



Exploración de aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá (Sector de Las Tablas) mediante métodos geofísicos

Alberto Caballero

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

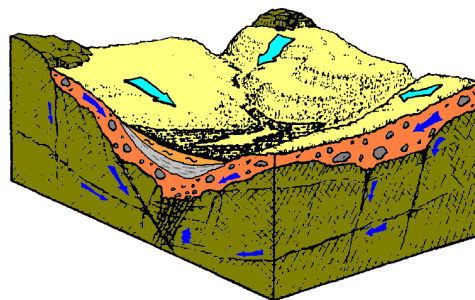
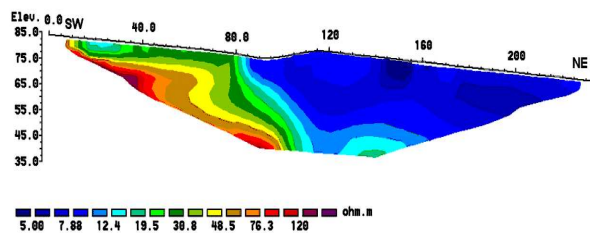
WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Facultat de Geologia
Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica

TESIS DOCTORAL

**EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
EL ARCO SECO DE PANAMÁ (SECTOR DE LAS
TABLAS) MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

ALBERTO CABALLERO



Barcelona, 2009

Esta Tesis va dedicada con todo cariño a:

Mi querida Madre Doña Elena

Mi amada esposa Greethel Varinia

Mis Hijas:

Greethel Carolina

Raisa Nicole

Arlene Danay

AGRADECIMIENTOS

Primero, le agradezco a Dios por haberme dado la salud, la fuerza, la voluntad y el espíritu para lograr este propósito tan anhelado.

Al Dr. Albert Casas por la dirección de este trabajo, por su comprensión y apoyo en los momentos que más lo he necesitado. Por su contribución en las tareas de gravimetría. Su experiencia ha sido invaluable en este trabajo.

Al Dr. Mahjoub Himi siempre con tiempo disponible para contribuir con el trabajo académico.

A los Dres. Xavier Font, Josep M. Carmona, Víctor Pinto, Lluís Rivero, Manuel Viladevall, sus orientaciones en momentos diversos.

A la Dra. Josefina C. Tapias, por su constante apoyo y voz de ánimo.

Al Dr. José Batista del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, por su asistencia durante mi estancia en dicho Instituto y sus constantes intercambios académicos.

Al Dr. Joaquín Proenza, su ayuda y sus consejos me sirvieron para ir adelante con mi trabajo.

A los docentes del Programa “Modelización de Procesos Geológicos”, por sus enseñanzas y orientación a lo largo de los cursos. A la Doctora Teresa Teixadó, su contribución con literatura apropiada.

Al Programa Becas de Excelencia SENACYT-IFARHU del Gobierno panameño, cuyo subsidio fue fundamental en la etapa final de mi doctorado, al ser beneficiado con el contrato-beca 270-2009-320.

A los profesores Aristides Montero y Ricardo Bolaños, del Departamento de Física de la Universidad de Panamá, quienes creyeron en mi, firmando un *Cheque en Blanco*, esto nunca podré pagárselos.

Al profesor Eduardo Camacho, Director del Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá, quien me facilitó la logística para seguir adelante, así como el permanente intercambio de bibliografía de la geología de Panamá.

Al MSc. Arkin Tapia del Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá, por su apoyo en el campo, su contribución a la geología y la geomorfología del área de estudio. Nunca podré pagarle sus clases de SIG, clave en este trabajo.

A la Sra. Nuria Casañé y al Sr. Jordi Báguena quienes en todo momento han contribuido de forma eficiente con su gestión administrativa.

Pedro Sanz Cava quien, con su sano humor, siempre tiene una solución para los problemas técnicos.

A los geólogos Iván Cedeño Chong y Edgardo Vergara del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN). Sin su colaboración todo hubiera sido aún más difícil.

Al geólogo Sebastián Sánchez por su participación en la confección del primer esquema geológico de este trabajo.

A mis colegas, profesores de la Universidad de Panamá, José Villarreal, Carmelo Bayard y Orlando Leone, por su contribución en la realización del análisis químico de los puntos de agua.

A la Licenciada Rosa M^a Marimón del Serveis Cientificotècnics (Unitat de Medi Ambient), de la Universidad de Barcelona por la realización del análisis isotópico de las muestras de agua de lluvia y mar.

A la profesora Diana Puigserver por su permanente orientación y apoyo.

De manera especial a las siguientes personas del programa de Becas Internacionales del IFARHU-SENACYT: Maritza Estela Solis H., Itzell Hubbard, Josselyn De La Cruz y Silvia Mora.

A todos mis compañeros del programa de doctorado: Carmenate, Beatriz, Idael, Yaniel, Niurka, Israel, Saleh, Elizabeth y Normando. Quienes vivieron día a día la evolución de mis estudios, desde su inicio en Moa, Cuba.

A mi compañera de estudios Yael Díaz, porque siempre tuvo un minuto para darme ánimo.

A Raúl Lovera con quien tuve oportunidad de compartir algunas tertulias, su calidad de gente y su apoyo en muchas ocasiones me ayudaron a seguir adelante.

Al Departamento de Física de la Universidad de Panamá, por haber cargado con mí *docencia* durante los tres años de licencia por estudios.

