

**SIG DE ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN
LOS ACUIFEROS DE LA ISLA DE SAN ANDRES.**

**POR:
Liane Gamboa Corrales
Geóloga**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FALTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA
COHORTE VII**

**Manizales, Caldas
15 de Agosto de 2013**

**SIG DE ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN
LOS ACUIFEROS DE LA ISLA DE SAN ANDRES.**

**POR:
Liane Gamboa Corrales
Geóloga**

**Trabajo de grado para optar por el título de Especialista en Sistemas de
Información de Geográfica.**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FALTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA
COHORTE VII**

**Manizales, Caldas
15 de Agosto de 2013**

NOTA DE ACEPTACION

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

**Manizales, Caldas
15 de Agosto de 2013**

CONTENIDO

RESUMEN	pag. 12
PALABRAS CLAVE	12
INTRODUCCIÓN	13
1. JUSTIFICACION	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION	16
3. ANTECEDENTES	18
4. HIPÓTESIS	21
5. OBJETIVO GENERAL	22
5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
6. MARCO CONCEPTUAL	23
6.1. LOCALIZACION	23
6.2. CLIMATOLOGIA	23
6.2.1. Ciclo anula de precipitación	24
6.2.2. Ciclo anual de temperatura	24
6.2.3. Humedad relativa del aire	25
6.2.4. Brillo solar	25
6.2.5. Velocidad del viento	26
6.2.6. Evapotranspiración	26
6.2.7. Recarga	26
6.3. GEOLOGIA	26

6.4.	HIDROGEOLOGIA	28
7.	METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS	32
7.1.	DEFINICIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS	32
7.2.	MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	33
7.2.1.	Método Paramétrico GOD	34
7.2.1.1.	Variables a utilizar para análisis de vulnerabilidad a la contaminación	35
7.2.1.2.	Rangos de clasificación de vulnerabilidad	35
7.2.2.	Técnicas y herramientas utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas	36
7.2.2.1.	Perforación de pozos	36
7.2.2.2.	Pozos de observación	37
7.2.2.3.	Inventario de pozos	38
7.2.2.4.	Métodos geofísicos	38
7.2.2.5.	Estudios hidrogeológicos.	38
7.2.2.6.	Mapas geológicos	39
7.3.	APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) A LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	39
7.3.1.	Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos	40
8.	ESTADO DEL ARTE	42
9.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	46

9.1.	DETERMINACION DE PARAMETROS GOD	46
9.1.1.	Groundwater Occurrence (G)	46
9.1.2.	Overall Lithology (O)	46
9.1.3.	Depth To Groundwater (D)	46
9.1.3.1.	Descripción de las redes piezométricas de la isla	46
9.1.3.1.1.	Red de piezómetros de la zona norte	46
9.1.3.1.2.	Red de piezómetros de la Cuenca del Valle del Cove	52
9.1.3.2.	Análisis estadístico de los niveles	52
9.1.3.2.1.	Análisis de la media aritmética, varianza y la desviación estándar anual para cada piezómetro	56
9.1.3.2.2.	Distribución anual de los niveles piezométricos	56
9.1.3.3.	Selección de serie de datos a utilizar para efectos del mapa de vulnerabilidad	59
9.1.3.4.	Generación de superficies piezométricas de series de datos niño y selección del método de interpolación	61
9.2.	MAPA DE VULNERABILIDAD	74
10.	GEODATABASE	78
	CONCLUSIONES	81
	BIBLIOGRAFIA	83
	ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de atributos del Shp Groundwater	pag. 47
Tabla 2. Tabla de atributos Shp Overall Lithology	50
Tabla 3. Pozos de observación que conforman la red de piezometría	55
Tabla 4. Episodios históricos del El Niño	60
Tabla 5. Periodos piezométricos a utilizar	61

LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1. Localización de la Isla de San Andrés	23
Figura 2. Ciclo anual promedio de las precipitaciones en las tres estaciones de registro	24
Figura 3. Ciclo anual promedio de la temperatura en superficie	25
Figura 4. Mapa geológico de la isla de San Andrés	29
Figura 5. Principales unidades acuíferas de la Isla	30
Figura 6. Modelo hidrogeológico conceptual	31
Figura 7. Sistema de indexación GOD, para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación	37
Figura 8. Descripción esquemática del método GOD, Tomado de Vergara V., et Al, 2009	41
Figura 9. Mapa de polígonos Groundwater	47
Figura 10. Mapa Raster Groundwater	48
Figura 11. Mapa de polígonos de Overall Litology	49
Figura 12. Mapa Raster Overall Lithology	51
Figura 13. Mapa de localización piezómetros red del Sector Norte	53
Figura 14. Mapa de localización piezómetros de la Red del Valle del Cove	54
Figura 15. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 1996	57
Figura 16. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 2010	57
Figura 17. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 1999	58

Figura 18. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 2010	58
Figura 19. Mapa Metodo Kriging Simple	62
Figura 20. Mapa Metodo IDW	62
Figura 21. Validación cruzada entre Kriging simple e IDW	63
Figura 22. Curva QQplot del método Kriging Simple	64
Figura 23. Validación cruzada entre Kriging Simple y Ordinario	65
Figura 24. Mapa Método Kriging simple	65
Figura 25. Mapa Método Kriging Ordinario	65
Figura 26. Histograma Kriging Ordinario	66
Figura 27. Curva Normal QQplot Kriging Ordinario	67
Figura 28. Análisis de tendencias Kriging Ordinario	67
Figura 29. Semivariogram/Covariance Cloud	68
Figura 30. Trend removal	69
Figura 31. Semivariogram7Covariance Modeling	69
Figura 32. Cross Validation Kriging Ordinario con y sin trend	70
Figura 33. Mapa Kriging Ordinario sin procesamiento	70
Figura 34. Mapa Kriging Ordinario con procesamiento	70
Figura 35. Mapa de piezometría 1997	71
Figura 36. Mapa de piezometría 1998	71
Figura 37. Mapa de piezometría 2002	71
Figura 38. Mapa de piezometría 2003	71
Figura 39. Mapa de piezometría 2009	72

Figura 40. Mapa de piezometría 2010	72
Figura 41. Reclasificación según parámetros GOD	72
Figura 42. Mapa de piezometría reclasificado 1997	73
Figura 43. Mapa de piezometría reclasificado 1998	73
Figura 44. Mapa de piezometría reclasificado 2002	73
Figura 45. Mapa de piezometría reclasificado 2003	73
Figura 46. Mapa de piezometría reclasificado 2009	74
Figura 47. Mapa de piezometría reclasificado 2010	74
Figura 48. Ponderación numérica GOD	75
Figura 49. Ponderación cualitativa GOD	75
Figura 50. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1997	75
Figura 51. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1998	75
Figura 52. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2002	76
Figura 53. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2003	76
Figura 54. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2009	76
Figura 55. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2010	76
Figura 56. Geodatabase GOD	78
Figura 57. Datos cargados en la Geodatabase GOD	79
Figura 58. Visualización de la Geodatabase en ArcMap	80

LISTA DE ANEXOS

Anexo digital Proyecto GOD final.mxd

Anexo digital GOD Geodatabase. gdb

RESUMEN

El presente trabajo de grado se basó en implementar la metodología GOD (Foster et Al, 1987) por medio de la utilización un conjunto de aplicaciones integradas: ArcMap y ArcCatalog, para la construcción de la cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, proceso que consistió en realizar la recopilación cartográfica de las formaciones geológicas, hidrogeológicas y superficies freáticas de los acuíferos en la isla, y realizar su reclasificación de acuerdo a controles de campo y criterios hidrogeológicos y su posterior organización en un modelo de datos Geodatabase.

El procedimiento adicionalmente consistió la generación del parámetro D del método, por medio de la selección tanto de la base de datos de piezometría de CORALINA de los periodos lluviosos y de sequía para cada año en base a la precipitación promedio anual como de los años de estudio correspondientes a los episodios históricos de El Niño máximos, quedando seleccionados los periodos de 1997 y 1998, 2002 y 2003 y 2009 y 2010.

Dicha información fue valorada por medio de estadística básica y posteriormente interpolada por los métodos IDW, Kriging Simple y Kriging Ordinario, siendo este último el que en términos estadísticos y visuales se acercó mejor a la representación en la realidad de la superficie freática de la isla; posteriormente se procedió a utilizar herramientas geoestadísticas que permitieron evaluar la interpolación de modo que se pudiera eliminar la mayor cantidad de trends en los datos para generar una representación real de los niveles freáticos.

