieron ochenta y ocho (88) perfiles litológicos, catorce (14) perfiles eléctricos y treinta y cinco (35) mediciones de niveles piezométricos del año 2003.

El listado de los pozos utilizados en este estudio se muestra en la tabla 1.1. El datum geodésico utilizado para las coordenadas UTM es el SIRGAS – REGVEN (WGS84), huso 19.

Tabla 2.1. Listado de las Localizaciones de los Pozos

No. POZO	CODIGO	ESTE (m)	NORTE (m)	COTA (m.s.n.m)
1	GU5257001N	668.100	954.200	69,00
2	GU5258002A	657.312	941.257	69,00
3	GU5258006H	659.546	956.994	68,00
4	GU5258012A	659.787	958.009	68,00
5	GU5258018N	664.130	957.411	68,00
6	GU5258019N	651.297	955.673	64,00
7	GU5258020N	651.755	955.675	62,00
8	GU5258025A	657.571	953.700	64,00
9	GU5258026A	656.895	954.619	64,00
10	GU5258030N	660.021	952.634	66,00
11	GU5258031N	663.334	949.943	66,00
12	GU5258032N	657.540	945.620	66,00
13	GU5258036A	658.043	950.230	66,00
14	GU5258075A	664.135	956.182	64,00
15	GU5258077A	650.473	955.819	62,00
16	GU5258079A	653.700	956.100	64,00
17	GU5258080A	645.980	954.912	64,00
18	GU5258081A	649.054	955.394	59,00
19	GU5258082A	659.865	959.842	65,00
20	GU5258086A	655.601	955.740	62,00
21	GU5258087A	654.776	955.675	62,00
22	GU5258088A	653.855	955.716	62,00
23	GU5258090A	657.774	952.274	62,00
24	GU5259001N	644.880	954.883	64,00
25	GU5259006A	635.300	956.652	58,00
26	GU5259007A	634.941	955.925	58,00
27	GU5259022A	626.600	957.751	59,00
28	GU5356020A	683.776	960.258	61,00
29	GU5356021A	686.390	966.855	74,00
30	GU5357004N	669.319	959.582	69,00
31	GU5357005N	675.818	962.528	72,00
32	GU5357006N	677.383	968.372	74,00
33	GU5357007N	666.600	969.000	74,00
34	GU5357036A	664.450	969.100	74,00
35	GU5357037A	669.650	969.500	74,00
36	GU5357038A	667.970	973.913	75,00
37	GU5357039A	672.813	974.805	74,00
38	GU5357040A	672.823	975.633	74,00
39	GU5357041A	662.400	968.680	74,00
40	GU5357042A	664.710	975.570	78,00
41	GU5357043A	675.745	963.746	70,00

No. POZO	CODIGO	ESTE (m)	NORTE (m)	COTA (m.s.n.m)
42	GU5357044A	661.332	975.607	75,00
43	GU5357046A	663.175	976.016	75,00
44	GU5357047A	667.594	968.781	72,00
45	GU5357048A	669.886	975.330	75,00
46	GU5358007N	659.527	962.001	66,00
47	GU5358022A	659.229	959.850	69,00
48	GU5358023A	659.385	959.236	69,00
49	GU5358025A	659.997	958.931	65,00
50	GU5358028A	660.146	960.007	65,00
51	GU5358029A	660.142	961.082	67,00
52	GU5358034A	660.894	972.083	72,00
53	GU5358036A	660.707	973.127	74,00
54	GU5358038A	661.613	975.895	76,00
55	GU5358039A	659.839	976.134	76,00
56	GU5358042A	658.064	969.000	79,00
57	GU5358068A	659.724	974.290	72,00
58	GU5358069N	657.519	967.677	69,00
59	GU5358070N	661.493	967.293	70,00
60	GU5358071N	662.258	967.234	70,00
61	GU5358073N	657.376	964.912	67,00
62	GU5358074N	656.322	960.760	69,00
63	GU5358075N	648.323	975.169	71,00
64	GU5358076N	651.600	973.400	68,00
65	GU5358079A	654.589	974.731	68,00
66	GU5358080A	652.603	974.570	69,00
67	GU5358082A	651.842	973.861	69,00
68	GU5358086A	649.653	970.720	67,00
69	GU5358088A	649.103	970.626	67,00
70	GU5358090A	646.972	968.560	68,00
71	GU5358091N	648.037	969.792	67,00
72	GU5358096A	650.348	964.425	66,00
73	GU5358099A	649.892	963.809	69,00
74	GU5358105A	652.140	975.798	68,00
75	GU5358107A	650.916	976.407	69,00
76	GU5358108A	649.849	975.635	69,00
77	GU5358114A	646.807	972.000	69,00
78	GU5358115A	647.360	971.019	69,00
79	GU5358119A	647.303	961.342	63,00
80	GU5358123A	649.285	962.578	68,00
81	GU5358128A	659.532	960.773	67,00
82	GU5358129A	660.899	962.928	67,00
83	GU5358143A	661.261	972.146	72,00
84	GU5358148A	662.529	975.991	75,00
85	GU5358151A	658.610	969.985	71,00
86	GU5358172A	646.700	978.000	74,00
87	GU5358173A	643.552	965.957	66,00
88	GU5358174A	659.120	971.898	74,00
89	GU5358175A	655.681	975.093	69,00

No. POZO	CODIGO	ESTE (m)	NORTE (m)	COTA (m.s.n.m)
90	GU5358176A	656.150	980.000	75,00
91	GU5359002N	640.425	961.472	65,00
92	GU5359003N	642.400	969.000	69,00
93	GU5359005A	632.027	959.141	59,00
94	GU5359014A	638.378	961.250	62,00
95	GU5359016A	646.515	967.944	69,00
96	GU5359017A	644.476	965.479	64,00
97	GU5359024A	639.580	967.398	69,00
98	GU5359026A	635.135	962.161	62,00
99	GU5359029A	639.053	960.423	61,00
100	GU5359032A	638.618	962.480	63,00
101	GU5359033A	635.804	963.146	62,00
102	GU5359039A	642.140	969.311	64,00
103	GU5359046A	644.454	971.930	71,00
104	GU5359061A	637.500	967.860	69,00
105	GU5457010A	666.139	982.426	88,00
106	GU5457012A	666.025	987.833	99,00
107	GU5457013A	668.889	989.841	101,00
108	GU5457022A	669.645	991.534	101,00
109	GU5457032N	668.460	982.804	92,00
110	GU5457048N	665.202	995.049	101,00
111	GU5457049N	669.172	995.065	102,00
112	GU5457050A	657.597	987.123	84,00
113	GU5457058A	670.414	990.309	101,00
114	GU5457061A	671.628	992.157	102,00
115	GU5457076A	668.122	990.606	100,00
116	GU5457097A	661.607	988.523	91,00
117	GU5457098A	668.826	995.790	101,00
118	GU5457099A	671.302	995.309	101,00
119	GU5458002A	662.239	979.861	101,00
120	GU5458005A	662.307	977.987	76,00
121	GU5458007A	661.298	978.136	77,00
122	GU5458009A	663.197	976.977	77,00
123	GU5458016A	659.762	980.281	76,00
124	GU5458029N	655.527	985.088	79,00
125	GU5458030N	652.191	978.501	69,00
126	GU5458031N	662.819	987.543	94,00
127	GU5458033N	659.885	987.869	91,00
128	GU5458037A	651.065	977.452	69,00
129	GU5458038A	651.796	978.100	69,00
130	GU5458040A	654.025	978.324	69,00
131	GU5458048A	658.993	981.507	76,00
132	GU5458049A	656.849	982.881	74,00
133	GU5458050A	656.703	981.344	72,00
134	GU5458053A	654.861	983.488	72,00
135	GU5458057A	664.790	983.588	86,00
136	GU5458064A	662.962	982.290	79,00
137	GU5458067N	659.007	977.974	79,00

