



**Maestría Regional
Centroamericana en
Ciencias del Agua**
con énfasis en Calidad del Agua

Trabajo de Tesis para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua

**“Disponibilidad Hídrica Subterránea y Prospección
Geofísica para el Aprovechamiento Sostenible del
Acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de
Solentiname, Nicaragua”.**

Elaborado por:

Ing. Ivette Núñez Sandino.

Cómite de Tesis

Tutor: MSc. Lener Sequeira Gómez.

Asesor: MSc. Valeria Delgado Quezada.

Managua, Marzo 2017.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y mi familia por apoyarme en esta meta que propuse dentro de mi proyecto profesional.

Al Centro de Investigaciones de Recursos Acuáticos (**CIRA – UNAN**), por el apoyo otorgado en realizar la Maestría en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad de Agua.

A mi tutor **Msc. Lener Sequeira Gómez** por su valiosa asesoría, acompañamiento durante las giras de campo y elaboración del documento, por su apoyo incondicional.

A mis asesora: **Msc. Valeria Delgado Quezada** por los aportes y sugerencias brindados durante el trayecto de la tesis de investigación.

A los organismos que me brindaron su apoyo para el desarrollo de las giras de campo: Huelva Solentiname, Asociación para el Desarrollo de Solentiname, Fundación del Río.

A la población de Isla Mancarrón, por su buena disponibilidad, brindando su apoyo y tiempo en todas las actividades de campo realizadas en la zona de estudio.

A miembros del jurado por su aporte a la investigación: Msc. Xochilt Zambrana Areas, Dr. William Martínez Bermudez, Msc. Marvin Corriols M.

A mis compañeros de Maestría: Harvin Bonilla, Eduardo Soza, Elida Madrid quienes me acompañaron durante las visitas de campo .

A otros colabadores que apoyaron con su tiempo en las visitas de campo: Ing. Alejandra Amayo y Msc. Maynor Ruíz.

Contenido

SIGLAS Y ACRÓNIMOS	9
RESUMEN	11
I. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Área de Estudio.....	15
1.2 Antecedentes.....	17
1.3 Planteamiento del problema.....	21
1.4 Justificación	22
1.5 Objetivos	24
1.5.1 Objetivo general.....	24
1.5.2 Objetivos específicos	24
II. MARCO TEÓRICO.....	25
2.1 Condiciones climáticas	25
2.1.1 Precipitación	25
2.1.2 Evaporación y Evapotranspiración	26
2.2 Geología y geomorfología	27
2.2.1 Geomorfología	29
2.3 Propiedades hidrogeológicas e hidráulicas.....	30
2.4 Zonas de recarga hídrica	37
2.4.1 Uso de suelo	37
2.5 Balance hídrico subterráneo	39
2.5.1 Entrada en el sistema: Recarga potencial.....	40
2.5.2 Salidas del Sistema	45
2.6 Descripción socio-económica.....	46
2.7 Prospección geofísica	47
2.7.1 Método de tomografía eléctrica	48
III. DISEÑO METODOLÓGICO.....	53
3.1 Tipo de estudio.....	53
3.2 Recopilación de la información	53
3.2.1 Recopilación, revisión y análisis de documentación:.....	53
3.2.2 Planificación, preparación e investigación de campo	54

3.2.3 Reconocimiento hidrogeológico y geológico.....	55
3.2.4 Monitoreo de objetos hidrogeológicos	57
3.2.5 Levantamiento de datos de precipitación para balance hídrico de suelos	60
3.2.6 Levantamiento geológico y geomorfológico.....	61
3.2.7 Pruebas de Infiltración	62
3.2.8 Levantamiento geofísico aplicando Tomografías Eléctricas.....	64
3.3 Análisis, procesamiento, interpretación e integración de resultados.....	67
3.3.1 Procesamiento de los resultados de monitoreo obtenidos de los objetos hidrogeológicos de la isla.	67
3.3.2 Interpretación de pruebas de infiltración	68
3.3.3 Procesamiento de los componentes del balance hídrico subterráneo y cuantificación de la recarga potencial del acuífero.....	68
3.3.4 Interpretación de los resultados de prospección geofísica	69
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
4.1 Componentes meteorológicos	72
4.2 Geología local.....	76
4.2.1 Geomorfología	79
4.2.2 Suelos y tipo de suelo	82
4.2.3 Uso actual del suelo	83
4.3 Hidrología.....	85
4.4 Hidrogeología	86
4.4.1 Inventario de objetos hidrogeológicos	86
4.4.2 Características físico-químicas <i>in situ</i> del agua subterránea	87
4.4.3 Piezometría de la isla	92
4.4.4 Caudal de Manantiales	93
4.4.5 Características hidráulicas del acuífero.....	95
4.4.6 Zonas de recarga del acuífero	100
4.4.6.1 Zonas de Recarga Hídrica	102
4.5 Potencial hídrico subterráneo de la Isla Mancarrón.....	105
4.5.1 Balance hídrico de suelos.	105
4.5.2 Descargas del sistema.....	109
4.5.3 Disponibilidad de Agua subterránea	110

4.6 Distribucion de los estratos y sus discontinuidades en el subsuelo.	118
4.6.1 Comunidad El Refugio (TEIM1 y TEIM2).	121
4.6.2 Sector El Colectivo (TEIM3 y TEIM4)	122
4.6.3 Comunidad Los Ortega (TEIM5).....	124
4.6.4 Hacienda La Salvadora (TEIM6).	125
4.6.5 Sitios Propuestos para perforación de pozos	126
4.6.6 Medio hidrogeológico: modelo conceptual del acuífero	128
4.6 Estrategias de aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón ..	131
V. CONCLUSIONES.....	136
VI. RECOMENDACIONES.....	138
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	139
VIII. ANEXOS	145
Anexo 1. Formatos de levantamiento de campo.....	145
Anexo 2. Registro de precipitación en Isla Mancarrón – período 2013-2014.	145
Anexo 3. Reconocimiento geológico Isla Mancarrón	146
Anexo 4. Inventario de Objetos Hidrogeológicos	153
Anexo 5. Aforo en Manantiales de Isla Mancarrón	154
Anexo 6. Balance Hídrico de Suelo utilizando el método de Schosinsky & Losilla G., 2006.	155
Anexo 7. Proyecciones de Recarga Potencial del acuífero de Isla Mancarrón	157

Indice de Mapas

Mapa 1. Localización del área de estudio, Archipiélago de Solentiname, Isla Mancarrón.	17
Mapa 2. Características geológicas- estructurales del archipiélago de Solentiname (CIRA/UNAN-Managua, 2008).	30
Mapa 3. Mapa de zonificación de uso de suelo, Plan de Manejo Solentiname (MARENA 2010).	39
Mapa 4. Objetos hidrogeológicos y comunidades en la Isla Mancarrón.	57
Mapa 5 Sitios de monitoreo de parámetros físico-químicos de campo en las costas de la Isla Mancarrón.	59
Mapa 6. Ubicación de los pluviómetros en Isla Mancarrón.	61
Mapa 7. Ubicación de pruebas de infiltración método doble anillo y Porchet.	64
Mapa 8. Ubicación de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, febrero 2014. ..	66
Mapa 9. Mapa geológico- estructural de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.	79
Mapa 10. Mapa geomorfológico de la Isla Mancarrón.	81
Mapa 11. Mapa de clasificación de textura de suelo Isla Mancarrón.	83

Mapa 12. Mapa de cobertura vegetal de Isla Mancarrón.	85
Mapa 13. Mapa de Red Hídrica de Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.....	86
Mapa 14. Piezometría de la Isla Mancarrón.	93
Mapa 15. Caudal de Manantiales en la Isla Mancarrón.....	95
Mapa 16. Dirección del gradiente hidráulico y velocidad media del flujo subterráneo en Isla Mancarrón.	100
Mapa 17. Coeficiente de infiltración en Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.	102
Mapa 18. Mapa de zona de recargas según capacidad de infiltración en Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.	104
Mapa 19. Ubicación de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, febrero 2014.	120
Mapa 20. Sitios seleccionados para exploración y perforación de pozos en Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.	128

Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados del muestreo efectuado en Isla Mancarrón (CIRA/UNAN-Managua, 2008).	20
Tabla 2. Clasificación de Transmisividad.....	33
Tabla 3. Cobertura de suelo en el Archipiélago de Solentiname y Reserva Los Guatuzos (MARENA, 2010).	38
Tabla 4. Punto de marchitez y capacidad de campo de diferentes texturas de suelo (Grassi, 1976).	43
Tabla 5. Resistividad de aguas y rocas.....	50
Tabla 6. Objetos hidrogeológicos en la Isla Mancarrón.....	56
Tabla 7. Ubicación de los puntos monitoreados en el Lago Cocibolca	58
Tabla 8. Ubicación de pluviómetros en la Isla Mancarrón.....	61
Tabla 9. Ubicación de las pruebas de infiltración a través del método de doble anillo y Porchet en la Isla Mancarrón.....	63
Tabla 10. Características generales de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, Febrero 2014.	65
Tabla 11. Interpretación de las resistividades eléctricas en los perfiles de tomografía de Isla Mancarrón.....	71
Tabla 12. Evapotranspiración del cultivo de frijol y maíz para el año 1997, mediante método Blaney & Criddle, cuenca Río San Juan.....	75
Tabla 13. Resultados de parámetros físico-químicos de campo en las proximidades de la Isla Mancarrón, en Lago Cocibolca (18/03/2014).	91
Tabla 14. Resultados de plaguicidas organoclorados y carbamatos en aguas superficiales alrededor de Isla Mancarrón (CIRA/UNAN- Managua, 2008).	92
Tabla 15. Aforo en manantiales de Isla Mancarrón (noviembre 2013-marzo 2014).	93
Tabla 16. Propiedades hidráulicas del acuífero de Isla Mancarrón.....	96
Tabla 17. Gradientes hidráulicos del sistema acuífero Isla Mancarrón.	96

Tabla 18. Prueba de dilución puntual en el agua subterránea del pozo PE-5, Comunidad El Refugio, febrero 2014.	98
Tabla 19. Velocidad media para cada una de las profundidades de la columna de agua del pozo PE-5.....	99
Tabla 20. Velocidad media del flujo subterráneo Isla Mancarrón.....	99
Tabla 21. Descripción de las zonas de recarga en Isla Mancarrón.	103
Tabla 22. Datos de precipitación promedio mensual para el período hidrológico 2013-2014 y fracción retenida por el follaje en la Isla Mancarrón.	106
Tabla 23. Evapotranspiración potencial estimada mediante el método de Thornthwaite a partir de datos de la Estación Meteorológica San Carlos (INETER) en el período 2013-2014.	106
Tabla 24. Propiedades físicas según características del suelo de la Isla Mancarrón.....	107
Tabla 25. Resultados de infiltración básica en la Isla Mancarrón.....	108
Tabla 26. Recarga potencial del acuífero anual mediante balance hídrico de suelos para el periodo 2013-2014.	108
Tabla 27. Escorrentía subterránea del acuífero Isla Mancarrón.....	110
Tabla 28. Disponibilidad de agua subterránea en la Isla Mancarrón (noviembre 2013-marzo 2014).	110
Tabla 29. Demanda de agua de Isla Mancarrón en base a indicador Huelva Solentiname,2009.	112
Tabla 30. Demanda de agua basado en indicador OMS (2003) para Isla Mancarrón.	113
Tabla 31. Demanda de agua vs Disponibilidad del acuífero, Isla Mancarrón (noviembre 2013-mayo 2014).	113
Tabla 32. Proyecciones futuras con un crecimiento demográfico del 2.5% (INAA, 2001).	115
Tabla 33. Recarga potencial del acuífero de Isla Mancarrón para período 2002-2012.	116
Tabla 34. Variabilidad climática y recarga potencial del acuífero para 2050 en Isla Mancarrón en escenario moderado según criterios INETER (2001).	117
Tabla 35. Disponibilidad de agua en la Isla Mancarrón, para tres escenarios.	118
Tabla 36. Características generales de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, Febrero 2014.	119
Tabla 37. Clasificación del tipo de material en base a resistividades y tonalidades en los perfiles.	120
Tabla 38. Ubiación de los posibles sitios de perforación de pozos para abastecimiento comunal de la población.....	127
Tabla 39. Matriz de acciones por línea estratégica para aprovechamiento sostenible del acuífero de Isla Mancarrón.	133

Indice de Figura

Figura 1. Esquema de posición de electrodos para tomografía eléctrica Dahlin, T. and Zhou B. 2006.49

Figura 2. Tomografía eléctrica TEIM1 ubicada en El Refugio.....121

Figura 3. Tomografía eléctrica TEIM2 ubicada en El Refugio.122

Figura 4. Tomografía eléctrica TEIM3 ubicada en El Colectivo.....123

Figura 5. Perfil TEIM4- Sector El Colectivo, en dirección sureste-noroeste.123

Figura 6. Perfiles TEIM3 y TEIM4 (transversal) comunidad El Colectivo.....124

Figura 7. Perfil TEIM5- en el sector de Los Ortega, de dirección sur-norte.....125

Figura 8. Perfil TEIM6 en la Hacienda La Salvadora, sector oeste de la isla.126

Figura 9. Modelo conceptual - medio hidrogeológico del acuífero de la Isla Mancarrón. .131

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACRA	:	Asociación Catalana de Recursos de Asistencia.
APDS	:	Asociación para el Desarrollo de Solentiname.
CAPRE	:	Comité Coordinador Regional de Instituciones de agua potable y saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana.
CIDIAT	:	Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial.
CIRA/UNAN-Managua:		Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua en Managua.
COSUDE	:	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
CREDES	:	Instituto Crecimiento y Desarrollo Sostenible.
ETP		Evapotranspiración.
ETPR	:	Evapotranspiración real.
FDR	:	Fundación del Río.
FCIHS	:	Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
GWP	:	Global Water Partnership.
INETER	:	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.
MARENA	:	Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales.
MINAE	:	Ministerio del Ambiente y Energía de Costa Rica.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

- m.s.n.m : Metros sobre el nivel del mar.
- OD : Oxígeno Disuelto.
- OEA : Organización de Estados Americanos.
- PNUMA : Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- STD : Sólidos Disueltos Totales.
- TE : Tomografías Eléctricas.
- UNAN-MANAGUA: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua en Managua.

RESUMEN

En Nicaragua, el agua subterránea es una de las principales fuentes de consumo humano, por tanto se desarrollan investigaciones que promuevan su adecuado manejo. En este contexto, la presente investigación, realizada durante el período 2013-2014 se efectuó en el acuífero de la Isla Mancarrón, del Archipiélago de Solentiname, siendo clasificada como área protegida por su importancia ecológica.

Son pocos los estudios en esta zona, la mayoría se enfocan en protección de biodiversidad y pocos en información específica en cuanto a caracterización hidrogeológica y disponibilidad hídrica. Hecho que limita el acceso de agua segura a los habitantes de la isla y que cobra relevancia por el incremento turístico en una situación de cambio climático global y de coyuntura nacional del proyecto Gran Canal Interoceánico de Nicaragua cuyo eje está proyectado al noroeste del archipiélago.

Por la problemática antes planteada, el objetivo de esta investigación es determinar la disponibilidad hídrica subterránea y prospección geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón.

Para lograr el objetivo, se diseñó la metodología en etapas definidas: revisión de documentación existente; recolección de información en campo y análisis, procesamiento e integración de resultados.

Durante las giras de campo se hizo reconocimiento geológico, monitoreo de objetos hidrogeológicos, midiéndose caudal en manantiales y Nivel Estático (NEA) en los pozos de la isla. De igual forma se efectuaron cinco tomografías eléctricas (TE) para determinar la distribución de estratos, monitoreo de precipitación mediante cinco pluviómetros portátiles estratégicamente instalados en El Refugio, El Colectivo, Los Ortega, Los Ugarte y La Hacienda y se desarrollaron pruebas de infiltración mediante método doble anillo y Porchet.

De acuerdo a los resultados, la hidrogeología del sitio presentó un acuífero somero y fracturado, recargado por precipitación propiciando una permabilidad secundaria.

En cuanto a la disponibilidad hídrica subterránea se determinaron tres escenarios climáticos: época de extrema sequía durante fenómeno El Niño con una disponibilidad de 33.24 MMCA (Período 2013-2014), escenario basado en datos históricos en un período de 10 años (1992-2012) con una disponibilidad de 74 MMCA y proyección de cambio climático sobre las variables meteorológicas con una disponibilidad de 15 MMCA resultando crítico con respecto a la demanda de la población de 27.68 MMCA .

Durante fenómeno El Niño, la disponibilidad abastece la demanda de la población, sin embargo con los efectos del cambio climático el balance se presenta negativo para el año 2050.

De la prospección geofísica se determinó que el flujo de agua subterránea se canaliza a través del medio geológico (basalto) fracturado de buen espesor y con flujo de agua significativo para su explotación planificada. Se propusieron cinco sitios favorables para la perforación de pozos (uno en cada TE) para el abastecimiento de agua a la población.

De acuerdo a los resultados, se establecieron estrategias de acción para el aprovechamiento del acuífero, proponiéndose la restauración de los pozos abandonados, el involucramiento de todos los sectores comunitarios e institucionales y la continuidad en el monitoreo de precipitación útil para futuras investigaciones en el tema.

Este estudio fue posible con el apoyo del CIRA/UNAN Managua, Programa de Maestría Red Cara, IGG-CIGEO/UNAN-Managua, Huelva Solentiname y Asociación para el Desarrollo de Solentiname.

La presente investigación es una base fundamental para estructurar un plan de manejo del acuífero de la isla y explotación sostenible para preservarlo y mejorar calidad de vida.

Palabras claves: Hidrogeología, Disponibilidad, Geofísica, Consumo, Estrategias.

I. INTRODUCCIÓN

En Nicaragua, los recursos hídricos han sido deteriorados principalmente por factores antropogénicos asociados al crecimiento urbano, ocasionando mayor presión sobre las fuentes de agua y generando aguas residuales con poco tratamiento. De igual forma se une a la problemática las inadecuadas prácticas en las actividades industriales y agropecuarias, uso de agroquímicos, entre otros, que contaminan a los cuerpos de agua.

Esto ha contribuido a una reducción de la calidad de las fuentes de agua y su disponibilidad, de tal manera que en ciertas regiones del país existen altos niveles de contaminación, lo que se traduce en efecto negativo en la salud de la población, aumentado los niveles de pobreza en la región.

El agua subterránea es una de las principales fuentes para consumo humano en el país, por ello se desarrollan investigaciones que promuevan una adecuada gestión de los recursos hídricos contribuyendo a mejorar el acceso de agua para la población. Sin embargo, una de las áreas poco estudiadas en el país para aprovechamiento del agua subterránea, es el Archipiélago de Solentiname ubicado en la parte sureste del Lago Cocibolca y clasificada como área protegida por su importancia ecológica y riqueza en biodiversidad bajo la resolución No. 6699 del Marena en el año 1990, Siendo característica la presencia de humedales palustrinos de valor ecológico y una zona de ruta migratoria de especies a nivel local y regional.

El Archipiélago está compuesto por 36 islas e islotes, de las cuales destacan cuatro: Mancarroncito, Mancarrón, La Venada y San Fernando, al ser estas las de mayor área y con mayor densidad poblacional con poco acceso a agua segura, salud, infraestructura, entre otros.

En cuanto al ingreso económico, la población vive de la pesca artesanal, agricultura de subsistencia, venta de artesanías y turismo ecológico. La principal fuente de abastecimiento de agua en el Archipiélago son: Lago Cocibolca, pozos (excavado y

uno perforado en la Isla San Fernando) y manantiales. Sin embargo el mayor uso del agua proviene del Lago Cocibolca.

Los estudios existentes en la zona se han enfocado en el manejo de los recursos naturales y biodiversidad de manera general. En cuanto al recurso hídrico, los estudios realizados evalúan solamente la calidad del agua en las zonas costeras de las islas y en algunos manantiales, sin embargo, no se han identificado de manera detallada las características hidrogeológicas de las islas del archipiélago, habiendo una ausencia de estudios sobre la disponibilidad del agua subterránea y su aprovechamiento.

Por tanto, es necesario conocer la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo y las características de las formaciones acuíferas, principalmente en la Isla Mancarrón, que es la de mayor territorio y densidad poblacional, con mayor afluencia de turismo que se hospeda durante todo el año en los eco-hotels disponibles y a la base militar establecida en ella. La información generada en esta investigación contribuirá a formular acciones para el aprovechamiento del recurso hídrico y por ende del mejoramiento de la calidad de vida de la población al tener a su disposición propuestas para el aprovechamiento sostenible del acuífero.

Es así que se realizó el presente estudio sobre el agua subterránea, su disponibilidad y propuestas de uso sostenible, el cual se efectuó durante el periodo comprendido del 2013 a del 2014, bajo las condiciones meteorológicas del fenómeno de El Niño, que permitió estimar la disponibilidad hídrica del acuífero en un periodo crítico de sequía.

En este trabajo, la integración y análisis de la información recopilada servirá de apoyo para las instituciones gubernamentales como ENACAL, la Alcaldía del municipio de San Carlos y los Comités de Agua Potable y Saneamiento (CAPS) , en la planificación del uso sostenible del recurso hídrico, en la planificación de planes de acción y mitigación contra el cambio climático y como una base científica para el desarrollo de proyectos con las organizaciones no gubernamentales, en desarrollo de la calidad de vida de la población de la Isla Mancarrón y que pueda ser reproducido en las otras islas del Archipiélago.

1.1 Área de Estudio

El Archipiélago de Solentiname, cuyo nombre significa “***lugar de muchos huéspedes***”, se encuentra ubicado en el extremo sureste del Lago Cocibolca, a unos 20 kilómetros al oeste de la ciudad de San Carlos; (Mapa 1). Pertenece a la cuenca número 69, la cuenca del Río San Juan que es la mayor de todo el país, y por lo tanto, es una de las más relevantes por su importancia hídrica al contener en ella al río San Juan, y a los lagos Xolotlán y Cocibolca; siendo este último, el lago de agua dulce más grande de Centroamérica (ENACAL,2006).

Esta zona del país ha cobrado gran importancia a nivel nacional e internacional desde el 2013, debido a la futura construcción del Gran Canal Interoceánico, el cual podría afectar el archipiélago; de ahí que tener un mayor conocimiento hidrogeológico de las principales islas, es de vital importancia como fuente alterna de abastecimiento para la población, en donde un 23.5% de la población (1055 habitantes) del archipiélago se abastece mediante pozos excavados y un 76.5% restante se abastece del Lago Cocibolca (MARENA, 2010).

El Archipiélago de Solentiname fue declarado área protegida bajo la categoría de Monumento Nacional en el Decreto No. 527 y por resolución No. 6699 del MARENA en el año 1990; considerado como un sitio de alto potencial turístico del departamento Río San Juan. El clima se clasifica como Zona Húmeda Tropical (Köppen, 1936); reportándose una temperatura media anual de 26 °C y una precipitación media anual de 1400-1800 mm/año en condiciones normales, considerado como una zona de amortiguamiento de alto valor ecológico fluvio-lacustre.

Dentro del archipiélago, la Isla Mancarrón es la de mayor extensión, con un área de 22 km² y una población de 346 habitantes (ACRA 2007). La principal actividad económica en la isla es la artesanía de madera de Balsa, seguida por la agricultura (maíz, frijol y frutales) y el turismo nacional e internacional (MARENA, 2010). La isla se ubica dentro de la provincia geomorfológica del Graben Nicaragüense, mismo,

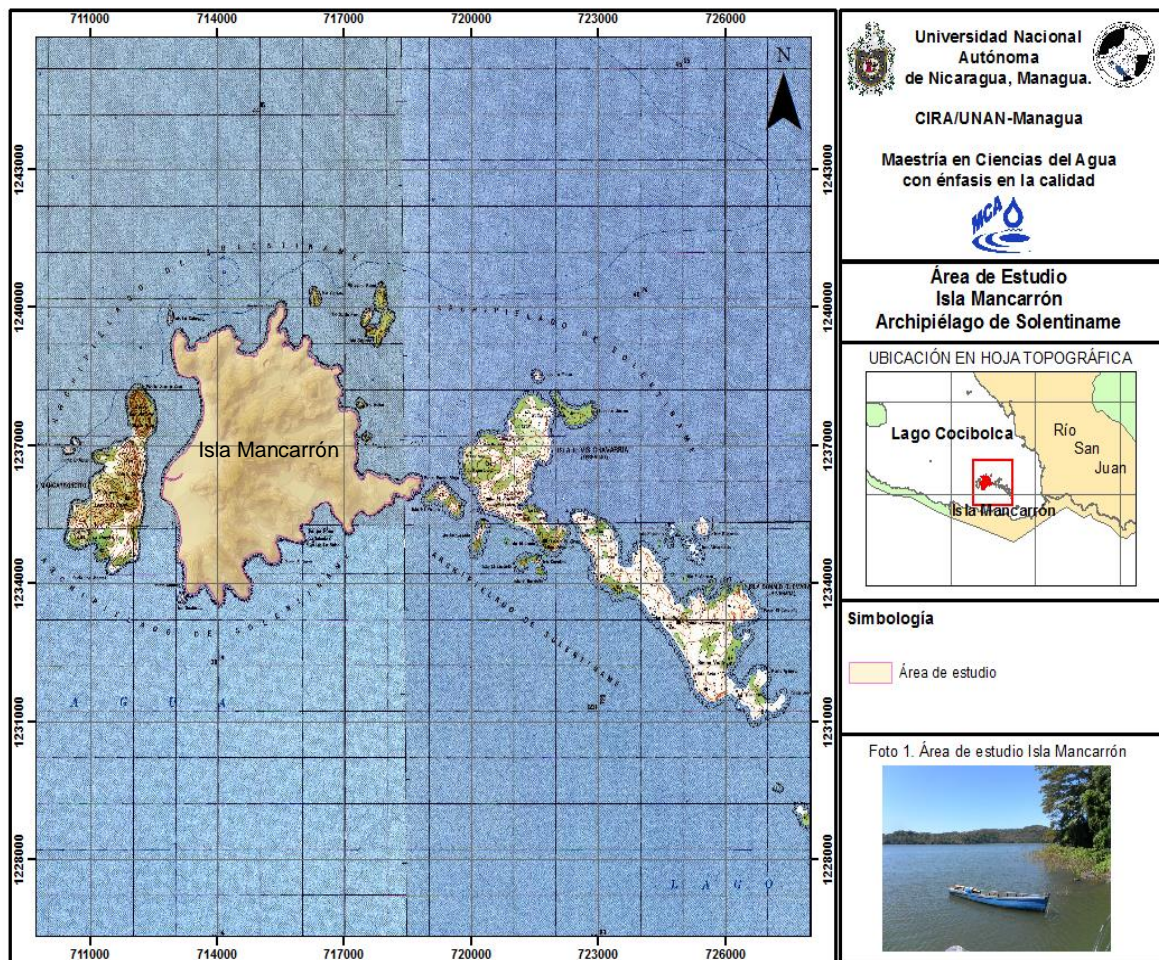
que es definido por fallas bien alineadas de rumbo NO–SE, en la cual se ubica la falla de Heiss que tiene una influencia tectónica sobre la misma.

De acuerdo con CREDES (1995), la base hidrológica del Archipiélago y por ende de la Isla Mancarrón, es el Lago de Nicaragua; el cual rodea a todas las islas y constituye la principal vía de comunicación. Dentro de la Isla Mancarrón, se ubican quebradas formadas a partir de pendientes fuertes entre 30% y 50%; la mayoría se secan durante el verano, pero en el invierno contienen agua producto de la precipitación.

La Isla Mancarrón se caracteriza por la presencia de un humedal palustrino en la zona oeste en buen estado de conservación y zona importante para poblaciones migratorias (MARENA,2019).

Dentro de las instituciones que apoyan el manejo integral de los recursos naturales en la Isla Mancarrón, se encuentra La Alcaldía Municipal, la Delegación del MARENA de la ciudad de San Carlos y organizaciones no gubernamentales como la Asociación para el Desarrollo de Solentiname (APDS) , ACRA, Huelva Solentiname y Fundación del Río.

Actualmente se está conformando el Comité de Agua Potable y Saneamiento (CAPS) con habitantes de la isla, con el fin de dar un mejor manejo al recurso agua.



Mapa 1. Localización del área de estudio, Archipiélago de Solentiname, Isla Mancarrón.

1.2 Antecedentes

Son pocos los estudios realizados en el Archipiélago de Solentiname o en alguna de sus islas en específico. La mayoría de ellos están enfocados a protección de la biodiversidad y son pocos los que han generado información específica de la caracterización hidrogeológica y de la disponibilidad hídrica de las islas.

En el año 1995, el Instituto de Crecimiento y Desarrollo Sostenible (Credes) en conjunto con MARENA, la Fundación del Río (FDR) y la Asociación para el Desarrollo de Solentiname (APDS) elaboró un análisis de la conservación y desarrollo de Solentiname; estudio en el que se elaboró una valoración hidrológica

de las islas, en el cual refiere que la profundidad promedio del agua es 3.6 m en las islas siendo su base hidrológica el Lago Cocibolca.

En 1997, el MARENA en conjunto con la Organización de Estados Americanos (OEA), el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y El Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE) elaboró un estudio diagnóstico de la cuenca del Río San Juan de Nicaragua y los lineamientos del plan de acción. Dentro de los resultados del estudio se incluyen los datos meteorológicos de la Estación San Carlos, así como cálculos de evapotranspiración de los cultivos que se siembran en la cuenca, incluyendo al archipiélago.

En 1998, el Instituto Nicaragüense de estudios Territoriales (INETER) en conjunto con la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), elaboró un estudio hidrogeológico e hidroquímico de ésta área a escala regional. En dicho estudio se delimitan sistemas y subsistemas de acuíferos en la subprovincia del Graben Nicaragüense, en donde localizan el subsistema de Islas en el Lago de Nicaragua, donde se localiza el Archipiélago de Solentiname, mencionando lo siguiente: “en el subsistema de Islas en el Lago de Nicaragua, el flujo subterráneo es continuo y regional con dirección desde las partes centrales de la isla hacia zonas de descarga, representadas ante todo por las orillas del lago, donde una parte es descargada por manantiales. El nivel del agua subterránea se acerca a la cota en superficie de las áreas costeras, bajo estas condiciones, la extracción de agua subterránea intensiva puede resultar en una recarga inducida de aguas desde el lago (INETER, 1998)”.

El Archipiélago de Solentiname forma parte de la Reserva de la Biosfera del Río San Juan y se encuentra dentro de la denominada zona de amortiguamiento fluvio-lacustre del Refugio de Vida Silvestre Los Guatuzos; donde ambos constituyen sitios con áreas en donde el agua es el componente determinante en la formación de vida animal y vegetal. Estos incluyen manglares, pantanos y tierras inundadas por corrientes de ríos en la época de lluvia (MARENA, 2004).

Con el fin de determinar sitios probables para la perforación de pozos en las Islas San Fernando y Mancarrón, la Asociación Catalana de Recursos de Asistencia (ACRA) realizó en el 2007 un estudio preliminar, el cual se desarrolló únicamente para la Isla San Fernando. Este estudio caracterizó geológica e hidrogeológicamente a la isla, proveyendo información sobre el tipo de basamento, conformado por rocas basálticas del periodo Terciario Pleistoceno, pertenecientes al Grupo Coyol Inferior; y del Cuaternario aluvial residual. Se presentan diferentes tipos de fallas y fracturas menores, que cortan el relieve de la isla en dirección Noroeste a Sureste.

De igual manera, ACRA (2007) elaboró una caracterización socioeconómica del Archipiélago de Solentiname, describiendo las actividades económicas de la población, como el cultivo de granos básicos, artesanías a base de balsa y turismo. Dentro de los servicios básicos, detallan que el 39% de la población consume agua directamente del lago sin tratamiento previo alguno y que un 41% consume agua del lago previamente tratada con filtros caseros.

Como parte de los estudios realizados en las islas del Archipiélago de Solentiname, el CIRA/UNAN-Managua, durante el 2008 hizo una caracterización hidrogeológica y de calidad de agua en el archipiélago; los resultados describen que las islas están caracterizadas por rocas volcánicas básicas e intermedias del grupo Coyol Superior. El estudio determinó que este tipo de rocas contribuye al tipo de relieve de la zona, siendo de pendiente suave y colinas en forma de mesas y el drenaje es de tipo dendrítico secundario. Sin embargo, no se definieron las propiedades del acuífero y sus unidades hidrogeológicas. En relación a la calidad química del agua superficial y subterránea, durante el muestreo realizado el 8 de mayo 2008, el estudio reveló que al agua debe recibir tratamiento debido a la presencia de contaminación fecal detectado en el manantial La Bolsa localizado en la Isla Mancarrón. Cabe destacar la presencia de concentraciones de carbamatos por encima de la norma para consumo humano, en muestras obtenidas de aguas del lago alrededor del Archipiélago de Solentiname, por lo que las aguas no se consideran aptas para consumo humano. En la Tabla 1 se reportan algunos de los resultados reportados

en cuanto a la calidad química de las aguas colectadas en aguas superficiales y subterráneas en la Isla Mancarrón (CIRA/UNAN-Managua, 2008).

Tabla 1. Resultados del muestreo efectuado en Isla Mancarrón (CIRA/UNAN-Managua, 2008).

Parámetros	Sitios de Muestreo en Isla Mancarrón			
	M1 Refugio Norte	M2 Refugio Sur	M3 La Salvadora	Manantial La Bolsa
Coordenadas (Norte/Oeste)	1236142/718104	1235698/718104	1234899/716146	1236356/713957
Tipo Hidroquímico	HCO ₃ -Na-Mg	HCO ₃ -Ca-Na	HCO ₃ -Na-Ca	HCO ₃ -Ca-Mg
CE (µS/cm)	212	209	219	491
Dureza total (mg/L)	58.80	60.75	58.80	190.12
Hierro total (mg/L)	0.56	0.30	0.34	0.06
Sílice (mg/L)	10.14	11.47	11.36	103.34
STD (mg/L)	113.62	145.68	120.56	352.31
Color (mg/L Pt-Co)	5	5	5	20
Nitratos (mg/L)	<ld	<ld	<ld	<ld
Nitritos (mg/L)	0.003	0.003	0.003	0.01
Amonio (mg/L)	0.03	0.124	0.064	0.139
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	230	300	50	230
Coliformes Termotolreanes (NMP/100 mL)	230	50	50	80
<i>E. Coli</i> (NMP/100 ml)	13	30	50	20
OGCL	Nd	14.24	nd	
Clasificación para riego	C1-S1	C1-S1	C1-S1	C2-S1

*Nota: muestreo realizado el 8 de Mayo 2008

Dentro de los estudios que promueve la protección y manejo de los recursos naturales se encuentra el plan de manejo de Solentiname (2010); sin embargo, el

manejo hacia el recurso agua es limitado por el poco conocimiento que se tiene sobre el agua subterránea de las islas.

1.3 Planteamiento del problema

La Isla Mancarrón es una zona poco estudiada, donde los habitantes no tienen un adecuado acceso al agua para el consumo. Actualmente utilizan como fuente de abastecimiento de agua, en la mayoría de los casos sin darle tratamiento alguno, las aguas del Lago Cocibolca y de algunos pozos excavados sin protección, cuyas aguas en su generalidad son producto de mezcla de agua subterránea y agua superficial (del lago), debido a que se encuentran ubicados principalmente cerca de la orilla del Lago Cocibolca, en los sistemas de fallas y fracturas sobre los que están construidos; propiciando la entrada de agua del lago en ellos. (CIRA/UNAN-Managua, 2008).

Cabe mencionar que el lago donde los habitantes consumen agua para sus actividades está siendo afectado directa e indirectamente por las actividades antropogénicas de los municipios que están a su alrededor, como las descargas de aguas residuales sin tratamiento, el cambio del uso de suelo, agricultura, pesca artesanal, hidrocarburos y aceites provenientes de los motores de las lanchas, inadecuada disposición de desechos sólidos; así como el aumento de sedimentos que se depositan anualmente en el lago siendo aproximadamente 18 toneladas (Banco Mundial, 2013).

Por otro lado, aparte del contexto particular del archipiélago, en el ámbito nacional actual se proyecta la construcción de un canal interoceánico cuya ruta atraviesa el Lago Cocibolca, entre Isla de Ometepe y Archipiélago de Solentiname, lo cual podría representar un riesgo para el deterioro del recurso y por ende afectar a la población que hace uso de este cuerpo de agua, en específico para consumo humano: donde se abastece el Archipiélago de Solentiname (CIRA/UNAN-Managua, 2008), Chontales y las comunidades ribereñas del Río San Juan del Sur (CIRA/UNAN-Managua, 2007).

De acuerdo a un estudio realizado por el CIRA/UNAN-Managua, en el 2008 sobre calidad en las fuentes de agua, reveló que en varios puntos de la isla existía presencia de coliformes fecales y en las muestras obtenidas del Lago hay presencia de carbamatos, lo cual podría afectar la salud de la población. Asimismo, se desconoce la demanda de la población sobre el recurso agua, en tanto no existe un ordenamiento adecuado de pozos.

Como parte de la falta de manejo de los recursos hídricos, los manantiales de la isla, de los que no se hace uso para consumo humano se encuentran sin protección, lo que ha promovido contaminación microbiológica por *E. Coli* (CIRA/UNAN Managua, 2008). Lo antes mencionado, ha colocado a las islas e islotes del archipiélago en condiciones de inseguridad en relación al acceso al agua.

Por falta de estudios sobre los acuíferos y las propiedades hidrogeológicas de la isla, se ha limitado la toma de decisión para uso del agua subterránea como fuente alternativa de abastecimiento aunque hay pozos excavados, en la actualidad, la mayoría de ellos se encuentra en abandono, debido a falta de apoyo de instituciones para su mantenimiento y ordenamiento.

Aunque en la Isla San Fernando se encuentra un pozo perforado, hay desconocimiento a detalle sobre las propiedades geométricas, tanto en esta isla como en las otras del archipiélago, lo que conlleva a que se realice una explotación del acuífero sin tener total conocimiento de la disponibilidad y sostenibilidad de este; promoviendo la construcción de pozos excavados, por parte de los comunitarios para satisfacer sus necesidades, sin contar con un plan de desarrollo.

1.4 Justificación

La Asamblea General de las Naciones Unidas en el año 2010, estableció a través de la la resolución 64/292 el derecho al agua segura y saneamiento, reafirmando como un derecho esencial para todos los seres humanos, exhortando a los organismos internacionales a la promoción de recursos financieros, capacitación, transferencia de tecnología e investigación a los países en vías de desarrollo para suministrar agua para consumo humano accesible para todos.

Bajo este contexto, se promueve la investigación en la Isla Mancarrón del Archipiélago de Solentiname con el propósito de generar información hidrogeológica del subsuelo tal que contribuya a la estimación de la disponibilidad de agua subterránea como una base técnica para el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico y un manejo integral por parte de las poblaciones.

Al ser un área protegida bajo la categoría de Monumento Nacional, debe ser prioridad la investigación sobre los recursos naturales en especial el recurso hídrico que al ser aprovechado de manera adecuada fomenta una mejor calidad de vida de los pobladores y promueve la protección de la biodiversidad de la isla, siendo una zona de amortiguamiento y zona migratoria de aves.

Bajo el contexto local, Huelva Solentiname desarrolla el proyecto "Abastecimiento de Agua Potable, Solentiname" en el cual han fomentado la cosecha de agua proveniente de la precipitación, sin embargo no tienen los recursos suficientes para conocer las propiedades del acuífero como otra posible fuente de abastecimiento.

Los principales beneficiarios del estudio son los pobladores de la Isla Mancarrón, representados por el Comité de Agua Potable y Saneamiento, el cual se está conformando por comunitarios de la zona, quienes podrán utilizar este estudio para la formulación de proyectos, protección de las zonas de recarga, sitios posibles para pozos comunitarios siendo una alternativa el uso de agua subterránea de la isla para consumo propio.

De igual forma, la base técnica promoverá estrategias de acción para aprovechamiento sostenible del acuífero con el apoyo de las organizaciones con presencia directa en la isla, tales como Fundación del Río, ACRA, Huelva Solentiname y Asociación Para el Desarrollo de Solentiname (APDS), quienes fomentan el manejo integral de los recursos hídricos y están en la constante búsqueda de apoyo para este tipo de investigaciones.

Cabe destacar que el período de investigación es 2013 - 2014 que coincidió con el fenómeno El Niño, considerado de extrema sequía. Esto permite conocer las

condiciones del acuífero en condiciones muy vulnerables obteniendo una disponibilidad hídrica en época crítica para los pobladores.

A falta de pozos perforados se realizó la investigación con auxilio de herramientas hidrogeológicas, geofísicas y geológicas, integrando una estrategia de acciones que promuevan el uso sostenible del acuífero.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar la disponibilidad hídrica subterránea y prospección geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón del Archipiélago de Solentiname.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar caracterización hidrogeológica y determinar la disponibilidad subterránea de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.
- Aplicar prospección geofísica, a través de tomografías eléctricas para determinar la distribución de estratos, así como las discontinuidades de las formaciones geológicas, la descripción del acuífero y selección de sitios de perforación.
- Proponer estrategias para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Condiciones climáticas

El clima en el área de estudio corresponde a la zona climática del Pacífico clasificada como Zona Húmeda Tropical (Köppen, 1936). En el Lago Cocibolca se presenta dos períodos climáticos: época seca que comprende el período noviembre–abril, y una época lluviosa en el período mayo-octubre.