Con el análisis de las variables GOD, se procedió a realizar algebra de mapas y generar la cartografía de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación para los años evaluados, encontrándose que el periodo 1997-1998, presenta mayores áreas de vulnerabilidad extrema en comparación con el periodo 2009-2010, lo cual se puede deber a la variación de la tabla de agua producto del incremento del nivel del mar como consecuencia de los efectos del cambio climático, o efecto de la variabilidad climática que traería consigo variación en los regímenes de precipitación y por lo tanto de la recarga hacia los acuíferos, lo cual propicia mayor cercanía de los niveles freáticos a la superficie del terreno y por lo tanto su incremento en la vulnerabilidad a la contaminación debido a las características de las rocas supra yacentes.

PALABRAS CLAVE

Acuífero, Nivel freático, Vulnerabilidad, Métodos de interpolación, Geoestadística, Reclasificación, SIG, ArcGis, Arc Catalog, Kriging Ordinario, Hidrogeología, Algebra de Mapas, Geodatabase.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio obedece a la necesidad y la importancia de actualizar el estado del recurso hídrico subterráneo en la Isla de San Andrés en cuanto a su vulnerabilidad a la contaminación, su evolución temporal y su influencia con los fenómenos de variabilidad climática que afectan la región y que condicionan en gran medida el comportamiento de los acuíferos.

El recurso hídrico subterráneo en la isla de San Andrés, el cual es la principal fuente del recurso en las islas, evidencia altos niveles de contaminación producto de las diversas actividades contaminantes relacionadas con la mala disposición de residuos líquidos y sólidos en superficie, y debido a la conformación geológica de las rocas y de su comportamiento hidrogeológico, permiten en mayor o menor medida el ingreso de dichos contaminantes a la superficie freática.

Es por ello que la implementación de herramientas y técnicas ofrecidas por los Sistemas de Información Geográfica, permitieron para este caso la gestión de la información geográfica en el marco de la metodología GOD (Foster et Al, 1987) y por medio de aplicaciones integradas como ArcGis, sus herramientas de geoestadística y ArcCatalog, por medio de lo cual fue posible hacer la gestión de la información geográfica disponible de parámetros intrínsecos tales como litología, profundidad de la tabla de agua y tipo de acuíferos, para confluír en la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación, evidenciándose con la información histórica, los años de mayor vulnerabilidad, la tendencia histórica y las zonas más críticas en el territorio; información que permite de una manera directa hacer gestión y control del territorio enmarcado en políticas restrictivas en la disposición de residuos contaminantes y planteamiento de alternativas limpias de manejo, con miras a la protección de la calidad de los acuíferos.

1. JUSTIFICACION

Las aguas subterráneas de la isla de San Andrés se encuentran en 80% contaminadas por agentes contaminantes producto de disposición en superficie de aguas negras y grises, actividades de agricultura y porcicultura (PMAS, 2000), que han llegado hasta el recurso hídrico subterráneo debido a la facilidad que tiene estos contaminantes en ser transportados por la escorrentía superficial e ingresar por zonas preferenciales a los acuíferos.

Estos agentes contaminantes obedecen en gran medida al déficit de cobertura del servicio de alcantarillado, ya que las áreas con menor cobertura corresponden específicamente a los asentamientos rurales localizados en las zonas altas (cuenca central) y zona sur oriental (cuenca sur), los cuales según L. Arboleda 2010 se encuentran en un 99% sin cobertura del servicio; sin embargo es importante aclarar que la mayor cantidad de asentamientos humanos en la isla se localizan en la zona norte, zona que cuenta con una cobertura del 43,6% (Tomado de Plan De Saneamiento y Manejo de Vertimientos para la Isla de San Andrés. PROACTIVA Aguas del Archipiélago S.A E.S.P. Departamento Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina. Diciembre 2012)

Pese a lo anterior la principal zona de recarga del acuífero San Andrés, localizada en inmediaciones de la Cuenca del Cove, se encuentra dentro de la zona sin cobertura de alcantarillado y es allí donde precisamente se desarrollan actividades culturales como porcicultura y agricultura, y pese a que la población de esta zona es netamente rural y de carácter raizal, las prácticas de disposición de aguas negras y grises se ha realizado a lo largo de los años por medio de pozos sépticos construidos sobre la roca sin ningún tipo de impermeabilización.