No. POZO	CODIGO	ESTE (m)	NORTE (m)	COTA (m.s.n.m)
138	GU5458075A	661.588	982.131	79,00
139	GU5458079A	664.472	986.597	91,00
140	GU5458091A	652.500	980.600	74,00
141	GU5458092A	656.491	987.565	83,00

2.2.6) ELABORACIÓN DEL MAPA BASE

Con la información de la localización espacial de los pozos se elaboró un mapa base a escala 1:100.000, con la utilización de los programas *Golden Software Surfer 8.0* y *AutoCAD*, el cual sirvió de soporte para establecer el mallado de las secciones transversales y para la posterior generación de los diferentes mapas de contornos (ver anexo 9.1).

2.2.7) ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO

El modelo digital del terreno se obtuvo a partir de la digitalización de las curvas de los mapas topográficos disponibles del área de estudio a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico y Cartográfico Simón Bolívar. El punto que se utilizó como referencia para la elaboración de este modelo es la sede del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN) de la ciudad de Calabozo, cuyas coordenadas son: E – 672.467 m y N – 985.272 m. La cota determinada por este punto es de 102 m.s.n.m.

Para la elaboración del modelo digital se utilizó el programa *Golden Software Surfer 8.0*, el cual es un programa de análisis geoestadístico utilizado para generar mapas de contornos y superficies 3D de cualquier variable de distribución espacial.

2.2.8) ELABORACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES

Se elaboraron tres (3) secciones estratigráficas transversales, a partir de la correlación de los perfiles litológicos de ochenta y ocho (88) pozos, utilizando los programas *Groundwater Software for Windows* y *AutoCAD*; con la finalidad de definir la geometría de las unidades estratigráficas que componen reservorio de agua subterránea (ver anexos 9.1 y 9.2).

Las correlaciones de perfiles litológicos fueron calibradas con catorce (14) perfiles de potencial espontáneo, los cuales sirvieron para ayudar a definir las unidades estratigráficas en áreas donde no era posible comparar y correlacionar los perfiles litológicos de pozos vecinos.

2.2.9) ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Cada unidad estratigráfica definida por medio de la correlación de los perfiles litológicos y eléctricos en las secciones transversales posee un tope y una base, y cada una de estas superficies posee una elevación en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en cada uno de los pozos correlacionados. Esta información se almacenó en una base de datos elaborada con el programa *Microsoft Excel*, elaborada de forma tal que pudiera ser utilizada en los programas de computadoras que se emplearon en la creación del modelo del acuífero.

2.2.10) ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Se elaboró el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero, el cual está conformado por los mapas de contornos y superficies 3D de los topes y bases de cada una de las unidades estratigráficas definidas, utilizando el software *Golden Software Surfer 8.0*. A su vez, se evaluaron los parámetros de porosidad efectiva, permeabilidad y transmisividad del reservorio de agua subterránea, a partir de las características litológicas de los materiales permeables del acuífero y las pruebas de bombeo disponibles. Los resultados obtenidos en el modelo conceptual del acuífero se describen en detalle en el capítulo IV.

2.2.11) ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO MATEMÁTICO

A partir de los mapas de contornos y superficies 3D generadas en el modelo hidrogeológico conceptual, se elaboró el modelo hidrogeológico matemático del acuífero, utilizando el software *Visual ModFlow 3.0*, con la finalidad de representar en el espacio la geometría de las unidades estratigráficas que conforman el reservorio de agua subterránea. En el capítulo VI se describe en detalle el modelo matemático del acuífero.

2.2.12) CALCULO DE RESERVAS DEL ACUÍFERO

Las reservas de agua del acuífero se calcularon en base al volumen de roca permeable saturada, la porosidad efectiva estimada y el mapa de niveles piezométricos de la campaña del año 2003, mediante la utilización del software *Golden Software Surfer 8.0*. Los resultados obtenidos en el cálculo de las reservas se describen en detalle en el capítulo VI.

2.2.13) ELABORACIÓN DEL MODELO DE RECARGA DEL ACUÍFERO

El modelo de recarga del acuífero se estableció por medio de la interpretación de los resultados de las análisis nucleares del agua. Estas nuevas técnicas nucleares son utilizadas en hidrología e hidrogeología para determinar la fuente de origen de cualquier cuerpo de agua, ya sea superficial o subterránea, y son conocidas como *técnicas de hidrología isotópica*. Los resultados de los análisis nucleares del agua fueron cotejados con las características hidrogeológicas del acuífero, para así obtener el modelo de recarga del mismo. En el capítulo VIII se hará una descripción más detallada de estas técnicas nucleares y su aplicación en la determinación de la dinámica de recarga del acuífero.

2.3) MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.3.1) GEOESTADÍSTICA

La geoestadística es la rama de la estadística que se encarga del estudio de variables de distribución espacial (x,y,z), también conocidas como variables regionalizadas. El término geoestadística proviene del griego *geo*, que significa espacio. Fue formalizada como ciencia por Matheron en el año 1962, en la Escuela de Minas de París (Jegat, 2001).

Según Sánchez (2002) el fundamento de la geoestadística es la aplicación de las variables regionalizadas a la estimación de fenómenos naturales (geológicos, geográficos, etc.) en el espacio, debido a que éstas variable son conocidas sólo en algunos puntos donde han sido tomadas mediciones, pero generalmente esta información no es suficiente, por lo tanto, es

necesario determinar el valor de la variable en muchos otros puntos donde no se dispone de observaciones.

2.3.2) VARIABLE REGIONALIZADA

Una variable regionalizada es una variable distribuida en el espacio, utilizada para representar un fenómeno natural. Ejemplos de variables regionalizadas en hidrogeología son: cotas del terreno, niveles piezométricos, porosidad, permeabilidad, espesor de roca, transmisividad, etc. (Jegat, 2001).

Desde un punto de vista matemático, una variable regionalizada es simplemente una función $Z(X)$ que adopta un valor para cada punto X en el espacio (Sánchez, 2002). Así pues, si $Z(X)$ es el valor de la característica Z en el punto X , entonces $Z(X)$ es una variable regionalizada.

En las variables regionalizadas, es frecuente observar dos componentes complementarios y aparentemente contradictorios (Sánchez, 2002):

- **Un componente aleatorio:** asociado con las variaciones erráticas e impredecibles de la variable.
- **Un componente general estructurado:** que refleja en cierta forma las características globales de variación del fenómeno generalizado.

Las variables regionalizadas pueden dividirse en dos categorías principales: estacionarias y no estacionarias. Las variables no estacionarias tienen una tendencia definida en el espacio, por ejemplo, la variable decrece sistemáticamente en una dirección. En las variables estacionarias, por el contrario, no hay una tendencia definida en el espacio, ya que no tienden a estabilizarse en ninguna dirección específica.