La dirección de los vientos en la cuenca del Río San Juan son prácticamente constantes. Datos medidos a 10m sobre la superficie de la tierra indicaron que las direcciones Este y Noreste de los mismos prevalecen constantes durante la mayor parte del año. Los vientos son mayores en el periodo enero-abril, reportándose velocidades entre 3.1 y 3.4 m/s; y manteniéndose durante los siguientes meses entre 1.8 y 2.7 m/s (MARENA, 2010).

La temperatura media en el período de 1962-2012, registrada en la estación San Carlos, fue de 25.7 °C y la humedad relativa media de 86%.

2.1.1 Precipitación

En cuanto a la precipitación en el archipiélago, se obtuvieron datos históricos del periodo de 1962-2012 de la estación San Carlos y de la estación San Miguelito, ubicada en el municipio de Río San Juan a 29 kilómetros de la Isla Mancarrón, para el período comprendido entre 1965-2007, (Gráfico 1).

Con respecto a los datos de la Estación San Carlos, el periodo de menor precipitación comprende de enero a abril coincidiendo con la época seca, obteniendo precipitaciones menores a 60 mm. Los meses de mayor pluviosidad oscilan entre junio y octubre, con la mayor precipitación en el mes de julio (285.8 mm).

El comportamiento de la precipitación en la Estación San Miguelito coincide con los reflejados en la Estación San Carlos; aunque se observan menores volúmenes de precipitación, atribuido a menores variables registradas en dicha estación. El

período de la canícula se presenta durante los meses de julio y agosto donde la precipitación se disminuye en la zona.

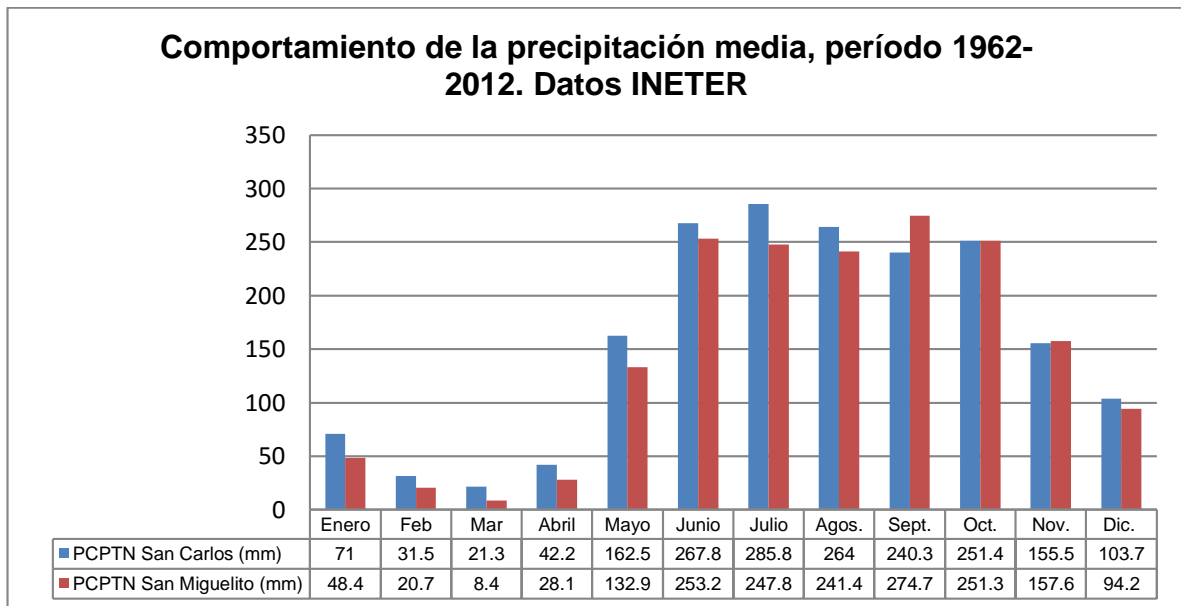


Gráfico 1. Precipitación media periodo 1962 - 2012. Datos obtenidos de INETER (elaboración propia).

2.1.2 Evaporación y Evapotranspiración

Los datos de evaporación para el período 1997-2012 por la Estación San Carlos tiene una media anual de 80 mm durante todo el año, siendo los meses de marzo y abril con la mayor evaporación (166.2 y 173.1.1 y 132.1 mm respectivamente) coincidiendo con la época seca de la zona (Gráfico 2).

Con respecto a los cultivos típicos presentes en la subcuenca del Río San Juan, la evapotranspiración (ETP) promedio anual para el arroz es de 201.83 mm, frijol 126.14 mm y maíz 134.55 mm.

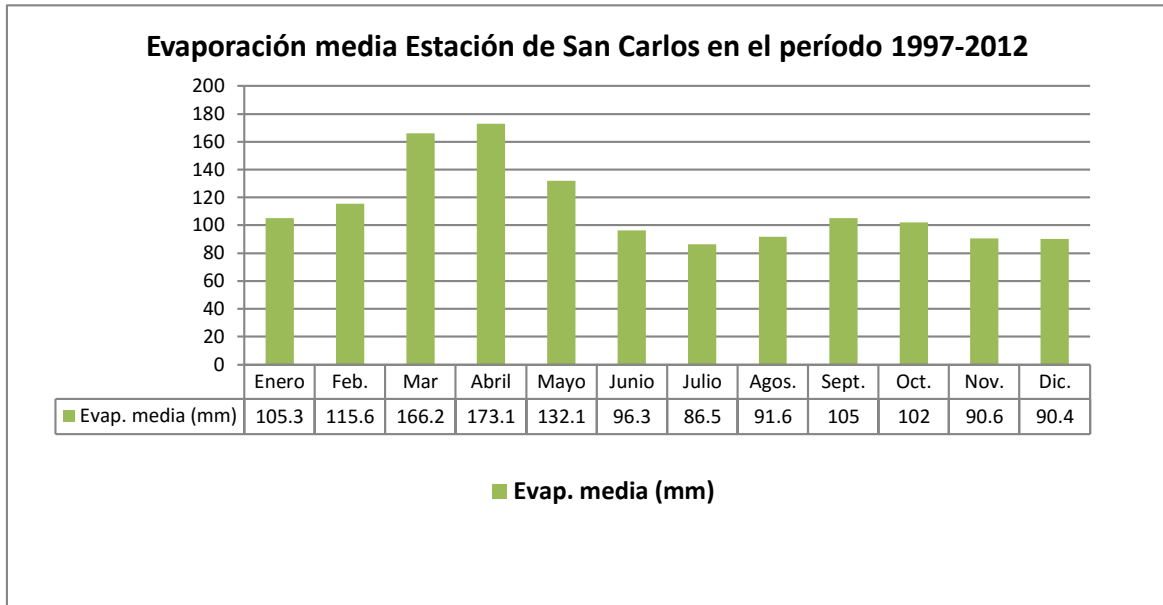


Gráfico 2. Evaporación media periodo 1997-2012. Datos obtenidos de INETER, Estación San Carlos (elaboración propia).

2.2 Geología y geomorfología

Nicaragua se encuentra dividida en 5 provincias geológicas (Fenzel N, 1989), clasificadas como: Provincia Geológica de la Costa del Pacífico, Depresión o Graben de Nicaragua, Provincia Geológica del área Central, Provincia Geológica del Norte y Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica.

De acuerdo a Krásný & Hetch (1998), Solentiname y el Lago Cocibolca se encuentran ubicados dentro de la cuya parte central presenta la apariencia de un graben definido por fallas bien alineadas de rumbo NO – SE. .

El Graben se formo a partir de la falla que provocó un hundimiento de las regiones comprendidas entre las fracturas y acompañado por actividades volcánicas (Fenzel N, 1989). De acuercon a Weyl (1980) la formación ocurrió durante el pleistoceno, sin embargo otros autores como Mc. Birney (1966) ubican el desarrollo del Graben en el mioceno.

Esta zona se encuentra entre las márgenes de la planicie costera del Pacífico y las tierras volcánicas de la área Central, por lo que su cuenca presenta variaciones y características provenientes del grupo Coyol de la Provincia de área Central. .

Al oeste y norte se desarrollan rocas sedimentarias y volcánicas del cuaternario, mientras que al este afloran las rocas del volcánico terciario, donde se ubica el Archipiélago de Solentiname, que forma parte de las formaciones volcánicas terciarias que formaron las rocas del Este del Lago (CIRA/UNAN-Managua, 2008).

Desde el punto de vista tectónico, el principal sistema de falla que atraviesa el Archipiélago es la el Sistema de Hess, aproximadamente con dirección O-E.

Los procesos de enfriamiento y los formadores del graben, tuvieron como consecuencia el fracturamiento y fallamiento de las rocas que forman el Archipiélago de Solentiname; es posible distinguir estructuras paralelas y perpendiculares al alineamiento de la depresión de Nicaragua.

En el margen oeste y norte se desarrollan rocas sedimentarias y volcánicas del cuaternario, mientras que al este afloran las rocas volcánicas terciarias provenientes de la actividad geológica de la Provincia del área Central, donde se encuentra la formación del Grupo Coyal.

La formación del Grupo Coyal tiene una espesura de 200 hasta 2300 m, compuesto por lavas basálticas, andesíticas, dacítas, aglomerados, ignimbritas y tobas intermedias y ácidas con zonas fracturadas de rumbo N – NO. El grupo se divide en Coyal Superior y Coyal Inferior separados por una discontinuidad angular.

El Grupo Coyal Inferior característico de aglomerados, lavas andesíticas, basálticas, ignimbritas de composición dacíta y andesítica (Fenzel N, 1989).

El Archipiélago de Solentiname forma parte de las formaciones volcánicas terciarias que formaron las rocas del Este del Lago. En la Isla Mancarrón se encontraron fracturas mayores de tensión en dirección NE-SO, (Noreste – Suroeste) presentando un relieve de bloques alineados, cortados y fracturas perpendiculares formando estructuras cúbicas (CIRA/UNAN-Managua, 2008).

Durante el estudio hidrogeológico elaborado por el CIRA/UNAN–Managua (2008), se identificaron tres unidades litológicas (Mapa 2), descritas a continuación:

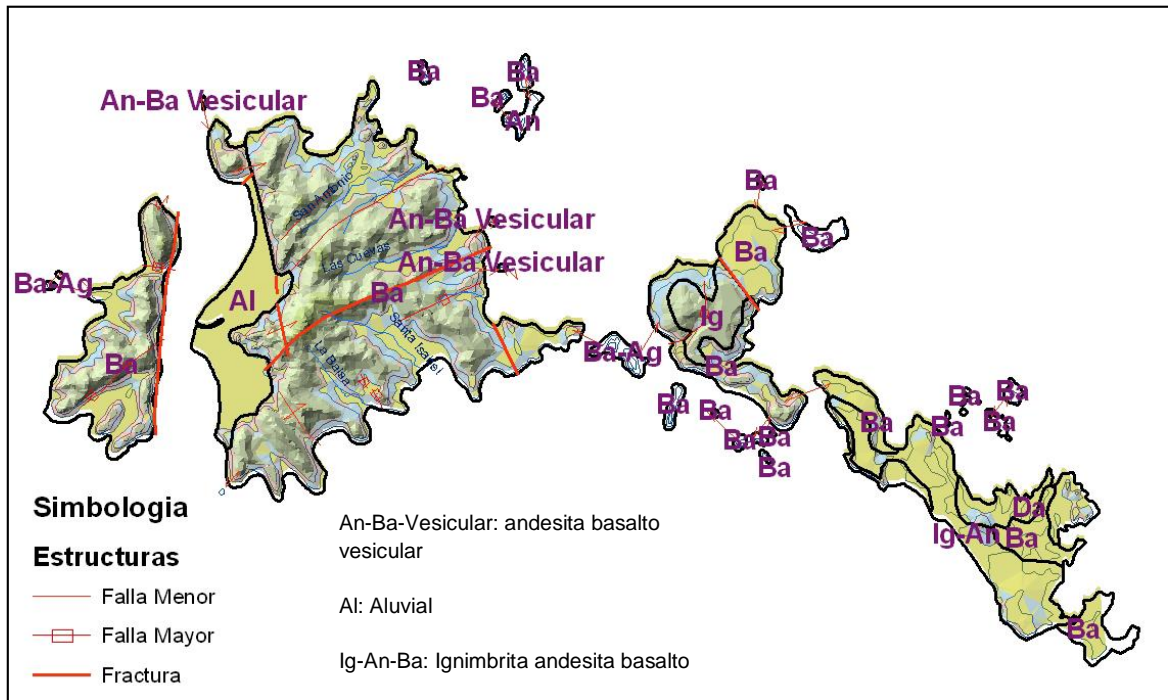
- Basaltos: espesores de 200 m, formados por rocas basalto-andesítica; predominan las plagioclasas alteradas, biotita y en menor cantidad cuarzo.
- Aglomerados: presentes en la Isla Mancarrón, forma un relieve de colinas onduladas y pendiente suaves con un espesor de 80 m, de origen volcánico.
- Sedimentos aluviales y lacustres: desarrollados al oeste de la Isla Mancarrón, representados por depósitos no consolidados.

2.2.1 Geomorfología

Desde el punto geomorfológico, Nicaragua a nivel regional se divide en 5 regiones: Planicie Costera del Pacífico, Cordillera Volcánica del Pacífico, Depresión Nicaragüense, Región Montañosa del Interior y Planicie Costera del Atlántico (Fenzel N, 1989).

Se caracteriza por formas de relieve planas o casi planas de 30 a 45 km de ancho, las zonas topográficas de menor altura se encuentran en el área del Golfo de Fonseca, en el Lago de Managua y en el Lago de Nicaragua.

El área de Solentiname se incluye en la unidad geomorfológica, de cuevas y mesas formadas por lavas y horizontes de ignimbrita. El relieve del archipiélago es bajo, las mayores elevaciones alcanzan apenas 250 m en la Isla Mancarrón, disminuyendo hacia el Este y Oeste, de forma abrupta al Oeste y más suave hacia el Este. En el flanco Oeste se desarrolla una planicie a nivel del lago rellena por sedimentos aluviales y lacustres. El relieve describe pendientes muy marcadas en Mancarrón y Mancarroncito con pendientes de hasta 90% localmente, predomina el rango 30-90 (CIRA/UNAN-Managua, 2008).



Mapa 2. Características geológicas- estructurales del archipiélago de Solentiname (CIRA/UNAN-Managua, 2008).

La Isla Mancarrón, en su parte intermedia presenta suelos de relieve ligeramente ondulado a escarpado, con pendientes que van desde 4 hasta 50°; son moderadamente profundos a superficiales, con textura franco arcillosa en la superficie y arcillosa en el subsuelo, color pardo a pardo oscuro en la superficie y amarillo rojizo en el subsuelo, ligeramente pedregosos a muy pedregosos y con una erosión moderada a fuerte. (MARENA, 2010).

2.3 Propiedades hidrogeológicas e hidráulicas

El ambiente hidrológico del Archipiélago de Solentiname es el Lago Cocibolca, que constituye la principal vía de comunicación. Las aguas cercanas al Archipiélago tienen una profundidad de 1.8-2.7 m. por el SE (Zapote, Zapotillo y Punta del Diablo) y de 5.4 m al NO de las Islas Mancarrón y Mancarroncito. El material encontrado en el fondo del Lago (entre las islas), está compuesto en su mayoría por rocas; alejándose un poco de las costas, las rocas son sustituidas por material arcilloso (Credes, 1995).

Todas las corrientes superficiales se forman entre el 30 y 50° de pendiente; y se encuentran dentro de la clasificación de corrientes efímeras e intermitentes, en donde la mayoría se secan durante el verano, y contienen muy poca agua durante el invierno (Credes 1995). En la isla Mancarrón las corrientes intermitentes que existen en el Archipiélago, son las quebradas: San Antonio, La Cueva, Santa Isabel y La Balsa; la longitud de cada una de ellas está entre 1000 y 2000 m (MARENA, 2010).

En el extremo oeste de la Isla Mancarrón, hay un valle aluvial, que debido a su poca elevación con respecto al nivel del mar, es un área de inundaciones durante los periodos de lluvia, en donde los niveles del Lago Cocibolca alcanzan hasta los cuatro metros de altura en la costa, referente al nivel que se alcanza en el periodo de verano (Salgado, 2007).

Dentro de las propiedades hidrogeológicas que se consideran en el presente estudio, están: nivel piezométrico, gradiente hidráulico, velocidad media del flujo de agua, conductividad hidráulica, transmisividad.

➤ Nivel piezométrico.

La piezometría se ha definido como la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar. Es la profundidad a la que se encuentra el nivel del agua en un pozo o manantial.

Para obtener la piezometría de un sitio se mide el nivel estático o dinámico del agua en pozos, piezómetros, zanjas y manantiales; la topografía del lugar y las elevaciones con respecto al nivel del mar; en dependencia del objetivo a desarrollar. En el caso de la presente tesis permitirá definir la dirección del flujo de agua como una herramienta para el aprovechamiento del recurso hídrico. Las mediciones se realizan con una sonda de nivel, que se basa en la observación de la profundidad del agua mediante el cierre de un circuito eléctrico cuando un elemento detector establece contacto con el agua.

La piezometría de un acuífero permite conocer la dirección de flujo del agua subterránea, la longitud y magnitud de los gradientes hidráulicos y conocer los efectos en el flujo por extracción de agua.

➤ Gradiente hidráulico (i).

El agua subterránea se mueve en la dirección en que decrece el potencial hidráulico total, de manera que si se mantienen constantes todos los demás factores, la cuantía del movimiento de aquella en el seno de la zona saturada depende del gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico (i) se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua. En la Ecuación 1, se presenta la fórmula para el cálculo del gradiente.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

i : Gradiente hidráulico (adimensional).

Δh : Diferencia de potencial entre dos puntos del acuífero en m (h_1-h_2).

L : Distancia en la dirección del flujo entre estos dos puntos.

➤ Velocidad media del flujo de agua (V).

En la zona saturada del subsuelo el flujo de agua subterránea se dirige desde los niveles más altos hacia los más bajos, es decir desde las zonas con mayor potencial hidráulico total hacia las de menor potencial.

$$V = K * i \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

V : Velocidad media del flujo subterráneo (m/d)

K : Conductividad hidráulica (m/d)

i : gradiente hidráulico (adimensional)

➤ Transmisividad (T).

Se define como el caudal que circula en un acuífero por unidad de longitud bajo un gradiente de unidad. En un acuífero homogéneo es igual al producto de conductividad hidráulica y el espesor de la zona saturada (FCIHS, 2009). La transmisividad se clasifica por niveles; desde muy baja a muy alta, según los valores (Tabla 2). Lo anterior determina la productividad de un acuífero para transmitir agua a través de todo el espesor saturado. La transmisividad depende de la permeabilidad y del espesor del acuífero.

Los acuíferos de transmisividad entre 500 y 1000 m²/d son altamente productivos considerándose como aguas subterráneas con alta capacidad de volumen para un fin. En cambio los acuíferos con transmisividades entre 10-100 m²/d o menor presentan una capacidad de baja a muy baja, no siendo capaces de transmitir caudales considerables.

Tabla 2. Clasificación de Transmisividad

T (m ² /d)	Clasificación estimada
<10	Muy baja
10 < T < 100	Baja
100 < T < 500	Media a Alta
500 < T < 1000	Alta
T > 1000	Muy Alta

Fuente: Custodio & Llamas, 2001

➤ Conductividad hidráulica (K).

Se define como el caudal de agua que circula por una sección de acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario. Representa la facilidad que tiene una roca para que el agua circule a través de ella, lo que depende tanto del medio físico como del fluido que lo atraviesa (Villarroya, 2009). Partiendo de $T = K * b$ (espesor del acuífero en m), se obtiene la conductividad hidráulica en la Ecuación 3.

$$K = \frac{T}{b} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

K : permeabilidad o conductividad hidráulica del acuífero en m/d.

T : Transmisividad del acuífero (m^2/d).

b : Espesor del acuífero (m).

- Permeabilidad del agua subterránea.

El método de dilución puntual se enfoca en realizar ensayos para obtener la permeabilidad del agua subterránea mediante el cálculo de la velocidad de flujo horizontal en un acuífero, dicho método fue desarrollado por Kocherin en 1916 y ampliado posteriormente por otros autores.

Para ello se determina la velocidad del agua a través de trazadores químicos, definidos como la materia o la energía transportada por las aguas subterráneas y que nos permite obtener información sobre la dirección, la velocidad, o ambas características del movimiento del agua. Las técnicas de trazadores permiten determinar parámetros hidráulicos en acuíferos (FCIHS,2009).

Uno de los trazadores químicos mayormente utilizado por su bajo costo y disponibilidad es el cloruro de sodio (NaCl), o sal común, en el cual se va midiendo la conductividad eléctrica en un medio líquido en un determinado tiempo y a diferentes profundidades.

Previo a la realización del método, es necesario determinar la masa a inyectar del trazador en el pozo. Se mide en un orden entre 100 y 1000 veces superior de los valores de concentración correspondientes en el agua subterránea; que corresponden a:

- Concentración mínima de detección.
- Concentración del fondo natural.
- C^* es el valor máximo de concentración natural.

$$C_{max} \approx (100. C^* a 1000 C^*) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

C_{max} = concentración con el trazador químico ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

C^* = concentración natural del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

La masa a inyectar vendrá delimitada por la siguiente Ecuación No. 5

$$M = V_0 \times C_{max} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

M : Masa a inyectar ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

V_0 : volumen inicial (L)

C_{max} : concentración máxima ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

El método consiste en introducir un determinado volumen del trazador en el pozo. Posteriormente se mide la evolución de la concentración en el mismo, a intervalos de tiempo determinados (FCIHS, 2009), que se detalla en la siguiente metodología:

- Se determina el diámetro (d) y altura (I) del pozo, de tal forma que el volumen V_0 va determinado por:

$$V_0 = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

V_0 : Volumen inicial del trazador (L)

d : diámetro del pozo (m)

I : altura del pozo (m)

- Se inyecta un trazador que se mezcla con el agua, obteniendo una concentración constante y homogénea C_0 .
- Se mide la concentración del trazador a intervalos de tiempo determinado a través de una sonda multiparamétrica para medir conductividad eléctrica.

El fundamento de este método se basa en medir como se reduce la concentración del trazador a una cierta profundidad. Se recomienda que la última medida en el ensayo sea como mínimo 10% de la concentración inicial.

La velocidad de flujo V' se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V' = \frac{\pi d}{4t} \ln \frac{C_0}{C} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde

d = diámetro del pozo (cm)

t = tiempo (s)

C_0 = concentración inicial ($\mu\text{S/cm}$)

C = concentración final ($\mu\text{S/cm}$)

Cabe mencionar que la velocidad que se expresa es la velocidad de flujo de Darcy aplicable para suelos arcillosos, siendo característico de la zona de estudio.

Un aspecto importante dentro del ensayo es tomar en cuenta las perturbaciones sobre la velocidad de agua en el sondeo V' , que viene dada por un coeficiente de corrección. En el caso de ausencia de filtro de pozo se propone un coeficiente de corrección de $\alpha = 2$ (FCIHS, 2009). Finalmente se calcula la velocidad por medio de la Ecuación No. 8

$$V = \frac{\pi d}{4\alpha t} \times \ln \frac{C_0}{C} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

d : diámetro del pozo (cm)

t : tiempo transcurrido (s)

α : coeficiente de corrección (adimensional)

C_0 : concentración inicial ($\mu\text{S/cm}$)

C : concentración final ($\mu\text{S/cm}$)

➤ Capacidad de infiltración.

Se define como la máxima cantidad de agua que puede absorber un suelo por unidad de tiempo, para unas condiciones iniciales previamente determinadas (FCIHS, 2009). Los resultados varían en función del tipo de suelo, la humedad del suelo y el grado de compactación del mismo.

La capacidad de infiltración de los suelos desempeña un papel fundamental en los procesos de regulación y escorrentía, como respuesta a una precipitación dada en una cuenca. Lluvias de iguales intensidades pueden producir caudales diferentes en suelos en cuencas con diferente capacidad de infiltración. La capacidad de infiltración es también muy importante en el estudio de la recarga de acuíferos (Custodio & LLamas, 2001).

2.4 Zonas de recarga hídrica

La recarga hídrica es el proceso en el cual se incorpora agua a un acuífero, procedente del exterior, además se define este fenómeno como un proceso por el cual el exceso de agua por infiltración sobre la evapotranspiración drena desde la zona radicular y continua circulando en dirección descendente a través de la zona no saturada, hasta la capa freática (Faustino, 2006).

Para la identificación de las zonas de recarga hídrica se evalúan los sitios en el cual se realizaron las pruebas de infiltración utilizando los criterios de pendiente y microrelieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso de suelo bajo la metodología Matus (Matus 2009).

2.4.1 Uso de suelo

El Archipiélago de Solentiname está compuesto en su mayoría por suelos con cobertura boscosa; sin embargo, dentro de las principales actividades económicas se encuentra la agricultura para comercio y para consumo personal, asimismo existen áreas destinadas para la conservación de la biodiversidad y conservación.

Con respecto a las tierras cultivables, en Solentiname suman un total de 3,251.5 manzanas. La mayoría de los hogares (77.3%) poseen menos de 21 manzanas,

distribuidas de la siguiente manera: un 30.7% de la población posee de 5 a 10 manzanas, siendo este el rango más representativo; seguido de menos de 5 mzs. con un 25.3%, y de 11 a 20 mzs., con un 21.3% (MARENA, 2010).

En relación a la cobertura del suelo, 5.6% corresponde al sector agropecuario principalmente en las Islas Mancarrón y San Fernando, 8.7% a bosques latifoliados abierto y 2.3% barbecho forestal (Tabla 3).

Tabla 3. Cobertura de suelo en el Archipiélago de Solentiname y Reserva Los Guatuzos (MARENA, 2010).

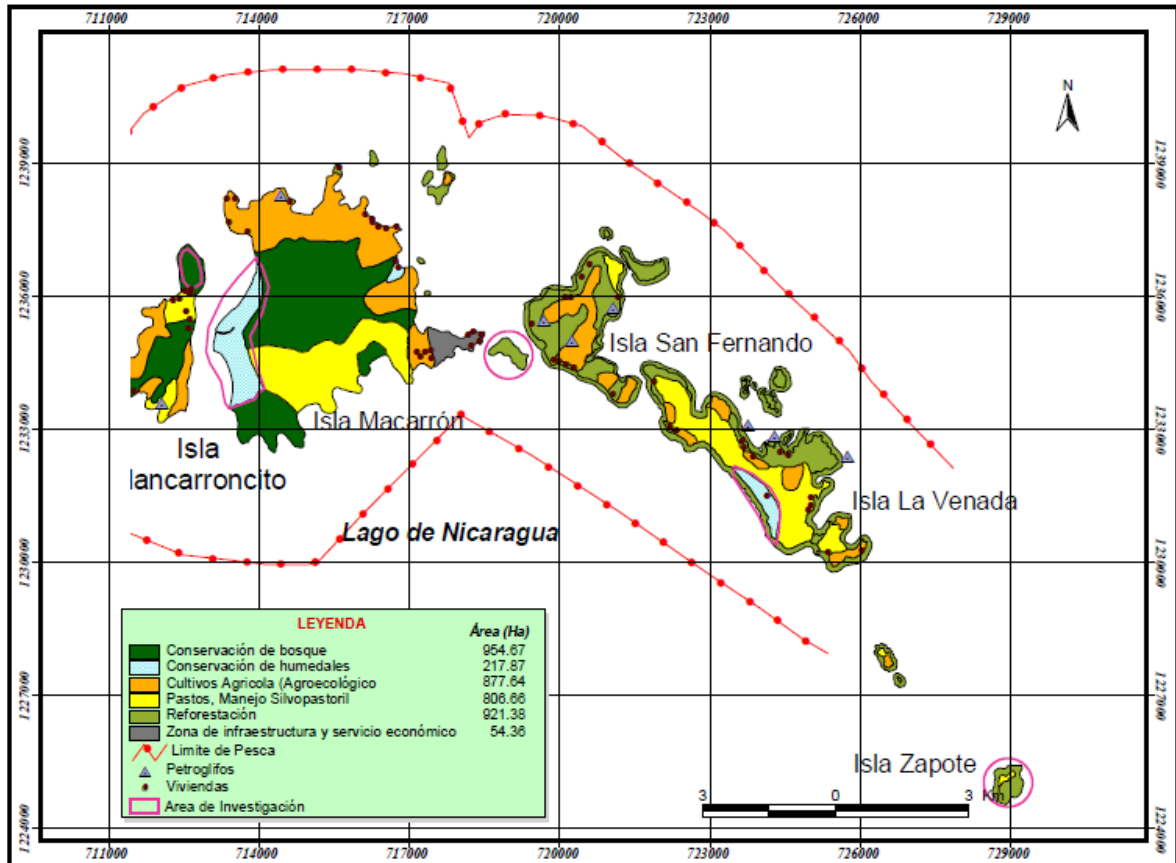
Cobertura de Suelo	R.V.S. Los Guatuzos		M.N. Archipiélago de Solentiname	
	Ha	%	Ha	%
Agropecuario	11,482	26	1,008	5.6
Agua	2,225	5	14,936	83.2
Barbecho Forestal	1,195	3	419	2.3
Bosques con Palmas	2,568	6		
Bosques latifoliado abierto	12,382	28	1,558	8.7
Tierra sujeta a inundación	1,886			
Vegetación arbustiva	716	2		
Vegetación herbácea	9,309	21		
Totales	44,370	100	17,950	100

Como parte del área de conservación de suelo de la Isla Mancarrón, se encuentra un humedal palustrino en el extremo oeste, donde existe tres tipos de cobertura vegetal: estado herbáceo que predomina en la orilla de la isla con cobertura del 98%, el estado arbustivo ubicado en sitios con menor profundidad de agua con una cobertura del 70% y el estado arbóreo con cobertura del 2%(MARENA, 2010).

En relación a los ecosistemas terrestres, en la isla predominan bosques secundarios correspondientes a antiguos potreros o áreas de cultivo con aproximadamente 15 años de regeneración natural.

Este tipo de cobertura vegetal presenta un dosel arbóreo con altura de 12m y algunos árboles emergentes de 20m de altura. La ganadería en Solentiname hace que en algunas áreas de las islas existan potreros para ganado vacuno, los cuales están conformados por vegetación herbácea con cobertura de 98% y 25 cm de

altura aproximada. Las actividades de los habitantes han definido un mosaico vegetal compuesto por áreas de cultivos anuales, tacotales y áreas de reforestación con especies de valor económico como el Balsa (Mapa 3; MARENA, 2010).



Mapa 3. Mapa de zonificación de uso de suelo, Plan de Manejo Solentiname (MARENA 2010).

2.5 Balance hídrico subterráneo

Para cuantificar la disponibilidad de agua subterránea de un área se deben conocer las condiciones meteorológicas, aspectos geológicos e hidrogeológicos, la oferta y demanda de agua en el área de estudio, cobertura boscosa, profundidad de raíz, entre otros datos. El planteamiento y el cálculo del balance, es un método para contrastar la coherencia entre el funcionamiento del sistema y el modelo conceptual de la zona de estudio (FCIHS, 2009).

De acuerdo a la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, el balance consiste en aplicar el principio de conservación de masas o de continuidad para estimar el volumen de agua que circula en un sistema. Se obtiene mediante un

procedimiento matemático por medio del cual se relacionan valores medios mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial con la capacidad de retención de humedad del suelo en un punto determinado (Rodríguez, 2009). El balance hídrico subterráneo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P = Es + ET + Ie \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

P : Precipitación (mm)

Es : Escurrimiento fluvial (mm)

ET : Evapotranspiración (mm)

Ie : Infiltración eficaz (mm/d)

2.5.1 Entrada en el sistema: Recarga potencial

Las entradas de agua en el sistema se definen mediante el balance de suelos por el método de Schosinsky & Losilla (2006), el cual permite conocer la disponibilidad de agua subterránea y se enfoca en el principio de la conservación de la materia, donde el agua que infiltra al suelo es proporcional al agua que se almacena más el agua que es extraída. Dentro de las componentes del balance de suelo se definen los siguientes:

Precipitación media mensual (P):

En la precipitación mensual se consideran los factores como volumen de lluvia mensual, retención pluvial en el follaje y el coeficiente de infiltración, dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = C_i(P - Ret) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente en el suelo en [mm/mes].

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional]

P = Precipitación mensual del mes [mm/mes].

Ret = retención de lluvia en el follaje.

Fracción de lluvia interceptada por el follaje (Ret)

Lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración ya que se considera que en un mes de lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky & Losilla, 2006). Además, se considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12% (Butler, 1957) de la precipitación mensual (Linsley, et al, 1958).

Coeficiente de retención del follaje (Cf_0):

Es el porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno. Para el 12% de retención, el $Cf_0=0,12$. Entonces, para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplicará la Ecuación No. 11.

$$Ret = (P)(Cf_0) \quad \text{Ecuación 11}$$

Si $P \leq 5 \text{ mm/mes}$, entonces $Ret = P$

Si $(P)(Cf_0) \geq 5 \text{ mm/mes}$, entonces $Ret = (P)(Cf_0)$

Si $P > 5 \text{ mm/mes}$ y $(P)(Cf_0) < 5 \text{ mm/mes}$, entonces $Ret = 5 \text{ mm/mes}$

Características del suelo

Dentro del balance hídrico de suelo se incorporan las características del suelo de la zona de estudio, evaluando las siguientes variables:

- Capacidad de Infiltración (F_c): se define como la capacidad de equilibrio, cuando el suelo está completamente saturado.
- Recarga por infiltración: se define como el paso del agua que proviene de la precipitación desde la superficie, hacia el interior del suelo. Ello depende de una serie de elementos tales como: el agua disponible a infiltrar, la naturaleza del suelo, el estado de la superficie y las cantidades de agua y aire existentes previamente en el subsuelo.

- Coeficiente de infiltración por textura del suelo (Kf_c): que es uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo; está dado por la Ecuación No. 12 (Schosinsky & Losilla, 2006):

$$Kf_c = 0.267 \ln(f_c) - 0.000154f_c - 0.723 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

Kf_c [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo).

f_c [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

Para f_c entre 16 y 1568 mm/día y para $f_c < 16$ mm/día, el $Kf_c = 0.0148f_c/16$. Para $f_c > 1568$ mm/día, $Kf_c = 1$.

- Coeficiente de Infiltración por pendiente y cobertura vegetal

Además del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, influye la pendiente del terreno y la vegetación. Estos coeficientes, vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo (C_i), basado en la Ecuación No13 (ONU, 1972):

$$C_i = K_p + K_v + Kf_c \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde

C_i : Coeficiente de infiltración [adimensional].

K_p : Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional].

K_v : Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional].

Kf_c : Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional].

- Capacidad de campo de suelos (CC): Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica (Custodio, 2001). Representa el agua que, transcurrido un tiempo (generalmente tres días) después de un riego o de una lluvia, queda en el terreno, parte de la cual podrá ser aprovechada por la vegetación para sus funciones biológicas.

- Punto de marchitez de suelos (PMP): es el punto de humedad mínima en el cual una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo y no puede recuperarse de la pérdida hídrica aunque la humedad ambiental sea saturada.
- Densidad aparente (g/cm^3) se define como el peso seco del suelo, condicionado por los factores de textura, porosidad y presencia de materia orgánica. Suelos con texturas arenosas tienden a tener mayores densidades, siendo un buen indicador de la capacidad de infiltración. En la Tabla 4, se reportan las propiedades físicas de suelos (Grassi, 1976).

Tabla 4. Punto de marchitez y capacidad de campo de diferentes texturas de suelo (Grassi, 1976).

Textura de suelo	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP (%)	CC (%)	Densidad aparente (g/cm^3)
Arenoso	2 - 6	6 - 12	1.55 - 1.80
Franco-arenoso	4 - 8	10 - 18	1.40 - 1.60
Franco	8 - 12	18 - 26	1.35 - 1.50
Franco-arcilloso	11 - 15	23 - 31	1.30 - 1.40
Arcilloso-arenoso	13 - 17	27 - 31	1.25 - 1.35
Arcilloso	15 - 19	31 - 39	1.20 - 1.30

Evapotranspiración potencial:

La evapotranspiración potencial (ETP) denominada por Thornthwaite (1948) es referida a la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación, siendo la que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas.

Numerosas fórmulas permiten evaluar la ETP con una aproximación suficiente para muchos estudios hidrológicos. Normalmente con estas fórmulas se calcula la ETP

mes a mes para datos medios de una serie de años. En este estudio, el cálculo se hará mediante la fórmula de Thornthwaite (1948).

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada a un exponencial a , utilizando la Ecuación No14

$$e = 16 \left(10 \frac{T_m}{l} \right)^a \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

e : evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes).

T_m : temperatura media mensual en °C.

l : índice de calor anual (adimensional)

El índice de calor anual se determina mediante el índice de calor mensual i_j a través de la Ecuación No. 15.

$$i_j = \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ecuación 15}$$

Posteriormente se debe calcular la ETP mensual, incorporando la ETP sin ajustar (e) a través de un coeficiente que toma en cuenta el número de días al mes y horas luz de cada día en función de la latitud, utilizando la Ecuación No. 16.

$$ETP_{Tho} = e \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

ETP_{Tho} : Evapotranspiración de Thornthwaite (mm)

e : evapotranspiración mensual sin ajustar (mm)

L : factor de corrección del número de días del mes y la duración de horas solares según latitud (adimensional)

Recarga potencial al acuífero:

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

capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero y que se calcula con la Ecuación No. 17 (Schosinsky & Losilla, 2006).

$$R_p = P_i + H_{s_i} - H_{s_f} - ET \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

R_p = Recarga potencial mensual en mm/mes.

P_i = Precipitación que infiltra en mm/mes.

H_{s_i} = Humedad del suelo al iniciar el mes en mm.

H_{s_f} = Humedad del suelo al final del mes en mm.

ETR = Evapotranspiración real en mm/mes.

2.5.2 Salidas del Sistema

Escorrentía superficial

Corresponde a la precipitación mensual, menos la retención de lluvia en el follaje, menos la infiltración. La escorrentía mensual se calcula con la Ecuación No. 18 (Schosinsky & Losilla, 2006).

$$ESC = P - Ret - P_i \quad \text{Ecuación 18}$$

ESC : Escorrentía superficial en mm/mes.

P : Precipitación en mm/mes.

Ret : Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes.

P_i : Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

Caudal de Manantiales

Como parte de las salidas del sistema se encuentran los manantiales que se identifican en la zona de estudio. Se evalúa el caudal mensual de cada uno de los manantiales presentes en el área de estudio, en un período de tiempo para definir el volumen de salida del acuífero en L/s.

2.6 Descripción socio-económica

En el estudio elaborado por ACRA (2007), se menciona que el Archipiélago de Solentiname cuenta con 1,055 habitantes siendo la isla Mancarrón la más poblada. La población se abastece de agua principalmente del lago, en algunos casos sin realizarle algún tratamiento previo como cloración o filtración; solamente los hoteles y servicios turísticos consumen agua purificada.

El 39% de la población del archipiélago consume agua sin tratamiento, mientras que el 41% de la población da tratamiento mediante filtros de barro que reducen en un 95% parásitos y algas (ACRA, 2007).

No existen entidades de suministro de agua potable en el archipiélago, por lo que cada casa de habitación cuenta con su propio sistema de suministro de agua a través de sistemas de bombeo de agua del lago, la cual es almacenada en tanques plásticos, para su posterior distribución a través de la red interna de cada casa. Únicamente en la Isla San Fernando, se cuenta con una red de suministro pública del pozo perforado a unos puestos de agua, de los cuales se suministra de agua potable la población de la isla.

De igual forma, no existe una red de saneamiento, por lo que los pobladores hacen uso de letrinas. En relación a la energía, ésta se suministra mediante paneles solares en hogares y negocios locales.

El principal rubro económico de la población es el trabajo artesanal; aproximadamente el 80% de las familias asentadas en el archipiélago se dedican a la elaboración de artesanías y pintura primitiva, estas son comercializadas en los mercados a nivel nacional e internacional. Otras familias se dedican a la agricultura de granos básicos (maíz y frijoles), plátano y cítricos; la ganadería dejó de ser un rubro económico de las comunidades, se observan muy pocas cabezas de ganado vacuno, especialmente en la Isla Mancarrón (Salgado, 2007).

En la Isla Mancarrón se observó que existe la siguiente infraestructura: escuela, hotel, parque, iglesia católica, casa comunal, casas para talleres de artesanías, pulperías, puesto de salud, un pequeño puerto lacustre donde atracan pequeñas

embarcaciones, así también áreas de terrenos privados que se dedican a la agricultura (fincas), lo habitantes de estas islas tienen vínculos comerciales con la ciudad de San Carlos cabecera departamental del Departamento de Río San Juan.

2.7 Prospección geofísica

La prospección geofísica aplicada a la hidrogeología, se centra en la ubicación y delimitación de formaciones geológicas que son reservorios de agua subterránea con características que a priori resulten apropiadas para una posterior explotación o aprovechamiento del recurso (Auge,2008).