En cuanto a lo anterior CORALINA por medio del Plan de Manejo de la Cuenca del Cove, y basándose en los resultados de estudios de geología e hidrogeología, determinó que esta zona debía ser objeto de protección y regulación de actividades, por corresponder a la principal zona de recarga del acuífero San Andrés.

Los monitoreos de calidad del agua subterránea realizados por CORALINA, han evidenciado la presencia de contaminantes en el recurso hídrico subterráneo, pese a las declaratorias de protección, hecho comprobado por medio de los análisis de resultados obtenidos en la red de calidad, en este mismo estudio se menciona que los principales componentes contaminantes corresponden a los vertimientos de aguas grises y negras provenientes de las actividades humanas que no cuentan con un servicio de alcantarillado tales como vertimiento de aguas jabonosas, utilización de pozos sépticos, etc.

Por lo anterior la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la isla de San Andrés es fundamental para dar a conocer con criterios técnicos, las áreas que por sus características intrínsecas, dinámicas del agua subterránea, del suelo de protección y de los regímenes de precipitación, presentan mayor o menor susceptibilidad de sufrir algún daño ante amenazas contaminantes antrópicas y de esta manera generar esquemas de mayor precisión para la restricción de actividades potencialmente contaminantes y propiciar el desarrollo de cobertura de alcantarillado en las áreas requeridas

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

Los acuíferos kársticos son un recurso estratégico en muchas regiones del mundo debido a los altos caudales de agua que producen y están asociados sobre todo a formaciones carbonatadas afectadas por fisuración y disolución (karstificación). En algunos países europeos el peso de las aguas kársticas en el total del agua suministrada para los diferentes usos es importante: Austria, Eslovenia (50 %); Bélgica, Croacia, Eslovaquia, Francia (25 a 35 %); Reino Unido, Suiza (15 a 20 %); Estado Español (12 %), según datos recogidos en el informe COST 65 (1995)¹.

La isla de San Andrés presenta en su conformación un sistema geológico kárstico formado por rocas calizas denominadas Formación San Andrés y Formación San Luis, las cuales corresponden a acuíferos libres conectados hidráulicamente y que se encuentran en forma de bolsones, flotando sobre agua de mayor salinidad o interface agua dulce agua salada, su recarga se da por la infiltración de agua lluvia que ingresa por las zonas cavernosas que conectan la superficie con los niveles freáticos del agua subterránea.

Esta condición geológica particular y la conformación geográfica de insularidad se presenta en el Caribe en islas como Puerto Rico en donde el 27.5% del territorio², en su gran mayoría está compuesto por rocas carbonatadas calizas, las cuales tienen la particularidad que se disuelven cuando entran en contacto con un ácido débil; este proceso es el resultado de la meteorización de la roca carbonatada, cuando el agua de la lluvia, que al caer adquiere bióxido de carbono en el aire, convirtiéndose en ligeramente ácida, va disolviendo la roca a través del tiempo geológico.

A nivel nacional, San Andrés isla, es el único territorio con las particularidades mencionadas y con el desarrollo urbano actual, lo cual le imprime al recurso hídrico subterráneo una gran presión y demanda. Los problemas evidenciados en las islas son similares a los presentados en las zonas costeras de Colombia, en donde gran parte de la población se asienta en la zona costera ejerciendo presión sobre los recursos y haciendo uso en muchos lugares de pozos de agua subterránea, cuando la disponibilidad de agua en ríos es baja o cuando las tasas de precipitación lo son también.

¹ LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS. CASOS DEL PAIS VASCO. The karstic aquifers. Cases of the Basque Country Iñaki Antigüedad, Tomás Morales, Jesus Angel Uriarte (*). Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2007. (15.3) 325-332 I.S.S.N.: 1132-9157. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2007 (15.3)

² El Karso y su importancia en Puerto Rico. **Abel Vale Presidente Junta de Directores Ciudadanos del Karso.** <http://www.corrienteverde.com/editoriales%20anteriores/karso.html>. Revista ambiental corriente verde contactanos@corrienteverde.com. Dirección: Urb. Los Paisajes del Lago #126 . Luquillo, Puerto Rico, 00773

Las islas oceánicas como San Andrés presentan grandes retos en cuanto al suministro de servicios públicos como el agua potable, ya que su localización las hace de difícil acceso y genera una dependencia exclusiva al recurso hídrico subterráneo y el aprovechamiento del potencial del agua lluvia tanto para consumo humano y doméstico, como para la recarga de los acuíferos, principal fuente de recarga para la isla.