2.3.3) ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE UN FENÓMENO NATURAL

El análisis geoestadístico de un fenómeno natural, representado por una variable de distribución espacial, se puede subdividir en tres (3) fases principales: el análisis estructural, la selección del modelo y la estimación o interpolación.

2.3.3.1) ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural de la variable regionalizada consiste principalmente en la cuantificación de la variabilidad espacial de los datos disponibles de la variable que representa dicho fenómeno. El análisis estructural depende de la ubicación relativa de los puntos muestreados y no del valor absoluto de la variable en ellos (Jegat, 2001).

La cuantificación de la variabilidad espacial de los datos tiene como objetivo analizar la variación de las mediciones en el espacio y su relación, tomando en cuenta su ubicación. Existen diversas maneras de cuantificar la variabilidad espacial, pero el método más utilizado es el variograma o semivariograma, el cual juega un papel primordial en la práctica de la geoestadística.

El Variograma

El variograma es una herramienta matemática que permite cuantificar la continuidad espacial de una variable regionalizada, en otras palabras, representa la forma como se distribuye un fenómeno natural en el espacio.

Para ilustrar un ejemplo, supóngase que se tienen 900 puntos levantados de un terreno. En este caso, el fenómeno natural que se estudia es la morfología del terreno, y el variograma representará la forma como se distribuye la variable Z (cotas) en relación a la ubicación norte y este (X, Y) de los puntos.

Por definición, el variograma es un momento de segundo orden de la distribución de la variable o función aleatoria $[Z(X+h) - Z(X)]$ dividido por 2:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [Z(X+h) - Z(h)]^2 \} \quad \dots \text{(Ecuación 5.1)}$$

o en forma discreta:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} N(h) \sum [Z(X+h) - Z(h)]^2 \quad \dots \text{(Ecuación 5.2)}$$

donde $\gamma(\mathbf{h})$ es el variograma, $Z(\mathbf{X}_i)$ son los valores experimentales en los puntos \mathbf{X}_i en los que se dispone de datos, tanto en \mathbf{X}_i como en $\mathbf{X}_i+\mathbf{h}$, mientras que $N(\mathbf{h})$ es el número de pares de puntos separados por una distancia \mathbf{h} .

Es importante destacar que la función $\gamma(\mathbf{h})$ se denomina semivariograma, mientras que la función $2\gamma(\mathbf{h})$ es la que se denomina variograma, pero en el ámbito geoestadístico suele utilizarse el término variograma para referirse a ambas funciones por igual.

2.3.3.2) SELECCIÓN DEL MODELO

La selección del modelo de la variable regionalizada es un proceso iterativo que consiste en encontrar un variograma teórico que se ajuste al variograma experimental de forma apropiada.

Para que un modelo de variograma sea válido, es necesario que cumpla con una serie de condiciones (Sánchez, 2002):

- $\gamma(h)$ ha de ser idénticamente nulo en el origen, es decir:

$$\gamma(0) = 0 \quad \dots \text{(Ecuación 5.3)}$$

- $\gamma(h)$ es una función “condicionalmente negativa definida”, o bien, $-\gamma(h)$ es “condicionalmente positiva definida”. Es decir, para todo conjunto x_1, \dots, x_n de puntos

arbitrarios y para todo conjunto $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ de coeficientes que satisfacen $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 0$ ha de cumplirse que:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) \leq 0 \quad \dots(\text{Ecuación 5.4})$$

- Como consecuencia de la propiedad anterior, se puede demostrar que el semivariograma debe tener un ritmo de crecimiento inferior a h^2 , es decir:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \frac{\gamma(h)}{h^2} = 0 \quad \dots(\text{Ecuación 5.5})$$

Puesto que no es fácil comprobar si el variograma experimental cumple con las condiciones necesarias para ser un modelo válido, en la práctica se opta por adaptar los modelos válidos de variogramas teóricos al variograma experimental. Los variogramas teóricos no son más que funciones con una expresión analítica sencilla que cumplen con las condiciones antes señaladas y que se adaptan de forma apropiada a los variogramas experimentales.

Existen diversos métodos de ajuste de los variogramas teóricos al variograma experimental, pero el más utilizado es el de ajuste al sentimiento (Sánchez, 2002).

Método de Ajuste al Sentimiento

En la mayoría de los casos, el ajuste al variograma experimental no se logra con un solo modelo de variograma teórico, por lo que se hace necesaria la combinación de varios de ellos, basándose en las propiedades cualitativas del variograma experimental.

Según Sánchez (2002) la determinación del modelo de variograma teórico ajustado por el método de ajuste al sentimiento es un proceso iterativo, que se inicia con un examen del variograma experimental, en el cual se evalúa el comportamiento tanto en el origen como a grandes distancias. A partir de esta evaluación, se selecciona el variograma o la combinación de variograma que más se asemejen al experimental. En esta selección debe tomarse en

consideración la consistencia con los datos experimentales, es decir, el variograma teórico debe coincidir con los puntos del variograma experimental, esta concordancia debe ser mayor en la medida de que el conjunto de datos también lo sea. El segundo paso consiste en probar distintos valores o combinaciones de modelos teóricos, hasta lograr el mejor ajuste. Se pueden superponer tantos modelos teóricos como se desee, sin embargo es recomendable trabajar con el mínimo de ellos. De igual modo, se deben evitar la superposición de modelos que tengan formas muy similares.

Como se desprende de la descripción anterior, este método de ajuste no garantiza un modelo de variograma único, ya que se basa en apreciaciones subjetivas, en la experiencia y el conocimiento físico del fenómeno que tenga el analista.

Modelos de Variogramas Teóricos más comunes

Los variogramas teóricos pueden dividirse en dos grupos. Los variogramas con meseta y los variogramas sin meseta.

Entre los variogramas teóricos con umbral o meseta tenemos: el efecto pepita, el esférico, el exponencial y el gaussiano. Generalmente se emplean cuando el variograma experimental tiende a estabilizarse en grandes distancias (variables estacionarias)

Entre los variogramas teóricos sin umbral o meseta tenemos: el monómico, el logarítmico y el efecto agujero. Generalmente se emplean cuando el variograma experimental presenta una tendencia creciente (variables no estacionarias).

En estudios de hidrogeología, los variogramas teóricos más comunes y de mayor uso son: el de efecto pepita puro, el esférico, el monómico, el exponencial y la combinación de esférico con pepita.

- **Efecto Pepita Puro:** El origen de este término debe su origen a los yacimientos de oro de África. Este modelo es indicativo de fenómenos sin ninguna autocorrelación espacial, o sea, puramente aleatorio. No es frecuente emplearlo solo, sino en combinación con algún otro modelo. Se utiliza cuando el variograma experimental presenta una discontinuidad en el origen. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ C & \text{si } h > 0 \end{cases} \quad \dots(\text{Ecuación 5.6})$$

Donde $\gamma(h)$ es el variograma, C es el valor de la meseta y h la distancia entre puntos.