De las técnicas geofísicas aplicadas a investigaciones diversas durante los últimos 20 años, el uso de tomografías eléctricas (TE) bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), ha ido en aumento en investigaciones de contaminación ambiental en general, arqueología, hidrogeología, geotecnología y en la localización de estructuras complejas por lo general subsuperficiales, tanto geológicas como antropogénicas. La disponibilidad de modernos programas de inversión así como equipos de medición (Dahlin, 1993) han contribuido en gran manera a este desarrollo.

Para poder modelar el subsuelo con una distribución arbitraria de resistividades y tomar en cuenta también la variación de otros parámetros que influyen notoriamente en ella; como por ejemplo la topografía, se utiliza para su cálculo los métodos de elementos finitos y de diferencias finitas, que permiten tomar en cuenta estas variaciones punto a punto y en todas las direcciones en un volumen de tierra considerado.

La resistividad real para un medio determinado cambia en todas las direcciones debido a la anisotropía y heterogeneidad del subsuelo. La resolución de estos casos generales implica considerar en el planteo y solución del problema una mayor cantidad de variables no tomadas en cuenta en los métodos actualmente utilizados en una dimensión (1D) los cuales la consideran constante en cada estrato o capa del subsuelo. Todo lo antes planteado, nos lleva a metodologías y modelos matemáticos de mayor complejidad.

La determinación y cálculo de resistividad real en 2D y 3D (dos y tres dimensiones) respectivamente, se basa en los algoritmos desarrollados e implementados por M.H. Loke y Dahlin en 1997. A través de estos algoritmos se puede optimizar la interpretación de los estudios geoelectricos, pudiéndose obtener la respuesta de ambientes geológicos y anomalías complejas, las cuales no pueden ser solucionadas satisfactoriamente considerando modelos de distribución de resistividad en una dimensión (1D) o a veces en dos dimensiones (2D).

2.7.1 Método de tomografía eléctrica

El método geofísico de tomografía eléctrica (TE) se basa en la implantación de una cantidad de electrodos a lo largo de perfiles, con una separación determinada que vendrá condicionada por el grado de resolución que se necesite y la profundidad de investigación que se precise; a menor separación de electrodos, mayor resolución y menor profundidad en la investigación, y viceversa. Con todos los electrodos conectados al equipo de medida y mediante un programa específico que se crea para cada objetivo, el aparato selecciona el conjunto de electrodos que funcionan en cada momento (Loke, 2000).

A partir de la correlación entre el valor de corriente inyectada, el voltaje medido y un coeficiente geométrico asociado a 4 electrodos, se obtiene la "resistividad eléctrica aparente" del subsuelo correspondiente a una cierta profundidad (o espesor). La resistividad eléctrica es considerada la propiedad física del medio que determina la capacidad de dejar pasar la corriente eléctrica a través del mismo (IGG/CIGEO-Managua, 2011). El Ohm.m es la unidad de resistividad eléctrica que generalmente se usa.

Una investigación multielectrónica (como la TE) con el arreglo gradiente se lleva a cabo inyectando corriente al terreno mediante electrodos con separación $(s+2)a$ (Figura 1) y simultáneamente o secuencialmente midiendo todas las diferencias de potencial entre los electrodos de potencial con espaciamiento a . Aquí, el factor de separación s es un entero que corresponde al número máximo de lecturas potenciales para una corriente de inyección. El factor n puede definirse como el espaciamiento relativo entre el dipolo potencial y el electrodo de corriente más

próximo. Además, es práctico definir el factor del punto medio “m” como la posición del punto medio del dipolo de potencial más próximo al punto medio de entre los dos electrodos de corriente actuales (Dahlin, T. And Zhou, B., 2006).

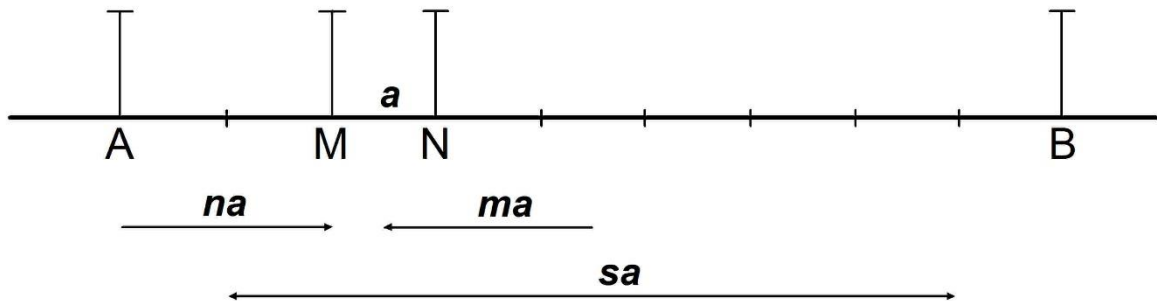


Figura 1. Esquema de posición de electrodos para tomografía eléctrica Dahlin, T. and Zhou B. 2006.

Las mediciones de resistividad eléctrica normalmente se realizan mediante la inyección de corriente (i) al terreno a través de dos electrodos comúnmente denominados como A , M , N y B ; midiendo con otros dos electrodos comúnmente denominados P_1 y P_2 la diferencia de voltaje (v) o de potencial resultante. A partir de valor de la corriente y del voltaje se calcula un valor de resistividad aparente (ρ_a), siendo:

$$\rho_a = k \frac{v}{i} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde k es un factor geométrico que depende del arreglo de los cuatro electrodos seleccionados para cada medición (Ecuación No. 20).

$$k = \pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Los valores de resistividad en una roca están determinados por su composición mineralógica, porosidad, disposición geométrica de los poros, proporción y distribución de poros y la resistividad de agua de relleno, por tanto, presenta una gran variabilidad entre cada capa. Algunos valores de resistividad eléctrica según el tipo de roca y agua se detallan en la Tabla 5 (Astier, 1982).

Tabla 5. Resistividad de aguas y rocas.

TIPO DE ROCA O AGUA	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (Ohm. m)
Agua de mar	0.2
Agua de acuíferos aluviales	10-30
Agua de fuentes	50-100
Arenas y gravas secas	1000-10000
Arenas y gravas con agua dulce	50-500
Arenas y gravas con agua salada	0.5-5
Arcillas	2-20
Margas	20-100
Calizas	300-10000
Areniscas arcillosas	50-300
Areniscas cuarcitas	300-10000
Cineritas, tobas volcánicas	20-100
Lavas	300-10000
Esquistos grafitosos	0.5-5
Esquistos arcillosos o alterados	100-300
Esquistos sanos	300-3000
Gneis, granito alterados	100-1000
Gneis. Granitos sanos	1000-10000

*Fuente: Astier J, 1982. Geofísica aplicada a la hidrogeología.

El método mide la variación lateral y en profundidad, la resistividad eléctrica de las rocas. Cuando las rocas carecen de poros o fisuras, y están secas, tienen una resistividad eléctrica alta; sin embargo, cuando hay agua acumulada en los huecos

o fisuras de las rocas, la resistividad eléctrica es mucho más baja, debido a que el agua con cierta concentración de sales, actúa como un conductor de la electricidad.

Para efectos hidrogeológicos, una baja o nula porosidad de las rocas se manifiesta por una elevada resistividad eléctrica; si la resistividad es media puede considerarse la presencia de un acuífero con flujo de agua; pero si es muy baja, se interpretan como suelo con alta presencia de arcillas y poco flujo de agua.

Las *rocas ígneas y metamórficas*, normalmente tienen altos valores de resistividad eléctrica, misma que disminuye en dependencia del porcentaje de fracturas rellenas con agua o de minerales metálicos. Las *rocas sedimentarias* usualmente son más porosas, por tanto, a mayor contenido de agua, menor es la resistividad. Los *suelos húmedos y el agua fresca* tienen valores de resistividad aún más bajos (IGG-CIGEO/UNAN, 2011).

Las resistividades eléctricas en las imágenes son representadas en una escala de colores que es característica de cada tomografía eléctrica (TE); aunque puede modificarse en rangos y tonalidades según las condiciones geológicas, geofísicas y litológicas disponibles en el subsuelo (Aracil, 2002). De acuerdo con el IGG-CIGEO/UNAN (2011) el método para la representación de los datos de resistividad eléctrica, es el trazado de pseudo-secciones obtenidas por el graficado de datos en un diagrama, donde se utiliza para la distancia de la línea de estudio el eje X y para la profundidad el eje Y. Esta técnica, permite obtener estructuras en forma de capas, diferenciando materiales permeables y no permeables en el caso de investigaciones hidrogeológicas.

La conductividad eléctrica es parte de los datos que se obtienen en un levantamiento geoelectrico definida como la capacidad de algunos materiales para transmitir corriente eléctrica. Su inverso es la resistividad eléctrica la cual está definida en la ley de Ohm (Keller & Frischknecht, 1996).

En general las rocas son malos conductores, pero la presencia de poros y fracturas vacías, tiene como resultado que los valores de conductividad se incrementen. Generalmente, la conducción eléctrica en una roca es producto de procesos

electrolíticos debido a que poros y fracturas contienen algún porcentaje de agua. La conductividad dependerá de la cantidad de agua presente, de su salinidad y de su distribución en la roca (Rionda, 2001).

III. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de estudio

De acuerdo al Dr. Piura (2006), el tipo de estudio es analítico, descriptivo y según el método de estudio, es no experimental. De acuerdo a Canales, Alvarado y Pineda (1996), según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la Información, el estudio es prospectivo y según el período y secuencia del estudio, el mismo es transversal.

3.2 Recopilación de la información

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados, se diseñó la metodología en las etapas definidas como: recopilación, revisión y análisis de documentación; planificación, preparación e investigación de campo y la etapa de análisis, procesamiento, interpretación e integración de resultados. La descripción de cada etapa se detalla a continuación.

3.2.1 Recopilación, revisión y análisis de documentación:

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica secundaria, seleccionando toda la información relacionada a los objetivos planteados y estudios previos que se realizaron sobre el Archipiélago y las zonas aledañas a él, por organismos gubernamentales, así como también por organismos de cooperación que trabajan en el archipiélago. Se hizo énfasis en la recopilación de datos meteorológicos provenientes de la Estación San Carlos, así como también en los generados en la Estación Colón en Cárdenas; información geológica, hidrogeológica, datos sobre el tipo y uso de suelo, pendientes y elevaciones, vegetación, calidad de agua y fuentes de contaminación. La revisión, estudio y análisis de esta información recopilada, se orientó a encontrar aquella que fuera retroalimentadora para los objetivos de este estudio y que sea representativa de la isla.

Como parte de esta etapa, se visitaron instituciones gubernamentales como Alcaldía de San Carlos, ENACAL, INETER, MARENA y organismos no gubernamentales como ACRA; Huelva Solentiname y Fundación del Río.

3.2.2 Planificación, preparación e investigación de campo

El desarrollo de la etapa de campo consistió en el levantamiento de datos hidrogeológicos, geofísicos y geológicos con el propósito de obtener información detallada del acuífero y cumplir con los objetivos planteados. En tanto esta etapa es uno de los ejes centrales, para fines metodológicos se describirá con base en las actividades realizadas en cada una de las visitas de campo.

3.2.2.1 Planificación de campo

Para la recolección de la información se elaboraron diversas herramientas metodológicas, las cuales fueron siendo utilizadas de acuerdo a la pertinencia de cada una de ellas; así, como primera parte, se diseñaron diversos formatos para cada uno de los componentes a ser medidos en campo; resultando en los formatos diseñados para la recolección de información de los pluviómetros, formatos para medición de niveles de agua, formatos para los parámetros de campo y registros de campo para las pruebas de infiltración (Anexo 1).

En orden de conocer datos básicos sobre agua y saneamiento, uso y demanda de agua, enfermedades de tipo hídrico, actividades principales relacionadas en la isla, y condiciones socioambientales en general, adicionalmente se realizó una encuesta para entrevistar a los pobladores, con el fin de obtener de primera fuente la información necesaria para este estudio. Estas entrevistas se realizaron con los diversos actores de la Isla Mancarrón, incluyendo autoridades de gobierno, organizaciones no gubernamentales y personas de la comunidad. La información obtenida fue reportada en las secciones que corresponde.

Para llevar a cabo la etapa de campo, fue necesario contar con los siguientes equipos, los cuales fueron utilizados en las diferentes actividades realizadas.

- Pluviómetros.
- Sonda multi-paramétrica para medir parámetros de campo.
- Sonda eléctrica para medir niveles estáticos del agua.
- Mapas topográficos, geológicos y de suelo.
- Formatos de campo.

- GPS.
- Infiltrómetros de doble anillo.
- Equipos de tomografía eléctrica.
- Cámara fotográfica.
- Machetes, pala y cinta métrica.
- Computadora y papelería de oficina.

Las giras de campo a la isla se planificaron de noviembre 2013 – marzo 2014, realizando viajes mensuales en un periodo de 1 semana y en algunos casos semana y media, con el fin de obtener la mayor información de la isla. En cada viaje, se contó con un equipo de apoyo conformado por el tutor, en el caso de la gira de reconocimiento, instalación de los pluviómetros y realización de la prospección geofísica; así como con el acompañamiento técnico de docentes del CIRA/UNAN-Managua y técnicos de campo.

3.2.3 Reconocimiento hidrogeológico y geológico

La actividad principal de la gira de reconocimiento, consistió en la visita a las instituciones y autoridades que trabajan en proyectos de desarrollo en la Isla Mancarrón, a fin de presentar la investigación y recolectar los insumos para la misma, los cuales fueron utilizados en la presente investigación, siendo valorada de suma importancia para ellos; reconociendo además que esta información será complementaria a la información con la que ya se cuenta.

En esta misma visita se realizó el primer inventario de objetos hidrogeológicos (pozos excavados y manantiales) en la isla, en el cual se identificaron cinco pozos excavados (Tabla 6, Mapa 4), uno de los cuales fue realizado por Hijos del Río para abastecer a los habitantes de la comunidad El Refugio. En cada uno de los pozos se tomaron sus respectivas coordenadas mediante GPS manual (no diferencial), medición de niveles estáticos utilizando una sonda para medir niveles y parámetros de campo. La información se documentó en los formatos de campo antes mencionados.

Con respecto a los manantiales, se identificaron un total de cinco ubicados en el sector oeste de la isla, se georeferenciaron las coordenadas y se midió el caudal de

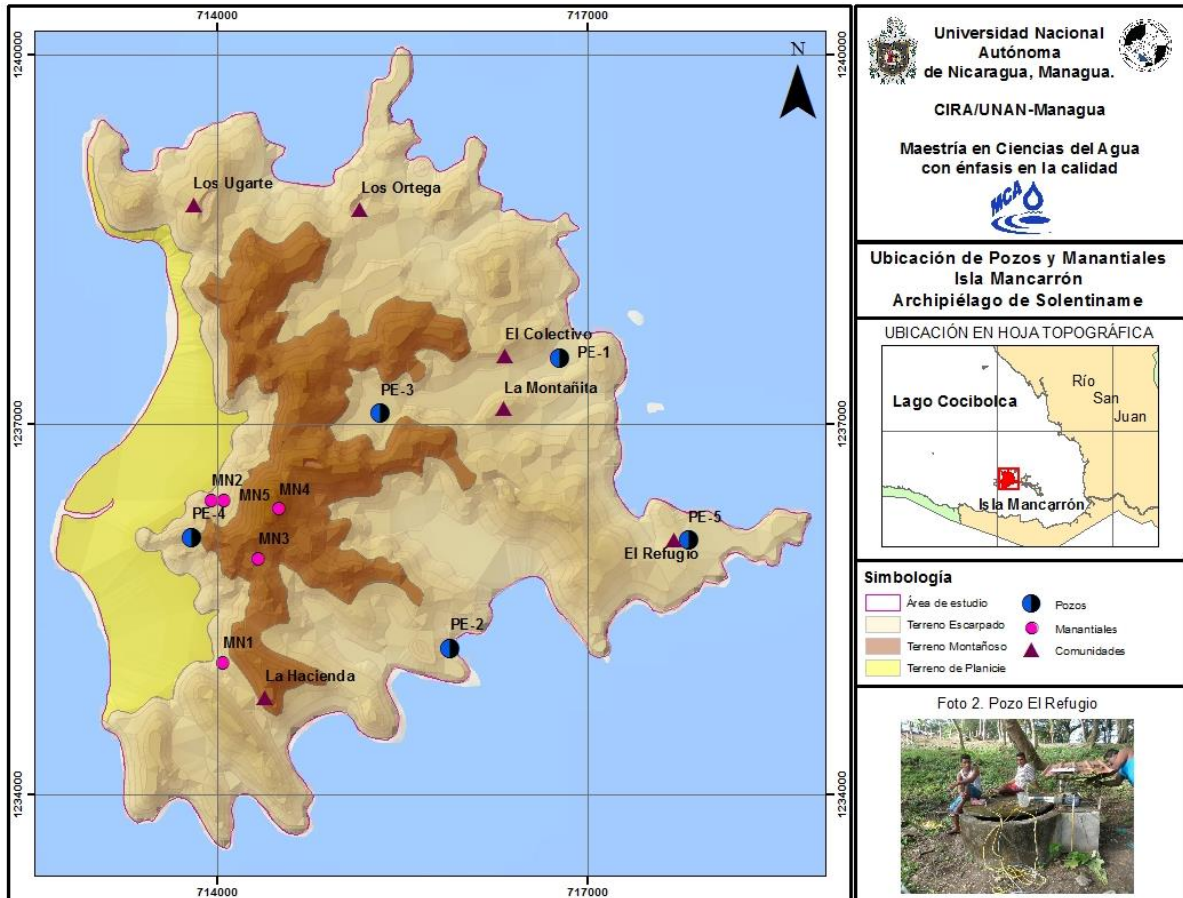
agua en un intervalo de tiempo, repitiendo la medición tres veces y parámetros de campo a través de sonda multiparamétrica.

Tabla 6. Objetos hidrogeológicos en la Isla Mancarrón.

Objeto Hidrogeológico	Ubicación	Coordenadas (Norte/Oeste)
PE -1	El Colectivo	1237539,716783,
PE-2	La Salvadora	123518,715895
PE-3	El Colectivo	1237096,715325
PE-4	La Hacienda	1236188,713398
PE-5	Comunidad El Refugio	1235990,718206
MN-1	La Guatusa	1235066,714049
MN-2	Manantial El Burro	1236385,713949
MN-3	La Bolsa	1235910,714331
MN-4	El Peñón	1236313,714498
MN-5	Cerca del Peñón	1236384,714055

En los objetos hidrogeológicos se midieron parámetros de campo tales como oxígeno disuelto (mg/L), temperatura (°C), conductividad eléctrica en agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$), potencial redox (mV) y el grado de acidez de las aguas (pH) utilizando una sonda multi-paramétrica Hanna Hi 9828.

De igual manera se identificó la red hídrica de la isla y la geología general descrita en los estudios bibliográficos. Se visitaron cada una de las comunidades de la isla en la cual se realizaron encuentros con los comunitarios para conocer el manejo de agua y su acceso a la misma.



Mapa 4. Objetos hidrogeológicos y comunidades en la Isla Mancarrón.

3.2.4 Monitoreo de objetos hidrogeológicos

Con el fin de obtener información acerca del comportamiento del agua subterránea de la isla, se realizó monitoreo mensual de los objetos hidrogeológicos (pozos y manantiales) en el periodo noviembre 2013-marzo 2014, obteniendo datos en el periodo seco del año hidrológico, registro que permite evaluar el acuífero en condiciones críticas.

En cada uno de los pozos se realizó la medición mensual del nivel estático del agua y parámetros de campo. De igual manera se visitaron los manantiales ubicados en el sector oeste de la isla para determinar su caudal de agua y medición de los parámetros de campo.



Foto 3. Medición de parámetros de campo en pozo PE-2.

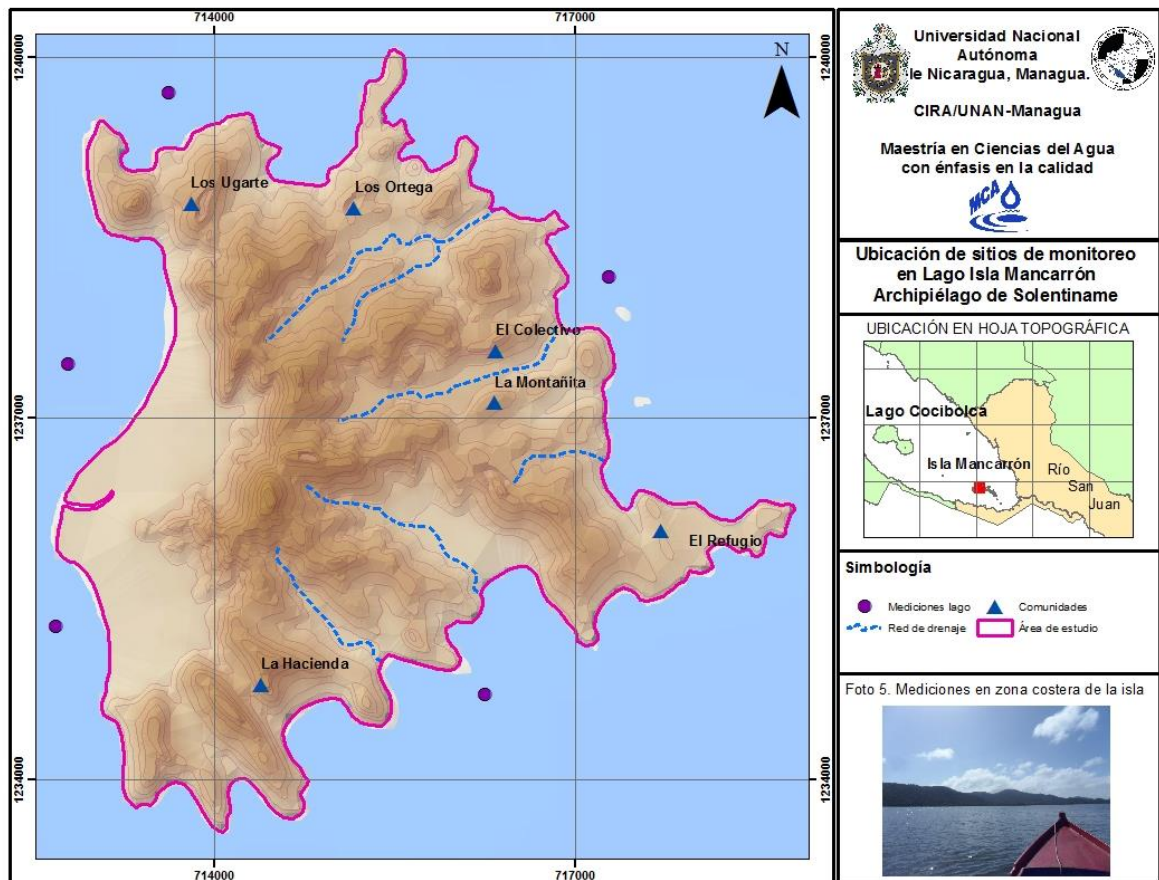


Foto 4. Medición de caudales M2- La Bolsa.

Como parte de la investigación se midieron los parámetros de campo en las costas de la isla, para identificar las condiciones actuales del agua superficial, y de esta manera, contar con información que sirva como punto de comparación si existiese alguna similitud entre las características del agua subterránea de los pozos excavados y el agua superficial (Tabla 7 y Mapa 5). Las variables de campo que se midieron fueron las mismas que los pozos y manantiales de la isla.

Tabla 7. Ubicación de los puntos monitoreados en el Lago Cocibolca

Punto	Coordenadas		Elev (m)
1	1238171	717277	69
2	1239704	713622	50
3	1237449	712782	57
4	1235263	712682	50
5	1234704	716249	65



Mapa 5 Sitios de monitoreo de parámetros físico-químicos de campo en las costas de la Isla Mancarrón.

- Prueba de dilución puntual

El método de dilución puntual se enfoca en el cálculo de la velocidad de flujo horizontal en un acuífero. El pozo PP-5 de la comunidad El Refugio fue seleccionado para realizar dicha prueba, utilizando como trazador químico, al cloruro de sodio (sal de mesa). Inicialmente se elaboró la concentración inicial 100 veces superior a los valores correspondientes del agua subterránea.

La dilución se inyectó en toda la columna de agua del pozo, resultando en altos valores de conductividad iniciales. El método consistió en las medidas de las concentraciones de conductividad en un determinado tiempo aproximadamente 5 horas y diferentes profundidades desde la superficie del agua 0.5 m hasta la profundidad del pozo.

3.2.5 Levantamiento de datos de precipitación para balance hídrico de suelos

Para contar con el dato de la precipitación local en la isla, y determinar de esta manera el balance hídrico de la misma, durante la gira de reconocimiento realizada en noviembre 2013, se instalaron 5 pluviómetros (Mapa 6) con el fin de registrar diariamente las precipitaciones ocurridas en la isla.

Los pluviómetros se instalaron cerca de las comunidades, escogiéndose sitios con poca pendiente, con poca cobertura arbórea y con pocas construcciones altas cerca del sitio; procurando que el área de instalación tuviera el espacio aéreo libre, para que se registrara la precipitación real en cada zona de instalación del pluviómetro.



Foto 6. Instalación de pluviómetros en Comunidad El Refugio.



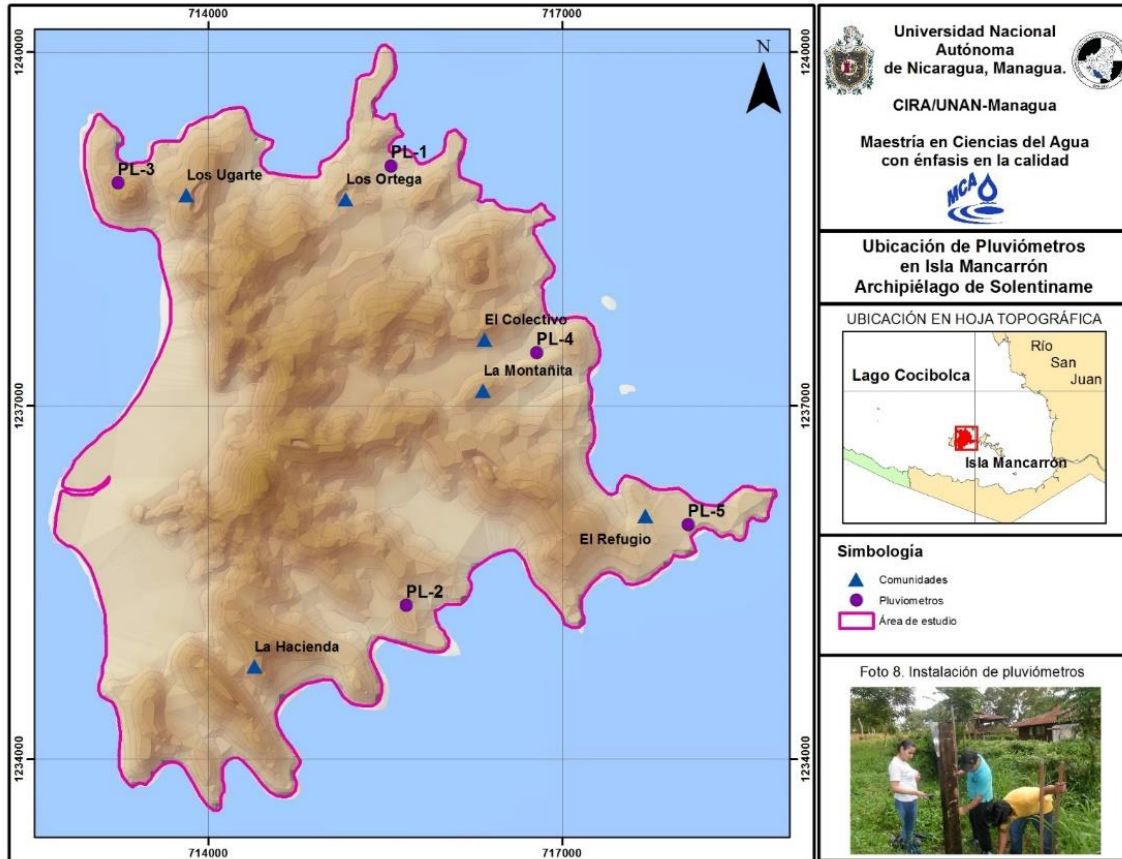
Foto 7. Pluviómetro instalado en la Comunidad El Refugio.

Cada equipo pluviométrico fue asignado a un responsable voluntario de cada comunidad quienes fueron capacitados en ese momento para el registro de lluvia diaria; a la vez, se les proporcionó con los registros pluviométricos y otros insumos necesarios para llevar a cabo esta actividad. Los encargados de los pluviómetros registraron los datos de lluvia durante 6 meses (noviembre 2013 – abril 2014 del año hidrológico, obteniendo datos durante época seca y lluviosa (Anexo 2).

Durante el recorrido se encontró un pluviómetro en La Salvadora (zona oeste), el cual llevaba registro diario de los meses anteriores, dicha información se incorporó dentro de los datos de precipitación. El pluviómetro de la Hacienda fue remplazado por uno más actual de manera que se continuara el monitoreo de la precipitación diariamente.

Tabla 8. Ubicación de pluviómetros en la Isla Mancarrón.

Pluviómetros	Ubicación	Norte	Este
PL-1	Los Ortega	1239034	715546
PL-2	La Salvadora	1235301	715673
PL-3	Los Ugarte	1238888	713225
PL-4	El Colectivo	1237448	716782
PL-5	El Refugio	1235988	718070



Mapa 6. Ubicación de los pluviómetros en Isla Mancarrón.

3.2.6 Levantamiento geológico y geomorfológico

En febrero 2015 se efectuó un levantamiento geológico y geomorfológico en la isla. Este levantamiento fue realizado en conjunto con la estudiante de quinto año de la carrera de Ingeniería en Geología de la UNAN-Managua, Alejandra Amaya. En este levantamiento se corroboraron elementos mencionados en la geología regional del archipiélago, pero también se identificaron fracturas y fallas a nivel local, que podrían incidir en la dinámica del acuífero de la isla a la vez que se realizó un

levantamiento geológico y geomorfológico local; así como de la litología del subsuelo de la isla.



Foto 9. Levantamiento geológico de la Isla.



Foto 10. Reconocimiento de fracturas en la Isla.

El levantamiento se realizó en toda la isla, enfatizando el mismo en los sitios de mayor relevancia como comunidades, zonas de cultivos y áreas protegidas, en el cual se tomaron coordenadas, tipo de rocas presentes o aflorantes, el tipo de suelo presente, los sedimentos superficiales, rumbo de falla o fractura, dirección de buzamiento, elevación y formas de relieve. La identificación de cuevas y mesas se realizó durante el recorrido por toda la isla georeferenciándose las de mayor elevación.



Foto 11. Perfil de relieve de Isla Mancarrón

3.2.7 Pruebas de Infiltración

Se realizaron diez pruebas de infiltración en la Isla Mancarrón (Tabla 9, Mapa 7), considerando el tipo de suelo de presente en la isla. Las pruebas se realizaron

utilizando el método de doble anillo (Foto 12) en aquellos sitios en donde era posible tener una fuente de agua, y el de Porchet (Foto 13) en zonas en donde el recurso agua era limitado. como resultado de estas pruebas, se obtuvo la velocidad con que se infiltra el agua, el coeficiente de infiltración y la textura del suelo, criterios a incorporarse en el análisis de las zonas de recarga hídrica y en balance hídrico. Las pruebas fueron realizadas en enero y marzo 2014.



Foto 12. Prueba de infiltración mediante método de doble anillo.

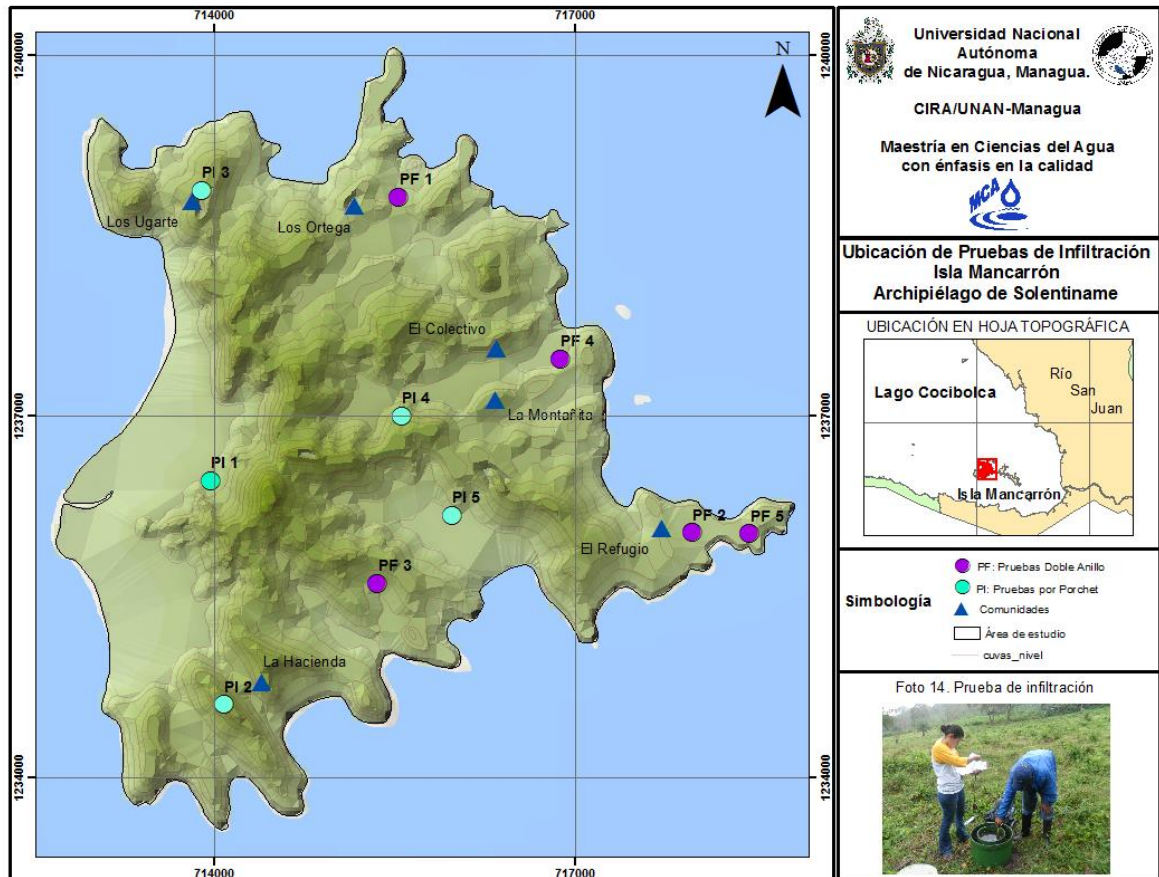


Foto 13. Prueba de infiltración mediante método de Porchet.

Tabla 9. Ubicación de las pruebas de infiltración a través del método de doble anillo y Porchet en la Isla Mancarrón.

Pruebas de infiltración	Ubicación	Coordenadas (Norte/Oeste)
PF 1	Los Ortega	1238824,715532
PF 2	El Refugio	1236039,717969,
PF 3	La Salvadora	1234981,715975
PF 4	La Montañita	1237478,716873
PF 5	El Refugio Zona Norte	1236026,718447
PI 1	Zona aluvial	1236467,713975
PI 2	La Hacienda	1234610,714086
PI 3	Los Ugarte	1238880,713895
PI 4	Zona central	1237007,715562
PI 5	La Salvadora	1236181,715975

Cuando se realizaron las pruebas de infiltración se obtuvieron muestras de suelo de cada sitio, identificándose la textura del mismo a través de la prueba de botella (Método de la FAO, 2009)..



Mapa 7. Ubicación de pruebas de infiltración método doble anillo y Porchet.

3.2.8 Levantamiento geofísico aplicando Tomografías Eléctricas.

En la gira de reconocimiento de noviembre 2013, se identificaron los posibles sitios para realizar la prospección geofísica. En la selección de los lugares para la realización de los perfiles, se valoró que cumplieran con los requisitos para poder implementar esta técnica, y que a la vez cumplieran con los criterios de fácil acceso y pendiente regular; considerando la proyección a futuro para posible aprovechamiento del agua subterránea por parte de los habitantes de esa comunidad como lo es la cantidad de habitantes y la agricultura desarrollada en esa zona.

Es así, como en febrero 2015 se desarrollaron seis perfiles de tomografía eléctrica (TE), en los sitios seleccionados en la gira de reconocimiento (Foto 15). En la realización de esta actividad, se contó con el apoyo del IGG-CIGEO/UNAN-Managua, institución que proveyó los equipos y materiales de medición necesarios para esta técnica (Foto 16), así como el permiso del experto que acompañó en la realización de la TE.

La tomografía eléctrica fue realizada con el sistema en arreglo de gradiente; para lo cual, se usan 81 electrodos conectados a un cable multi-conector con una distancia de separación entre cada electrodo de 5 metros. Los electrodos fueron colocados en el subsuelo de acuerdo con la dirección del perfil (Tabla 10, Mapa 8); con el propósito de obtener una profundidad de 70m y una longitud de 400m para cada perfil. Este arreglo se realizó con el propósito de conocer las condiciones del subsuelo y del acuífero presente en cada zona en donde se desarrollaron los perfiles.

Los datos de la tomografía eléctrica se adquirieron en campo inyectando corriente a los electrodos, cuya diferencia de potencial eléctrico (voltaje) era medido simultáneamente en el equipo de Terramater S.A., que almacenó la información en dos dimensiones.

Tabla 10. Características generales de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, Febrero 2014.

Tomografía Eléctrica	COORDENADAS UTM WGS84				Longitud (m)	Dirección del Perfil	Comunidad
	INICIO		FIN				
	Norte	Este	Norte	Este			
TEIM1	1236052	717814	1235996	718508	700	E-W	El Refugio
TEIM2	1236190	717500	1235765	717746	500	SE-NW	El Refugio
TEIM3	1237257	716575	1237586	716942	500	NW-SE	El Colectivo
TEIM4	1237589	716831	1237071	717082	600	SE-NW	El Colectivo
TEIM5	1238367	715508	1239059	715563	700	S-N	Los Ortega
TEIM6	1234726	713621	1235053	713826	400	SW-NE	La Hacienda

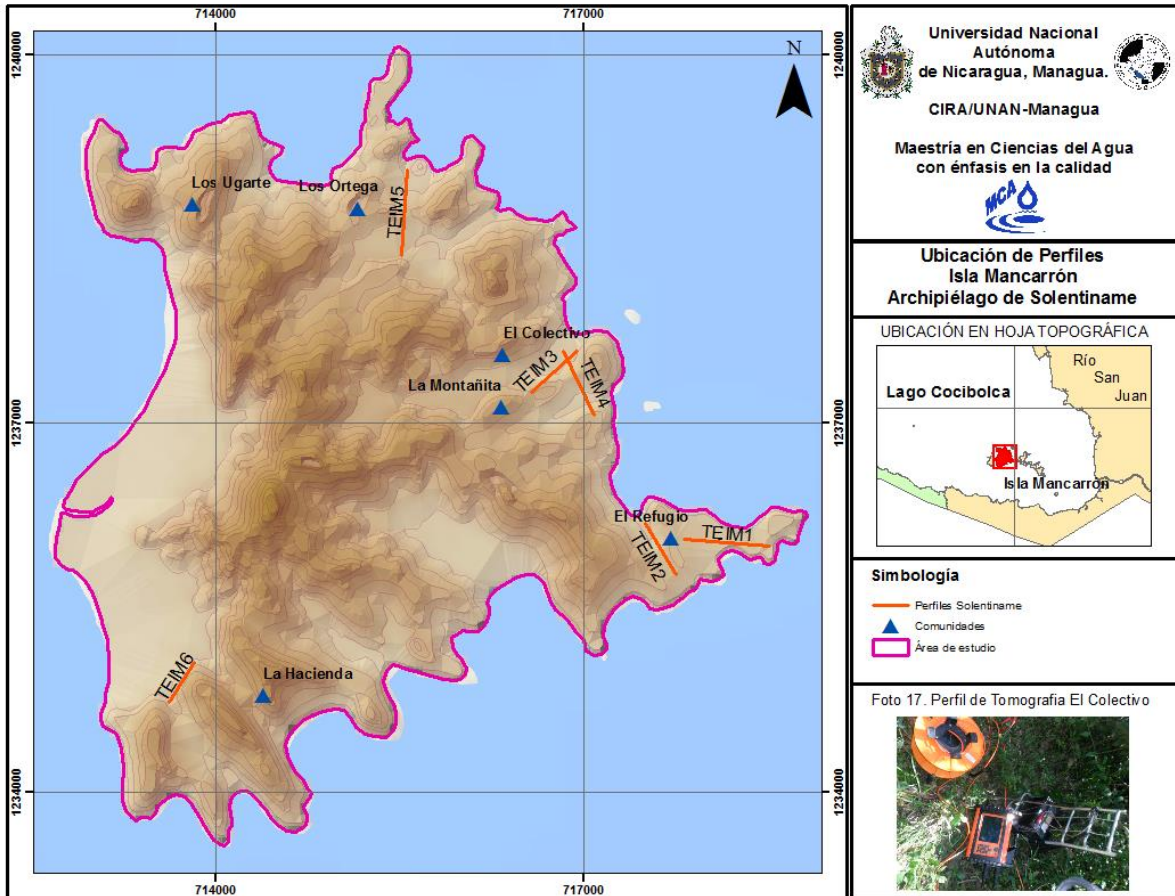
“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.