A mis familiares, por todo el apoyo que le han brindado a los “míos” para que sigan adelante, mientras he estado ausente.

A los colegas de la Universidad de Panamá, Dres. Juan Jaén y Cesar Garrido, por animarme a lo largo de mis estudios.

Muchas personas han contribuido de forma efectiva, la lista es larga, si no los menciono, entenderán que no es voluntario.

ÍNDICE

	Página
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	
1.1. Introducción	3
1.1.1. Aspectos generales.....	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Justificación	5
1.4. Antecedentes del área de estudio	6
1.4.1 Localización geográfica y generalidades.....	6
1.4.2. Acceso al área de estudio.....	7
1.4.3. Situación socioeconómica general.....	7
1.4.4. Climatología	8
Capítulo 2: CONTEXTO GEOLÓGICO	
2.1. Contexto Geológico Regional	13
2.1.1. Marco Tectónico Regional.....	13
2.1.2. Ámbito estructural de la Península de Azuero.....	15
2.2. Geología de la Península de Azuero	18
2.2.1. Introducción.....	18
2.2.2. Geología de Las Tablas.....	21
2.2.3. Descripción y análisis de los perfiles geológicos.....	28
2.2.4. Descripción de las principales alineaciones estructurales.....	32
2.3. Geomorfología del área de estudio	35
2.3.1. Hidrografía.....	35
2.3.2. Pendientes.....	37
2.3.3. Geomorfología.....	37
2.3.3.1. Ambiente de origen tectónico.....	38
2.3.3.2. Formas de origen sedimentario.....	42

Capítulo 3: HIDROGEOLOGIA

3.1. Introducción.....	51
3.2. Evolución del abastecimiento de agua.....	52
3.3. Características Hidrogeológicas.....	53
3.3.1. Acuíferos predominantemente fisurados y discontinuos.....	54
3.3.2. Acuíferos locales, intergranulares o fisurados, de productividad limitada.	56
3.4. Características hidroquímicas y calidad de las aguas subterráneas...	56
3.4.1. Determinaciones fisicoquímicas y métodos de análisis.....	57
3.4.2. Hidroquímica de las aguas subterráneas.....	57
3.5. Evaluación hidrogeológica.....	70
3.5.1. Transmisividad hidráulica.....	70
3.6. Aplicación de los isótopos estables.....	76
3.6.1. Los isótopos en las aguas subterráneas.....	77
3.6.2. Análisis isotópico las aguas del sector de San José.....	79

Capítulo 4: CAMPOS POTENCIALES

4.1. Introducción.....	85
4.1.1. Aspectos generales.....	85
4.2. Exploración magnética.....	86
4.2.1. Caracterización magnética regional.....	86
4.2.2. Caracterización magnética local.....	92
4.3. Exploración gravimétrica.....	94
4.3.1. Conceptos fundamentales.....	94
4.3.2. Compilación de datos.....	95
4.3.3. Análisis cualitativo regional.....	102
4.3.4. Levantamiento gravimétrico local.....	103
4.3.5. Mapa de Anomalías de Bouguer de Las Tablas.....	108
4.3.6. Modelización gravimétrica.....	112

Capítulo 5. MÉTODOS ELÉCTRICOS

5.1. Introducción.....	115
5.2. Metodología.....	117
5.3. Fundamentos físico-matemáticos de los métodos empleados.....	119
5.3.1. Descripción de los dispositivos de electrodos empleados.....	122
5.3.1.1. Método Schlumberger.....	122
5.3.1.2. Dispositivo Wenner.....	123
5.3.1.3. Dispositivo Wenner-Schlumberger.....	123
5.3.1.4. Dispositivo Dipolo-Dipolo.....	124
5.3.1.5. Dispositivo Offset-Wenner.....	125
5.3.2. Profundidad de investigación.....	133
5.3.3. Obtención de la función de resistividades de un medio estratificado....	134
5.3.3.1. La resistividad aparente.....	135
5.4. Interpretación de los datos geoelectricos.....	137
5.5. Interpretación de datos en dos dimensiones.	139
5.5.1. Introducción.....	139
5.5.2. Resolución del Problema Directo.....	140
5.5.3. Métodos de Inversión en 2-D.....	141
5.5.3.1. Inversión por suavizado Norma L_2	141
5.5.3.2. Inversión Robusta. Norma L_1	142
5.6 Resistividad de las rocas estudiadas.....	143
5.7. Principios de Equivalencia y Supresión.....	144
5.8. Parámetros de Dar Zarrouk.....	146
5.9. Resultados.....	149
5.9.1. Sondeos geoelectricos del Sector de San José.....	149
5.9.2. Sondeos geoelectricos del sector de La Palma.....	186
5.9.3. Sondeos geoelectricos del sector de Santo Domingo.....	196
5.9.4. Sondeos Geoelectricos del Sector de Las Tablas.....	206
5.10 Cortes geo-eléctricos por correlación con sondeos mecánicos.....	229

Capítulo 6: DISCUSIÓN

6.1. Discusión..... 235

Capítulo 7: CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones..... 251

REFERENCIAS

Referencias..... 257

ANEXOS

Anexo 1. Mapa Regional del área de estudio

Anexo 2. Pozos de referencia del sector de La Palma

Anexo 3. Pozos de referencia del Sector de Santo Domingo

Anexo 4. Pozos de referencia del Sector Las Tablas