- **Esférico:** Es uno de los modelos más empleados en la práctica, se caracteriza porque alcanza una meseta a una distancia finita ($h = a$) y es indicativo de fenómenos continuos. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C * [3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3] & \text{si } h \leq a \\ C & \text{si } h > a \end{cases} \quad \dots(\text{Ecuación 5.7})$$

Donde $\gamma(h)$ es el variograma, C es el valor de la meseta o umbral, h la distancia entre puntos y a es el alcance o rango. La meseta o umbral es el valor de estabilización del variograma, mientras que el rango o amplitud es el valor de la distancia a la cual el variograma tiende a estabilizarse.

- **Monómico:** También conocidos como variogramas potenciales. Se caracterizan porque no tienen meseta y son representativos de fenómenos no estacionarios. Responden a la ecuación:

$$\gamma(h) = C * h^\alpha \quad \dots(\text{Ecuación 5.8})$$

Donde $\gamma(h)$ es el variograma, C es una constante, h es la distancia entre puntos y α es la potencia.

En este caso $\alpha \geq 0$, ya que si $\alpha = 0$ se tiene un efecto de pepita puro. Un caso particular de este tipo de variogramas es cuando $\alpha = 1$, en cuyo caso estaremos en un variograma de tipo lineal: $\gamma(h) = C * h$

- **Exponencial:** Alcanza su meseta en forma asintótica. Es representativo de fenómenos continuos, salvo en conjuntos de puntos líneas o planos, según se esté trabajando en una, dos o tres dimensiones respectivamente. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = C * [1 - e^{-(h/a)}] \quad \dots(\text{Ecuación 5.9})$$

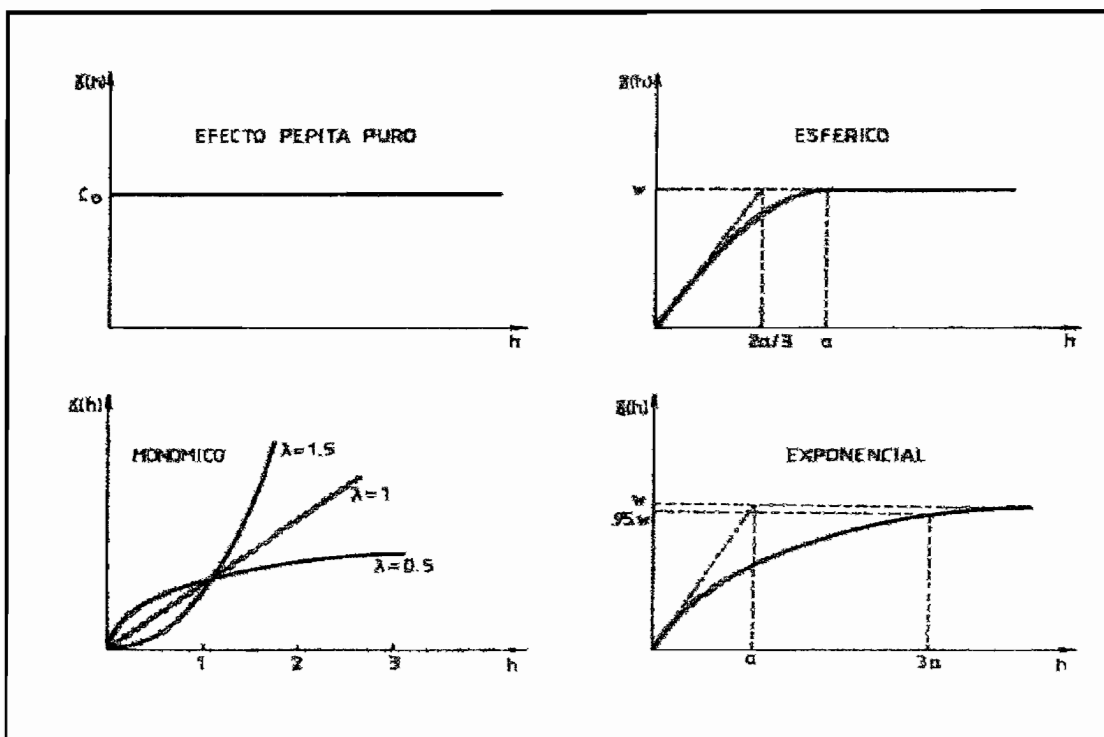


Figura 2.2. Modelos de Variogramas Teóricos más comunes.

Fuente: Linares (2003).

- **Esférico con Pepita:** Este modelo resulta de la combinación del variograma de efecto pepita puro y el esférico. Se utiliza en variogramas experimentales que alcanzan una

meseta a una distancia finita ($h = a$) pero que a su vez presenta una discontinuidad en el origen. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ C_0 (1 + [3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3]) & \text{si } 0 < h < a \\ C_1 & \text{si } h > a \end{cases} \dots(\text{Ecuación 5.10})$$

donde $\gamma(h)$ es el variograma, h es la distancia entre puntos, a es la amplitud, C_0 es el valor del efecto pepita y C_1 es el valor de la meseta.

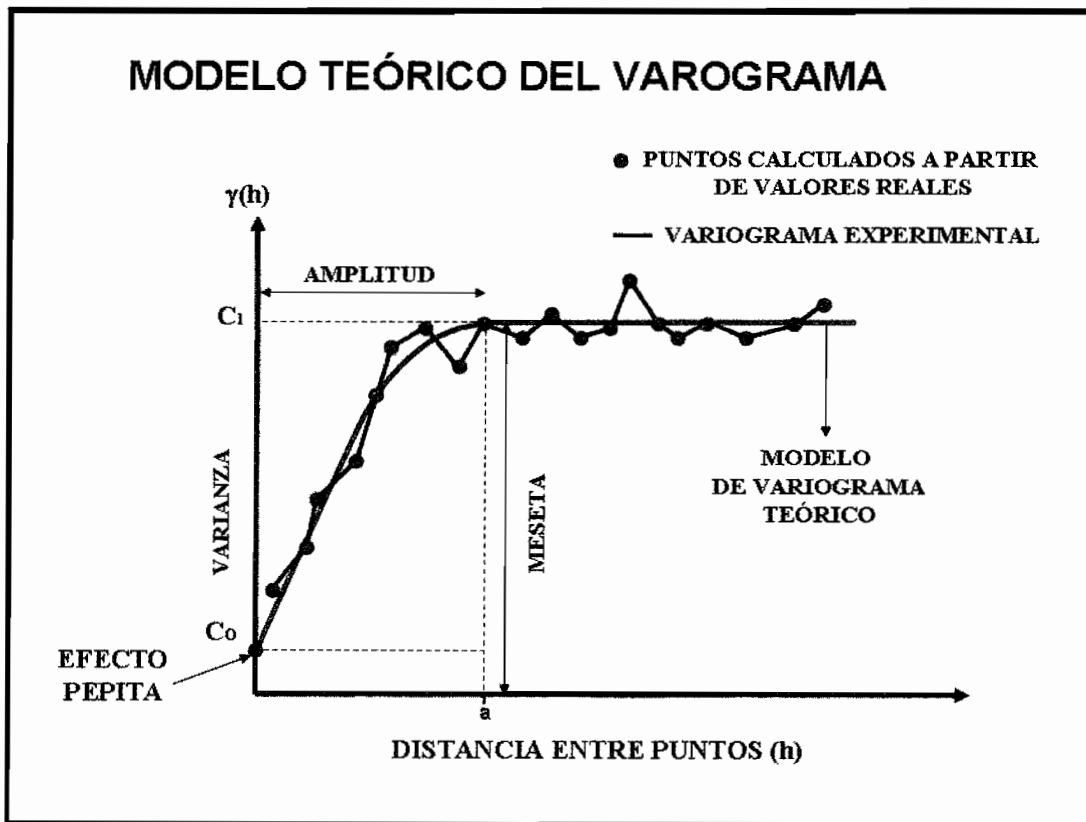


Figura 2.3. Modelo del Variograma Esférico con Pepita y sus elementos.