Foto 15. Prospección geofísica en la isla.



Foto 16. Prospección geofísica en la isla.



Mapa 8. Ubicación de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, febrero 2014.

3.3 Análisis, procesamiento, interpretación e integración de resultados

Posterior a la recolección de la información generada en el campo, se inició con el procesamiento de los datos, su análisis e interpretación; así como la integración de los mismos, de tal manera que se obtuvo un modelo conceptual inicial del acuífero de la Isla Mancarrón, la distribución de los diferentes estratos geológicos y una profundidad parcial del mismo; determinándose su disponibilidad y distribución en la isla.

3.3.1 Procesamiento de los resultados de monitoreo obtenidos de los objetos hidrogeológicos de la isla.

Se identificaron las unidades hidrogeológicas y las condiciones del acuífero mediante los datos obtenidos del levantamiento geológico, geomorfológico e identificación de fracturas.

Para ello se diseñaron mapas a través del programa ArcGIS; y el procesamiento de la información se realizó utilizando las herramientas de Microsoft y Excel. Dentro del análisis geológico se incorporó información obtenida de la revisión bibliográfica, como base científica de este tema.

Con la medición de NEAs en los pozos, y con los valores piezométricos de los manantiales, se elaboró la piezometría de la isla, con la cual se obtuvo la dirección del flujo de agua subterránea. A la vez, con estos valores piezométricos y la dirección de las líneas de flujo, se seleccionaron los pozos y manantiales con los cuales se determinaron los gradientes hidráulicos a ser utilizados para el cálculo de la velocidad de flujo del agua subterránea. Los gradientes se obtuvieron para las comunidades de El Colectivo, en el sector oeste de la isla y en La Salvadora.

Se realizó un análisis de la dinámica del agua a través de los resultados de la medición de caudales en manantiales, de los niveles estáticos de los pozos, y del método de dilución puntual, con el cual se calculó la velocidad media del flujo subterráneo.

En cuanto al método de dilución puntual, se interpretaron las concentraciones de cloruro de sodio en las diferentes profundidades con respecto al tiempo. Para la determinación de la velocidad de flujo promedio del agua se utilizaron las variables de concentración inicial y final del trazador, diámetro del pozo y tiempo medido para cada profundidad.

A las unidades hidrogeológicas identificadas en la isla, se analizaron sus características y su capacidad de contribuir a la dinámica de los acuíferos.

3.3.2 Interpretación de pruebas de infiltración

A partir de las pruebas de infiltración se obtuvieron los coeficientes de infiltración en los sitios monitoreados en la isla, lo cual brinda información general sobre la capacidad de infiltración de los suelos presentes en la isla; de igual forma se determinó la textura de suelo en cada sitio analizado. Estos datos son insumos para balance hídrico y para las zonas de recarga hídrica.

Para la identificación de las zonas de recarga hídrica se evaluaron las condiciones de la isla en función del relieve, geología (fallamiento), tipo de suelos y sedimentos superficiales, cobertura vegetal, velocidad de infiltración y actividades realizadas en la isla. Se analizaron las relaciones e influencias de dichas características para evaluar cada una de las zonas.

3.3.3 Procesamiento de los componentes del balance hídrico subterráneo y cuantificación de la recarga potencial del acuífero.

Para determinar la disponibilidad de agua subterránea se determinaron las variables de entrada y salida de agua en la isla. Las entradas se definieron mediante el balance de suelos por el método de Schosinsky & Losilla (2006).

Dentro de las componentes del balance de suelo se definieron los datos de precipitación provenientes de los registros de los pluviómetros instalados, la retención de lluvia en el follaje (Ret) en base a la cobertura vegetal, el coeficiente de infiltración y textura del suelo (K_{fc}) obtenido de las pruebas de infiltración con el método de doble anillo y por Porchet, el coeficiente de infiltración por pendiente (k_p) y por cobertura vegetal (k_v) y el coeficiente total de infiltración del suelo.

Como parte de los datos de salidas del agua dentro del balance, se utilizaron los registros de evaporación de la estación San Carlos para el periodo 2013-2014. Estos datos permitieron en conjunto con la temperatura registrada el cálculo de la evapotranspiración mediante el método de Thornthwaite.

Otra variable de las salidas de agua es la escorrentía superficial que corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración (Schosinsky & Losilla, 2006).

En cuanto a la cuantificación de agua, se incorporaron las variables anteriores con las características del suelo y se determinó la recarga potencial al acuífero. De igual forma se estimó la demanda de agua de los habitantes mediante información secundaria lo que permitió identificar la disponibilidad actual de agua y proyecciones para uso de la población.

3.3.4 Interpretación de los resultados de prospección geofísica

Para el modelamiento de la tomografía eléctrica, los datos de campo se procesaron con el programa RES2DINV que utiliza el método de mínimos cuadrados mediante la inversión en dos dimensiones (2D), generando primero una pseudosección de las resistividades aparentes con los datos de campo (Gráfico 3) que presenta el error cuadrático medio, a partir de esta, seguidamente se genera una pseudosección de resistividades aparentes calculadas (Gráfico 3b), para finalmente generar la sección de resistividades del modelo invertido (Gráfico 3c). Posterior a la inversión de los perfiles, se utilizó el programa Erigraph para el diseño estético del modelo.

En la inversión se usaron parámetros predefinidos, usando el método Gauss-Newton para calcular la matriz de sensibilidad en todas las interacciones.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

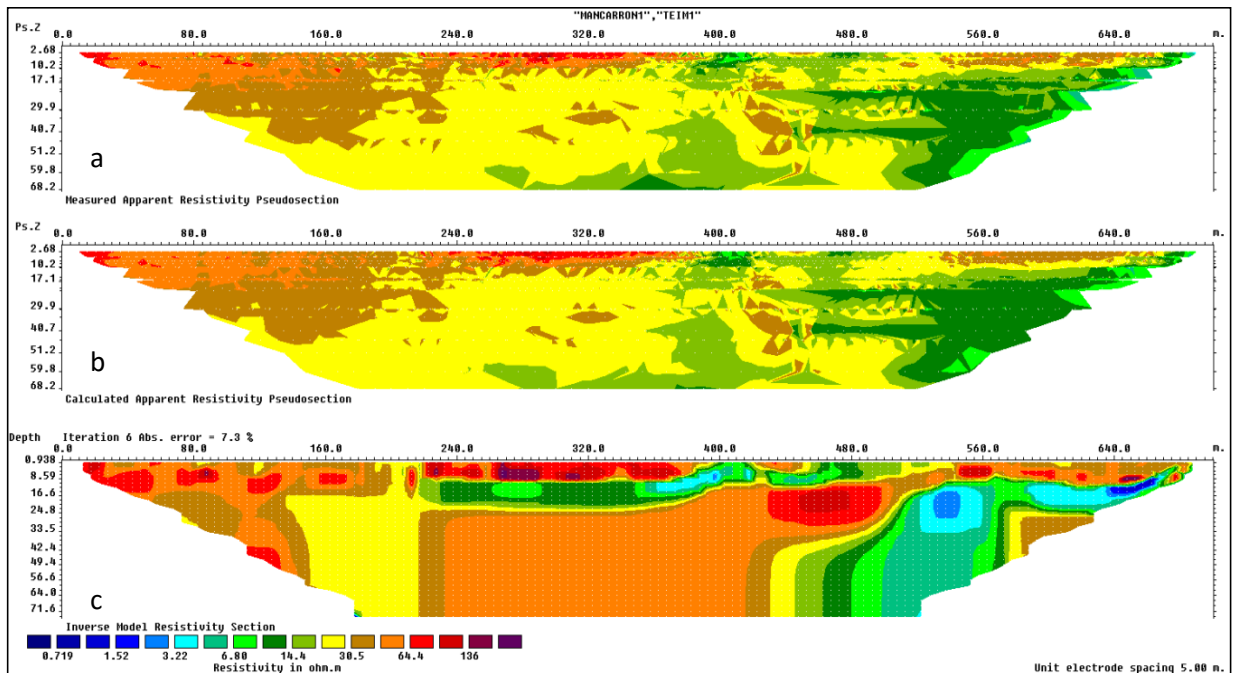


Gráfico 3. Pseudosecciones de prospección geofísica TEIM1- El Refugio.

Las imágenes de TE muestran la distribución en dos dimensiones de la resistividad eléctrica representados en una escala de colores que es característica y específica de cada perfil, aunque puede modificarse en rangos y tonalidades según la información geológica, geofísica y litológica disponible. Esta gama de colores representa los valores de resistividad de las formaciones en el subsuelo (Aracil, 2002).

Para mayor facilidad en la interpretación se hizo una escala única de resistividades eléctricas para la Isla Mancarrón. La escala de los rangos de resistividad de cada perfil es uniforme, el análisis se efectuó de izquierda a derecha. La gama de colores se definió por el rango de resistividades que corresponden al material hidrogeológico del subsuelo (Tabla 11). En este sentido, las tonalidades azules se asocian a materiales arcillosos húmedos (con flujo de agua subterránea muy bajo), los tonos verdes se asocian con materiales arenosos no compactos (con flujos de agua subterránea), los tonos amarillos se asocian con zonas fracturadas (con flujos de agua subterránea) y los tonos naranja a rojos intensos se asocian con rocas compactas (con flujo de agua subterránea muy bajo).

Tabla 11. Interpretación de las resistividades eléctricas en los perfiles de tomografía de Isla Mancarrón.

Resistividad eléctrica (Ohm-m)	Interpretación geológica	Tonalidad
0-17	Arcillosos húmedos (poco flujo de agua subterráneo, baja transmisividad).	Azules
17-39	Arenosos no compactos (con flujos de agua subterránea significativo), acuífero.	Verdes
39-87	Zonas fracturas (fallas y fracturas).	Amarillos
87- <150	Rocas compactas del tipo basalto.	Naranja a Rojo intenso

De la integración de toda la información generada en el campo, se elaboró el modelo conceptual incluyendo marco geológico, geofísico e hidrogeológico para la identificación del medio hidrogeológico de la isla. De igual manera se seleccionaron los posibles sitios para perforación de pozos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de datos, estos se organizaron de acuerdo a los objetivos planteados en la investigación. Inicialmente se describen los componentes meteorológicos de la isla con datos obtenidos de pluviómetros instalados y de la estación climática de San Carlos con el propósito de describir de manera general las características propias de la isla.

Posteriormente se describen características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, en el cual se realizó un análisis mediante la geología, geomorfología, red hídrica y piezometría, provenientes de los datos obtenidos en campo. De igual manera se detallan los resultados y análisis producto de la prospección geofísica que permitió identificar los estratos y discontinuidades del subsuelo, que describen espesores y profundidades de los estratos no permeables y permeables (acuíferos) en las comunidades y zona oeste de la isla. Basado en toda la información previamente analizada, se elaboró el modelo conceptual de la isla, que permitió conocer la dinámica del acuífero y sus características.

A continuación se detalla el potencial hídrico de la isla, para el año hidrológico 2013-2014, obtenido de los datos de campo. Como parte del análisis se detallan la oferta y demanda del acuífero en tres escenarios: estación seca durante el fenómeno de El Niño; para un período histórico de 10 años (2002-2012), con datos de estación meteorológica de San Carlos; y escenario moderado de cambio climático presentados por INETER.

Por último, se seleccionaron sitios posibles para perforar pozos en seis sitios en la isla, como alternativa de aprovechamiento sostenible del recurso.

4.1 Componentes meteorológicos

a) Precipitación

Para obtener los registros de precipitación local durante el ciclo hidrológico 2013-2014, se obtuvieron registros a partir de los 5 pluviómetros instalados en las

comunidades y en el área protegida de la isla. El registro se mantuvo diariamente por los responsables de cada comunidad y los reportes fueron obtenidos en cada gira de campo.

Los resultados de los pluviómetros, registraron una precipitación promedio anual para este período es de 111.87mm. Los valores máximos registrados de precipitación se reportan en junio y julio con 267mm y 228mm respectivamente, coincidiendo con la época lluviosa. Los valores mínimos registrados corresponden a 14.1mm (marzo 2014) coincidiendo con el período seco, el cual se inicia en el mes de noviembre (Gráfico 4).

El fenómeno conocido como la canícula, ocurre entre los meses de julio y agosto, por lo que se observa un descenso en los niveles de precipitación; sin embargo, se observa que la precipitación siguió disminuyendo en los meses consecutivos: lo cual se puede atribuir al fenómeno de El Niño, el cual se caracteriza por fuertes sequías que inciden en una variación climática sobre el ciclo hidrológico.

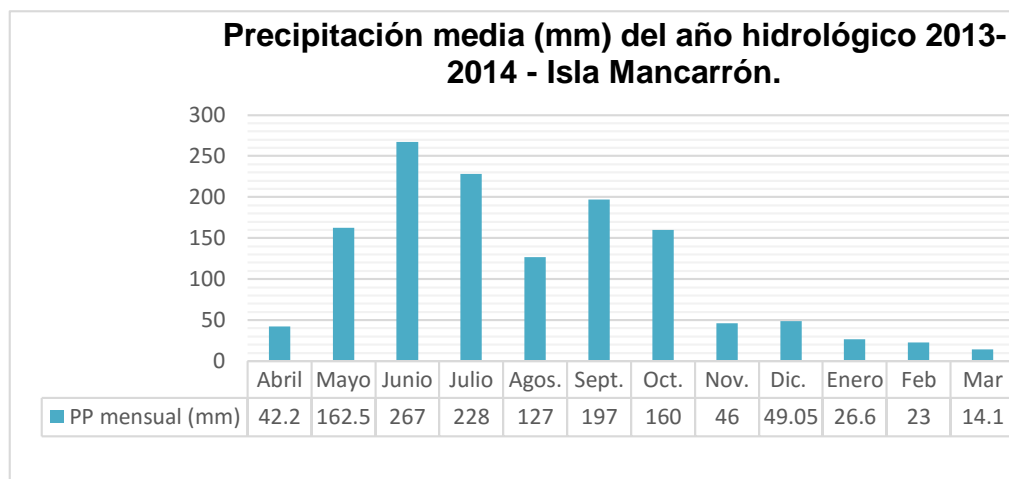


Gráfico 4. Datos de precipitación media en el período 2013-2014, obtenidos de medición en pluviómetros instalados en Isla Mancarrón.

Para el análisis de proyección de recarga potencial del acuífero durante un período lluvioso se utilizaron los registros históricos del 2002-2012 provenientes de la estación San Carlos. La precipitación máxima que ellos reportan es de 340 mm mientras que en nuestro estudio fue de 228 mm. En cuanto a la precipitación

mínima, INETER reporta 31 mm y lo medido en esta investigación fue de 14.1 mm (Gráfico 5).

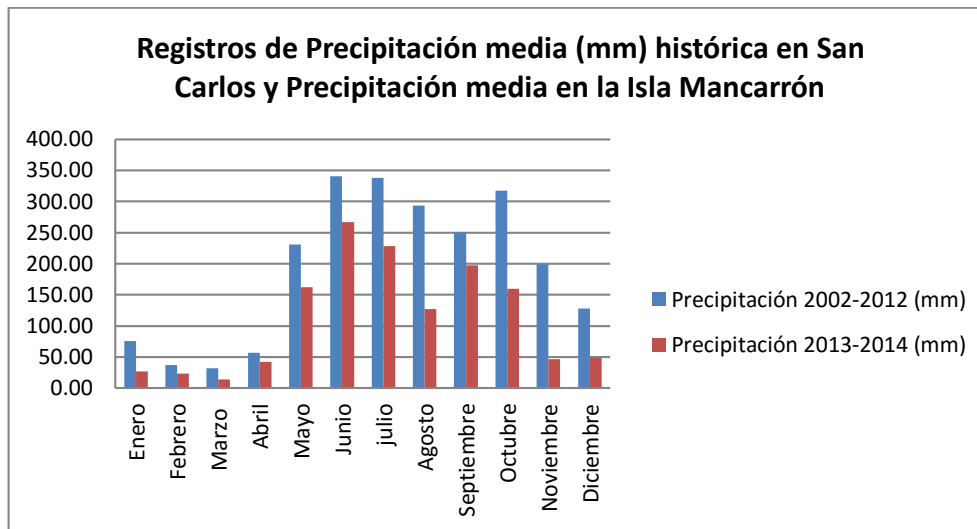


Gráfico 5. Registros de Precipitación media (mm) histórica en San Carlos y Precipitación media en la Isla Mancarrón.

En este período, la precipitación anual es de 1342.45 mm que refleja un marcado déficit de lluvia en comparación a la ocurrida en periodo 2002-2012, con 2298.76 mm (Estación meteorológica San Carlos).

b) Evaporación

La evaporación producto de las condiciones atmosféricas del sitio se utilizó para el cálculo de la evapotranspiración en el balance hídrico de suelos.

Los datos obtenidos de la Estación San Carlos, suministrados por INETER, registraron para el período 2013-2014, los mayores niveles de evaporación en marzo y abril con 169.6mm y 147.4mm, respectivamente. Los niveles menores se reportaron en 76.4mm en julio y de 85.8mm en diciembre coincidiendo con la época lluviosa (Gráfico 6).

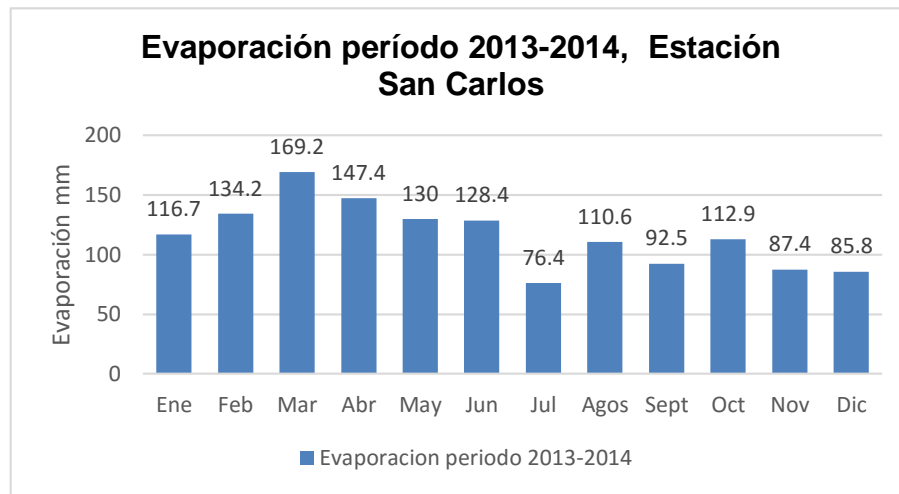


Gráfico 6. Registro de Evaporación en mm, de la Estación San Carlos para el período 2013-2014.

En el estudio de diagnóstico de la cuenca Río San Juan elaborado por MARENA en 1997, se determinó la evapotranspiración de cultivos característicos de esta cuenca, incluyendo el Archipiélago de Solentiname para el periodo 1997 utilizando el método de Blaney & Criddle. La evapotranspiración de los cultivos es referido al volumen de agua que se evapora producto de la transpiración de las plantas. En la Isla de Mancarrón se siembran maíz y frijoles para autoconsumo y comercio con el municipio de San Carlos, lo cual influye en el volumen de agua que infiltra al acuífero.

El cultivo que presenta mayor evapotranspiración es el maíz, con rangos de 118.39mm y 147.11mm (febrero–mayo), en el caso del frijol el rango se encuentra entre 111mm y 137.92mm, en los mismos meses del año. (Tabla 12).

Tabla 12. Evapotranspiración del cultivo de frijol y maíz para el año 1997, mediante método Blaney & Criddle, cuenca Río San Juan.

Mes	Coficiente de Cultivo	ETP (mm) Frijol	Coficiente de cultivo	ETP (mm) Maíz
Enero	0.75	119.14	0.8	127.09
Febrero	0.75	111	0.8	118.39
Marzo	0.75	128.5	0.8	137.07
Abril	0.75	129.6	0.8	138.24
Mayo	0.75	137.92	0.8	147.11

Junio	0.75	131.69	0.8	140.46
Julio	0.75	134.12	0.8	143.07
Agosto	0.75	132.61	0.8	141.45
Septiembre	0.75	125.61	0.8	133.99
Octubre	0.75	125.8	0.8	134.19
Noviembre	0.75	118.33	0.8	126.22
Diciembre	0.75	118.38	0.8	127.34

c) Temperatura

El registro de la temperatura (Gráfico 7) se obtuvo para el ciclo hidrológico 2013-2014 y también de los registros históricos del periodo del 2002-2012, datos utilizados para las proyecciones de la recarga potencial del acuífero.

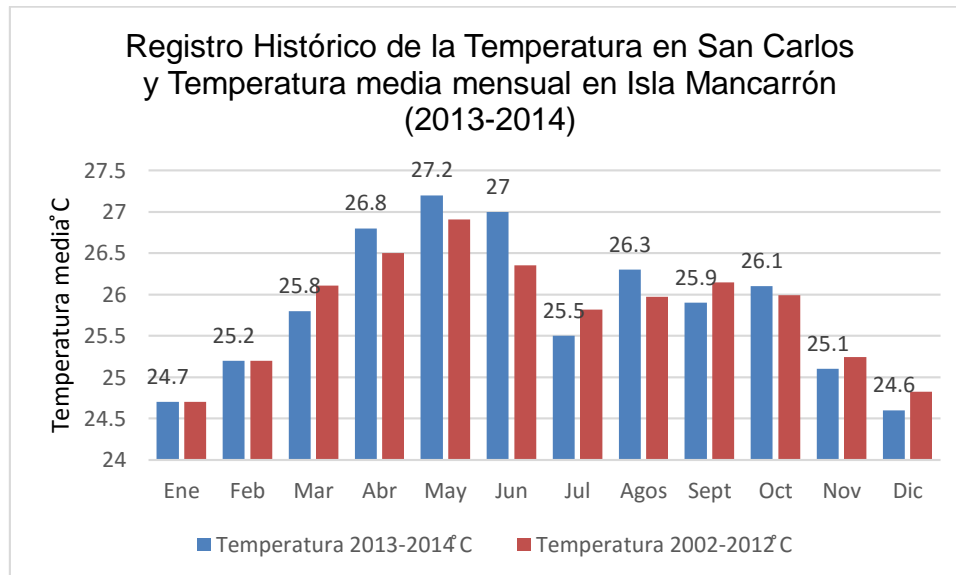


Gráfico 7. Registros de Temperatura para Isla Mancarrón (2013-2014) y datos históricos (2002-2012).

Durante el fenómeno El Niño se dio un ligero aumento de la temperatura con respecto a los registros históricos del 2002-2012, reportándose la mayor temperatura de 27 °C con respecto a la histórica de 25.5 °C.

4.2 Geología local

El tipo de roca predominante en la isla, son las correspondientes al Grupo Coyol Superior, donde las unidades encontradas son basalto, aglomerado y aluvial (Anexo

3). El Grupo Coyol, se divide en dos sub grupos: Coyol Superior y Coyol inferior. El primero, subdividido en las formaciones basáltica aglomerática, toba e ignimbrita riolita y en la Formación lava y aglomerado superior. Este grupo está separado del Coyol Inferior por una ligera discordancia angular: y está conformado por ignimbritas, lavas y tobas intercaladas fueron depositadas como capas horizontales ligeramente inclinadas, dando origen a las mesetas y cuevas escalonadas, con escarpes verticales que constituyen un rasgo geomorfológico muy particular.

La actividad volcánica es característica del periodo Mioceno superior y Plioceno inferior.

Los suelos residuales están constituidos por un material arcilloso nodular no consolidado algo laterítico.

Las Unidades del Grupo Coyol encontradas en la Isla Mancarrón son:

- **Basalto:** Es una roca ígnea volcánica de color oscuro, de composición máfica, rica en silicatos de magnesio y hierro. Suelen tener una textura porfídica, con fenocristales de olivino, augita y plagioclasa y una matriz cristalina fina.

Se encuentra en abundancia en la isla como basalto-andesítico. En los puntos explorados se encuentra las rocas basálticas mayormente como bloques subredondeados, de igual manera se observan en las quebradas y cauces.

Debido a la forma en cómo se observa el basalto en las partes bajas, este se encuentra aflorando en las partes altas de la isla, de donde son erosionadas, transportadas y depositadas en la partes bajas y cauces de la isla.

De la roca basáltica predominan las plagioclasas alteradas y biotita. De igual manera se observó escoria volcánica representada por vesículas de degasificación, especialmente en las partes altas. Su espesor es de 220m y forman cerros escarpados con pendientes de moderadas a inclinadas y representa las mayores alturas en la isla.

La roca basáltica de la isla presenta características compactas con poca porosidad y es el basamento principal de la geología de la isla.

- Aglomerado: Es una roca ígnea volcánica formada casi totalmente de trozos angulares o redondeados de lava, de variadas formas y tamaños; están asociados con los flujos de lava que son expulsados durante las erupciones volcánicas.

La Formación basáltica aglomerática, es la mejor definida en la isla, ya que cubre grandes extensiones; con densos flujos en disposición horizontal, de grandes espesores y relieve en mesas. Estas rocas se encuentran falladas y fracturadas; algunas ya están cementadas, pero la mayoría de ellas son fallas jóvenes dando lugar a una permeabilidad secundaria.

En la Isla Mancarrón se logran observar afloramientos de hasta 2 metros de altura en las partes bajas y zona costera de la isla, conformada por fragmentos redondeados de basalto, basalto andesítico con matriz de ceniza color gris oscuro, variando desde granos de arena gruesa hasta bloques métricos, en ocasiones se podían observar fragmentos de lava porosa, con un espesor aproximado de 80 m.

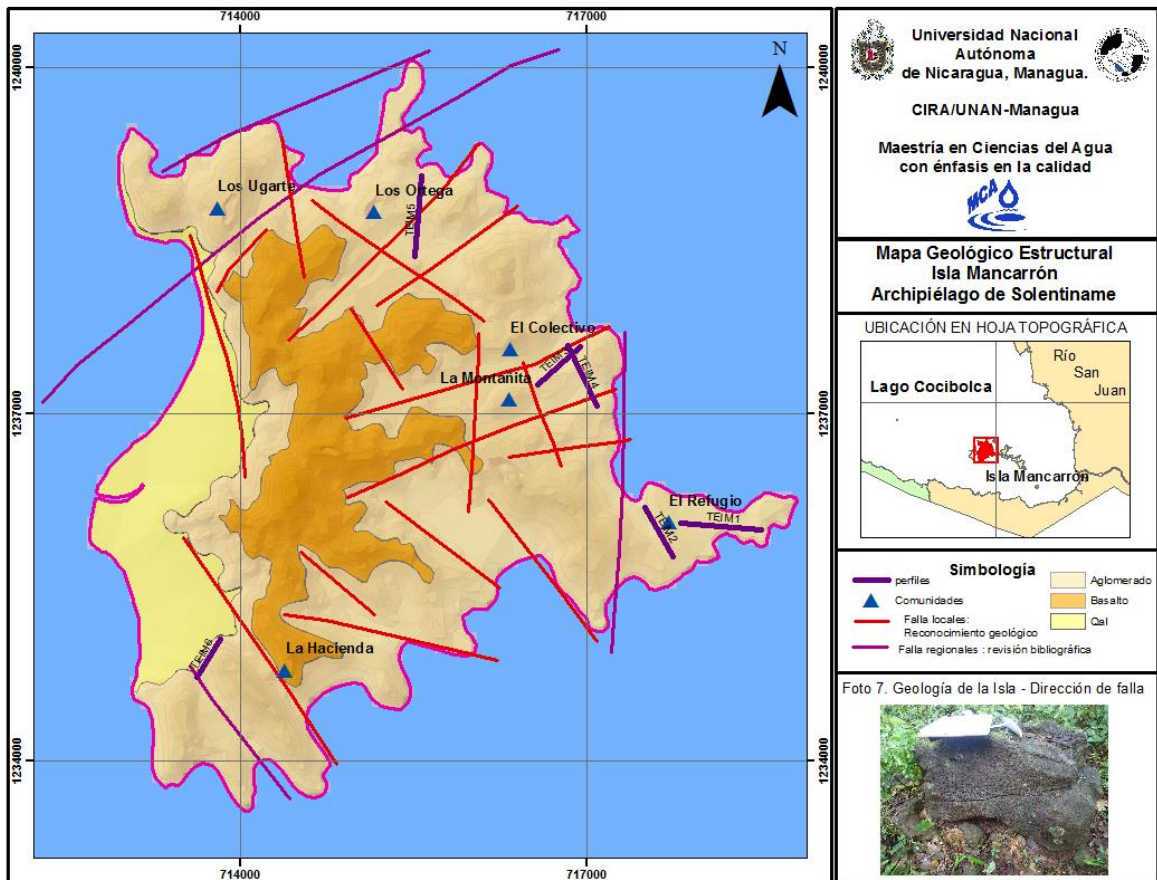
- Suelos residual aluvial: Se encuentra en el lado oeste de la isla. Está representado por terrenos no consolidados formados por el arrastre de sedimentos e inundación del lago. La granulometría se encuentra en el rango de limos y arcillas que se encuentran saturadas.

Fallas y fracturas de la isla

Se determinaron 10 fallas dentro de la isla, con una dirección preferencial NE-SO, encontrándose sitios con la presencia de fracturamiento, propiciando la filtración del agua hacia el subsuelo dando origen a una permeabilidad secundaria (Mapa 9).

El mapa de provincias geológicas de Nicaragua, elaborado por INETER (2009), en el sector suroeste del Lago Cocibolca, por la Isla Mancarrón atraviesa la Falla de Hess (estructura regional) en el sector norte, teniendo una influencia tectónica en la geología del lugar.

Se encontraron dos espejos de fallas en la comunidad El Colectivo, cerca de la zona de cultivos, contribuyendo a una mayor recarga del acuífero durante los eventos de precipitación. El sistema de fallas y fracturas de la isla, propicia mayores condiciones de infiltración en las zonas de recarga hídrica.



Mapa 9. Mapa geológico- estructural de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.

4.2.1 Geomorfología

La geomorfología se caracteriza por ser de de cuevas y mesas formadas por lavas y horizontes de ignimbrita, identificándose tres unidades geomorfológicas:

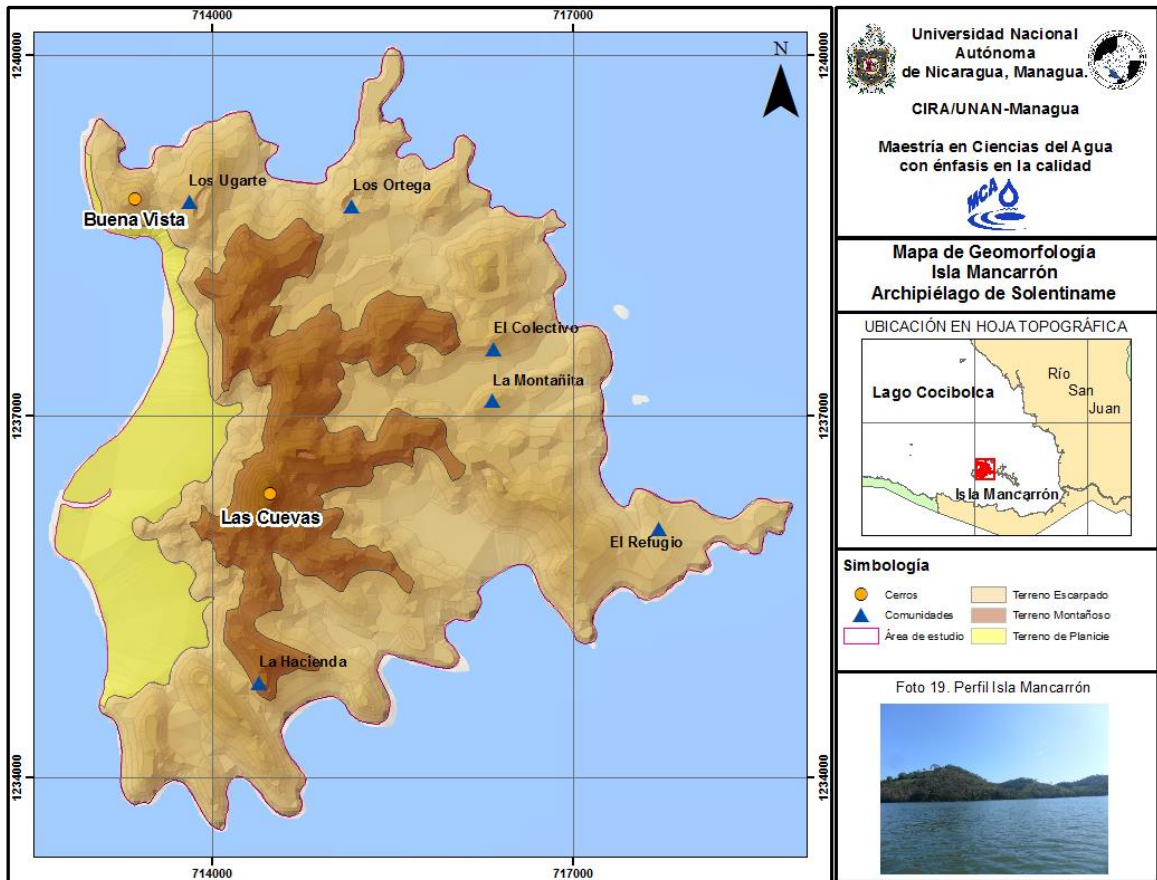
- Planicies lacustres del Cuaternario reciente (valle coluvial), con pendientes menores al 8%, sujetas a inundaciones frecuentes.
- Colinas volcánicas del Terciario, con pendientes menores del 75°. Se hayan situadas en bloques montañosos redondeados y escarpados.

- La zona intermedia: presenta suelos ondulados a escarpados, con pendientes hasta 50°, moderadamente profundos con textura franco arcillosa en la superficie y arcillosa en el subsuelo, ligeramente pedregosos a muy pedregosos en la zona central.

Las mayores elevaciones en el área corresponde a las crestas volcánicas que generan afloramientos rocosos tales como el cerro Las Cuevas con 256 msnm y el cerro Buena Vista con 145 msnm ubicado al centro y Norte de la Isla Mancarrón, respectivamente. En el sector Sur y Suroeste ocurren diferentes domos y/o montículos (complejo de montículos dispersos), cuyas elevaciones oscilan entre 160 y 180 msnm.

La isla presenta un relieve bajo de mesas y cuevas formadas por lavas y horizontes de ignimbrita, con pendientes inclinadas que oscilan entre el 30° y 90°. En el Oeste, las alturas disminuyen de manera abrupta desde los 250 msnm hasta pendientes mínimas; aquí se desarrolla una planicie a nivel del lago (humedal) rellena por sedimentos aluviales y lacustres con una superficie aproximada de 4 km², la cual es inaccesible durante la época lluviosa por ser un área de inundaciones (Mapa 10).

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.



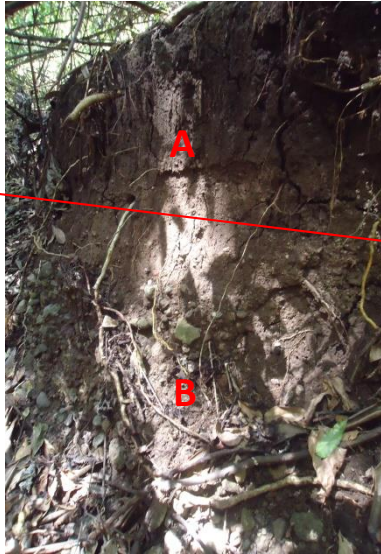
Mapa 10. Mapa geomorfológico de la Isla Mancarrón.

Las partes depresionales de la isla son planicies lacustres de origen Cuaternario, ubicadas en la zona Oeste, con drenaje pobre e inundaciones frecuentes y prolongadas durante la época lluviosa.



Foto 20: Zona oeste de la Isla, planicie de sedimentos aluviales y lacustres.

Durante el reconocimiento geológico, se identificaron diferentes estratos (Foto 21) que constituyen el subsuelo de la isla, estos son:



Estrato A: conformado por fragmentos de rocas redondeados, cementados, con suelo arenoso-arcilloso, espesor 0.90 m.

Estrato B: corresponde a suelo arcilloso en la que se observa en la parte superior una capa rojiza por presencia de materia orgánica con espesor de 1.20 m.

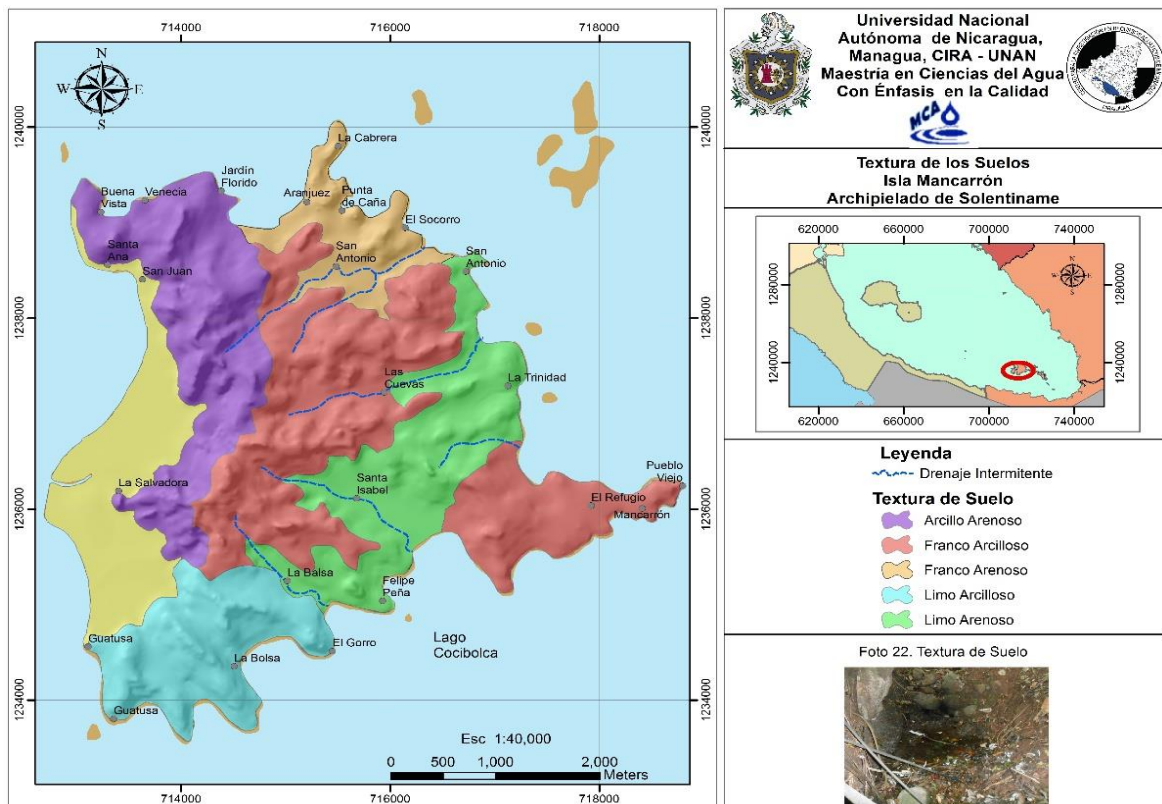
Foto 21. Corte estratigráfico de la Isla Mancarrón. Coordenadas 1236595N, 713929E

En su parte intermedia, la isla presenta suelos ondulados a escarpados con pendientes de 4 - 50° de textura franco arcillosa y arcillosa; ligeramente pedregosos. En las crestas volcánicas hay presencia de afloramientos rocosos con relieve escarpado y en la parte baja se encuentran las planicies lacustres con inundaciones durante la época lluviosa.

4.2.2 Suelos y tipo de suelo

La edafología de la isla está conformada por el **grupo molisol** característico de suelos de desarrollo joven, con texturas francoarcillosa, arcilloarenoso, limos y arcilla, entre otros. El grupo molisol está conformado por suelos minerales con estado de desarrollo incipiente, joven o maduro, de drenaje natural muy pobre, con un horizonte superficial (epipedón móllico) de color oscuro, rico en humus, bien estructurado, suave en seco y un subsuelo de acumulación de arcilla aluvial. Son característicos por tener horizontes de suelos cargados de arcilla, de poco profundos a muy profundos, fertilidad de baja a alta; originados de depósitos aluviales y lacustres, de sedimentos de origen volcánico (Reyes, 2010).

En el sector Oeste predominan texturas de suelo arenoso arcilloso cerca del humedal y franco arcilloso en el centro de la isla, donde hay predominancia de bosques en estado natural. En las comunidades ubicadas en el sector Este de la isla, cerca de las costas, la textura varía de franco arcilloso a franco arenoso presentando mayores condiciones de permeabilidad (Mapa 11).



Mapa 11. Mapa de clasificación de textura de suelo Isla Mancarrón.