Sin embargo debido a que el agua lluvia no es aprovechada en su totalidad, esta condición hace que el recurso hídrico subterráneo sea de gran demanda para la población creciente de los territorios insulares y costeros donde se asienta un gran porcentaje de la población. El agua subterránea es utilizada en más de un 80 % en la isla (PMAS 2000), por lo cual se puede considerar un recurso con alta presión en cuanto a la demanda y con gran afectación por contaminación debido a las características particulares geológicas que permiten la infiltración por medio del agua lluvia de cualquier tipo de contaminante que pueda ser arrastrado por ella. Específicamente para los acuíferos presentes en la isla de San Andrés la anterior situación es preocupante, ya que sus características intrínsecas permiten la infiltración casi inmediata de los contaminantes dispuestos en superficie, imprimiéndoles una condición de contaminación no favorable para la población.

Las fuentes de contaminación naturales y antrópicas se encuentran relacionadas por un lado con la intrusión salina dada por el incremento del nivel del mar y por la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos y por el otro, los diversos contaminantes generados en actividades humanas como porcicultura, agricultura, déficit de servicios de alcantarillado, derrames de hidrocarburos, etc, que luego de ser producidos en la superficie del suelo, pueden llegar al nivel freático y contaminar el agua subterránea con velocidades muy rápidas debido a la naturaleza kárstica de las rocas.

Por lo anterior es muy importante conocer cuáles son las amenazas contaminantes puntuales y dispersas y la zonificación de la vulnerabilidad de los acuíferos en la isla, con miras a plantear mejores medidas de protección y mitigación ante dicha contaminación de un recurso fundamental y casi exclusivo para el territorio insular.

3. ANTECEDENTES

Se han realizado muchos estudios temáticos relacionados con la identificación y cartografía geológica y de los acuíferos en la isla de San Andrés desde el año 1956 (Hubach E.) y hasta 2010, en donde autores como Geister J., Guzmán G., y Hernández O. en INGEOMINAS, Huguet A., Cañas H., y Martínez C., Universidad Nacional sede Medellín – CORALINA, entre otros, realizaron aproximaciones a la cartografía geológica de la isla de San Andrés hasta la generación del modelo hidrogeológico conceptual y la modelación del acuífero, estudios que permiten tener una base cartográfica detallada de las condiciones hidrogeológicas insulares.

Sin embargo en cuanto al tema de vulnerabilidad a la contaminación las únicas aproximaciones temáticas corresponden a CORALINA - INGEOMINAS (1996), en el Estudio de las Amenazas Geológicas de la Isla de San Andrés, en donde se presentaron las condiciones fisiográficas, hidrometeorológicas, geológicas, sísmicas y usos del suelo de la isla, con el fin de identificar las potenciales amenazas de origen natural, por otro lado en INGEOMINAS (1998) se realizó el Estudio de Contaminación de Acuíferos en la Isla de San Andrés, Perforación y Construcción de la Red de Piezómetros del Sur de la Isla de San Andrés en el cual se reporta la construcción de 12 piezómetros y en Vargas M. Et a.,l (1997) – INGEOMINAS, se realizó la caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas y la primera aproximación a la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, sin embargo estos análisis no se realizaron con una serie histórica adecuada de datos en cuanto a lo relacionado con niveles estáticos del agua subterránea.

Estos trabajos previos sobre la naturaleza de los acuíferos fueron materia prima importante para la primera aproximación del conocimiento del agua subterránea en la isla, e insumo fundamental para la formulación del Plan de Manejo de aguas subterráneas (2000), el cual en combinación con aspectos sociales y económicos con los técnicos y legales, permitieron a CORALINA evaluar el problema hídrico de la Isla desde un punto de vista integral y generar un mecanismo de manejo sostenible del recurso, regulando la extracción del agua subterránea por medio de concesiones basadas en pruebas de bombeo.