2.3.3.3) ESTIMACIÓN O INTERPOLACIÓN

El proceso de estimación de la variable regionalizada se realiza utilizando el modelo desarrollado en el análisis estructural que llevó a la selección de un variograma teórico que refleja la variabilidad espacial del fenómeno.

Cuando se quiere mapear una variable regionalizada que representa un fenómeno natural sobre una determinada área de estudio, se presenta el problema de que la variable no está distribuida uniformemente sobre toda el área, sino que se dispone de medidas puntuales. Para resolver este problema se realizan interpolaciones entre las medidas puntuales que sirven como puntos de control y así obtener una serie de valores estimados en otros puntos de dicha área.

Algunos métodos de interpolación son el Trazado Manual, la Triangulación Lineal, el Inverso de la Distancia, el de las Funciones Polinomiales y el Krigeado o “kriging”, el cual es el método de interpolación más exacto de todos los anteriormente nombrados y el que fue utilizado para la elaboración de los mapas de contornos de este trabajo.

El Krigeado

El krigeado es un método de estimación B.L.U.E. que corresponde a las iniciales en inglés de *Best Linear Unbiased Estimator*, o Mejor Estimado Lineal No Sesgado. Este método de interpolación debe su nombre en honor a D. Krige (1951). El objetivo del krigeado es encontrar la mejor estimación lineal posible de una variable a partir de la información disponible: valores muestrales (mediciones puntuales) y relaciones de interdependencia espacial (variogramas), imponiendo como criterio la ausencia de sesgo y la minimización de la varianza de la estimación.

Debido a que el estimador es óptimo y no sesgado, es conveniente sin embargo hacer notar que la minimización del error se hace sobre la base de que el variograma se conoce con exactitud. Por otro lado, aún conociendo el variograma con exactitud, puede haber otros

métodos de estimación no lineales, con errores de estimación menores, pero lo que hace atractivo al krigeado es que permite obtener la estimación más precisa del valor en un punto cuando los datos siguen una distribución de probabilidad normal, y además, permite determinar la varianza de la estimación y con ello detectar un error sistemático.

2.3.4) CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS EN RELACIÓN CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

- **ACUÍFEROS**

Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, las cuales son capaces tanto de almacenar como transmitir el agua. Son formaciones con capacidad de drenaje alta en la que se pueden perforar pozos con el fin de producir agua para satisfacer las necesidades humanas, agrícolas e industriales.

La capacidad de almacenar agua depende de la porosidad del material, mientras que la capacidad de transmitir agua depende de la permeabilidad del material. Por lo tanto, para que una formación pueda ser considerada como acuífero debe poseer alta porosidad y alta permeabilidad. Los materiales rocosos que son acuíferos por excelencia son los depósitos aluviales cuaternarios ricos en gravas y arenas.

- **ACUITARDOS**

Los acuitardos son formaciones capaces de almacenar agua, pero la transmiten con dificultad. Son capas que retardan pero que no impiden el flujo (goteo) de agua desde acuíferos verticalmente adyacentes. No proporcionan caudales de agua subterránea significativos directamente a los pozos o manantiales, pero pueden servir como unidades de almacenamiento del agua subterránea. También se llaman capas semipermeables y producen un semiconfinamiento. Los materiales rocosos que actúan como acuitardos son las arenas arcillosas, limos y arcillas arenosas, entre otros.

- **ACUICLUDOS**

Los acuicludos son formaciones que pueden almacenar agua en grandes cantidades, pero no pueden transmitirla y se drenan con mucha dificultad, ya que el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada. Los materiales rocosos que actúan como acuicludos son las arcillosas, lutitas y las rocas cristalinas.

- **ACUIFUGOS**

Los acuífugos son formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representadas por las rocas compactas, como granitos gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar; se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que puedan permitir flujos.

2.3.5) TIPOS DE ACUÍFEROS

- **ACUÍFERO LIBRE**

Un acuífero libre es caracterizado por la presencia de una superficie de agua libre o nivel freático y el hecho de que la presión del agua en dicha superficie es igual a la presión atmosférica, y a su vez, la presión del agua dentro del acuífero es igual que la presión hidrostática. Este tipo de acuíferos se encuentran saturados sólo parcialmente y el agua que contienen fluye libremente controlada por la pendiente del nivel freático. El agua contenida en un acuífero libre se denomina agua libre o freática.

- **ACUÍFERO CONFINADO**

Un acuífero confinado es aquel que se encuentra situado entre dos capas impermeables o acuicludos, en el cual, la o capa confinante superior mantiene el agua bajo una presión mayor a la presión atmosférica, y a su vez, la presión del agua dentro del acuífero es mayor que la presión hidrostática. Estos acuíferos se encuentran totalmente saturados. Los puntos a los que

llegue el agua en pozos construidos en acuíferos confinados forman una superficie ficticia llamada piezométrica. Aún cuando se esté sacando agua de un acuífero confinado, éste último se queda saturado en todo su espesor siempre que la superficie piezométrica se mantenga por encima del techo confinante. Las capas totalmente impermeables raramente se dan en la naturaleza; por ello, este tipo de acuíferos son menos comunes de lo que a menudo se cree. El agua contenida en un acuífero libre se denomina agua confinada o artesiana.

- **ACUÍFERO SEMICONFINADO**

Se habla de un acuífero semiconfinado cuando la capa confinante superior de un acuífero confinado es semipermeable, o sea, que tiene una permeabilidad muy inferior a la del acuífero, pero no nula. En tales casos, se considera insignificante el movimiento horizontal del agua, tomando en cuenta el movimiento vertical o filtración del agua en la capa confinante. Estos tipos de acuífero generalmente se encuentra totalmente saturados, pero ocasionalmente los niveles piezométricos pueden disminuir por diversos factores (bombeo, descarga, etc) se encontrándose saturados sólo parcialmente. El acuífero semiconfinado es un acuífero confinado que recibe agua (recarga) de la capa superior cuando la superficie piezométrica está por debajo del nivel freático del agua en la capa semiconfinante. Si el nivel freático está por debajo del nivel piezométrico hay movimiento del agua hacia arriba.