4.2.3 Uso actual del suelo

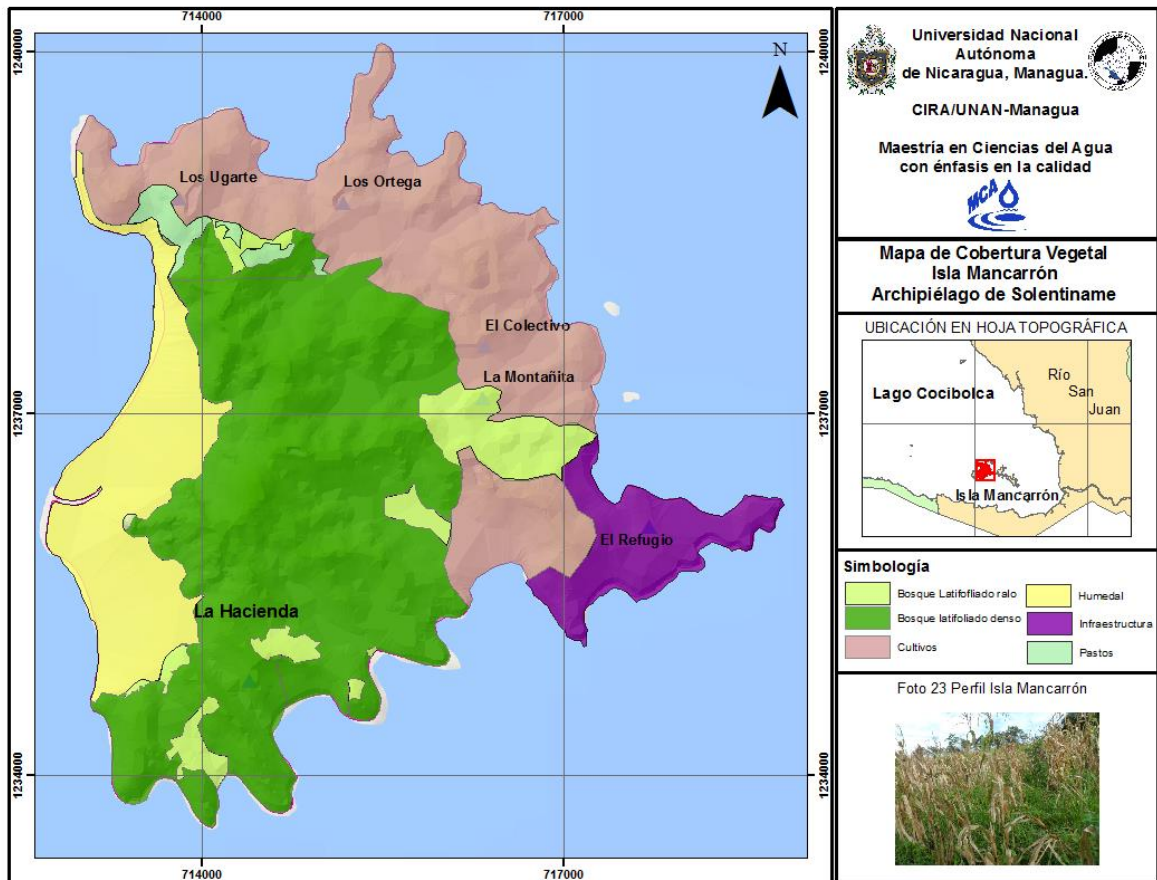
De acuerdo al Plan de Manejo Solentiname (MARENA, 2010): existen un total de 66 productores que cultivan un total de 209 Mzs; principalmente frijol rojo con un 54%, maíz con un 31.6%, arroz un 12.9% y plátano 1%. En la Isla Mancarrón el consumo de agua para los cultivos proviene principalmente de la precipitación y en algunos casos es agua del lago.

En la isla predominan las áreas de bosque natural y en las zonas aledañas a las comunidades se cultivan de manera tradicional maíz y frijol que son comercializados en el municipio de San Carlos. El área de cultivos se encuentra desprotegida porque

los agricultores hacen uso de agroquímicos sin medidas de conservación, contribuyendo a la reducción de la infiltración de agua. En menores cantidades se cultiva el plátano, yuca, aguacate, ayote, frutas y cítricos para consumo personal en las zonas boscosas de la isla.

Como parte del uso del suelo, existe una zona clasificada como un humedal palustrino en el extremo Oeste de la isla, en buen estado de conservación. El humedal actúa como zona de amortiguamiento para la Reserva Los Guatuzos, de alta importancia ecológica. Dentro del humedal existen tres estratos de vegetación: herbáceo, arbustivo y arbóreo.

La isla está caracterizada por poseer bosque secundario en regeneración; específicamente en la hacienda La Salvadora. Dichos bosques proveen de protección a las zonas hídricas y acuíferos de la isla. El tipo de suelo de la isla propicia condiciones para un tipo de vegetación boscosa y cultivos con técnicas de conservación de suelo.



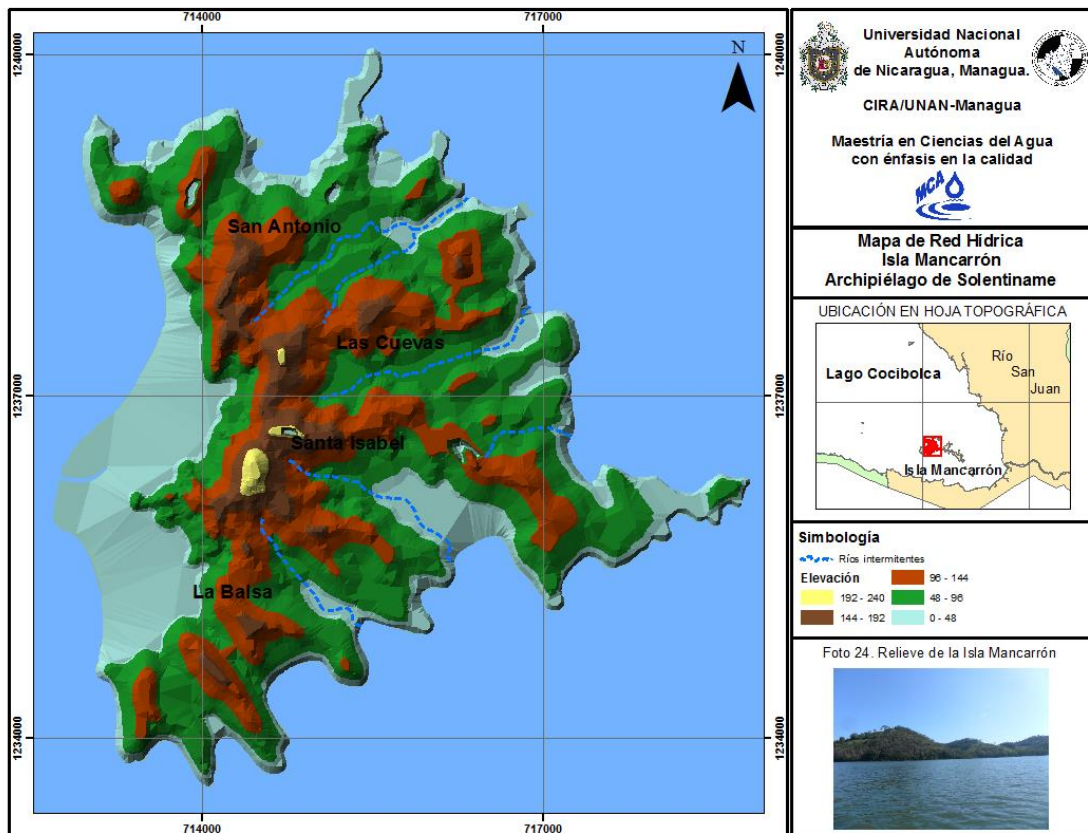
Mapa 12. Mapa de cobertura vegetal de Isla Mancarrón.

4.3 Hidrología

En cuanto a la red hídrica de la isla, las formaciones geológicas de la misma, propician las condiciones para la conformación de un sistema de drenaje de orden 2, con ríos intermitentes durante la época lluviosa que drenan directamente hacia el lago. Los cauces son de poca longitud y profundidad, presentando pendientes de alta a media conforme descargan al Lago Cocibolca. Entre los principales ríos se encuentra San Antonio, ubicado en el extremo Este de la isla con una longitud de 2.43 km y una pendiente media de 30°; la quebrada Santa Isabel con una longitud de 1.84 km y una pendiente media de 23°; y la quebrada Las Cuevas que drena hacia SE con una longitud de 2.19 km y pendiente media 55°.

El río San Antonio, de carácter intermitente, se encuentra sobre aglomerados; los fragmentos que lo forman son escoria y andesita. El tipo de suelo es residual con

fragmentos andesíticos con espesor de 30 cm. Durante la época seca los ríos intermitentes se mantienen sin agua, confirmándose que no existe una conexión con los cuerpos de agua subterráneos de la isla al no tener caudal base; siendo estos alimentados principalmente de la precipitación y escorrentía superficial.



Mapa 13. Mapa de Red Hídrica de Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.

4.4 Hidrogeología

4.4.1 Inventario de objetos hidrogeológicos

Como parte de la caracterización del acuífero, se efectuó un inventario de pozos y manantiales en la isla. En total se registraron cinco pozos excavados y cinco manantiales que corresponden al total de objetos hidrogeológicos presentes en el sitio (Anexo 4). Estos conformaron la red de monitoreo hidrogeológica en la isla.

Los pozos excavados se encuentran irregularmente distribuidos en la isla, encontrándose 4 de ellos en abandono, mismos que anteriormente se utilizaban para consumo de agua para ganado. El pozo PE-5 se construyó en 2000 con el patrocinio de ENACAL y el proyecto Hijos del Agua en la comunidad de El Refugio, actualmente no está funcionando por daño ocasionado en el equipo de bombeo. Esto permitió conocer el nivel estático del agua subterránea sin ningún tipo de interferencia por el bombeo. No obstante, este pozo brindó información sobre la demanda de agua en el sector más poblado de la isla.

Del inventario se obtuvo que el nivel estático del agua (NEA) en la Isla Mancarrón oscila de 2 a 5 metros, siendo mayor en el interior de la isla. El NEA está definido por el acuífero somero y varía según sea época seca o lluviosa.

Por falta de conocimiento del acuífero, no se ha promovido la perforación de pozos en la Isla Mancarrón. El único pozo perforado que hay en el archipiélago, se encuentra en la isla San Fernando; y fue construido por la organización ACRA; pero no se tiene conocimiento del diseño del pozo, ni de la profundidad total del mismo. Se infiere que las características hidrogeológicas en la Isla San Fernando, son similares a las de la Isla Mancarrón.

Los manantiales se ubican en el sector oeste de la isla, en el área protegida del humedal y en la zona alta de la isla. Estas fuentes de agua tienen poca intervención humana, ya que únicamente se utilizan como fuente de agua potable cuando los habitantes realizan actividades de cacería. El nivel piezométrico de los manantiales, así como su caudal, confirman la presencia de un acuífero somero.

De la elaboración del mapa piezométrico en la isla, utilizando los sitios de monitoreo hidrogeológico, se obtuvo la dirección del flujo de agua subterránea, determinándose que en su mayoría fluye hacia el lago (Mapa 14).

4.4.2 Características físico-químicas *in situ* del agua subterránea

Las variables físico-químicas medidas *in situ* (pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial de oxidación-reducción) del agua subterránea,

indican las condiciones a las cuáles se encuentra el agua dentro del acuífero en el momento en que fue captada.

La composición hidrogeoquímica de un agua está en dependencia de la composición inicial del agua que se infiltra y la que va adquiriendo durante todo su recorrido por el medio geológico hasta que es captada a través de un pozo o un manantial.

Se realizaron mediciones mensuales en el periodo de noviembre 2013 a marzo 2014 (Anexo 4). Los parámetros monitoreados durante las visitas de campo fueron OD, % OD, T, pH, CE, SDT mediante sonda multiparamétrica, obteniéndose los siguientes resultados:

- En los pozos la temperatura oscila entre 25.12 °C y de 27.8°C, en cuanto a los manantiales, se obtuvo una temperatura entre 24.4°C y 27.2 °C ligeramente mas baja que el agua proveniente de los pozos. En general la temperatura del acuífero en los diferentes puntos de monitoreo presentó valores similares siendo muy poco variable en los meses medidos.
- En cuanto a los valores de pH obtenidos en los pozos, se encontró que las aguas presentan condiciones ligeramente ácidas (6.09-7.45), atribuidas al contacto con hojarasca y cobertura vegetal que propicia un ambiente reductor en el área sub-superficial. El pozo que presentó valores de pH menores a 6.5 fue el PE-1 ubicado en la comunidad El Colectivo, por las malas condiciones que presentaba En cambio en el pozo PE-5 ubicado en la comunidad El Refugio, el pH resultó con valores más neutros, dando al agua subterránea carácter alcalino (7.38).
- En el caso de los manantiales, el pH oscila entre 6.81 a 7.79, considerado de carácter alcalino que es propio del acuífero de la isla que interactúa con la geología propia de la zona
- Con respecto a las mediciones de la conductividad en los pozos presentaron valores entre 60 y 179 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (marzo y febrero respectivamente). Todos estos tuvieron valores por debajo del límite permisible según las normas. En el caso del PE-5 se encontraron valores más elevados, entre 115 y 585 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y

aunque el promedio se encuentra en 253 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el cual está por debajo del límite establecido pero por el hecho de tener un valor extremo superior a la norma es recomendable una vigilancia particular a este pozo, atribuido a una posible interacción entre el lago y el acuífero, ya que el PE-5 se encuentra ubicado cerca de la zona costera.

- En cuanto a la conductividad eléctrica obtenida en los manantiales, los valores se encuentran en rangos de 239 a 471 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las variaciones de la conductividad en los meses monitoreados es producto de la variación de la temperatura en el medio y la exposición de los manantiales hacia factores externos como hojarasca, cobertura vegetal y desprotección de los mismos.
- Con relación al monitoreo del oxígeno disuelto, se obtuvieron valores entre 1 y 3 mg/L en los pozos. Los pozos presentaron bajas concentraciones de oxígeno que podría ser por el mal mantenimiento de los mismos. Cabe mencionar que las concentraciones de oxígeno eran mayores durante la época de invierno principalmente en Noviembre, atribuido a la precipitación que dinamiza el movimiento del agua en profundidad y contacto con la atmósfera.
- Con respecto a los manantiales monitoreados ubicados en el sector oeste de la isla, el oxígeno se obtuvo entre 0.9 y 5 mg/L, con un promedio de 3.7 mg/L, que es característico de acuíferos somero. Es característico de las aguas subterránea presentar valores bajos de oxígeno, dado las condiciones del subsuelo, su confinamiento y la temperatura del mismo.
- Respecto a las condiciones reductoras y oxidantes del agua, estas son variantes tanto en los pozos como en los manantiales, cambiando de una época a la otra. En los pozos y manantiales se obtuvo valores negativos durante la época invernal e inicios del verano, presentando un ambiente reductor para la interacción de los compuestos en el agua influenciado por las características propias de las precipitaciones. En cambio durante las mediciones efectuadas en febrero y marzo, las concentraciones de redox son positivas dando un carácter oxidante al acuífero de la isla.
- Los sólidos disueltos totales (SDT) relacionados con la conductividad encontrados en cada muestreo en pozos y manantiales fueron menores a 300

mg/ L a excepción del pozo PE-4 que presentó un valor de 411 mg/L. lo que se explica por su mal estado.

A partir del análisis de parámetros de campo obtenidos en el sistema de acuíferos, se observa una ligera variación con respecto al tiempo y espacio, sin embargo los valores no son tan diferentes en el área, por lo cual el acuífero de carácter somero posee características similares en toda la isla.

Cabe mencionar que en la mayoría de los casos los parámetros se encuentran de acuerdo con la norma CAPRE a excepción del pozo PE-1, PE-4, Manantial M4, M5 que sobrepasan algunos rangos, sin embargo con su debida protección y cuidado cumplirían con las normas.

Adicional a la información recolectada en campo en el estudio efectuado por CIRA/UNAN-Managua (2008), en el manantial La Bolsa (M-3) se encontró presencia de coliformes termotolerantes, producto de las actividades humanas que están contribuyendo al deterioro de las fuentes de agua y afectaciones en su calidad. En este estudio, se caracterizó el tipo hidroquímico de las aguas de la isla, siendo los bicarbonatos el ion predominante en el agua subterránea; clasificándose como bicarbonatada-cálcica-magnésica en manantiales ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$), las cuales son aguas jóvenes, de reciente infiltración, características de las zonas de recarga; bicarbonatada-sódica-magnésica ($\text{HCO}_3\text{-Na-Mg}$) y bicarbonatada-sódica-cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$) en la zonas costeras de la isla, producto del contacto con el subsuelo que produce un intercambio químico con las aguas pluviales y característico de una zona de descarga. Basado en la información hidroquímica, se definen los manantiales como zonas de afloramiento del acuífero con aguas jóvenes que drenan sus aguas hacia las zonas costeras al entrar en contacto con la geología de la isla, adquiere un carácter sódico –cálcico y sódico-magnésico.

Con el propósito de conocer algún tipo de similitud entre las condiciones físico-químicas *in situ* de las aguas del Lago Cocibolca y las del acuífero de la isla, se realizaron mediciones de parámetros físico-químicos de campo en las zonas costeras. En el Lago (en los alrededores de la isla) la concentración de oxígeno disuelto se

encuentra en el rango 7.2-8.5 mg/L, característica de los cuerpos superficiales; mientras que las aguas subterráneas registraron valores menores a 5 mg/L (Tabla 13), en concordancia con los valores de aguas en el subsuelo.

Por otro lado, el pH de las aguas del lago es básico (8.3-8.57 unidades de pH), mientras que las aguas en el acuífero registran valores de pH de 6.09-7.98, que van de ligeramente ácidas a neutras, que puede ser producto de la interacción del agua con el material geológico en el que se encuentra almacenada.

En cuanto a la temperatura de las aguas del lago, se obtuvieron valores entre 26 y 27 °C, similares a las registradas en el acuífero; variando la temperatura en las épocas del año.

Tabla 13. Resultados de parámetros físico-químicos de campo en las proximidades de la Isla Mancarrón, en Lago Cocibolca (18/03/2014).

Punto	Coordenadas		Elevación m	pH (unid)	T (°C)	COND μS/cm	OD %	Redo x mv
Límites permisibles CAPRE				6.5-8.5		400		
1	1239990	715012	39	8.5	26.7	148	8.36	95
2	1238319	712885	40	8	26.8	252.92	8.3	97
3	1235000	712810	41	8.4	26.8	251.3	8.57	99
4	1234817	716734	37	7.6	26.9	250.48	8.57	97
5	1288185	717380	42	7.2	27	250.96	8.5	90

Por los valores del potencial de oxidación-reducción, las aguas del lago están en condiciones oxidantes. En cuanto a la conductividad eléctrica, el máximo valor reportado fue de 252.96 μS/cm.

En cuanto a los valores medidos *in situ* en los sitios monitoreados en el lago, los valores de pH, temperatura y conductividad eléctrica se encuentran dentro de los valores recomendados para consumo humano, de acuerdo con la Norma CAPRE (1994).

En el estudio efectuado por CIRA/UNAN- Managua (2008), se encontró presencia de plaguicidas (organoclorados y carbamatos; Tabla 14) en los sitios monitoreados en el lago, a orillas de la isla, lo cual pone en riesgo a la población que consume agua directamente del lago sin previo tratamiento.

Tabla 14. Resultados de plaguicidas organoclorados y carbamatos en aguas superficiales alrededor de Isla Mancarrón (CIRA/UNAN- Managua, 2008).

Punto de Muestreo	Coordenadas		Organoclorados	Plaguicidas Carbamatos (µg/l)			
	N	E	Endosulfan A	Metomil	Aldicarb	Carbofurán	Carbaryl
Refugio Norte	1236142	718337	nd	27.43	1211.29	nd	nd
Refugio Sur	1235698	718104	14.24	nd	1065.84	198.46	29.62
La Salvadora	12344899	716146	nd	nd	317.16	Nd	nd

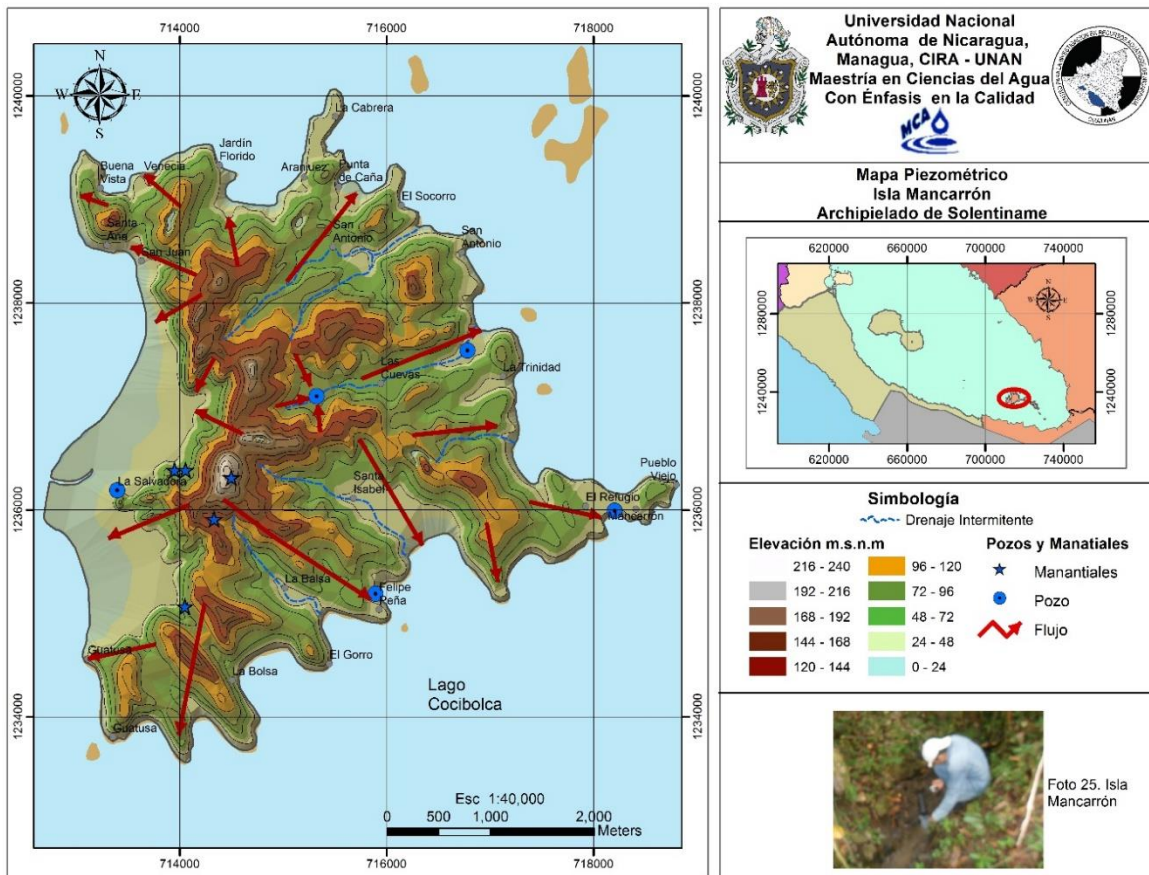
De acuerdo con los resultados obtenidos en los estudios efectuados por el CIRA/UNAN- Managua la calidad del lago no es apta para consumo directo para los habitantes; aunque todavía no se cuenta con una normativa reguladora de todos estos compuestos. Aunque estos compuestos son degradables mediante hidrólisis, se recomienda realizar monitoreo de estos compuestos en otras matrices como peces (en donde se bioacumulan) y en sedimentos (donde se adsorben).

4.4.3 Piezometría de la isla

La piezometría se obtuvo mediante la medición de los niveles estáticos de los objetos hidrogeológicos e información de la topografía de la isla. El flujo refleja dos direcciones principales de escurrimiento subterráneo; en dirección oeste (hacia el humedal, zona de descarga) y en dirección noroeste, noreste y sureste descargando en el lago (Mapa 14). No existe alteración en el flujo de agua por la ausencia de bombeo o explotación del acuífero.

El agua subterránea se mueve principalmente desde las zonas de mayor elevación hacia las zonas de descarga bajo un gradiente hidráulico natural. Su profundidad varía en dependencia de la topografía y época del año. En la zona oeste el nivel de agua se encuentra a 5m, siendo de mayor profundidad en la zona central de la isla.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.



Mapa 14. Piezometría de la Isla Mancarrón.

4.4.4 Caudal de Manantiales

Se aforaron los cinco manantiales ubicados en el sector Oeste de la isla (Tabla 15), durante el periodo noviembre 2013 - marzo 2014. Estos se encuentran sobre roca meteorizada de andesita originando material arcilloso de color gris cerca de ellos. Se localizan a alturas mayores de 75 msnm, considerándose como una zona de afloramiento del acuífero..

Tabla 15. Aforo en manantiales de Isla Mancarrón (noviembre 2013-marzo 2014).

Código del Manantial	Sitio	Elevación (msnm)	Q (l/s)	Q (m ³ /mes)
MN-1	La Guatusa	75	0.021	56.31

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

MN-2	Manantial El Burro	92	0.118	305.96
MN-3	La Bolsa	140	0.091	235.33
MN-4	El Peñón	155	0.087	227.75
MN-5	Cerca del Peñón	96	0.177	459.04
Total			0.49	1284.39

Los aforos en manantiales en el sector oeste de la isla registraron caudales de 56-459 m³/mes (Gráfico 8, Mapa 15) durante la época seca, confirmando la presencia de un acuífero productivo y somero; el cual, en algunos sectores, como el que está cerca de El Peñón, pueden abastecer agua a la comunidad, inclusive en época seca.

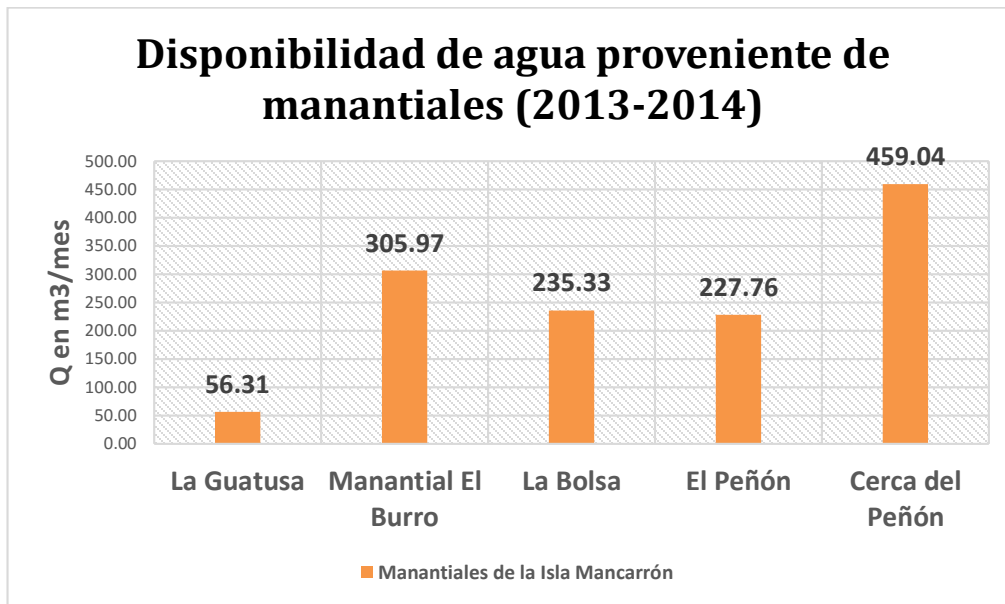
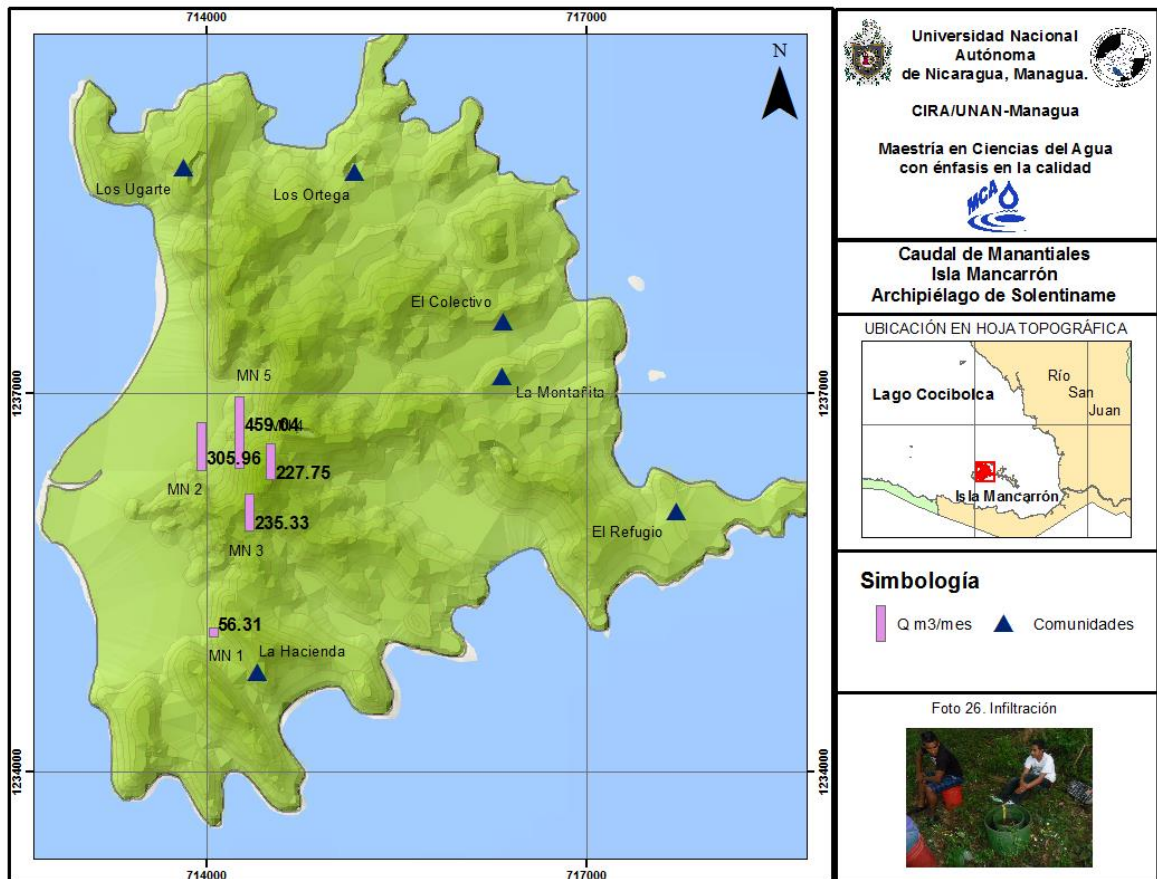


Gráfico 8. Caudal de manantiales durante época seca en Isla Mancarrón.



Mapa 15. Caudal de Manantiales en la Isla Mancarrón

4.4.5 Características hidráulicas del acuífero

Para determinar las características hidráulicas se consideraron cuatro propiedades del acuífero: permeabilidad, gradiente hidráulico, velocidad media del flujo subterráneo y la transmisividad. La información fue tomada del estudio de ACRA (2007) y pruebas de campo.

En cuanto a la permeabilidad de los acuíferos de la Isla Mancarrón, los valores oscilan entre 3-10 m/día dentro de los estratos porosos o a través de las fallas o fracturas de las rocas terciarias (ACRA, 2007) resultando una permeabilidad secundaria, calificándose como un acuífero de regular a bueno.

Con base en los datos geofísicos y litoestratigráfico del suelo se determinó el espesor promedio del acuífero que es de unos 50m, (espesor del sistema de acuíferos en toda

el área de la isla) utilizando una permeabilidad máxima de 10 m/día según el tipo de estrato (dato extraído de estudio ACRA, 2007).

La transmisividad para la Isla Mancarrón es de 100 m²/d obtenido del mapa hidrogeológico de INETER-COSUDE (2003), caracterizando al acuífero fracturado con una productividad de baja a media, con la capacidad de abastecer a nivel comunal.

Tabla 16. Propiedades hidráulicas del acuífero de Isla Mancarrón

Permeabilidad (m/día)*	Transmisividad m ² /d**
3-10	100

* ACRA, 2007

** INETER-COSUDE 2003

4.4.5.1 Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico se obtuvo a través del cálculo de la carga piezométrica de la fuente de agua ubicada en la parte más alta menos la carga hidráulica del pozo ubicado en la parte más baja dividido entre la distancia entre ambos. Se consideraron tres sitios (Tabla 17), para el cálculo del gradiente hidráulico (i), utilizando la fórmula $i = \Delta H / \ell$, el cual resultó de un gradiente hidráulico promedio de 0.06.

Tabla 17. Gradientes hidráulicos del sistema acuífero Isla Mancarrón.

Punto de inicio	Punto final	ΔH (m)	Distancia entre pozos (ℓ en m)	Gradiente Hidráulico (i)
Zona Central	El Colectivo	1523.81	1523.81	0.0289
El Peñón	La Hacienda	1102	1102.00	0.0998
El Peñón	La Salvadora	1809	1809.00	0.0397

Los gradientes se obtuvieron en dirección NE del centro de la isla hacia la comunidad El Colectivo, La Hacienda y sector SE hacia La Salvadora, presentando un gradiente y comportamiento similar en El Colectivo y la Salvadora.

4.4.5.2 Velocidad media del flujo subterráneo

Se realizó una prueba de dilución puntual utilizando el cloruro de sodio (NaCl) como trazador químico, en el pozo PE-5 en la comunidad El Refugio; obteniéndose la velocidad media del agua a diferentes profundidades en dirección al lago Cocibolca.

Para dar inicio con la prueba, se midió la conductividad eléctrica inicial en el agua, la cual resultó ser 585 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Posteriormente se preparó el trazador a una concentración, cuya conductividad eléctrica fuera 100 veces mayor que la del agua del PE-5; así, se preparó una solución de NaCl a una concentración 33 mg/kg, mezclando 4 kg de sal en un bidón con 18 litros de agua; para obtener una concentración 100 veces mayor que el agua natural proveniente del pozo.

$$C_{max} = 100 * C *$$

Donde $C *$: concentración natural de las aguas.

Luego de preparado el trazador, se introdujo la mezcla mediante una manguera en la columna de agua, la cual fue desplazada suavemente para poder mezclarse en toda la columna de agua. Las concentraciones se midieron en un lapso de 8.2 horas hasta que nuevamente el agua del pozo alcanzara su concentración inicial (Tabla 18).



Foto 27. Preparación del trazador.



Foto 28. Medición de la conductividad a diferentes profundidades.

Las mediciones de conductividad se realizaron a diferentes intervalos de tiempo sobre toda la columna de agua obteniéndose datos a diferentes profundidades. A medida

que el tiempo transcurría la conductividad iba alcanzando su nivel inicial en cada estrato.

Tabla 18. Prueba de dilución puntual en el agua subterránea del pozo PE-5, Comunidad El Refugio, febrero 2014.

Profundidad (m)	Intervalo 5 min						
	COND $\mu\text{S/cm}$	COND $\mu\text{S/cm}$	COND $\mu\text{S/cm}$	COND $\mu\text{S/cm}$	COND $\mu\text{S/cm}$	COND $\mu\text{S/cm}$	COND $\mu\text{S/cm}$
superficie	789	591	591	612	639	644	665
0.5	1675	1403	1145	1156	1165	1135	1023
1	3565	3315	2985	2326	2219	2135	2123
1.5	3783	3624	3567	3545	2874	2569	2137
2	2834	2765	2435	2316	2214	1456	1431
	Intervalo 10 min				Intervalo 20 min		
superficie	675	654	648	635	645	589	589
0.5	633	620	654	631	614	614	587
1	1987	1675	1324	1216	987	845	765
1.5	1569	1257	1257	1238	985	823	765
2	1345	1324	1298	1167	976	956	873
	Intervalo 1 h						
superficie	587	588	587				
0.5	587	587	587				
1	588	588	588				
1.5	619	585	585				
2	675	589	589				

Se observa que las concentraciones variaban en las diferentes profundidades a medida que transcurría el tiempo. A nivel de superficie la conductividad alcanzó su nivel natural en un periodo de 1 hora y 50 minutos (valores señalados en color amarillo). En cambio a una profundidad intermedia (1.5m de profundidad) el agua alcanzó su conductividad natural de 585 $\mu\text{S/cm}$ a las 4.10 horas. Los cambios se dieron de manera pausada.

A partir de los datos y a través de la Ecuación No. 21, se obtuvo la velocidad media para cada profundidad.

$$V' = \frac{\pi d}{4t} \ln \frac{C_0}{C} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

V' : velocidad media (m/d)

d = diámetro del pozo (m).

t = tiempo (horas)

C_0 = concentración inicial durante la medición ($\mu\text{S/cm}$)

C = concentración final natural del acuífero ($\mu\text{S/cm}$)

α : coeficiente de rugosidad, se obtuvo un dato teórico de 2, adimensional.

Tabla 19. Velocidad media para cada una de las profundidades de la columna de agua del pozo PE-5.

Profundidad (m)	C_0 ($\mu\text{S/cm}$)	C ($\mu\text{S/cm}$)	Tiempo (h)	Velocidad (m/h)	Velocidad m/d)
superficie	789	589	1.91	0.00279	0.06706
0.5	1675	587	2.25	0.00265	0.06357
1	3565	588	3.25	0.00202	0.04840
1.5	3783	585	4.25	0.00156	0.03747
2	2834	589	3.25	0.00196	0.04697

Para obtener la velocidad media del agua subterránea se obtuvo un promedio de toda la columna de agua que resultó de 0.05269 m/d para el sector de El Refugio. En cuanto a los otros sectores, se definió la velocidad media del flujo subterráneo mediante el gradiente hidráulico (Tabla 20) y el valor de transmisividad de la isla.

Tabla 20. Velocidad media del flujo subterráneo Isla Mancarrón.

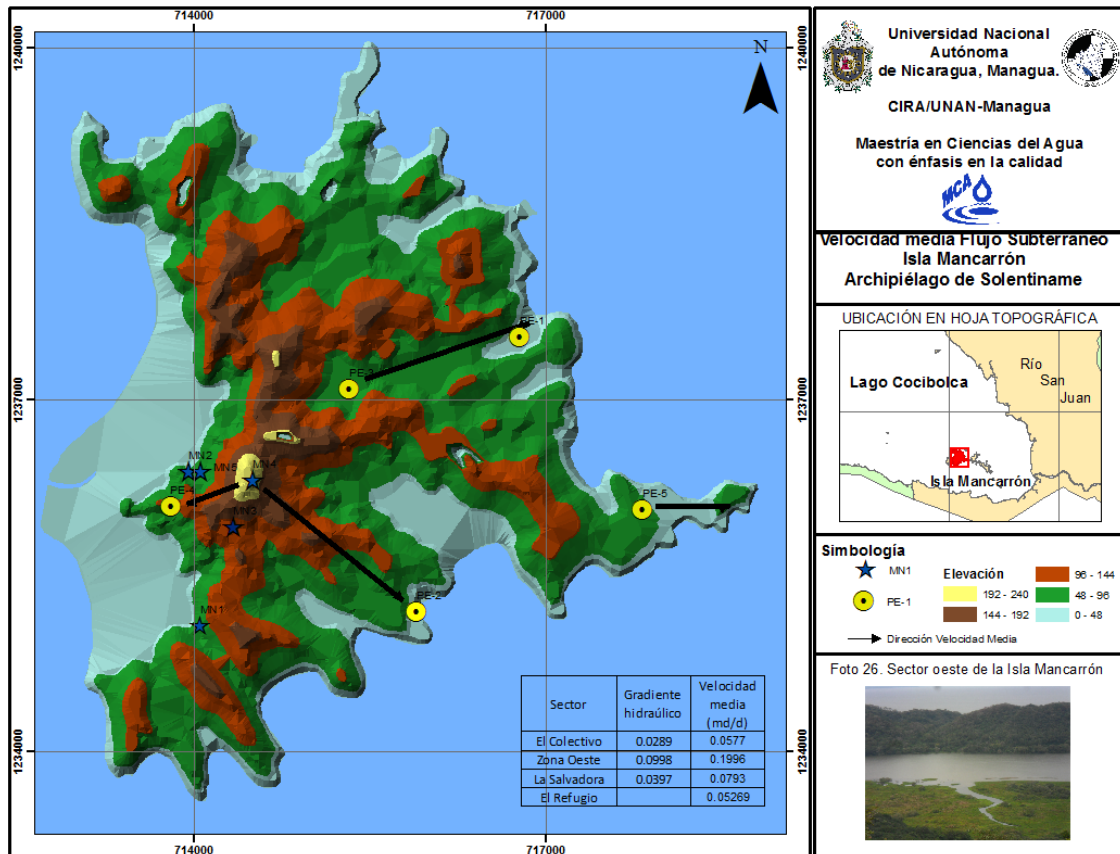
Sector	Espesor del acuífero (m)	Transmisividad* (m^2/d)	Gradiente hidráulico	Velocidad del flujo de agua (m/d)
El Colectivo	50	100	0.0289	0.0577
Zona oeste			0.0998	0.1996
La Salvadora			0.0397	0.0793
El Refugio				0.0526**

*Dato obtenido del Mapa Hidrogeológico de INETER-COSUDE, 2003.

**Dato obtenido de la prueba de dilución.

La velocidad del flujo subterráneo en dirección Este (El Colectivo y El Refugio) presenta el mismo comportamiento, atribuido a la misma textura de suelo para ambas zonas (francoarcilloso). La zona con mayor velocidad de flujo subterráneo y gradiente hidráulico se ubica en el sector Oeste (Mapa 16) de la isla que presenta textura arenosa en sus suelos, donde se ubican los manantiales de la isla, así como

ser característico por pendientes fuertes. Cabe mencionar que el flujo del acuífero descarga en el Lago Cocibolca.