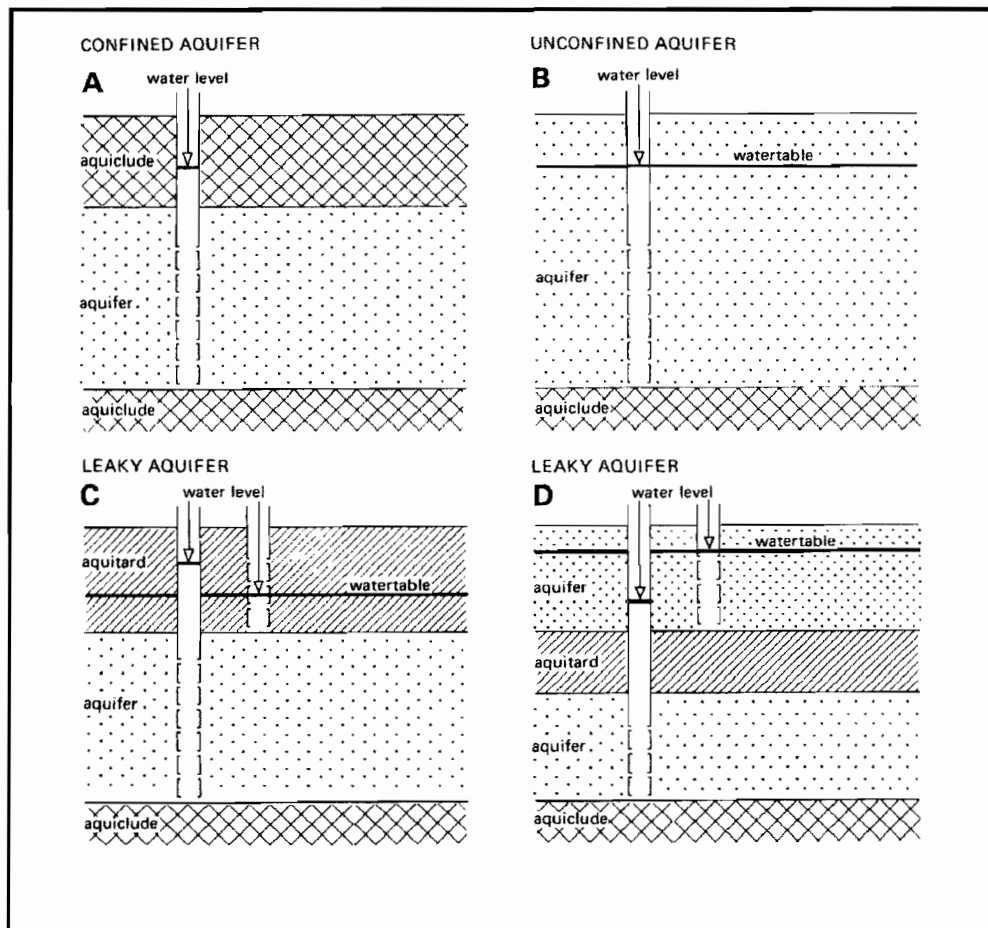


Figura 2.4. Clasificación de los Acuíferos. Fuente: Kruseman y De Ridder (1997).

En la figura 2.4 pueden observarse los diferentes tipos de acuíferos y los materiales que los componen. En la figura 2.4.A se representa a un acuífero libre, en la 2.4.B se representa un acuífero confinado, en la 2.4.C se representa un acuífero semiconfinado con niveles piezométricos por encima del nivel freático de las capas superiores, mientras que en la figura 2.4.D se representa un acuífero semiconfinado con niveles piezométricos por debajo del nivel freático de las capas superiores.

2.3.6) 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, etc.). 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 potenciométrica.

2.3.7) ESTRUCTURA HIDROGEOLÓGICA

Cuando describimos la configuración de los acuíferos y de los acuicludos dentro del ambiente geológico nos referimos a la estructura hidrogeológica, dentro de la cual, se determina la circulación del agua subterránea desde la zona de recarga hasta la zona de descarga, a lo largo de los caminos de percolación, infiltración y circulación (reservorio de agua subterránea).

Las *divisorias de agua*, condicionadas por la orografía o la geología de la región, separan las zonas de recarga de agua subterránea de los sistemas hidrogeológicos colindantes. Así, una estructura hidrogeológica tiene límites fijos que se establecen a partir de la geomorfología y la estructura geológica.

El caudal de flujo en el sistema hidrogeológico depende del gradiente hidráulico o de la pendiente de la superficie piezométrica. Ésta última normalmente cambia debido a la recarga

subterránea del acuífero, que varía estacionalmente (ya que la precipitación controla la fluctuación del nivel de agua subterránea), también debido a la infiltración a través de capas permeables, producto de grandes cantidades de agua almacenada como es caso particular del embalse del Sistema de Riego Río Guárico, o debido a las influencias antrópicas (por ejemplo, las causadas por el bombeo de agua del acuífero).

Las estructuras hidrogeológicas bajo condiciones propicias contienen un recurso de agua subterránea el cual sería un recurso económicamente explotable dependiendo del caudal (caudal de descarga del agua subterránea utilizada) y del volumen de almacenamiento (reserva de agua o almacenamiento) (Mook, 2001).

2.3.8) TRAZADORES Y TRASPORTE

El agua subterránea contiene una mayor o menor cantidad de sustancias inorgánicas y orgánicas, que se encuentran principalmente en solución, aunque también se encuentran en forma coloidal o incluso en suspensión. La materia en suspensión no es una característica habitual del agua subterránea, ya que tales partículas experimentan un filtrado efectivo debido a la velocidad de movimiento generalmente lenta a través de los intersticios de los acuíferos. No obstante son un componente importante en los sistemas de flujo rápido, como los que se desarrollan típicamente en los terrenos kársticos.

Entre las sustancias disueltas en el agua subterránea tenemos una serie de elementos, que pueden llegar a ella de forma natural o antrópica, y que pueden utilizarse para monitorear y estudiar el movimiento de flujo del agua subterránea en una estructura hidrogeológica. Este tipo de elementos o sustancias se denominan trazadores.

2.3.9) TIPOS DE TRAZADORES

Un trazador es una sustancia que se usa para seguir el paso del agua subterránea en lugares donde no se puede observar directamente. Los trazadores disueltos pueden ser de origen natural o antrópico. Ambos orígenes proporcionan información sobre los diferentes aspectos

del movimiento del agua subterránea. Los trazadores típicos de laboratorio incluyen colorantes fluorescentes y sales.

Los trazadores presentan una serie de propiedades comunes, han de ser móviles, solubles y no deben experimentar grandes retardos producidos por la retención en el sólido o en la matriz del acuífero. Esto es, el trazador ha de ser no-reactivo (conservativo) y, por supuesto, necesita ser fácilmente cuantificable.

Dentro de los tipos de trazadores, se distinguen los *históricos* y *ambientales*.

Trazador histórico: es aquel que experimenta un aumento de su concentración ocasionado por un fenómeno histórico. Se mueve de forma lenta y se usa para determinar la velocidad de movimiento o el caudal de recarga. Un fenómeno histórico abarca desde un cambio en los procesos agrícolas hasta la contaminación provocada por una fábrica. Los trazadores históricos más importantes en los estudios hidrológicos son aquellos que comúnmente se usan como trazadores en los ensayos nucleares, como por ejemplo el tritio (^3H), carbono 14 (^{14}C), cloro 36, ^{36}Cl , y cesio 137 (^{137}Cs); estos trazadores presentan un máximo entre los años 1963 y 1964.

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).

2.3.10) TRAZADOR DEL AGUA

Un trazador ideal para el 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

fácilmente 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. Estos isótopos ambientales del agua son del deuterio, el tritio y el oxígeno 18, que forman parte de la molécula del agua, por lo que tienen un comportamiento idéntico a la del agua dentro del sistema (Mook, 2001).

El trazador del agua subterránea mediante isótopos ambientales ofrece información única y suplementaria sobre el origen 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).

2.3.11) LOS ISÓTOPOS EN EL CICLO HIDROLÓGICO

Los estudios preliminares sobre los isótopos del agua se referían al agua de mar y al agua de lluvia. El primero fue un estudio de las variaciones de la relación de concentración $^{18}O/^{16}O$. Le sucedió una investigación sobre la relación de $^2H/^1H$ en las aguas naturales (Friedman, 1953). Dansgaard (1964) observó en gran detalle variaciones $^{18}O/^{16}O$ en la precipitación global, incluyendo una discusión sobre el modelo meteorológico. Su trabajo fue el comienzo de la red global de organizaciones internacionales como Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA por sus siglas en español, IAEA por sus siglas en inglés) sobre "isótopos en la precipitación". En la actualidad las observaciones vienen apoyadas por la modelación teórica y numérica (Mook, 2001).

Los estudios isotópicos ayudan a identificar el origen del agua subterránea, a determinar los problemas ecológicos relacionados con el ciclo hidrológico, y proporcionan información

necesaria para la gestión y la protección sustentable del agua subterránea. Para interpretar los datos isotópicos se requiere un modelo simplificado que describa el comportamiento hidrodinámico a partir de la estructura hidrogeológica y del flujo subterráneo.

Las numerosas aplicaciones de las técnicas isotópicas hidrológicas que aplican isótopos estables abarcan la hidrosfera completa. Uno de los principales campos de aplicación se refiere al origen y la mezcla del agua subterránea y a los constituyentes naturales y antrópicos disueltos. La información más razonable se obtiene de las abundancias de los isótopos estables. Se miden de forma rápida y barata y se puede utilizar de forma razonable como trazadores conservativos (Gat y Gonfiantini, 1981).

2.3.12) HIDROLOGÍA ISOTÓPICA. TÉCNICAS ISOTÓPICAS QUE SE UTILIZAN EN HIDROLOGÍA

La aplicación de técnicas isotópicas en hidrología, denominada también hidrología isotópica, se emplean como herramientas precisas y modernas para estudiar los recursos hídricos. Estas técnicas pueden proporcionar soluciones adecuadas para resolver problemas relativos al origen, distribución y propiedades del agua en una región, especialmente cuando se combina con todos los demás instrumentos disponibles para la hidrología, hidrogeología y geoquímica.

La hidrología isotópica, al proveer información sobre la distribución de los elementos y su evolución espacial y temporal en sistemas hidrogeológicos, ayudan a caracterizar los acuíferos, como también definir los problemas ambientales y los planes de remediación.

El uso de las técnicas isotópicas y nucleares constituyen una herramienta muy importante en estudios hidrogeológicos. Su aplicación se basa principalmente en la determinación de los isótopos ambientales pesados de la molécula de agua, el deuterio (${}^2\text{H}$) y el oxígeno 18 (${}^{18}\text{O}$), cuyo porcentaje está en función de los cambios de fase del agua durante el ciclo hidrológico, proporcionando información que indica el proceso al que ha estado sujeta dicha molécula de agua. La medición de las concentraciones de estos isótopos en aguas naturales es medida en un

espectrómetro de masas y expresadas en valores de partes por mil de desviación estándar con relación a la composición isotópica del agua en estudio.

Los problemas resueltos con esta técnica, en depósitos de aguas subterráneas son: determinación del origen, edad, distribución, movimiento y calidad de las aguas. A su vez, los problemas resueltos en agua superficiales son: determinación de dinámica de reservorios, fugas a través de diques en reservorios y en túneles de centrales hidroeléctricas, tasa de evaporación, descarga de ríos y transporte de sedimentos.

La naturaleza de las aplicaciones isotópicas depende naturalmente del carácter específico de los isótopos, radioactivos y no radioactivos. Se pueden distinguir tres tipos diferentes de aplicaciones (Mook, 2001):

- Se pueden utilizar isótopos estables y radioactivos como *trazadores*, para detectar un cuerpo de agua o una cierta cantidad de agua; un buen ejemplo es el fenómeno de separación de los isótopos pesados (el ^2H estable, deuterio, o el ^{18}O estable) respecto de los isótopos más abundantes (^1H y ^{16}O , respectivamente) que se obtienen del agua de lluvia durante las tormentas intensas. Esto permite seguir el agua de lluvia a través de la escorrentía superficial.
- A menudo, durante el tránsito de compuestos, como el agua y el dióxido de carbono, de una fase a otra, el cociente de concentraciones de los isótopos varía. Este fenómeno recibe el nombre de *fraccionamiento isotópico*. Recíprocamente, la observación de diferencias en los cocientes de concentración, especialmente en el caso de los isótopos estables, informa sobre ciertos procesos geoquímicos e hidrológicos que acontecen. Por ejemplo, la composición isotópica del carbono y del oxígeno presentes en el carbonato cálcico como resultado de una serie de procesos, es diferente para el agua salada que para el agua dulce. Además, la composición isotópica del oxígeno y el hidrógeno del agua de lluvia varía con la latitud, la altitud, el clima y la época del año.

- *La desintegración radioactiva* ofrece la posibilidad de determinar las edades, siempre que se cumplan ciertas condiciones. Digna de mención a este respecto es la frecuente aplicación de la datación del agua subterránea, es decir, la determinación del lapso de tiempo desde que se produjo la infiltración de agua, mediante la comparación de las actividades del ^{14}C o del ^3H (tritio) en una muestra de agua subterránea con aquella que proviene de la recarga. Asimismo, se pueden usar como trazadores las diferentes concentraciones de los isótopos radioactivos.

2.3.13) ISÓTOPOS

Los átomos del mismo elemento pueden tener diferente número de neutrones, ocasionando diferentes versiones de átomos para un mismo elemento. Las diferentes versiones posibles de cada elemento son llamadas isótopos. Para un mismo elemento, el número atómico es el mismo para todos los isótopos, lo que cambia es el número de masa atómica y por ende, el número de neutrones.

2.3.14) NÚMERO ATÓMICO (Z)

El número atómico de un elemento se refiere al número de protones que posee el átomo en su núcleo, por lo tanto, también el número de electrones que posee el átomo en sus orbita (Sears y Zemanski, 1962).

2.3.15) MASA ATÓMICA (P)

La masa atómica de un elemento se refiere a la masa del núcleo atómico, expresada en una. También se conoce como peso atómico, pero lo correcto es denominarla masa atómica. Mientras mayor sea el número atómico de un elemento (Z), mayor es su masa atómica (P), y por lo tanto, mayor es su tamaño (Sears y Zemanski, 1962).

2.3.16) NÚMERO DE MASA ATÓMICA (A)

El número de masa atómica se refiere al número entero más próximo a la masa atómica real de un elemento. El número de masa atómica es igual al número total de partículas nucleares: protones y neutrones (Sears y Zemanski, 1962).

2.3.17) ISÓTOPOS DEL HIDRÓGENO

El número atómico de un átomo representa el número de protones de su núcleo. Este número es constante para cada elemento. Sin embargo, el número de neutrones puede variar, lo que da lugar a isótopos con el mismo comportamiento químico pero distinta masa. El hidrógeno siempre tiene un protón en su núcleo, cuya carga está equilibrada por un electrón. Los isótopos del hidrógeno son el protio (sin neutrones en su núcleo), el deuterio (un neutrón en su núcleo) y el tritio (dos neutrones en su núcleo).