Mapa 16. Dirección del gradiente hidráulico y velocidad media del flujo subterráneo en Isla Mancarrón.

4.4.6 Zonas de recarga del acuífero

Los criterios para definir las zonas de recarga fueron seleccionados mediante la recopilación de datos en campo y factores que influyen en la recarga del acuífero delimitando de esta manera las zonas de mayor relevancia bajo los criterios (MATUS 2008).

Las variables incorporadas en el análisis son: pendiente, uso de suelo (cobertura), tipo de roca (Geología y geomorfología), tipo de suelo (textura y coeficiente de infiltración) y pendiente. Estas variables fueron definidas según las condiciones de la isla y que influyen directamente en la recarga del acuífero.

a) Pendiente de la isla

En cuanto a la pendiente de la isla, las zonas que propician recarga se ubican cerca de las comunidades y del humedal, por ser pendiente casi plana. Las zonas con mayor escorrentía se ubican en el centro de la isla por presentar condiciones de pendientes fuertes, mayores de 40% y se ubican los cerros de mayor elevación con alturas mayores de los 200 m.

b) Tipo de roca

El tipo de roca se estableció con datos de la Geología de la isla, zonas de fractura y permeabilidad. Las zonas de fracturas ubicadas en la comunidad El Colectivo propician mayor infiltración al sistema acuífero y menor infiltración en el área central donde existe altas pendientes y roca basáltica.

c) Según uso de suelo

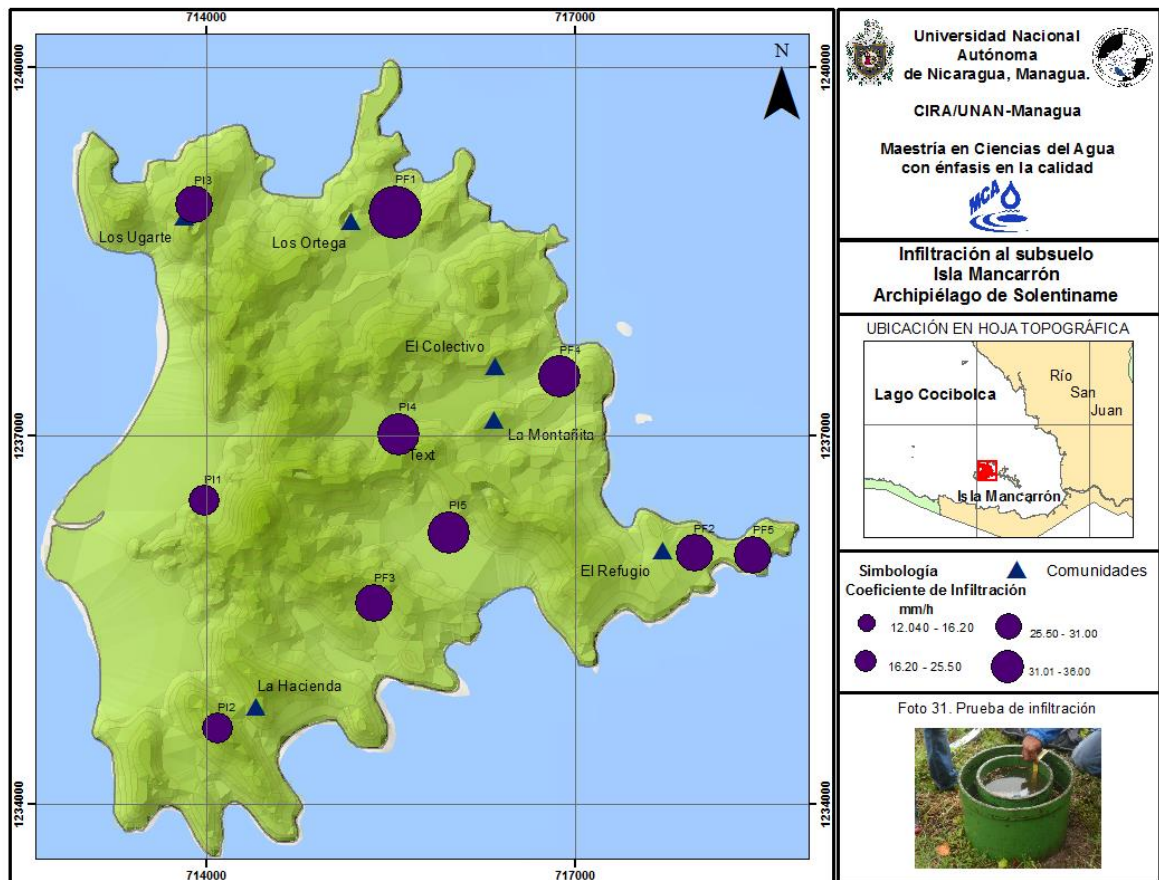
El uso de suelo se evaluó por la cobertura vegetal existente en la isla, siendo más boscosa en el área oeste y de menor densidad en las comunidades donde existen cultivos de maíz, frijoles y frutales.

Por ser una isla con alta presencia de bosques y poca compactación de suelos, se propicia mayor recarga al acuífero, siendo las zonas de poca recarga al acuífero, el humedal y Los Ugarte, que son los sitios de cultivo en la isla.

d) Capacidad de infiltración

El acuífero es recargado principalmente por la precipitación, condicionada por el tipo de suelo y su capacidad de infiltración que es distribuida heterogéneamente.

Durante el levantamiento de campo se realizaron diez pruebas de infiltración mediante el método de doble cilindro y Porchet que permitió identificar la velocidad con que se infiltra el agua, el coeficiente de infiltración (Mapa 17) y la textura del suelo, criterios a incorporarse en el análisis de las zonas de recarga hídrica y en el balance hídrico.



Mapa 17. Coeficiente de infiltración en Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.

La mayoría de los suelos presenta una capacidad de infiltración (F_c mm/h) entre media y alta siendo el menor valor 12.04 mm/h cerca del humedal (PI-1) zona de inundación y saturación de agua; y el mayor con 36 mm/h cerca de las comunidades Los Ortega y El Colectivo, siendo estas últimas áreas con presencia de fracturas.

4.4.6.1 Zonas de Recarga Hídrica

A partir de la integración de los criterios: textura de suelos, coeficiente de infiltración, geomorfología de la isla, pendiente y geología estructural, se seleccionaron 3 zonas de recarga (Tabla 21, Mapa 18), ubicadas en espejo de fallas y fracturas con pendientes moderada. La primera zona se ubica en la comunidad El Colectivo, área de cultivo y con presencia de espejo de fracturas que propician permeabilidad secundaria.

La segunda zona de recarga se ubica cerca de la zona central, en La Salvadora, área altamente boscosa y protegida. La tercera zona se ubica en la comunidad Los Ortega con pendientes promedios.

Tabla 21. Descripción de las zonas de recarga en Isla Mancarrón.

Sitio	Textura	Fc(mm/h)	Geomorfología	Pendiente (Schosinsky & Losilla, 2006).	Geología estructural	Zonas de Recarga
Los Ugarte	Franco-arcilloso	21.56	Escarpado	Promedio	Zona de fallas	Media zona de recarga ZR3
La Guatusa	Limo-arcilloso	16.20	Montañoso	Fuerte		
El Refugio 1	Franco arenoso	25.50	Escarpado	Promedio		
El Refugio 2	Franco arenoso	24.50	Escarpado	Promedio		
Humedal	Areno arcilloso	12.04	Plana	Algo plana		
Los Ortega-Colectivo	Franco arcilloso	36.00	Escarpado	Promedio	Zona de Fallas	Alta recarga ZR1
El Colectivo	Franco arcilloso	31.00	Escarpado	Promedio	Zona de Fallas	
La Salvadora	Limo arenoso	30.64	Escarpado	Promedio	Zona de fallas	Media zona de recarga ZR2
Zona Central	Franco arenoso	30.36	Escarpado	Promedio	Zona de Fallas	
La Guatusa 2	Limoarcilloso	23.40	Escarpado	Fuerte		

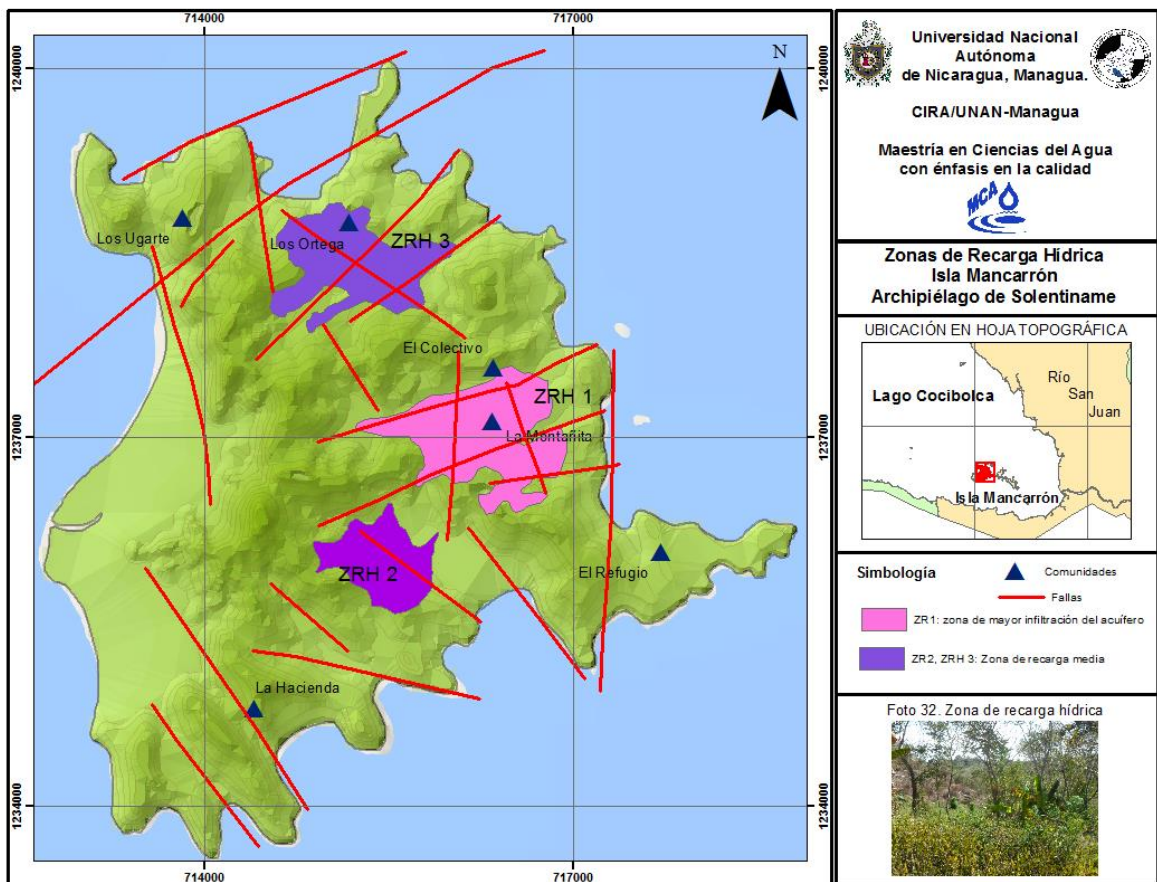
La zona de mayor recarga ZR1 ubicada entre la comunidad Los Ortegas presenta una capacidad de infiltración promedio de 33 mm/h, con relieve escarpado y espejo de fallas; se encuentra cerca de los cultivos y no tiene las condiciones naturales de protección por la alta actividad antropogénica.

Con respecto a la ZR2 ubicada cerca de la zona central tiene una capacidad de infiltración de 30.36 mm/h se encuentra en la zona boscosa de la isla, protegida por condiciones naturales y cobertura vegetal. Misma situación con la ZR3 ubicada en el área protegida cerca de la comunidad Los Ortega con una capacidad de

infiltración de 21.56 mm/h. Las zonas ZR2 y ZR3 se definieron como zonas de recarga media y las ZR1 como la de mayor infiltración al acuífero.

Las zonas de recarga hídrica se mantienen protegidas y en condiciones naturales, debido a la poca actividad antropogénica. A excepción de la comunidad El Colectivo donde hay presencia de cultivos en áreas cercanas que podrían estar afectando la recarga del acuífero.

Las áreas de descarga basados en la geomorfología se ubican en los sectores de las comunidades de El Refugio, La Hacienda, Los Ugarte y la zona costera del humedal palustrino en dirección del flujo subterráneo que el acuífero descarga directamente al Lago Cocibolca y no hay presencia de intrusión directa según datos geofísicos, dado que es impermeabilizado por una capa de basalto.



Mapa 18. Mapa de zona de recargas hídricas en Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.

4.5 Potencial hídrico subterráneo de la Isla Mancarrón.

4.5.1 Balance hídrico de suelos.

Para conocer la cantidad de agua subterránea de la isla y para desarrollar una estrategia de aprovechamiento sostenible, se utilizaron los siguientes elementos: recarga potencial del acuífero, estimada a partir de los parámetros meteorológicos (precipitación y evapotranspiración potencial); infiltración directa de la precipitación (recarga); propiedades físicas del suelo; infiltración desde ríos intermitentes o desde el lago; descargas del sistema y demanda.

La recarga potencial evaluada en el balance hídrico de suelos a través del método de Schosinsky & Losilla (2006), muestra que en las zonas de recarga el volumen de agua que infiltra y alimenta al acuífero es principalmente de la precipitación. En el balance hídrico de suelos se integran los siguientes componentes:

Recarga por infiltración -escorrentía subterránea – caudal de manantiales – extracción de consumo = disponibilidad hídrica

4.5.1.1 Infiltración directa de la precipitación a través del terreno.

➤ Parámetros meteorológicos

Precipitación

A partir de datos de lluvia obtenidos de los cinco pluviómetros portátiles instalados alrededor de la isla para el año hidrológico 2013-2014, se estimó la precipitación que infiltra al subsuelo y la que es retenida por la cobertura vegetal.

En el caso de la isla el coeficiente de retención por el follaje es del 12%, siendo una zona altamente boscosa con presencia de cultivos perennes en las comunidades.

En la Tabla 22 se reportan los datos de precipitación y la estimación de fracción de lluvia retenida por el follaje o vegetación.

Tabla 22. Datos de precipitación promedio mensual para el período hidrológico 2013-2014 y fracción retenida por el follaje en la Isla Mancarrón.

Año	2013							2014				
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Enero	Feb	Mar
PP mensual (mm)	42.2	162.5	267	228	127	197	160	46	49.05	26.6	23	14.1
Cfo ret. 0.12 %	5.064	19.5	32.04	27.36	15.24	23.64	19.2	5.52	5.886	3.192	2.76	1.692
Ret. (mm/mes)	5.064	19.5	32.04	27.36	15.24	23.64	19.2	5.52	5.886	26.6	23	14.1

Como parte de la entrada al acuífero; la precipitación directa que cae sobre el mismo y que logra infiltrar hasta la zona saturada del acuífero, pasa a formar parte de las reservas del acuífero.

En los meses que hubo poca precipitación se estimó la retención total por la cobertura vegetal (enero-marzo), siendo la infiltración mínima sobre el subsuelo.

Evapotranspiración Potencial (ETP)

Otro elemento a tomarse en cuenta dentro del balance de suelo, es la evapotranspiración potencial (ETP), la cual se calculó con los datos obtenidos de la estación meteorológica San Carlos (INETER), utilizando la fórmula de Thornthwaite.

Tabla 23. Evapotranspiración potencial estimada mediante el método de Thornthwaite a partir de datos de la Estación Meteorológica San Carlos (INETER) en el período 2013-2014.

Período	2013									2014		
	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	ene	feb	mar
Temp	26.8	27.2	27	25.5	26.3	25.9	26.1	25.1	24.6	24.7	25.2	25.8
i	12.7	12.99	12.85	11.78	12.35	12.06	12.21	11.5	11.16	11.23	11.57	11.99
ETP sin corr	139.8	147.2	143.5	117.4	130.8	124	127.4	111.1	103.5	105	112.6	122.3
nºdías mes	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28.3	31
nº horas luz	5.95	4.85	5.47	2.42	4.51	4.35	5.22	4.7	4.06	5.7	7.43	7.34
ETP corr.	69.3	61.5	65.4	24.5	50.8	44.9	57.3	43.5	36.2	51.5	65.7	77.3
P	42.2	162.5	267	228	127	197	160	46	49.1	26.6	23	14.1
ETR	42.2	61.5	65.4	28	50.8	44.9	57.3	43.5	36.2	51.5	48.1	14.1

* T_{med}: temperatura media en °C obtenida de estación climática de San Carlos INETER

No horas luz: número de horas luz obtenido de tabulación para zona Nicaragua – Costa Rica bajo metodología de Doorenbos y Pruitt, 1977

ETP corr obtenido estación San Carlos (mm)

P: Precipitación de Isla Mancarrón (mm)

ETR: evapotranspiración potencial (mm)

La evapotranspiración en la isla en los meses de época seca es similar a la precipitación, siendo nula la infiltración de agua al acuífero.

➤ **Propiedades físicas del suelo**

Las propiedades físicas se asumieron de acuerdo al tipo del suelo y cobertura vegetal existente en el terreno. Las variables se obtuvieron mediante las tabulaciones estimadas por el método de Grassi (1976), proveniente del balance de suelos de Schosinsky.& Losilla (2006).

Tabla 24. Propiedades físicas según características del suelo de la Isla Mancarrón.

Textura del suelo	PMP (%)	CC (%)	d. ap (g/cm³)	Profundidad de raíces (m)
Franco Arcilloso	15	23	1.30	1.50

*PMP: punto de marchitez.

*CC: capacidad de campo.

*d. ap: Densidad aparente.

*La profundidad de las raíces fue determinada en base al tipo de vegetación en cada zona.

La infiltración a la zona saturada se condiciona por parámetros climáticos, textura del suelo, pendiente y geología; entre otros que están directamente relacionados con el porcentaje de infiltración proveniente de la precipitación.

El área de estudio se caracteriza por ser suelo tipo molisol de textura franco arcillosa. Se realizaron diez pruebas de infiltración con los métodos del doble anillo y Porchet, con el objetivo de determinar el volumen de agua que infiltra hacia el subsuelo producto de la precipitación directa. A través de las pruebas se obtuvo valores de infiltración de 12.04 a 36 mm/h, variando en cada terreno según su uso y textura del suelo. Según los datos obtenidos, la zona de mayor infiltración se ubica en la comunidad Los Ortega (36 mm/h), atribuido a una zona de fallas y de fracturas que propician mayores infiltraciones.

En la isla se estimó una infiltración promedio de 776 mm/d, dato obtenido de las pruebas realizadas en los diez sitios. En el cuadro resumen (Tabla 25) se describe el coeficiente de infiltración hacia el subsuelo por la variable de textura de suelo (kfc), fracción que infiltra por efecto de pendiente (kp) y fracción que infiltra por cobertura vegetal (kv).

Tabla 25. Resultados de infiltración básica en la Isla Mancarrón.

Sitio	Textura de Suelo	Valor de fc. (mm/d)	Kfc	Kp	kv	Ci
Zona de Recarga Isla Mancarrón	Franco Arcilloso	776	0.976974	0.06	0.2	1

*Ci: coeficiente de infiltración adimensional para balance hídrico.

*fc: infiltración básica obtenida de las pruebas de infiltración de las zonas de recarga.

*Kfc: fracción que infiltra por textura de suelo (adimensional).

Kp: fracción que infiltra por efecto de pendiente (adimensional).

Kv: fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (adimensional).

Los coeficientes son variables que contribuyen a la estimación del volumen de agua que recarga al acuífero tomando en cuenta las entradas en el sistema (infiltración a partir de la precipitación) y la retención por cobertura vegetal y subsuelo.

La recarga potencial del acuífero se basa en la interacción de parámetros del balance hídrico de suelo, infiltración y precipitación en la isla (Anexo 5). En la Tabla 29 se resume el detalle del volumen de recarga mensual para el año hidrológico 2013-2014.

Tabla 26. Recarga potencial del acuífero anual mediante balance hídrico de suelos para el periodo 2013-2014.

Zona de Recarga	Área (Km ²)	Fc (mm/d)	Recarga Promedio Anual (MMCA)
Isla Mancarrón	22	776	56.77

La recarga potencial del acuífero anual es de 56.77 MMCA en toda la Isla Mancarrón, proveniente de la infiltración mediante fracturas (permeabilidad secundaria) y por las características del subsuelo que corresponden a toda el área de la isla (22 km²). Los valores de recarga obtenidos, corresponden a suelos franco arcillosos.

Actualmente el acuífero no es explotado por la falta de inversión de proyectos y estudios hidrogeológicos a detalle. Los meses con mayor recarga potencial coinciden con la época lluviosa junio – septiembre; en cambio en la época seca la

recarga es casi nula debido a que la evapotranspiración y retención del follaje superan los niveles de precipitación en la isla. Cabe mencionar que esta recarga ocurrió durante el fenómeno de El Niño, considerándose una base para escenarios críticos de sequía en la isla.

4.5.1.2 Infiltración desde cuerpos de agua superficiales.

La interacción entre agua superficial (lago) y el agua subterránea se obtuvo a través de la investigación geofísica y el análisis topográfico del terreno. En el sector de El Refugio se identificó una conexión hidráulica entre el lago y los estratos arcillosos que están separados del acuífero por roca compacta de tipo basalto. En el sector oeste de la isla, se identificó que en época lluviosa existe una conexión entre el agua del lago con un acuífero confinado del sector.

4.5.2 Descargas del sistema

Como parte de la cuantificación de las aguas subterráneas se identificó como salida del sistema la escorrentía subterránea y los manantiales ubicados en la zona Oeste de la isla.

- Caudal de Manantiales

En base a las mediciones obtenidas de los cinco manantiales, se obtiene una descarga de agua de 1284 m³/mes equivalente a 15,408 m³ al año de descarga del acuífero, resultando en 15.40 MMCA.

- Escorrentía subterránea

Con respecto a la escorrentía subterránea (Q), se determinó en tres secciones de la isla (Tabla 27) incorporando datos de transmisividad, el gradiente hidráulico (obtenido de la piezometría) y la longitud de la sección estudiada; aplicando la Ecuación No. 22. En la isla no hay pozos perforados para extraer el agua subterránea. El pozo de la comunidad El Refugio que abastecía a los habitantes de este sector se encuentra deshabilitado por daños a la bomba. Por tanto la extracción del acuífero en este sector es nula.

$$Q = TL \quad \text{Ecuación 22}$$

Q : Escorrentía subterránea (m³/d).

T : Transmisividad del acuífero (m²/d).

L : Longitud de la sección estudiada (m).

i : Gradiente hidráulico (adimensional).

Tabla 27. Escorrentía subterránea del acuífero Isla Mancarrón.

Sector	Transmisividad* (m ² /d)	Gradiente hidráulico	Longitud (L) m	Q (Escorrentía Subterránea m ³ /d)
El Colectivo	100	0.0289	1523.81	4400.00
Zona oeste	100	0.0998	1102	11000.00
La Salvadora	100	0.0397	1809	7180.00
* Transmisividad de Mapa Hidrogeológico INETER-COSUDE, 2003.			Q (m ³ /d)	22580.00
			Q (m ³ /mes)	677400
			Q (m³/año)	8128800

La escorrentía subterránea por su topografía descarga directamente al lago con un volumen de 22580 m³/d equivalente a 8.13 MMCA.

4.5.3 Disponibilidad de Agua subterránea.

La disponibilidad (Tabla 28) es referida al volumen medio anual de agua subterránea aprovechable en un acuífero para ser utilizado por los usuarios de manera sostenible para las actividades que se desarrollan, tomando en cuenta las recargas, pérdidas y las extracciones realizadas, reflejadas en el balance hídrico. En el caso de las salidas del sistema se considera la escorrentía subterránea que está en movimiento dentro del acuífero y manantiales.

Tabla 28. Disponibilidad de agua subterránea en la Isla Mancarrón (noviembre 2013-marzo 2014).

Parámetros	Total (MMCA)
Recarga Potencial	56.77
Escorrentía Subterránea	8.13
Manantiales	15.40

Disponibilidad del acuífero	33.24
-----------------------------	-------

El balance hidrogeológico determinó 33.24 millones de metros cúbicos al año (MMCA) de agua disponible; estimación que fue realizada durante el fenómeno de El Niño. Esta cantidad de agua puede ser utilizada como un volumen explotable, ya que representa el efecto de la recarga por infiltración directa, que es considerada dinámica y puede reemplazarse anualmente, según las condiciones de las precipitaciones.

El resultado positivo del balance hídrico, sugiere que para el período evaluado, la recarga del acuífero supera la descarga y que este volumen de recarga de agua puede ser utilizado para consumo de la población.

4.5.3.1 Demanda de agua

En cuanto a la demanda de agua, se identificaron tres tipos de consumo en la isla: doméstico, turístico y actividades agrícolas. Como se mencionó anteriormente, en la isla no existe un sistema de abastecimiento de agua potable, por lo que la población en general (39%) consume agua del lago sin ningún tratamiento previo para uso doméstico. Se estima que un 41% da tratamiento mediante filtrado (ACRA, 2007) y el restante consume agua del pozo de la Isla San Fernando. El agua se almacena en pilas de cada vivienda adicionando cloro sin ninguna dosis recomendada.

Para determinar la demanda de agua se utilizaron dos indicadores para el consumo doméstico:

a) Indicador Estudio de Cosecha de Agua

El consumo de agua para bebida calculado para los 346 habitantes de la isla, fue calculado de 8 l/d por habitante (Huelva Solentiname, 2009). Sobre esta base, la demanda de agua para consumo humano de los habitantes es de 996.48 m³/año.

En cuanto al consumo para las actividades restantes 7722.36 m³/año, se obtuvo a través de entrevistas a la población, quienes extraen el agua del lago mediante

bombas y se almacenan en pilas en cada hogar, cuantificando el volumen de agua que almacenan en las pilas y el caudal de extracción por las bombas.

Los turistas que visitan la isla consumen agua purificada (embotellada) que proporcionan los hoteles. Aproximadamente ingresan 100 turistas al mes con un plazo de 5-7 días de permanencia en la isla, consumiendo 8352 m³/año de agua.

En relación al uso de agua en agricultura y ganadería, antiguamente utilizaban pozos excavados que fueron abandonados. Actualmente, para los cultivos utilizan el agua de la precipitación y agua del lago con un consumo de 10611 m³/año. Los granos básicos que se siembran son para comercio y autoconsumo.

Tabla 29. Demanda de agua de Isla Mancarrón en base a indicador Huelva Solentiname,2009.

	Demanda de agua m ³ /año				
Población	Agua de Bebida*	Consumo doméstico	Turismo***	Cultivos****	Total (MMCA)
346	996.48	7722.36	8352.00	10612.00	27.68

Fuente:

*Estudio socio-económico ACRA, 2007

** Consumo por habitante: 8 l/d- Huelva Solentiname 2012

***Entrevistas a hoteles y puesto de militares

****Cultivos: 12.9% arroz, 54.5% frijoles y 31.6% maíz en un área de: 877 ha –(MARENA,2010).

La demanda total de agua en base a todos los sectores (Tabla 29) es de 27.68 MMCA; con un consumo racional de agua por parte de la población.

b) Indicador de consumo doméstico

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (2003), se estima un consumo doméstico para las zonas rurales de 100 l/d por habitante, utilizando el agua de una manera sostenible que incluye consumo de agua potable y actividades propias del hogar. Basado en esto se estima una demanda para la Isla Mancarrón de 12456 m³/año para consumo doméstico, resultando con una demanda total de 31.42 MMCA (Tabla 30).

Tabla 30. Demanda de agua basado en indicador OMS (2003) para Isla Mancarrón.

Población* (habitantes)	Demanda de agua m ³ /año			Consumo total MMCA
	Consumo doméstico**	Turismo***	Cultivos****	
346	12456	8352	10612	31.42

Fuente:

*Estudio socio-económico ACRA, 2007

** Consumo por habitante: 100 l/d- OMS,2003

***Entrevistas a hoteles y puesto de militares

****Cultivos: 12.9 % arroz, 54.5 frijoles y 31.6 % maíz en un área de: 877 ha) –MARENA, 2010..

Actualmente el Lago Cocibolca, como principal fuente de agua, ha dado abasto para las diferentes actividades propias de los habitantes de la isla; sin embargo, con la creciente influencia de actividades aledañas al lago, el recurso puede verse afectado tanto en su cantidad como en su calidad.

4.5.3.2 Disponibilidad de agua

La recarga anual del acuífero es función de diferentes variables; sin embargo, en la actualidad, también deben de considerarse otros factores que afectan las condiciones climáticas tanto a nivel local como regional; tal es el caso del Fenómeno de El Niño, que se ha reflejado en la variación de los regímenes de lluvia; bajo eventos severos se ha registrado una disminución importante en los acumulados de lluvia al inicio de la época lluviosa; lo que implica menor disponibilidad de agua, riesgo de incendios, entre otros.

En cuanto al volumen a ser aprovechable y la disponibilidad del acuífero (Tabla 31), se determina que la disponibilidad se encuentra por encima de la demanda de la población para consumo, durante un escenario de variación de regímenes de lluvia y consecuente disminución de acumulados, ocasionado por el fenómeno El Niño.

Tabla 31. Demanda de agua vs Disponibilidad del acuífero, Isla Mancarrón (noviembre 2013- mayo 2014).

Disponibilidad del acuífero (MMCA)	Demanda consumo de agua de la isla (MMCA)* APDS	Demanda consumo de agua de la isla (MMCA)**OMS
33.24	27.68	31.42

El resultado positivo del balance hídrico, para el período evaluado, la recarga del acuífero supera la descarga desde el mismo y que este volumen de recarga puede ser utilizado para las actividades planificadas, por lo tanto, el acuífero en la zona de estudio tiene la capacidad de suplir los volúmenes requeridos para consumo de la población y el entorno en un período de regímenes de lluvia variados (Fenomeno El Niño), y en época seca (noviembre 2013-marzo2014) en que se realizó el estudio.

Para la conservación y aprovechamiento sostenible del agua subterránea es conveniente el uso racional de las fuentes, protección de las zonas de recarga y distribución racional en todas las comunidades. Cabe mencionar que en la disponibilidad del acuífero debe incorporarse el caudal de manantiales que dentro de la ecuación del balance hídrico subterráneo se considera como una salida, pero que en realidad, es agua que está disponible para el uso de la población.

En el Gráfico 9, se presentan cuantificadas el total de las demandas de agua de acuerdo con el levantamiento realizado por Huelva (2012) y con el consumo mínimo establecido por la OMS (2003) para zonas rurales. Al incorporar el caudal obtenido de los manantiales de la isla, la disponibilidad para aprovechamiento es de 48.64 MMCA proveniente del acuífero, con la capacidad de suplir las necesidades de la población, sus actividades y turismo, conforme las diferentes demandas calculadas.

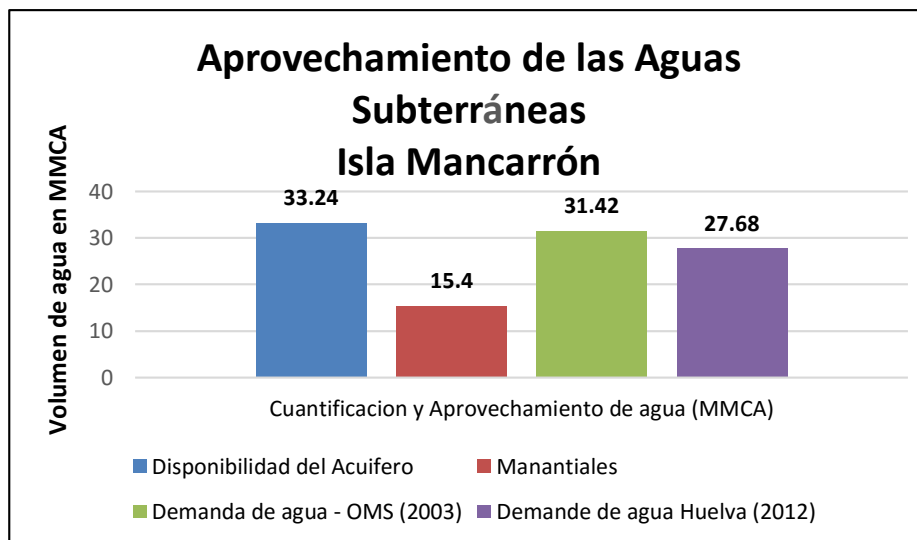


Gráfico 9. Aprovechamiento de las aguas subterráneas de Isla Mancarrón, considerando diferentes volúmenes de demanda.

4.5.3.3 Proyecciones

a) Proyección en base a crecimiento demográfico

Basado en una proyección de demanda futura para uso y consumo, el acuífero debe explotarse bajo principios de conservación y con un manejo sostenible del mismo. El incremento de la población, y por ende, el aumento en la demanda del consumo de agua, es un factor que debe de considerarse en la explotación sostenible de un acuífero. Conforme esto, se utilizó la normativa de INAA (2001), para establecer el porcentaje de crecimiento poblacional para comunidades rurales, el cual es del 2.5%. Con este dato, se proyectó un aumento de 175 habitantes cada 5 años en la Isla Mancarrón (Tabla 32), dando un estimado de 381 habitantes para el 2018 y de 416 habitantes para el 2022. Para cada uno de estos años, se determinó la demanda de agua en la isla (en MMCA); determinándose que ésta puede ser suplida por el acuífero, bajo la premisa de que la disponibilidad de agua subterránea se ha determinado en un periodo de sequía, con regímenes de precipitación variables; por lo que en una época de mayor precipitación se asume que la disponibilidad será mayor; lo cual redundará en una mejor calidad de vida para la población.

Tabla 32. Proyecciones futuras con un crecimiento demográfico del 2.5% (INAA, 2001).

Disponibilidad del acuífero (MMCA)	Agua subterránea	Manantiales	Total Disponible MMCA
	33.24	15.4	48.64
Año	Población estimada	Demanda de agua (MMCA)	
2014	346	27.68	20.96
2018	381	30.48	18.16
2022	416	33.28	15.36

La disponibilidad hídrica del acuífero (48.64 MMCA) para el año 2022 es capaz de abastecer y cubrir las necesidades para consumo humano de los habitantes en la

isla, resultando con una disponibilidad positiva de 15.36 MMCA luego de cubrir la demanda de la población.

b) Proyección en base a período histórico de precipitación

Con los registros históricos de temperatura y precipitación de la estación San Carlos (INETER) para el período 2002-2012, se obtuvo a través del balance hídrico de suelos, una recarga potencial del acuífero de 74 MMCA (Tabla 33, Anexo 5).

Tabla 33. Recarga potencial del acuífero de Isla Mancarrón para período 2002-2012.

Promedio de Precipitación 2002-2012 (mm)	Evapotranspiración (mm)	Área km²	Recarga Potencial MMCA
191.56	80.52	22	74

Basado en el período histórico, la recarga del acuífero refleja un aumento en la disponibilidad de agua subterránea, pasando de 33.24 MMCA durante fenómeno El Niño, a 74 MMCA para un periodo de 10 años, lo que refleja que con épocas de mayor precipitación, habrá una mayor disponibilidad para los habitantes.

Para el periodo histórico de 10 años, la recarga cubre con la demanda de la población actual de 27.68 MMCA según la demanda establecida por indicador de Huelva Solentiname.

c) Proyección de agua en base a efectos del cambio climático

Con el fin de conocer la disponibilidad de agua en los próximos años se incluyeron datos de variabilidad climática basados en el escenario moderado para el año 2050. Con un aumento de la temperatura de 1.7° C y una reducción de la precipitación de 16.9% (Gráfico 10), variables establecidas del modelo de variabilidad climática de INETER (2001).

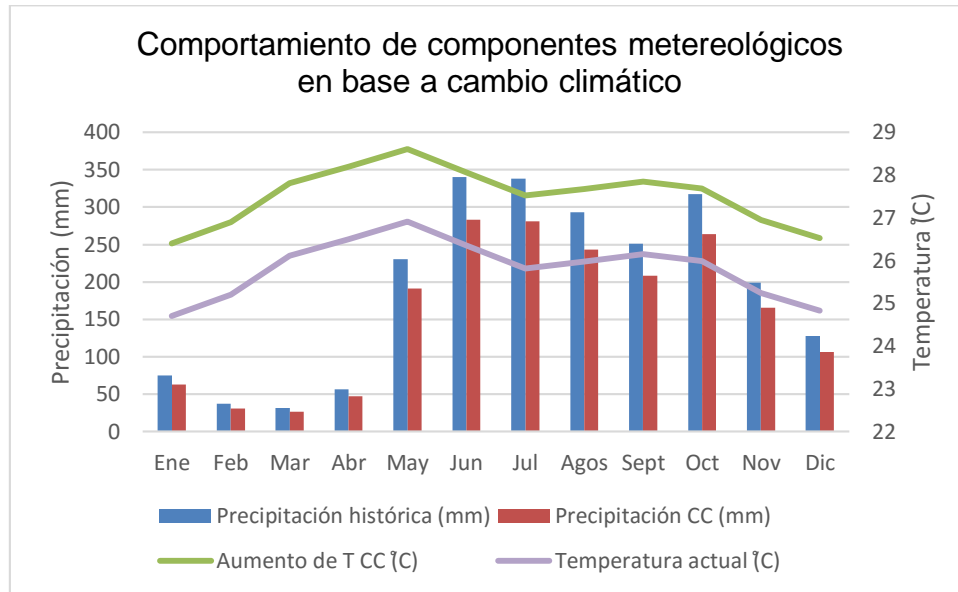


Gráfico 10. Comportamiento de la precipitación y temperatura para el año 2050 con respecto a variabilidad climática, datos provenientes de estudio INETER, 2001.

El aumento de la temperatura y reducción de la precipitación para el año 2050, reduce la disponibilidad del acuífero para la población, resultando con una recarga potencial de 15 MMCA, resultando negativo con respecto a la demanda de agua de la población de 33.74 MMCA, colocando a la isla en un estado crítico en cuanto al recurso agua (Tabla 34, Anexo 6).

Tabla 34. Variabilidad climática y recarga potencial del acuífero para 2050 en Isla Mancarrón en escenario moderado según criterios INETER (2001).

Aumento de T (°C)	Reducción de Precipitación (% mm)	Área (Km ²)	Recarga potencial MMCA para año 2050	Demanda de agua en la isla (2050)
1.7	16.9	22	15	33.74

d) Disponibilidad del acuífero basado en proyecciones

De acuerdo a las 3 proyecciones establecidas (Tabla 35) y con una demanda de agua por parte de la población de 31.42 MMCA, se obtuvo una disponibilidad positiva en las proyecciones de registro histórico e incremento de la población. En cambio en la proyección con variables de cambio climático, el balance se encuentra

por debajo de la demana de la población (15 MMCA) presentando un déficit para abastecer la población para el año 2050, si las variables tuvieran los cambios estimados en el escenario moderado proyectado por INETER. Por lo cual las instituciones, deberán planificar, medir y evaluar las extracciones de agua para la correcta explotación del acuífero; y a la vez formular una adecuada gestión del mismo, con énfasis en la protección de las zonas de recarga hídrica; con el fin de evitar posibles situaciones de sequía y estrés hídrico en la isla.

Tabla 35. Disponibilidad de agua en la Isla Mancarrón, para tres escenarios.

AÑO/Condiciones de la proyección	DEMANDA DE AGUA (MMCA)	DISPONIBILIDAD DE AGUA (MMCA)	Resultado del balance (MMCA)
2012-2013 Fenómeno El Niño	31.42	48.64	17.22
Período histórico 2002-2012	27.68	74	46.32
Proyección 2050 Variabilidad Climática	33.74	15	18.74

4.6 Distribucion de los estratos y sus discontinuidades en el subsuelo.

La distribución de los estratos y sus discontinuidades en el subsuelo de la Isla Mancarrón se obtuvieron a través de la tomografía eléctrica realizada en seis perfiles. Los perfiles se realizaron en las comunidades de mayor desarrollo poblacional y en la zona protegida de la isla; distribuyéndose de la siguiente manera: dos en la comunidad El Refugio (TEIM1, TEIM2), dos en la comunidad El Colectivo (TEIM3, TEIM4), uno en la comunidad Los Ortega (TEIM5) y uno en la Hacienda Salvadora (TEIM6), con el objetivo de determinar la secuencia litológica, así como el tipo de acuífero y sus características (Mapa 19).

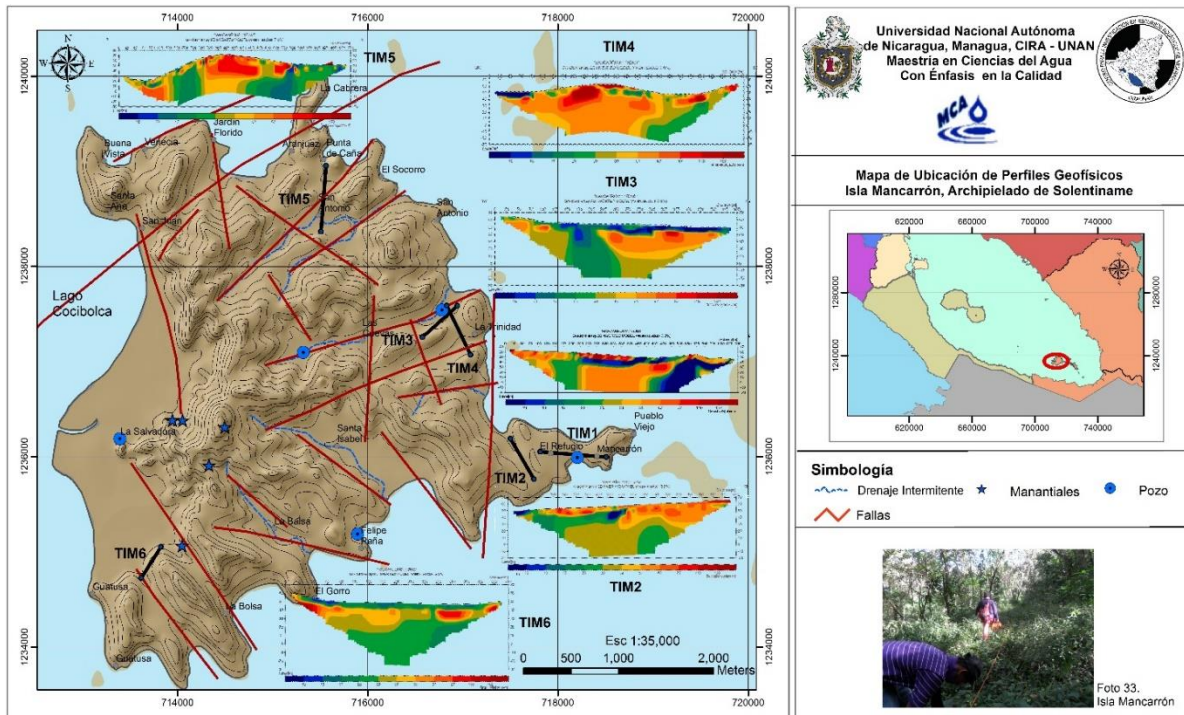
Como resultado de la interpretación de estos perfiles, se determinó que en la Isla Mancarrón, espacialmente el agua subterránea fluye a través del material detrítico depositado o alterado superficialmente; y la mayor parte fluye del medio fracturado. Lo

anterior se determinó a través de seis tomografías eléctricas, con longitudes entre 400 m y 700 m, alcanzando profundidades de 70 m. El RMS (error de la desviación cuadrática) es referido al error obtenido en cada uno de los perfiles, presentando porcentajes menores del 10% por lo cual los valores medidos son aceptables para realizar el análisis de respuesta eléctrica del medio hidrogeológico (Tabla 36).

Tabla 36. Características generales de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, Febrero 2014.

Tomografía Eléctrica	COORDENADAS UTM WGS84				Dirección del perfil	Total de mediciones	Longitud (m)	Profundidad máxima alcanzada (m)	RMS (%)
	INICIO		FIN						
	Este	Norte	Este	Norte					
TEIM1	717814	1236052	718508	1235996	E-W	2177	700	70	7.3
TEIM2	717500	1236190	717746	1235765	SE-NW	1407	500	70	6.5
TEIM3	716575	1237257	716942	1237586	NW-SE	1407	500	70	6.0
TEIM4	716831	1237589	717082	1237071	SE-NW	1792	600	70	7.5
TEIM5	715508	1238367	715563	1239059	S-N	2177	700	70	7.5
TEIM6	713621	1234726	713826	1235053	SW-NE	1022	400	70	6.5

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.



Mapa 19. Ubicación de perfiles de tomografía eléctrica en Isla Mancarrón, febrero 2014.

De acuerdo a la literatura, en la observación in situ y en la experiencias se definió el rango de las resistividades eléctricas (gama de colores) que corresponde a los materiales geológicos del subsuelo (Tabla 37).

Tabla 37. Clasificación del tipo de material en base a resistividades y tonalidades en los perfiles.

Resistividad eléctrica (Ohm-m)	Interpretación geológica	Interpretación hidrogeológica	Tonalidad
0-17	Arcillosos húmedos (poco flujo de agua subterráneo, baja transmisividad).	Acuitardo (poco flujo de agua subterránea, baja transmisividad)	Azules
17-39	Arenosos no compactos (con flujos de agua subterránea significativo), acuífero.	Acuífero (con flujos de agua subterránea significativo)	Verdes
39-87	Zonas fracturas (fallas y fracturas).	Acuífero	Amarrillos
87- <150	Rocas compactas del tipo basalto.	Acuitardo	Naranja a Rojo intenso

Los resultados de los perfiles se describen a continuación.

4.6.1 Comunidad El Refugio (TEIM1 y TEIM2).

La comunidad El Refugio donde se encuentra la mayor parte de los pobladores de la isla. Las TEIM1 y TEIM2 realizadas en esta comunidad, en general presentan resistividades eléctricas bajas asociadas a un subsuelo conductivo. En la TEIM1 (Figura 2), se observa al Este una zona de bajas resistividades asociada a la conexión hidráulica entre el cuerpo de agua superficial (Lago Cocibolca) y los estratos arcillosos del subsuelo, en la cual el flujo subterráneo se produce desde el lago.

Entre los 150 y 200m sobre la tomografía eléctrica, se observa existencia de una zona fracturada en donde puede orientarse la perforación de un pozo para uso doméstico y turístico. El espesor del acuífero en este sector supera los 60m, y representa sobre este perfil el mejor sitio para perforar. También, a los 450m sobre esta TE, se observa una pequeña zona fracturada por donde circula cierta cantidad de agua. Al sur de esta zona ya existe un pozo excavado de poca profundidad y con caudal apreciable.

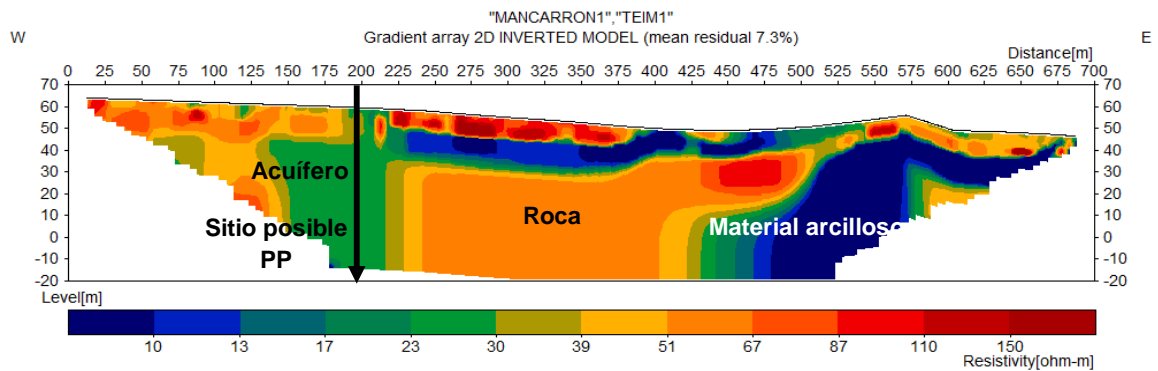


Figura 2. Tomografía eléctrica TEIM1 ubicada en El Refugio.

En el sector oeste, entre los 175 metros y los 225 metros, se ubica otra zona fracturada con importante flujo de agua subterránea de dirección norte – sur y donde puede ubicarse un pozo para los usos mencionados antes. El espesor de este acuífero supera los 60 m y representa sobre este perfil el mejor sitio para perforar.

Con respecto al perfil TEIM2 la disposición de los estratos es más homogénea, el lago se ubica al norte y sur de esta TE, presentando igualmente una conexión entre el lago y el acuífero. En la parte superior se muestra un estrato con resistividades

relativamente altas, características de suelos de material volcánico compacto poco permeables; por lo que se deduce, que en este sector, el acuífero es de tipo semiconfinado con material poroso con capacidad de permitir flujo de agua con un espesor mayor a 60 m. Existe potencial para perforar un pozo entre 100 y 250 metros; sin embargo, se propone un sitio a los 240m sobre la TE, donde el agua ha sido filtrada por el material geológico (Figura 3).

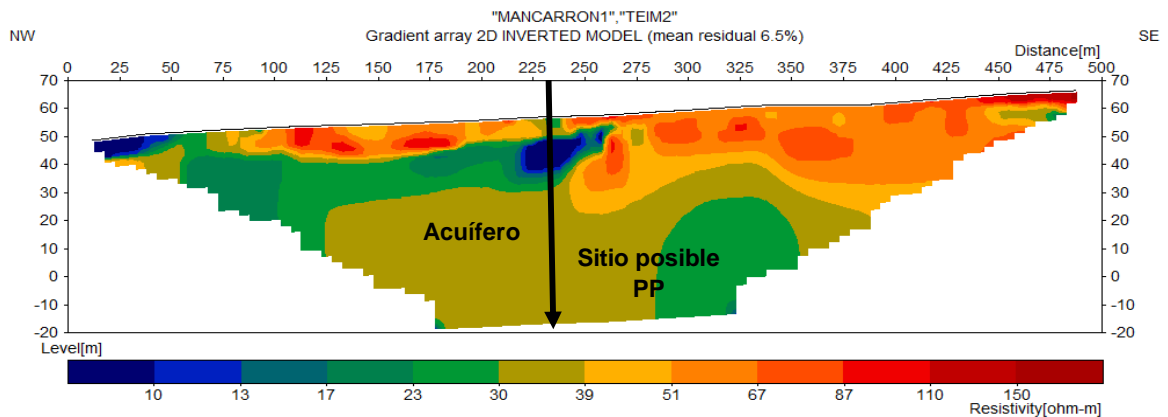


Figura 3. Tomografía eléctrica TEIM2 ubicada en El Refugio.

La comunidad El Refugio presenta un acuífero somero, hidráulicamente conectado con el lago protegido por la roca compacta del subsuelo y con un espesor mayor de 50 m con potencial para ser explotado. El acuífero es recargado mediante la precipitación a través de una infiltración en el subsuelo y a través de fracturas. En El Refugio se proponen dos sitios para perforar pozos.

4.6.2 Sector El Colectivo (TEIM3 y TEIM4)

En la comunidad El Colectivo, se efectuaron las tomografías eléctricas TEIM3 y TEIM4 (Figuras 4 y 5); la principal actividad de los pobladores es la siembra de maíz y frijoles que comercializan con el municipio de San Carlos.

La TEIM3 registra que hay presencia de material arcilloso húmedo con espesor de 10 m en la longitud del perfil. Entre los 225 y 500 metros, le subyace una capa de alta resistividad eléctrica de unos 30 metros de espesor (baja transmisividad). La capa más profunda ubicada a unos 40 metros de profundidad se asocia con una capa permeable

en la que la ocurrencia de flujos de agua subterránea es significativa. En esta parte puede proyectarse un pozo para uso doméstico. Del lado izquierdo, a los 125 metros sobre el perfil, puede proyectarse otro pozo para los usos antes mencionados. Asimismo entre los 150 y 225 m se observa una zona de fallas o fracturas rellenada por material arcilloso-arenoso de baja transmisividad (Figura 4).

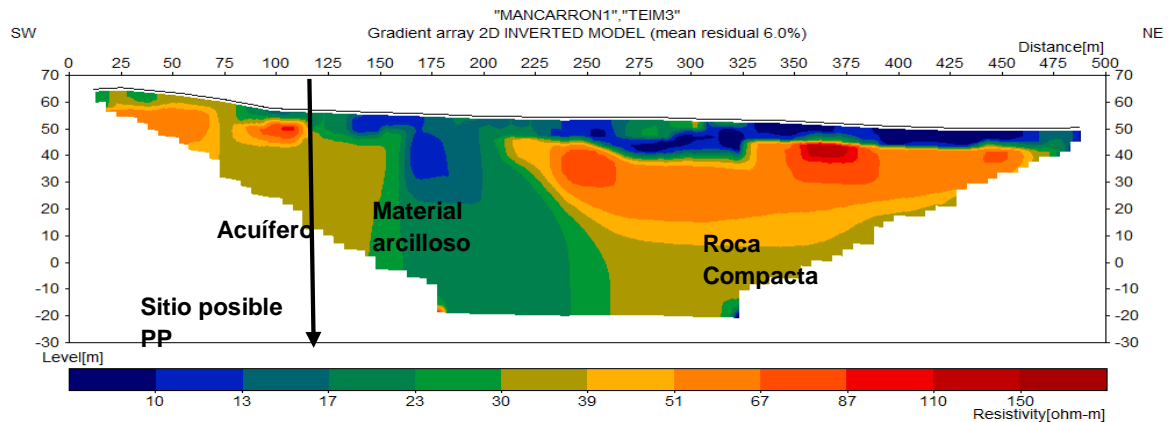


Figura 4. Tomografía eléctrica TEIM3 ubicada en El Colectivo.

Con respecto al perfil TEIM4 transversal al TEIM3 (Figura 5), con dirección noroeste-sureste; en los primeros 350 metros sobre el perfil, predominan materiales rocosos no muy compactos y con poco flujo de agua subterránea. De los 350 metros hasta el final del perfil, el material en profundidad es permeable con flujos de agua subterránea significativos, proponiéndose un sitio favorable para perforación de pozo para los usos antes mencionados y para uso agrícola.

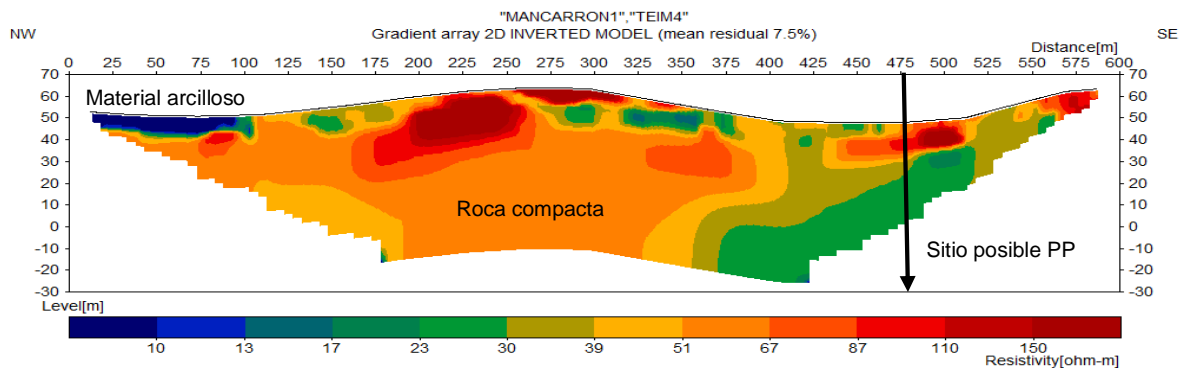


Figura 5. Perfil TEIM4- Sector El Colectivo, en dirección sureste-noroeste.

En la comunidad de El Colectivo, se detectó la presencia de una falla geológica y zonas fracturadas, en el cual se determinó la presencia de un acuífero con espesor mayor de 50m, de permeabilidad secundaria; características similares a las de la comunidad El Refugio.

Al unir el TEIM3 con el TEIM4 (transversal al TEIM3), se distinguió la secuencia del basamento de la isla representado como roca compacta; y la presencia de fallas que dan origen a un acuífero fracturado (Figura 6).

La profundidad del acuífero determinada en los perfiles de tomografía es de 50m, sin embargo se observa la presencia de mayor profundidad del acuífero en cada uno de los perfiles.

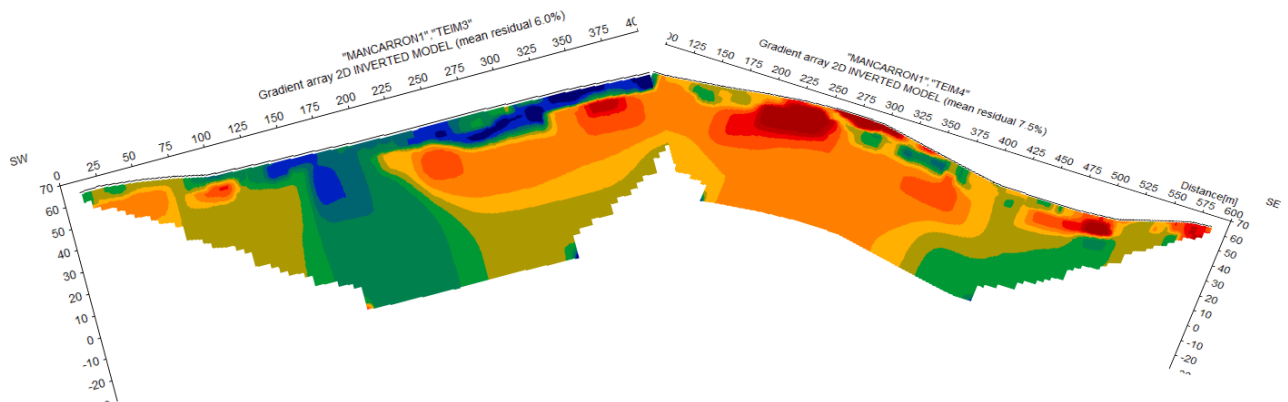


Figura 6. Perfiles TEIM3 y TEIM4 (transversal) comunidad El Colectivo.

4.6.3 Comunidad Los Ortega (TEIM5)

En el sector de Los Ortega se realizó el perfil TEIM5 a una profundidad de 70m, con una dirección sur-norte. Se visualiza una zona de fracturas que han generado la formación de acuíferos de porosidad secundaria; asimismo, se observa una estructura de forma circular con alta resistividad atribuido a flujos piroclásticos.

Los sitios de mayor potencial para perforar pozo con capacidad para transmitir agua se encuentra a 200 y 550 metros respectivamente de la costa, cerca de la zona de cultivos de la comunidad. El punto más lejano (550 metros) de la costa podría utilizarse para el riego de cultivos y el más cercano al lago (200 metros) podrían utilizarse para

consumo humano fundamentalmente (Gráfico 9). Parte del agua del pozo más cerca del lago, puede provenir ya filtrada del mismo.

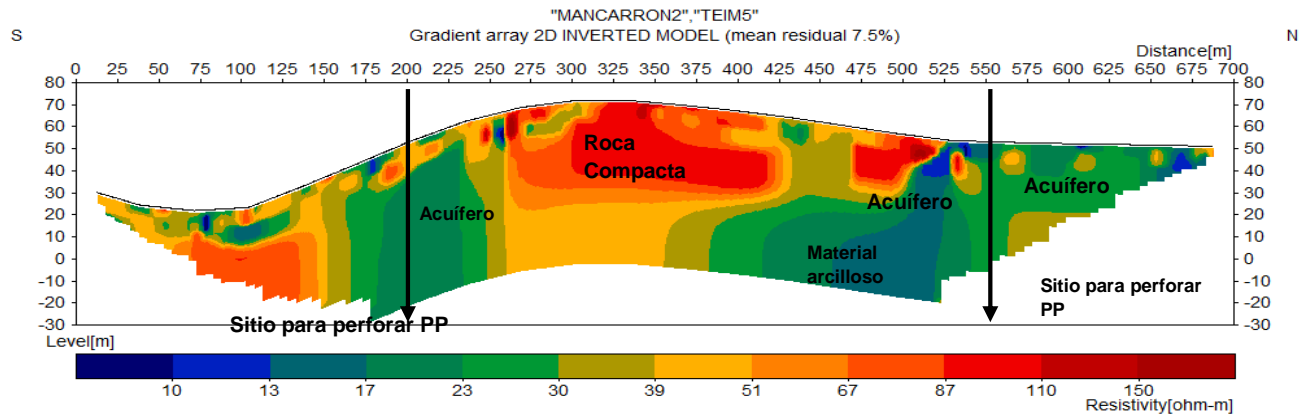


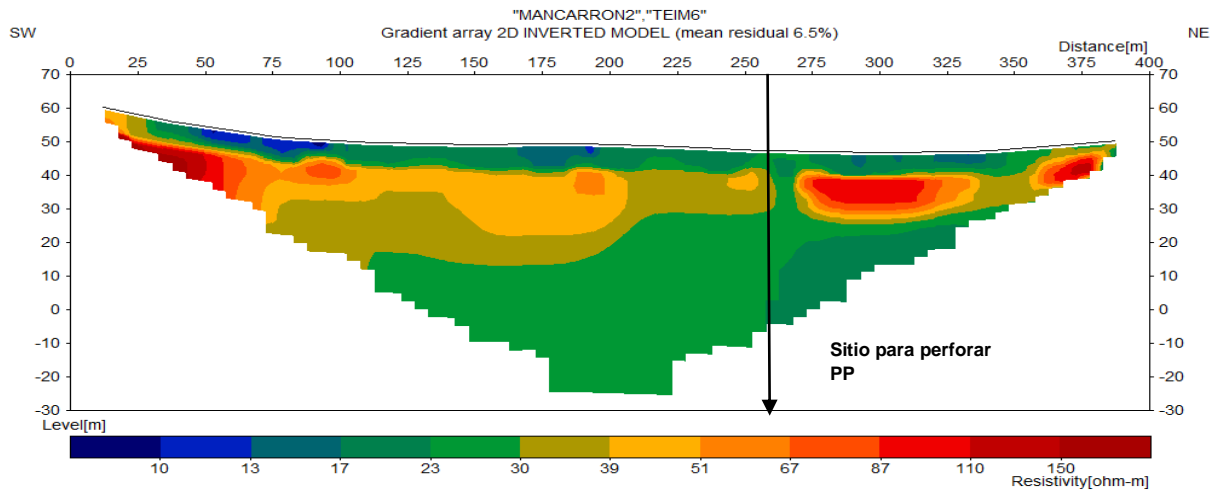
Figura 7. Perfil TEIM5- en el sector de Los Ortega, de dirección sur-norte.

4.6.4 Hacienda La Salvadora (TEIM6).

Esta propiedad es un área protegida, en la cual se realizó el perfil TEIM6 con una longitud de 400m. Presentó una estructura homogénea reflejando la existencia de un acuífero somero alimentado por agua del lago, conectado a un acuífero semi-confinado, con un subsuelo de buena permeabilidad. El espesor del acuífero somero es de 10 m y el acuífero semiconfinado mayor de 50 m.

Cabe mencionar que en el sector oeste de la isla, se ubican los manantiales con caudal moderado y el humedal de alto valor ecológico. De la prospección geofísica se deduce que el que el sector oeste de la isla tiene alto potencial hídrico con presencia de un acuífero en profundidad con disponibilidad de extracción.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.



4.6.5 Sitios Propuestos para perforación de pozos

Para delimitar zonas de perforación de pozos se utilizó información geológica, hidrogeológica y geofísica para la ubicación de los acuíferos con mayor espesor. Se seleccionaron seis sitios favorables para la perforación de pozos, de los cuales se proponen tres para realizar las perforaciones.

Esta selección se realizó considerando primeramente, la distribución poblacional en la isla; seguido por las actividades realizadas en las comunidades. Por tanto, estos se ubicarán en las comunidades de El Refugio, Los Ortega y El Colectivo (Mapa 20); cabe señalar, que aunque en el sector oeste de la isla se tiene alto potencial hídrico con presencia de un acuífero en profundidad con disponibilidad de extracción, no se considera este sitio como probable punto de perforación, debido a que no hay habitantes en ese sector.

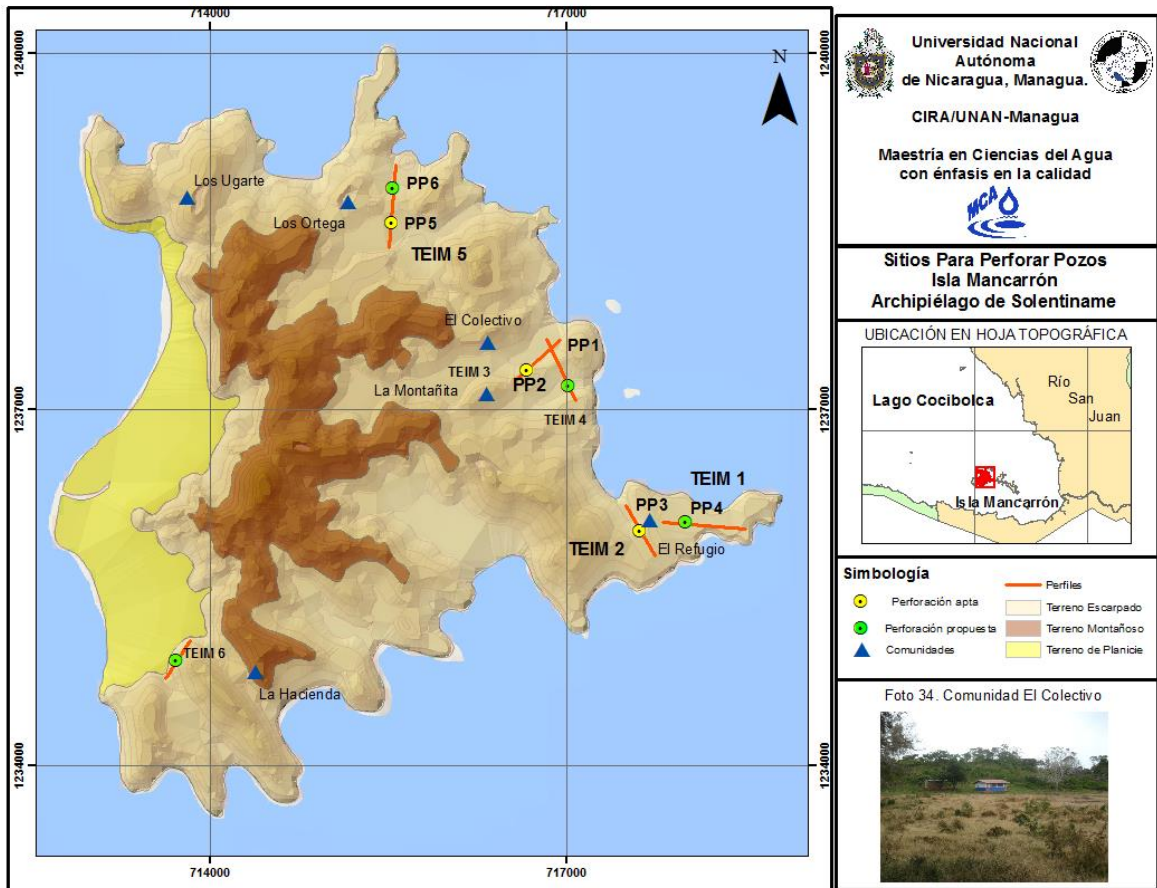
Tabla 38. Ubiación de los posibles sitios de perforación de pozos para abastecimiento comunal de la población.

Comunidad	TEIM	Pozo	Coordenadas		Profundidad de perforación	Propuesta
			E	N		
El Refugio	2	PP 3	717600	1235977	30 m	Apta
	1	PP 4	718030	1236026	30 m	Limitada
El Colectivo	4	PP 1	717018	1237197	35 m	Limitada
	3	PP 2	716680	1237343	25 m	Apto
Los Ortega	5	PP 5	715516	1238536	25 m	Apto
	5	PP 6	715559	1238791	30 m	Limitada
La Salvadora	6	PP 7	713747	1234898	25 m	Limitada, no hay comunidad cerca

El perímetro de protección de los sitios de pozos a perforar contribuye al ordenamiento territorial de la isla y protección del recurso, de manera que las actividades agrícolas y los correspondientes riesgos de contaminación de las fuentes de agua sean restringidas.

Con respecto a los pozos propuestos en la Comunidad El Colectivo, el PP 1 para consumo comunitario. En cuanto a El Refugio se propone la activación del pozo 5 (ya existente) y la perforación del pozo PP 3 para abastecer a la comunidad y sus actividades artesanales.

En relación al pozo propuesto en Los Ortega se sugiere se realice la perforación del pozo PP 5, ya que se encuentra más alejado de la zona costera para abastecer a los pobladores quienes hacen uso del recurso del lago para su consumo.



Mapa 20. Sitios seleccionados para exploración y perforación de pozos en Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname.

4.6.6 Medio hidrogeológico: modelo conceptual del acuífero

Los modelos hidrogeológicos son representaciones físicas o numéricas de un sistema hidrogeológico real. Estos permiten observar a escala, el comportamiento hidrogeológico e hidráulico de un acuífero, como herramienta de la investigación, la cual se fundamenta con información geológica, geofísica, hidrogeológica e hidroquímica, entre otras; provenientes del campo y de laboratorio.

En esta sección se describen los aspectos fundamentales del modelo hidrogeológico conceptual que corresponde a la Isla Mancarrón (Figura 9).

Desde el punto de vista geológico, la isla esta constituida por materiales basálticos, alomerados y depósitos aluviales acumulados en las zonas bajas y costeras. La presencia de fallas y fracturas en las formaciones geológicas de la isla propician la permeabilidad secundaria dando lugar a la infiltración tanto por la precipitación, como

por infiltración lateral del lago. Los pozos de la isla se encuentran sobre estos aglomerados que representan formaciones acuíferas someras con capacidad de abastecer a nivel comunal.

El medio hidrogeológico está compuesto principalmente por aglomerados de granulometría franco-arcillosa y arenosa. La granulometría del suelo, varía de franco-arcillosa en las partes altas a areno-arcilloso en las zonas costeras, con espesores de distancia de 0.50 m a 1 m respectivamente, seguido de suelos arcillosos con espesores de 1.20 m. En profundidad existe una capa compuesta de suelo arcilloso-pedregoso y basalto aglomerado con espesor entre 15 y 20 m concentrado en zonas cercanas a las costas del lago. En la zona alta (crestas volcánicas) hay afloramientos rocosos de unos 10 m de espesor y planicies lacustres en la zona oeste de la isla.

Los acuíferos de la isla son generalmente libres, someros y discontinuos, dispuestos en materiales volcánicos terciarios; con recarga de estos materiales por el fracturamiento que presentan estas formaciones geológicas terciarias.

El acuífero de la isla se encuentra sobre roca terciaria del Grupo Coyol Superior con un espesor de 200 m, excepto el área oeste que está compuesto por sedimento cuaternario aluvial de suelo residual arcilloso producto del intemperismo de rocas que dio origen al humedal.

La principal formación geológica que esta debajo de la capa de suelo superficial y que aflora en diversos puntos de la isla, es el Grupo Coyol; de color gris oscuro con fragmentos tobaceos y cristales de cuarzo. Litológicamente está compuesta por Tpcl (lava y aglomerado); Tpci (ignimbrita y toba); Tpcb (basalto y andesita), Tpca (aglomerado y basalto). Estas rocas se encuentran falladas y fracturadas, algunas ya están cementadas, pero la mayoría de ellas son fallas jóvenes. La presencia de fallas y fracturas en la isla propicia áreas de mayor infiltración hacia el acuífero favoreciendo las condiciones hidrogeológicas. El complejo basáltico (Tpcb) aflora de manera discontinua en las costas de la isla, en forma de bolones y clastos de hasta 40cm de diámetro. La erosión de los bolones da origen al suelo residual y se depositan sobre los bloques de basalto.

El perfil estratigráfico de la isla se construyó con base en los datos obtenidos de la geofísica (tomografías eléctricas) y del reconocimiento geológico; determinando así el material geológico, zonas de fractura, acuífero y nivel de agua. El perfil de 700 metros de longitud se ubica en la comunidad El Refugio cuyas características son: comunidad de mayor densidad poblacional y una zona de descarga con conexión hidráulica con el lago.

La litoestratigrafía de las islas está compuesta por una secuencia de materiales depositados en diferentes épocas: de tipo rocas lávicas, basálticas, andesitas, aglomerados y en la mayoría de la formación Basalto Andestico.

En cuanto al sector oeste de la isla, la presencia de manantiales indica características propias de acuíferos someros, de infiltración reciente. Por su carácter hidroquímico $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, son zonas de recarga al sistema acuífero de la isla. Los humedales del sector son de interés hídrico y ecológico.

Acerca del sistema de drenaje, entre las principales quebradas se encuentra San Antonio ubicada en el extremo este de la isla con una longitud de 2.43 km y una pendiente media de 30%; la quebrada Santa Isabel con una longitud de 1.84 km y pendiente media de 23%; y la quebrada Las Cuevas que drena hacia SE con una longitud de 2.19 km y pendiente media de 55%. Las zonas de quebradas se encuentran en suelos cubiertos de pastos, con fuerte erosión, las cuales se secan durante la época de verano.

El medio hidrogeológico de la isla proporciona las condiciones para que se haya desarrollado un sistema acuífero somero con permeabilidad secundaria, descargando sus aguas hacia el lago; en el que los manantiales están ubicados en zonas de recarga.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

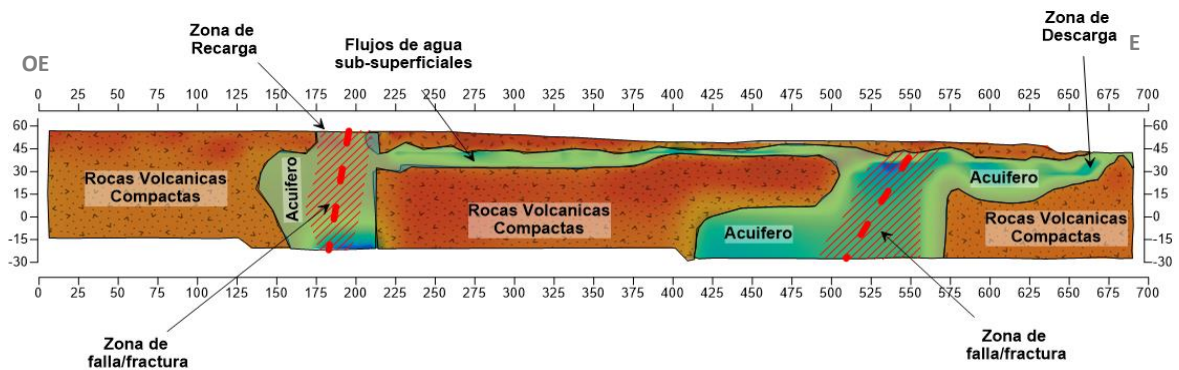


Figura 9. Modelo conceptual - medio hidrogeológico del acuífero de la Isla Mancarrón.

En cuanto a las zonas costeras, existe una interacción directa entre el lago y el agua subterránea, en el cual el medio hidrogeológico actúa como un filtro (suelo arcilloso) que retiene las partículas en el subsuelo.

Basado en las características hidrogeológicas, se infiere que el acuífero de la isla se encuentra sobre basamento andesítico (del Grupo Coyol Superior) y en la parte superior se encuentra conformado por una variedad de texturas de franco-arcillosa a arenosa en las zonas costeras, lo que contribuyen a su calidad y protección.

El acuífero de la isla tiene una dinámica directa con la precipitación siendo el principal medio de recarga. El cual proporciona el volumen de agua que abastecería a la población y el turismo de manera sostenible si se protege las fuentes de recarga y vegetación.

4.6 Estrategias de aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón

El potencial uso del acuífero de la isla promoverá a mejorar la calidad de vida de la población y desarrollo de sus actividades económicas. Actualmente la población se abastece del lago tanto para sus actividades domésticas como económicas. Esto ha imposibilitado un acceso a agua segura para la población de todo el Archipiélago de Solentiname.

Por ello deben establecerse medidas para el uso del agua subterránea como una vía a mejorar el desarrollo de los habitantes de la Isla Mancarrón. El adecuado uso del acuífero depende del manejo sostenible del recurso, las prácticas de riego, involucramiento de todos los sectores comunitarios y apoyo tanto de las instituciones gubernamentales como las organizaciones de cooperación externa.

A partir de la información obtenida, se definieron cuatro líneas estratégicas de acción que con el propósito de contribuir a la protección del acuífero y uso sostenible del mismo (Tabla 38). A continuación se detalla la descripción general para cada una de estas líneas estratégicas.

- Política de desarrollo para uso de agua subterránea

El potencial uso del acuífero está ligado directamente con la gestión de gobernanza del agua, que permita fomentar medidas locales como actualizaciones del plan de manejo, proyectos de captación de agua y desarrollo de indicadores socioeconómicos que promueva una política sostenible del uso del recurso hídrico.

- Organización comunitaria

Para el buen uso del recurso es necesario el involucramiento de los usuarios con el fin que haya un empoderamiento de la gestión del recurso; para ello se promueve la formación de los comités de agua potable y saneamiento (CAPS), con el soporte de las instituciones que se involucran en el apoyo de la gestión de agua a nivel comunitario; lo cual contribuirá a proteger el recurso y aprovecharlo para todas las actividades de los usuarios.

- Desarrollo de agricultura con enfoque de protección de recursos naturales

La interacción entre el riego agrícola y los recursos hídricos es muy estrecha: el uso de grandes volúmenes de agua para irrigación y el empleo de agroquímicos y fertilizantes que son transportados en los diferentes compartimentos del ecosistema, y retornados al acuífero y a las aguas superficiales por las aguas de retorno, pueden tener una afectación directa sobre el agua y salud de los usuarios. Por ello, se proponen acciones concretas que permitan implementar técnicas de riego y agricultura amigables con el medio ambiente.

Es necesario el diálogo entre los sectores involucrados; tanto de agricultores, comunitarios y las Instituciones reguladoras para ser efectivas las políticas locales de gobernanza del agua.

- Gestión de la oferta hídrica subterránea

La gestión de la oferta hídrica subterránea es un componente esencial para promover el acceso de agua a la población de la isla. Para ello se establecen acciones concretas como la restauración del pozo de la comunidad El Refugio, el seguimiento y monitoreo de la precipitación para mantener actualizado los balances hídricos de la isla y la perforación de pozos en las comunidades para abastecimiento comunal. Esto permitirá el acceso y manejo sostenible del recurso mediante la oferta hídrica disponible en la isla.

Tabla 39. Matriz de acciones por línea estratégica para aprovechamiento sostenible del acuífero de Isla Mancarrón.

Líneas estratégicas	Acciones	Instituciones involucradas
Política de desarrollo para uso de agua subterránea	Desarrollo de proyecto de sistemas de agua potable y saneamiento utilizando manantiales de la isla. Actualización del plan de manejo de Solentiname haciendo énfasis en recurso agua e incorporando la hidrogeología de la isla. Ordenamiento del territorio y actualización de indicadores socioeconómicos incluyendo la variable de turismo y migración de los pobladores. Desarrollo de proyectos de cosecha de agua e implementación de filtros para mejoramiento de calidad. Elaboración del plan de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en el Archipiélago.	Alcaldía Municipal, ENACAL, MARENA, MINSA. ONGs: Fundación del Río, ASODELCO, APDS, Huelva Solentiname.
Organización comunitaria	Formación de Comités de Agua Potable y Saneamiento (CAPS). Promoción de educación ambiental y manejo del recurso agua. Continuar red de monitoreo de precipitación en la isla.	INAA, Alcaldía Municipal, ENACAL y Red Nacional de CAPS.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

	<p>Desarrollo de talleres participativos comunitarios para formulación y ejecución de proyectos que conlleven a la gestión integrada en la isla, perforación de pozos y establecimiento del sistema de suministro de agua potable.</p> <p>Involucramiento de la mujer en la toma de decisión y ejecución de proyectos comunitarios.</p> <p>Implementación de registro de usuarios para uso de agua.</p> <p>Desarrollo de proyectos de uso eficiente y ahorro de agua.</p> <p>Participación de Solentiname en los encuentros de CAPS de Río San Juan.</p>	<p>ONGs: ASODELCO, Huelva Solentiname.</p>
<p>Desarrollo de agricultura con enfoque de protección de recursos naturales</p>	<p>Cambio de fertilizantes químicos por biológicos y naturales, para el desarrollo de los cultivos.</p> <p>Implementación de técnicas de riego que utilicen menores volúmenes de agua.</p> <p>Atención técnica a agricultores.</p> <p>Re-uso del agua.</p> <p>Control de tala y quema de recurso forestal.</p> <p>Rotación de cultivos.</p> <p>Fomento de la producción sostenible: agroforestal y sistemas silvopastoriles.</p>	<p>Alcaldía Municipal, MARENA, MAGFOR, Productores.</p> <p>ONGs: ASODELCO, Fundación del Río.</p>
<p>Gestión de la oferta hídrica subterránea</p>	<p>Cambio de la bomba y restauración del pozo PP5 de la Comunidad El Refugio.</p> <p>Protección de los manantiales en el sector oeste de la isla para evitar contaminación fecal.</p> <p>Perforación de dos pozos en la comunidad El Colectivo para agricultura y para consumo de la población; y un pozo en la comunidad Los Ugartes y otro en los Ortega para abastecimiento comunal de manera que los habitantes de toda la isla tengan acceso a agua.</p> <p>Control y monitoreo de caudales en manantiales para desarrollo de proyecto de captación y aprovechamiento del recurso a nivel comunal.</p>	<p>Alcaldía Municipal, ENACAL, MARENA, MINSA.</p> <p>ONGs: Fundación del Río, ASODELCO, APDS, Huelva Solentiname.</p>

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

	<p>Implementación de redes de monitoreo de parámetros meteorológicos para obtener datos puntuales de precipitación en la isla y mantener actualizado la oferta hídrica subterránea.</p> <p>Evaluación de los efectos del cambio climático sobre las aguas subterráneas.</p> <p>Establecimiento de un programa de monitoreo y mantenimiento de pozos y manantiales.</p>	
--	--	--

V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de esta investigación, se deducen conclusiones sobre aspectos hidrogeológicos y de acuíferos en la Isla Mancarrón del Archipiélago de Solentiname así como su disponibilidad y aprovechamiento. Estas se exponen a continuación.