Las imágenes que se muestran en la figura 2.5 son representaciones esquemáticas del átomo: en realidad el núcleo es 100.000 veces menor que el átomo, y el electrón es un millón de veces menor que el núcleo. El tamaño del átomo está determinado por el movimiento del electrón en regiones del espacio llamadas orbitales.

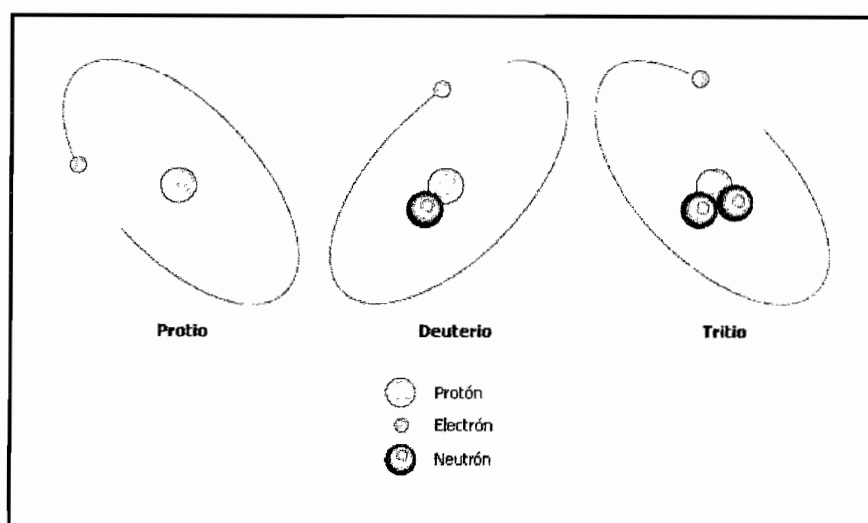


Figura 2.5. Isótopos del Hidrógeno. Fuente: Microsoft Encarta (2004).

- **PROTIO**

Es uno de los isótopos estables y el más común del hidrógeno que tiene las siguientes características: Número Atómico: $Z = 1$, y Número de Masa Atómica: $A = 1$. Su símbolo es 1H o ${}^1_1\text{H}$, posee un núcleo conformado por un protón y se denomina también hidrógeno normal (Enciclopedia Metódica Larousse, 1997).

- **DEUTERIO**

Es otro de los isótopos estables del hidrogeno, que tiene las siguientes características: Número Atómico: $Z = 1$, y Número de Masa Atómica: $A = 2$. Su símbolo es D , 2H o ${}^2_1\text{H}$, posee un núcleo conformado por un protón y un neutrón, recibe también el nombre de hidrogeno pesado por ser su masa atómica el doble de la del hidrogeno normal, sin embargo, ambos tienen las mismas propiedades químicas. Tal como se da en la naturaleza, el hidrogeno contiene un 0,02% de deuterio. Como el hidrogeno normal, el deuterio puede combinarse con el oxígeno para formar el agua pesada, también conocida como óxido de deuterio, de fórmula D_2O . El punto de fusión del agua pesada es de $3,82^\circ\text{C}$ y el punto de ebullición es $101,42^\circ\text{C}$ a la presión de 1 atm, y a temperatura ambiente, su densidad es un 10,79% mayor que la del agua normal. El núcleo de un átomo de deuterio se denomina deuterón.

El deuterio por electrolisis del agua. Debido a la gran masa de este isótopo, el hidrogeno normal se deposita en el cátodo entre cinco y seis veces mas deprisa que el deuterio, por lo tanto, el agua sobrante se va enriqueciendo progresivamente en deuterio (Enciclopedia Metódica Larousse, 1997).

- **TRITIO**

Es un isótopo radiactivo del hidrogeno de símbolo T o 3H , que tiene las siguientes características: Número Atómico: $Z = 1$, y Número de Masa Atómica: $A = 3$. Su símbolo es T , 3H o ${}^3_1\text{H}$, posee un núcleo conformado por un protón y dos neutrones. La concentración de tritio se expresa en Unidades de Tritio ($1\text{UT} = 1$ átomo de tritio en 10^{18} átomos de protio). Se

desintegra emitiendo una partícula beta, y produce un núcleo de helio de masa 3. Tiene una vida media de 12,26 años (Enciclopedia Metódica Larousse, 1997).

2.3.18) ISÓTOPOS DEL OXIGENO

El oxígeno, de símbolo O, es un elemento gaseoso ligeramente magnético, incoloro, inodoro e insípido. El oxígeno es el elemento más abundante en la Tierra, constituye el 23,15 % en masa de la atmósfera, el 85,8 % en masa de los océanos (el agua pura contiene un 88,8% de oxígeno), el 46,7% en masa de la corteza terrestre, como componente de la mayoría de las rocas y minerales.

Se conocen tres formas estructurales del oxígeno: el oxígeno ordinario, que contiene dos átomos por molécula y cuya fórmula es O₂; el ozono, que contiene tres átomos por molécula y cuya fórmula es O₃, y una forma no magnética azul pálida, el O₄, que contiene cuatro átomos por molécula, y se descompone fácilmente en oxígeno ordinario (Microsoft Encarta, 2004).

- **OXÍGENO 16**

Es el isótopo más estable y el más abundante del oxígeno. Representa un 99,76% del oxígeno ordinario, y tiene las siguientes características: Número Atómico: Z = 8, y Número de Masa Atómica: N = 16. Su símbolo es ${}_8\text{O}^{16}$, posee un núcleo conformado por 8 protones y 16 neutrones (Enciclopedia Metódica Larousse, 1997).

- **OXÍGENO 18**

Es otro de los isótopos estables, que tiene las siguientes características: Número Atómico: Z = 8, y Número de Masa Atómica: N = 18. Su símbolo es ${}_8\text{O}^{18}$, posee un núcleo conformado por 8 protones y 18 neutrones (Enciclopedia Metódica Larousse, 1997).

2.3.19) VIDA MEDIA DE UN ISÓTOPO RADIATIVO

La vida media es la cantidad de tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los átomos de un isótopo radiactivo. La vida media de un isótopo dado es siempre la misma y no depende de cuántos átomos se tengan o cuánto tiempo hayan estado allí (Sears y Zemanski, 1962). Por ejemplo, el tritio tiene una vida media de 12,26 años. Esto quiere decir que si se tiene una masa de 6 gramos de tritio, en el transcurso de 12,26 años la misma se reducirá hasta 3 gramos, por efectos de desintegración radiactiva.

2.3.20) ESPECTROMETRÍA DE MASAS

Técnica que permite la determinación de masas atómicas o moleculares. El material se vaporiza en vacío, se ioniza, y se hace pasar primero a través de un potencial eléctrico fuertemente acelerante y después a través de un campo magnético potente. Esto sirve para separar los iones según su relación carga/masa; los iones se detentan generalmente mediante un electrómetro que mide la fuerza entre cargas y, por tanto, el potencial eléctrico. La espectrometría de masas se usa para la datación radiométrica de las rocas y en hidrología isotópica. El instrumento que se utiliza en esta técnica se denomina espectrómetro de masas (Oxford – Complutense, 2000).