- Se determinó que el acuífero tiene una disponibilidad de 48.68 MMCA en época de sequía; reserva que es suficiente para abastecer la población total actual y de proyecciones futuras (año 2022) de la Isla Mancarrón.
- Bajo un escenario de cambio climático moderado, las reservas del acuífero no son suficientes para satisfacer la demanda de la población total de la Isla Mancarrón en el año 2050; ya que habría un déficit de 22.78 MMCA.
- La velocidad de flujo horizontal en el acuífero es de 0.055 m/d, la cual fue determinada utilizando la Ley de Darcy y el Método de Dilución Puntual.
- Las zonas con mayor recarga hídrica se localizan en las comunidades El Colectivo y Los Ortega.
- Las formaciones acuíferas, pertenecientes a rocas terciarias del Grupo Coyol Superior, están asociadas al sistema de fallamiento local, que le confiere una permeabilidad secundaria, y en algunos sectores, el acuífero está hidráulicamente conectado con el Lago Cocibolca.
- El acuífero fracturado tiene un espesor mayor a 60 metros y un ancho mínimo de 50 metros. Por lo general se encuentra bajo condiciones libres; y como semiconfinado en algunos sectores.

- Los siete sitios propuestos para perforación de pozos para suministro de agua a la población, se localizan en las zonas fracturadas con espesores mínimos de aproximadamente 45 metros.
- Las estrategias de acción están dirigidas a garantizar el acceso óptimo de agua a la población total de la Isla Mancarrón; con el objetivo de asegurar la disponibilidad del recurso para las generaciones futuras.
- Las estrategias están encaminadas a fortalecer los procesos de monitoreo y gestión a nivel gubernamental, organizacional y comunal.

VI. RECOMENDACIONES

Continuar con la red de monitoreo mensual de: precipitación, niveles de agua y caudales de los manantiales, para determinar la disponibilidad del acuífero en el futuro; así como la dinámica del acuífero ante los efectos del cambio climático.

Proteger las zonas de recarga hídrica identificadas en la Isla Mancarrón, para garantizar la infiltración efectiva al acuífero.

Realizar un plan de gestión para garantizar el acceso óptimo de agua segura a la población total de la Isla Mancarrón, a través de la perforación de pozos en los sitios propuestos.

La acción conjunta de las Instituciones de Gobierno, Organismos y comunidad en general, en la implementación de las estrategias sugeridas, garantizará el manejo adecuado del recurso hídrico para obtener resultados integrales en beneficio de la población.

Implementar las medidas de seguridad y protección sanitaria correspondientes, a los pozos existentes y manantiales, para que cumplan con los parámetros establecidos en las Normas para el consumo de la población.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- ACRA, 2007.** *Caracterización socioeconómica del Archipiélago de Solentiname.* Managua, Nicaragua.
- Amisial Roger, Jegat Hernet, 1984.** *Aprovechamiento y modelos de aguas subterráneas.* Banco de programa CIDIAT, Merida, Venezuela.
- Aracil, Enrique, et all., 2002.** *Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica.* U.P de Cartagena, Universidad de Burgos.
- Astier, J, 1982.** *Geofísica aplicada a la hidrogeología.* Segunda edición, Programa para el desarrollo de las Naciones Unidas. Madrid, España.
- Auge M, 2008.** *Métodos geoelectricos para la prospección de aguas subterráneas.* Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Baca, Muricio et all, 2010.** *Determinación de la geometría del Acuífero de Morrosquillo y geología detallada del Acuífero de Toluviejo, Sucre.* Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Banco Mundial, 2013.** *Prioridades de Política e Inversión Para Reducir la Degradación Ambiental de la Cuenca del Lago de Nicaragua (Cocibolca).* Nicaragua.
- Bautista-Belmonte, Navarro-Mendoza y Aragón Sulik M., 2002.** *Determinación de la geometría y flujo subterráneo del acuífero del valle de Zaachila, Oax. como base para el manejo del recurso.* Instituto Politécnico nacional, Centro interdisciplinario de investigación Para el desarrollo integral Regional, México.
- Butler S., 1957:** *Engineering hydrology.*- 356 págs. Prentice hall Inc, Estados Unidos.
- Calvo-Alvarado Julio, 2010.** *Tema 1, Introducción al balance hídrico.* Curso Nacional de Cuencas Hidrográficas, Costa Rica.

- CAPRE, 1995.** *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano.* Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica. San José, Costa Rica.
- CIRA/UNAN-Managua, 2007.** *Informe técnico Análisis de la relación entre las presiones antropogénicas y el estado de la contaminación del Lago Cocibolca de Nicaragua,* Managua.
- CIRA/UNAN- Managua., 2008.** Caracterización hidrogeológica y evaluación de calidad de agua para el archipiélago de Solentiname. CIRA-UNAN, Managua, Nicaragua.
- Credes 1995.** Estrategia de conservación y desarrollo de Solentiname. APDS-FDR-MARENA.
- Custodio B, Llamas E, 2001.** *Recarga Hídrica.* Madrid, España.
- Cuesta, Alfonso, 2007.** *Prospección geofísica en métodos potenciales: tomografía eléctrica y sondeos eléctricos verticales para caracterización de suelos y aplicación en estudios hidrogeológicos.* Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- Dahlin Torleif, 1993.** *Resistivity survey at Stora Uppåkra, Sweden.* Área de tecnología, Universidad de Lund, Suiza.
- ENACAL, 2006.** *Sobre el Recurso Agua y su Situación en Nicaragua.* Organización Panamericana de la Salud, Nicaragua.
- Elming Sten, Widenfalk Lennart, Rodríguez Dionisio, 1998.** *Investigación geotécnica en Nicaragua.* Proyecto conjunto Suecia-Nicaragua durante el período 1981-1991, Universidad Tecnológica de Luleå, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Managua, Nicaragua.
- Faustino, J. 2006.** *Notas de clase para el curso identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica.* San Salvador, ES, CATIE. 113
- Faustino, J. (2011).** *Importancia del Bosque- Agua. Manual Manejo Integrado de Cuencas* (CATIE, Ed.).

- FAO, 2009.** *Guía para la descripción de suelos.* Cuarta edición, Proyecto FAO-SWALIM. Roma
- FCIHS, 2009.** *Hidrogeología, conceptos básicos de hidrología subterránea.* Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona, España.
- Fenzel, Norbet, 1989.** *Nicaragua, geografía, clima, geología y hidrogeología.* UFPA; INETER, INAN. Nicaragua
- Fetter Charles, 2001.** *Applied Hydrogeology.* 4th Ed, University of Wisconsin – Oshkosh
- Grassi C.J, 1976.** *Método de riego.* Materia de enseñanza no 72. CIDIAT Mérida, Venezuela.
- GWP Centroamérica, 2011.** *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: Hacia una gestión integrada.* Asociación Mundial para el Agua GWP Centroamérica, Zonas Fronterizas en América Central (ZONAF), Unión Europea (UE) y Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE).
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985.** *Reference crop evapotranspiration from temperature.* Applied Eng. In Agric., 1(2): 96-99.
- Huelva Solentiname, 2009.** *Proyecto de Abastecimiento de Agua Potable Solentiname.* Archipiélago de Solentiname, Nicaragua.
- IGG/CIGEO- Managua, 2011.** *Prospección de aguas subterráneas en la comunidad de Sacacli del Municipio de San Rafael del Norte, Jinotega.* UNAN-Managua.
- INAA.** *Normas Técnicas para el diseño y abastecimiento y potabilización del Agua.* Managua, Nicaragua.
- INETER, 2001.** *Amenazas Naturales en Nicaragua.* Managua, Nicaragua.
- INETER, 2009.** *Mapa de provincias geológicas Nicaragua.* Managua, Nicaragua.
- INETER, 2012.** Dirección de Meteorología. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Managua, Nicaragua.

- Johnson 1967.** Specific yield: compilation of specific yields for various materials
Water Supply Paper 1662-D
- Krásný, J & Hentch, H., 1998.** *Estudio hidrogeológico e hidroquímico de la región del pacífico de Nicaragua.* Instituto de Estudios Territoriales (INETER), Cooperación Suiza (COSUDE), Nicaragua.
- Keller, G.V y Frischknecht F.L, 1996.** *Electrical methods in Geophysical Prospecting: Pergamon press.* New York, Estados Unidos.
- KOCHERIN, O.J. 1916.** *Materials on water research.* Rusia.
- Köppen-Geiger,1936.** *Clasificación Climática,* Band I, Teil C. Berlín, Alemania.
- Kuang, J. 1971:** *Estudio Geológico del Pacífico de Nicaragua.* Catastro e inventario de recursos naturales. Nicaragua
- Kohler M, Linsley R & Paulus L, 1958.** *Hydrology for engineers.-* 340 págs. McGraw hill, Nueva York, Estados Unidos.
- Loke, M. H. & Dahlin, T. 1997.** *A combined Gauss-Newton and quasi-Newton inversion method for the interpretation of apparent resistivity pseudosections.* 3^a Meeting of the Environmental and Engineering Geophysics Society, Denmark.
- Loke, M.H, 2000.** *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.* A practical guide to 2-D and 3-D surveys. University of Birmingham
Página web: www.bham.ac.uk/EarthSciences/people/staff/loke_m.html
- Mayora, Delgado, 2007.** *Estudio de prospección de agua subterránea en sitios específicos del Archipiélago de Solentiname.* ACRA, Managua, Nicaragua.
- MARENA, 1990.** *Decreto Ejecutivo No. 527- Resolución 6699 Monumento Nacional del Archipiélago de Solentiname.* Nicaragua.
- MARENA, 1997.** *Estudio de Diagnóstico de la Cuenca del Río San Juan y Lineamientos del Plan de Acción.* Ministerio del Ambiente y Energía, Costa

Rica (MINAE), Organización de los Estados Americanos (OEA) Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) Nicaragua.

MARENA, 2004. *Programa de Pago por Servicios Ambientales para el desarrollo y la conservación de la Reserva de Biosfera del Sureste de Nicaragua- Archipiélago Solentiname – Refugio de Vida Silvestre Los Guatuzos.* Fundación Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (IPS).

MARENA, 2010. *Plan de manejo Monumento Nacional de Archipiélago de Solentiname.* Dirección General de Patrimonio Natural, Dirección Específica Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP). Nicaragua.

Matus, 2009. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica.* Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Costa Rica.

Montenegro, Salvador 2013. *Carta HKDN Group.* CIRA-UNAN, Nicaragua.

McNeill, J. D., 1980. *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number: technical note TN-6.* Geonics limited, Mississauga, Ontario, Canada.

Mc. Birney & Williams, 1966. *Volcanic history of Nicaragua.* Universidad de California, Estados Unidos.

ONU 2011. *Objetivos de desarrollo del Milenio, 2011.* New York

Reyes O, 2010. *Caracterización del estado actual de los suelos del departamento de León, en base a sus características físicas y sistemas de producción.* León, Nicaragua.

Rionda, Erika, 2001. *Exploración geofísica e hidrogeológica integrando sondeos eléctricos verticales y sondeos electromagnéticos en San Jose Buenavista, Puebla.* Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Rodríguez Pamela, 2009. *Zonificación de la disponibilidad del recurso hídrico de la microcuenca del Río Ciruelas.* Universidad Nacional de Costa Rica.

- Rubio, Félix y Plata, Juan., 2007.** *Ensayo para la determinación de parámetros hidrodinámicos en una zona del acuífero Almonte-Marismas (Doñana, Huelva).* Sevilla, España.
- Sánchez Javier, 1987.** *Prospección geofísica, sondeos eléctricos verticales.* Departamento de geología, Universidad de Salamanca. España
- Salgado, Rafael, 2007.** *Estudio hidrogeológico para la localización de un pozo de abastecimiento de agua potable en el Archipiélago de Solentiname.* ACRA, Managua, Nicaragua.
- Sequeira, L. and Escolero, 2010.** *The application of electrical methods in exploration for ground water resources in the River Malacatoya sub-basin, Nicaragua.* Geofísica Internacional 49 (1), 351-360.
- Sequeira, Lener, 1998.** *Estudio Geofísico del acuífero del Valle de Estelí, Nicaragua.* CIGEO – UNAN, Nicaragua.
- Schosinsky & Losilla, 2006.** *Calculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídricos de suelos.* Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Thornwaite, C.W. 1948.** *An approach towards a rational classification of climate.* Geogr. Rev., 38: 55-89
- UNESCO 2003.** *Agua para todos, agua para la vida.* Mundi-prensa, España.
- Weyl R., 1980:** *Geology of Central America.* Borntraeger. Berlin, Alemania.
- Villarroya Ferpín, 2009.** *Tema: Tipo de acuíferos y parámetros hidrogeológicos.* Universidad Complutense, España.
- Winter Thomas, Harvey Judson, Franke O, Alley Willian, 1998.** *Ground water and surface water a single resource.* U.S Geological Survey. Estados Unidos

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Formatos de levantamiento de campo

a) Medición de caudales de manantiales

Nombre del Manantial	Coordenadas	Elevación (msnm)	Fecha	Hora	Volumen (L)	Tiempo promedio (s)

b) Inventario de pozos

Nombre del Pozo	Coordenadas	Elevación (msnm)	Profundidad	NEA	Observaciones

c) Medición de la precipitación en pluviómetros

Responsable	Sitio	Fecha	Hora	Volumen de agua de lluvia mm

d) Medición de parámetros de campo en fuentes de agua

Objetivo	Coordenadas	Fecha	Hora	Temp	pH	CE	OD	REDOX

Anexo 2. Registro de precipitación en Isla Mancarrón – período 2013-2014.

Registro de datos 2013 (mm)									Registro de datos 2014 (mm)		
Abril	Mayo	Junio	Julio	Agos.	Sept	Oct	Nov	Dic	Enero	Feb	Marzo
42.2	162.5	267	228	127	197	160	46	49.05	26.6	23	14.1

Anexo 3. Reconocimiento geológico Isla Mancarrón

Ruta	Pt	Este	Norte	Elev msnm	Azimut	Rb. Fracturas	Buzamiento	Estrato	Descripción
Día 1	Pt. 1	715919	1235519					Aglomerado	Aglomerado de rocas, con fragmentos semi-angulosos posiblemente de basalto?
Día 1	Pt. 2	713301	1234836					Andesita	Rocas redondeadas y acumuladas por el transporte.
Día 1	Pt. 3	713319	1234532		310	N50W	40SE	Basalto	Roca fracturada, moldeada y alterada por el interperismo.
Día 1	Pt. 4	713323	1234526		19	N19E		Basalto	Roca alterada y fracturada, alrededor hay rocas igualmente muy alteradas y más porosas.
Día 1	Pt. 5	713324	1234567		350	N10W		Basalto	Roca fracturada vertical- con algunas cavidades en su exterior
Día 1	Pt. 6	713367	1234637	64			35NW	Basalto	Roca con cavidades en el exterior y maciza en el interior
Día 1	Pt. 7	713663	1234770	45					Área plana con abundantes rocas de redondeadas a sub-redondeadas.
Día 1	Pt. 8	713889	1235085	69					Rocas alteradas color gris oscuros, angulosos y redondeados
Día 1	Pt. 9	713968	1235089	58	355	N5W	45SW	Basalto	Roca maciza, alterada.
Día 1	Pt. 10	714055	1235059	20					suelo arcilloso, y arenoso en las cercanías del manantial
Día 1	Pt. 11	713885	1235330	62					Humedal.
Día 1	Pt. 12	713865	1235452	69					Sedimentos de rocas, rodados.
Día 1	Pt. 13	713706	1235780	79	120 - 245	S60E - S65W		Aglomerado	Roca alterada, fracturada internamente, con incrustaciones de basalto.
Día 1	Pt. 14	713447	1236094	54	5	N5E	50SE	Basalto	Roca fracturada y alterada, de color gris oscuro.
Día 1	Pt. 15	713408	1236196	61	325 - 83	N35W - N83E		Basalto	Roca fracturada, alterada, maciza.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

Día 1	Pt. 16	713740	1236432	71					Roca muy alterada, de color azul metálico, con partes color bronce.
Día 1	Pt. 17	713955	1236408	48	280	Falla N80W		Aglomerado	Afloramiento de roca. H=2.30m. Fracturada desde la base, posiblemente fallada.
Día 1	Pt. 18	713929	1236595	62					Corte de suelo. Primera capa: arcilla, parte superior de color rojizo, posiblemente por la presencia de materia orgánica, y la parte inferior color café. H1=0.58m. Segunda capa: compuesta por conglomerado, fragmentos de roca volcánica. H2=0.54m?
Día 1	Pt. 19	714010	1236878	79					Suelo arcilloso. Área plana, abundante vegetación.
Día 1	Pt. 20	714345	1236968	63				aglomerado	Afloramiento de roca, muy alterada, con cavidades relativamente grandes.
Día 1	Pt. 21	714359	123641	64	87	Falla N87E	30NW	aglomerado	A 8.89m del afloramiento anterior. Posiblemente sean del mismo material. H=3.40m. Posible zona de falla entre los 2 afloramientos.
Día 1	Pt. 22	714537	1236758	173					Suelo rocoso.
Día 1	Pt. 23	714829	1236949	141	150	Falla S30°E		Aglomerado	Roca con fragmentos incrustados, fracturada. Posible fallamiento, debido a que 2 rocas son fracturadas en la misma dirección.
Día 1	Pt. 24	715253	1237014	102					Se observan rodados, por las corrientes.
Día 1	Pt. 25	715544	1237169	75	10	Falla N10°E		Basalto	Rocas fracturadas en la misma dirección. Presencia de un espejo de falla, posible sistema de falla. Cause en donde se observa el suelo rocoso fallado.
Día 1	Pt. 26	715775	1237226	51					Corte de suelo. Cuenca de corrientes. Se observa el mismo estrato de conglomerado no consolidado..
Día 1	Pt. 27	716127	123704	62				Basalto	Cuenca de rocas rodadas, color oscuro, muy redondeadas.
Día 1	Pt. 28	716538	1237353	80	7	Falla N7°E		Basalto	Presencia de rocas fracturadas muy seguido. Posible fallamiento.
Día 2	Pt. 1	715466	1237171	70	290	Falla N70°W - N55°W		Basalto	Roca fracturada posiblemente por una falla. Se encuentra alterada.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

Día 2	Pt. 2	716605	1238097		297	Falla N63W	55NE	Aglomerado	Roca de H=2.03m, fracturada con una separación de 0.17m. Los fragmentos de rocas son basalto.
Día 2	Pt. 3	714845	1236955	130	97	Falla S83E		Aglomerado	Roca compuesta por fragmentos de rocas de basalto. Fracturada con una separación de 0.48m, y H=1.45m.
Día 2	Pt. 4	714527	1236764	144	300	Falla N60W		Aglomerado	Roca fracturada con una separación de 0.35m.
Día 2	Pt. 5	714286	1236827	72	350	N10W		Basalto	Roca fracturada, cuya fractura estaba rellena con suelo arcilloso. Poseía dos fracturas, una abierta y otra cerrada.
Día 2	Pt. 6	714011	1236862	52					Campo abierto con mucha vegetación.
Día 2	Pt. 7	713931	1237320	48					Presencia de rocas basálticas.
Día 2	Pt. 8	713884	1237582	64			45NE	Aglomerado	Topografía baja y plana, suelo arcilloso con mucha vegetación. Presencia de rocas aglomeráticas y basálticas, fácil de fracturar.
Día 2	Pt. 9	713782	1237954	54				Aglomerado	Roca alterada, fracturada en la parte superior.
Día 2	Pt. 10	713742	1238037	49				Aglomerado	Abundantes sedimentos transportados por las corrientes del lago que llenan las orillas. Se observa la presencia de afloramientos de rocas.
Día 2	Pt. 11	713714	1238091	54	208	Falla S28°W		Basalto	Posible zona fallada, debido a que 2 rocas se encontraban fracturadas en la misma dirección.
Día 2	Pt. 12	713565	1238684	79					Topografía plana.
Día 2	Pt. 13	713563	1238910	75					Área de cultivo.
Día 2	Pt. 14	713608	1239079	80	110	Falla S70E			Rocas de color blancuzco en el exterior. Suelo arcilloso.
Día 2	Pt. 15	713694	1239165	54					Siembro de café, color del suelo blancuzco.
Día 3	Pt. 1	715848	1235057	81	100	Falla S80E		Basalto	Varias rocas con aproximadamente la misma dirección de fractura
Día 3	Pt. 2	715704	1235456	99	285	Falla N75W		Basalto	Roca fracturada y semi-alterada.
Día 3	Pt. 3	715703	1235495	97	213	S33W		Basalto	Encontrada a pocos metros de la anterior, igualmente se encuentra fracturada y alterada.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

Día 3	Pt. 4	715897	1235745	63					Zona de rodamiento, hay fragmentos de rocas fracturados y alterados, bastante redondeados.
Día 3	Pt. 5	715993	1236155	45					Zona plana con abundante vegetación, suelo arcilloso.
Día 3	Pt. 6	716488	1236049	70	285 - 210	N75W - S30W		Basalto	Zona con abundantes rocas a su alrededor. Se encuentra fracturación en una roca con cavidades, posiblemente una lava, y otra roca maciza.
Día 3	Pt. 7	716878	1236059	125				Basalto	Zona de rocas alteradas muy duras, no hay vestigios de actividad tectónica.
Día 3	Pt. 8	717278	1235883	122	125	S55E		Basalto	Roca fracturada y meteorizada
Día 3	Pt. 9	717570	1235899	55					Área de cultivo.
Día 3	Pt. 10	717657	1235910	63	260	S80W		Basalto	Suelo arcilloso, área de rodados. A 5m se observa una roca fracturada.
Día 3	Pt. 11	717734	1236011	68	10	N10E		Basalto	Roca fracturada, alterada, semidura.
Día 3	Pt. 12	717283	1236224	67	240	S60W		Basalto	Cauce con rocas redondeadas, se observa una roca fracturada.
Día 3	Pt. 13	717208	1236409	43				Aglomerado	Afloramiento de suelo rocoso
Día 3	Pt. 14	717192	1236519	61				Aglomerado	Bloque caído, con fragmentos de rocas incrustados.
Día 3	Pt. 15	717200	1236949	66				Aglomerado	Afloramiento de roca aglomerática color blancuzco.
Día 3	Pt. 16	717128	1237140	57					Topografía plana, áreas bajas.
Día 3	Pt. 17	716950	1237424	65	350	N10W		Basalto	Roca oscura, fracturada y alterada.
Día 3	Pt. 18	716775	1237583	57				Aglomerado	Roca con incrustaciones.
Día 3	Pt. 19	716801	1237939	69					Cauce con rocas redondeadas que desembocan al lago.
Día 3	Pt. 20	716168	1238254	67					Suelo muy rojizo.
Día 3	Pt. 21	716727	1238379	76				Aglomerado	Afloramiento de roca, con fragmentos incrustados. De color blancuzco
Día 3	Pt. 22	716718	1238409	54					Cauce.
Día 3	Pt. 23	716496	1238557	81					Suelo de color claro, blancuzco.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

Día 3	Pt. 24	716193	1238581	62				Aglomerado	Rocas superficialmente diaclasadas, muy erosionadas.
Día 3	Pt. 25	716057	1238550	52					Corte de suelo, parte superior suelo arcilloso, parte inferior, suelo detrítico. A sus orillas se encuentra un suelo arenoso.
Día 3	Pt. 26	715623	1238629	65	237	S57W		Basalto	Roca fracturada, color gris.
Día 4	Pt. 1	716122	1234914	39	340 - 30	N20W - N30E		Aglomerado	suelo aglomerado con fragmentos de roca en la superficie, fracturadas en la misma dirección
Día 4	Pt. 2	715692	1235601	115	350	N10W		Basalto	Suelo arcilloso rojizo, poca presencia de rocas. Se observa una roca fracturada.
Día 4	Pt. 3	715636	1235642	124	75	N75E		Basalto	Roca bastante fracturada y alterada.
Día 4	Pt. 4	715477	1235750	129	70	Falla N70E		Basalto	Rocas fracturadas, se observa el desplazamiento.
Día 4	Pt. 5	715418	1235902	105					Cauce con abundantes rocas, fragmentos angulosos.
Día 4	Pt. 6	715337	1235938	119	30	N30E		Aglomerado	Afloramiento de roca. A 2m se observa un afloramiento más grande de la misma roca, bastante diaclasada.
Día 4	Pt. 7	715267	1236023	64					Zona de transportación de rocas, fragmentos redondeados.
Día 4	Pt. 8	715270	1236038	105	350	N10W		Basalto	Roca fracturada, alterada.
Día 4	Pt. 9	715251	1236050	116	47 - 310	Falla N47E - N50W		Aglomerado	Zona de falla, se encuentra completamente fracturadas las rocas, con predominancia en un mismo sentido. Están muy alteradas.
Día 4	Pt. 10	715227	1236158	105	82	N82E		Aglomerado	Roca fracturada, con mucho musgo encima.
Día 4	Pt. 11	715225	1236176	104	40	N40E		Basalto	Roca fracturada, alterada y semidura.
Día 4	Pt. 12	715231	1236250	87				Aglomerado	Cauce muy erosionado. Se observa un afloramiento de roca con fragmentos incrustados.
Día 4	Pt. 13	715244	1236320	91	142	S38E		Basalto	Roca fracturada, muy alterada y dura.
Día 4	Pt. 14	715237	1236343	111				Basalto	Roca fracturada
Día 4	Pt. 15	715224	1236347	114	7	Falla N7E		Basalto	Roca fracturada

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

Día 4	Pt. 16	715216	1236421	121				Basalto	Zona de rodados, se observan rocas fracturadas posiblemente por el transporte.
Día 4	Pt. 17	715196	1236430	138				Basalto	Roca muy fracturada, alterada y muy dura.
Día 4	Pt. 18	715203	1236569	178					Zona arcillosa, poca presencia de rocas.
Día 4	Pt. 19	715240	1236597	162				Basalto	Se observan rocas debido a la erosión, se encuentran moldeadas por el agua.
Día 4	Pt. 20	715401	1236647	142				Basalto	presencia de rocas alteradas y algunas fracturadas
Día 4	Pt. 21	715397	1236664	129	162	S18E		Basalto	Roca fracturada y alterada.
Día 4	Pt. 22	715397	1236664	129	90	EF		Basalto	Roca fracturada a pocos metros de la anterior.
Día 4	Pt. 23	715544	1236729	169					Área plana, abundante vegetación, suelo arcilloso de color oscuro.
Día 4	Pt. 24	715589	1236839	162					Área plana, poca presencia de rocas, bastante vegetación.
Día 4	Pt. 25	715564	1236912	156				Aglomerado	Afloramiento de rocas.
Día 4	Pt. 26	715534	1237077						Pendiente inclinada.
Día 4	Pt. 27	715554	1237153	78	237	S57W		Basalto	Roca bastante fracturada y alterada.
Día 4	Pt. 28	715572	1237182	75					Cauce con rocas redondeadas.
Día 4	Pt. 29	715751	1237273						Cauce.
Día 4	Pt. 30	715577	1237311	104					Pendiente inclinada, poca presencia de rocas.
Día 4	Pt. 31	715612	1237401	153					Pendiente inclinada, poca presencia de rocas.
Día 4	Pt. 32	715645	1237457	129	237	S57W		Basalto	Presencia de rocas semi-fracturadas.
Día 4	Pt. 33	715662	1237490	155					Abundantes rocas en el terreno, cubierto por suelo vegetal. Fragmentos angulosos y redondeados.
Día 4	Pt. 34	715668	1237554	105					Cauce.
Día 4	Pt. 35	715660	1237608	116				Aglomerado	Suelo rocoso con arcilla.
Día 4	Pt. 36	715693	1237681	106					Suelo con abundantes rocas y con arcilla rojiza.
Día 4	Pt. 37	715731	1237822	140					Pendiente inclinada, suelo arcilloso con poca presencia de rocas.
Día 4	Pt. 38	715760	1237958	126					Difícil de ver las rocas debido a la abundante vegetación presente.

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

Día 4	Pt. 39	715740	1238093	69				Basalto	Roca alterada, a su alrededor el suelo es arcilloso.
Día 4	Pt. 40	715710	1238140	58					Suelo con abundantes rocas, dando un aspecto de suelo rocoso.
Día 4	Pt. 41	715766	1238265	57				Aglomerado	Área plana con afloramientos de rocas.
Día 4	Pt. 42	715646	1238487	75					Cauce en donde se observa un cambio de coloración en el suelo de Blancuzco (S) a rojizo (N).

Anexo 4. Inventario de Objetos Hidrogeológicos

Pozo/Manantial	Mes	Fecha	T °C	pH	CE µs/cm	OD mg/L	%OD	REDOX mv	SDT mg/L
Límites permisibles normas CAPRE			18-30	6.5-8.5	400				1000
PE-1	Nov	27/11/2013	26.88	6.09	97	1.12	10.2	-213	49
	Ene	14/01/2014	25.12	6.75	132	1	8.1	55	66
	Feb	17-feb-14	25.7	6.88	179.33	1.3	14	-41,9	65
	Mar	27-mar-14	26.3	6.8	189	1.5	18	ND	ND
PE-2	Nov	26/11/2013	27.19	7.11	113	1.75	16.5	-209.8	ND
	Ene	16/01/2014	25.36	6.88	141	1	8.6	62.2	ND
	Febr	17-feb-14	25.2	6.44	166.86	1.4	20	0,3	68
	Mar	27-mar-14	26.1	6.64	319	1.4	17	ND	ND
PE-3	Nov	26/11/2013	26.25	6.26	60	1	10.8	-218.5	ND
PE-4	Nov	26/11/2013	26.02	7.42	823	1.3	13	-214.8	411
PE-5	Nov	27/11/2013	26.3	7.38	115	3	37.5	-215	20
	Ene	16/01/2014	26.71	7.35	585	1.9	24.4	24.2	292
	Feb	16-feb-14	27.3	7.45	109.4	2	25	ND	200
	Marzo	26-mar-14	27.8	6.73	205	1.3	15	ND	ND
M1	Nov	26/11/2013	25.37	6.81	239	4.98	55.2	-173.9	119
	Ene	15/01/2014	24.8	6.87	325	1.89	22.9	96.7	163
	Feb	17-feb-14	24.6	7.5	351.97	3.8	47	36,5	165
	Mar	27-mar-14	25.6	6.68	370	1.9	11	ND	ND
M2	Nov	26/11/2013	26.16	6.92	302	5	60.1	-176	151
	Ene	15/01/2014	25.7	7.18	378	3.34	41.3	78.8	188
	Feb	17-feb-14	25.5	7.98	471	4.3	51	26.9	176
	Mar	27-mar-14	26.2	7.3	408	4.4	54	ND	ND
M3	Ene	15/01/2014	26.1	7.6	285.6	5	62.2	26.2	150
	Febr	17-feb-14	26.5	7.79	296.8	4.5	56	27,5	148
	Mar	27-mar-14	27.2	6.75	405	1.2	16	ND	ND
M4	Febr	20-feb-14	25	7.19	413.55	4.2	50	186	98
M5	Feb	17-feb	24.4	7.56	420.01	5.3	69	219,3	121

Anexo 5. Aforo en Manantiales de Isla Mancarrón

Manantial	Ubicación	Coordenadas	Elevación (msnm)	Registro de Caudal (L/s)			
				Nov-13	Ene-14	Feb-14	Mar-14
MN1	La Guatusa	714049, 1235066	75	0.0424	0.0082	0.01	0.0263
MN2	El Burro	713949, 1236385	92	0.0899	0.1849	0.1364	0.061
MN3	La Bolsa	714331, 1235910	140	0.1093	0.081	0.0156	0.1573
MN4	El Peñón	714498, 1236313	155	0.1517	0.1454	0.0271	0.0271
MN5	Cerca del Peñón	714055, 1236384	96	0.2646	0.2436	0.103	0.0967

Anexo 6. Balance Hídrico de Suelo utilizando el método de Schosinsky & Losilla G., 2006.

Tabla. BALANCE HÍDRICO ZONA DE RECARGA

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

RAD (CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra (precipitación efectiva).

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

fc [mm/d]:	776.00
I [%]:	0.5
DS [g/cm ³]:	1.30
PR [mm]:	120.00
HSi [mm]:	23.40

	[%]	[mm]
CC	23.00	35.88
PM	15.00	23.40
RAD	8.00	12.48

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

Concepto	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
P [mm]	42.2	162.5	267	228	127	197	160	46	49.05	26.6	23	14.1	1,342.45
Cf	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Pi [mm]	21.10	81.25	133.50	114.00	63.50	98.50	80.00	23.00	24.53	13.30	11.50	7.05	671.23
ESC [mm]	21.10	81.25	133.50	114.00	63.50	98.50	80.00	23.00	24.53	13.30	11.50	7.05	671.23
ETP [mm]	42.2	61.5	65.4	28	50.8	44.90	57.30	43.50	36.20	51.50	48.10	14.10	543.50
HSi [mm]	35.88	31.06	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	31.31	35.88	35.88	35.88	
HD [mm]	33.58	88.91	145.98	126.48	75.98	110.98	92.48	35.48	32.43	25.78	23.98	19.53	
ETR [mm]	25.92	61.50	65.40	28.00	50.80	44.90	57.30	27.57	24.12	20.75	19.04	10.36	
HSf [mm]	31.06	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	31.31	31.72	28.43	28.34	32.57	
DCC [mm]	4.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.57	4.16	7.45	7.54	3.31	
Rp [mm]	0.00	14.93	68.10	86.00	12.70	53.60	22.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	258.03
Rp [mm/ha]	0.00	149.34	681.00	860.00	127.00	536.00	227.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2,580.34
ETR [mm]	0.00	74.67	340.50	430.00	63.50	268.00	113.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
NR [mm]	21.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.50	16.25	38.20	36.60	7.05	139.70

Área (km 2) 22
Rp (MMCA) 56.77

Anexo 7. Proyecciones de Recarga Potencial del acuífero de Isla Mancarrón

a) Calculo de ETP

- Período histórico 1992-2012:

	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
temp	26.1	26	25.2	24.8	24.7	25.2	26.1	27.1	26.9	26.4	25.8	26
i	12.24	12.13	11.61	11.32	11.23	11.57	12.21	12.89	12.78	12.39	12.01	12.12
ETP sin corr	128.1	125.5	113.3	106.9	105.0	112.6	127.5	144.5	141.8	131.8	122.6	125.2
nºdias mes	30	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31
nº horas luz	8.25	8.34	7.91	8.1	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.6	8.86	8.71
ETP corr.	88.1	90.1	74.7	74.5	73.5	65.4	92.8	100.8	107.5	94.4	93.5	93.9
P	228.1	245.1	170.6	101.0	75.3	37.3	31.8	56.8	209.5	309.6	307.5	266.4
ETP	88.1	90.1	74.7	74.5	73.5	65.4	53.7	56.8	107.5	94.4	93.5	93.9

- Con variables de cambio climático para 2050:

	sept	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
temp	27.8	27.7	26.9	26.5	26.4	26.9	27.81	28.2	28.61	28.05	27.52	27.67
i	13.46	13.35	12.81	12.51	12.42	12.78	13.44	13.72	14.03	13.62	13.22	13.34
ETP sin corr	159.7	156.1	139.6	131.0	128.4	138.7	158.9	168.2	178.4	164.7	152.2	155.7
nºdias mes	30	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31
nº horas luz	8.25	8.34	7.91	8.1	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.6	8.86	8.71
ETP corr.	109.8	112.1	92.0	91.4	89.9	80.6	115.6	117.3	135.4	118.0	116.1	116.8
P	208.5	263.9	165.2	106.4	62.6	31.0	26.4	47.2	191.5	283.0	281.0	243.5
ETP	109.8	112.1	92.0	91.4	89.9	53.7	26.4	47.2	135.4	118.0	116.1	116.8

b) Balance hídrico:

- Registro Histórico 2002-2012

Concepto	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
P [mm]	56.818	230.5	340.5	338.2	293.03	250.86	317.54	198.82	128.06	75.28	37.33	31.83	2298.76
Cf	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Pi [mm]	28.40909091	115.25	170.25	169.1	146.515	125.43	158.77	99.41	64.03	37.6409091	18.664	15.9136	1149.38
ESC [mm]	28.40909091	115.25	170.25	169.1	146.515	125.43	158.77	99.41	64.03	37.6409091	18.664	15.9136	1149.38
ETP [mm]	56.81818182	107.5	94.4	93.5	93.9	88.1	90.1	74.7	74.5	73.5	65.4	53.7	966.359
HSi [mm]	35.88	30.76377	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	
HD [mm]	40.88909091	122.6138	182.73	181.58	158.995	137.91	171.25	111.89	76.51	50.1209091	31.144	28.3936	
ETR [mm]	33.52532117	107.5436	94.4374	93.539663	93.9014	88.0978	90.13346	74.7005	65.5381	42.8446419	26.155	23.0415	
HSf [mm]	30.76376974	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	34.3719	30.6762671	28.389	28.7522	
DCC [mm]	5.116230257	0	0	0	0	0	0	0	1.508099	5.20373286	7.4911	7.12783	
Rp [mm]	0	2.590134	75.8126	75.560337	52.6136	37.3322	68.63654	24.7095	0	0	0	0	337.255
Rp [mm/ha]	0	25.90134	758.126	755.60337	526.136	373.322	686.3654	247.095	0	0	0	0	3372.55
ETR [mm]	0	12.95067	379.063	377.80168	263.068	186.661	343.1827	123.547	0	0	0	0	
NR [mm]	28.40909091	0	0	0	0	0	0	0	10.51638	35.8447287	46.764	37.8136	159.347

Área (km 2) 22
Rp (MMCA) 74

- Cambio climático para 2050

Concepto	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
P [mm]	47.216	191.546	282.956	281.044	243.508	208.465	263.876	165.219	106.418	62.56	31.02	26.45	1910.27
Cf	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Pi [mm]	23.60795455	95.77275	141.478	140.5221	121.75397	104.2323	131.9379	82.6097	53.20893	31.2795955	15.509	13.2242	955.137
ESC [mm]	23.60795455	95.77275	141.478	140.5221	121.75397	104.2323	131.9379	82.6097	53.20893	31.2795955	15.509	13.2242	955.137
ETP [mm]	47.22	135.4	118.0	116.1	116.8	109.8	112.1	92.0	91.4	89.9	53.7	26.4	1108.92
HSi [mm]	35.88	30.94453	32.1211	35.88	35.88	35.88	35.3099	35.88	34.75306	35.88	35.88	35.88	
HD [mm]	36.08795455	103.3173	150.199	153.0021	134.23397	116.7123	143.8478	95.0897	64.56199	43.7595955	27.989	25.7042	
ETR [mm]	28.54342294	94.59617	118.036	116.11519	116.79529	104.8024	112.1348	83.7366	56.80286	38.4261235	22.708	17.4638	

“Disponibilidad Hídrica Subterránea y prospección Geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua”.

HSf [mm]	30.9445316	32.12111	35.88	35.88	35.88	35.3099	35.88	34.7531	31.15913	28.733472	28.681	31.6405	
DCC [mm]	4.935468397	3.758888	0	0	0	0.5701	0	1.12694	4.72087	7.146528	7.1989	4.23953	
Rp [mm]	0	0	19.6825	24.406911	4.9586739	0	19.23298	0	0	0	0	0	68.2811
Rp [mm/ha]	0	0	196.825	244.06911	49.586739	0	192.3298	0	0	0	0	0	682.811
ETR [mm]	0	0	98.4125	122.03456	24.79337	0	96.16489	0	0	0	0	0	
NR [mm]	23.60795455	44.5308	0	0	0	5.58675	0	9.43888	39.28131	58.6351956	38.154	13.2242	232.459

Área (km 2) 22
Rp (MMCA) 15

Concepto	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
P [mm]	56.818	230.5	340.5	338.2	293.03	250.86	317.54	198.82	128.06	75.28	37.33	31.83	2298.76
Cf	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Pi [mm]	28.40909091	115.25	170.25	169.1	146.515	125.43	158.77	99.41	64.03	37.6409091	18.664	15.9136	1149.38
ESC [mm]	28.40909091	115.25	170.25	169.1	146.515	125.43	158.77	99.41	64.03	37.6409091	18.664	15.9136	1149.38
ETP [mm]	56.81818182	107.5	94.4	93.5	93.9	88.1	90.1	74.7	74.5	73.5	65.4	53.7	966.359
HSi [mm]	35.88	30.76377	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	
HD [mm]	40.88909091	122.6138	182.73	181.58	158.995	137.91	171.25	111.89	76.51	50.1209091	31.144	28.3936	
ETR [mm]	33.52532117	107.5436	94.4374	93.539663	93.9014	88.0978	90.13346	74.7005	65.5381	42.8446419	26.155	23.0415	
HSf [mm]	30.76376974	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	35.88	34.3719	30.6762671	28.389	28.7522	
DCC [mm]	5.116230257	0	0	0	0	0	0	0	1.508099	5.20373286	7.4911	7.12783	
Rp [mm]	0	2.590134	75.8126	75.560337	52.6136	37.3322	68.63654	24.7095	0	0	0	0	337.255
Rp [mm/ha]	0	25.90134	758.126	755.60337	526.136	373.322	686.3654	247.095	0	0	0	0	3372.55
ETR [mm]	0	12.95067	379.063	377.80168	263.068	186.661	343.1827	123.547	0	0	0	0	
NR [mm]	28.40909091	0	0	0	0	0	0	0	10.51638	35.8447287	46.764	37.8136	159.347

Área (km 2) 22
Rp (mmca) 74