Este plan de manejo se planteó para un periodo de acción de 10 años, durante los cuales se realizó monitoreo continuo de los recursos, permitiendo con ello tener un número considerable de información que puede ser utilizada para el refinamiento de la información y específicamente de zonificación de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, a la luz de las condiciones actuales.

La información generada por la gran variedad de instrumentos ha permitido determinar la naturaleza kárstica de las rocas en la isla de San Andrés, la

capacidad de almacenamiento de agua en poros y grietas de las formaciones geológicas presentes en el territorio, conformando lo que se conoce como acuíferos libres, en los cuales la superficie freática se encuentra en contacto con la atmósfera; en algunos casos a pocos metros de la superficie y en otros a decenas de metros, sin embargo la condición característica de las rocas supra yacentes y de los suelos, permite el ingreso en algunos lugares casi directo tanto del agua lluvia como de los contaminantes antrópicos que son arrastrados por la misma.

La complejidad de los sistemas kársticos ha contribuido a que la contaminación de los acuíferos de la isla se presente de una manera generalizada, ya que se desconoce en gran medida las zonas de almacenamiento y la dirección de los flujos locales, aunque se plantea en los modelos hidrogeológicos tendencias de flujo regionales de tipo radial.

La anterior situación implica, que existen zonas del acuífero más vulnerables que otras, por medio de las cuales, los contaminantes generados en superficie ingresan de manera directa a los acuíferos, sin embargo y no menos importante está también la condición de desarrollo urbano sin los respectivos servicios de saneamiento básico (Alcantarillado).

EL 30.6% de la isla cuenta con servicios de acueducto y alcantarillado³ y se localiza principalmente en la zona norte de la isla, quedando descubierto un 69.4% de la zona rural sur y central de la isla, esta última en inmediaciones a la cuenca del Cove, definida como zona de protección tanto en el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas como en el Plan de Manejo de la Cuenca del Cove.

De la totalidad de la zona rural el 99% se encuentra sin alcantarillado; el estado no ha realizado ningún tipo de intervención y consecuentemente ha sido la población la responsable de la correcta disposición de sus excretas, recayendo en ésta el compromiso de toda una sociedad con la sostenibilidad ambiental y con las futuras generaciones, mientras el Estado permanece al margen de esta situación⁴

Del censo poblacional del DANE del 2005, se puede considerar que entre el 72 - 75% de la población de la Isla se concentra en el perímetro urbano del norte de la Isla (Sector North End). En este sector se agrupan también la mayoría de los hoteles y el comercio de la Isla. La población asentada en la zona norte de la isla

³ Plan De Saneamiento Y Manejo De Vertimientos Para La Isla De San Andrés. PROACTIVA Aguas del Archipiélago S.A E.S.P. Departamento Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina. Junio de 2008

⁴

Estado Del Sector Agua Potable Y Saneamiento Básico En La Zona Rural De La Isla De San Andrés, En El Contexto De La Reserva De La Biosfera. Luz Estela Arboleda Garzón. Trabajo de grado presentado para optar al título de: Magister En Medio Ambiente Y Desarrollo Universidad Nacional De Colombia Sede Bogotá – Sede Caribe Facultad De Ciencia Económicas. Instituto de estudios ambientales IDEA. San Andrés Isla, 2010

aunque cuenta con servicios eficientes de acueducto y alcantarillado, no ha perdido la cultura de extracción de agua subterránea por medio de pozos domésticos de poca profundidad y la de utilización de pozos sépticos que presentan malos diseños, los pozos son excavados sobre la formación San Luis y la proximidad del nivel freático a la superficie implica que los contaminantes ingresan de manera directa sobre el recurso hídrico subterráneo; teniendo en cuenta el modelo hidrogeológico regional, la Formación San Andrés y la Formación San Luis están conectadas hidráulicamente, y la tendencia regional del flujo es radial hacia el mar, por lo cual la contaminación generada en el acuífero San Luis no afectaría en teoría al acuífero San Andrés; sin embargo es este acuífero en donde se localiza la población que no cuenta con servicios de alcantarillado, donde se desarrollan las actividades de agricultura y porcicultura y que debido a esta situación cuentan en su gran mayoría con pozos sépticos construidos sin fondo, posibilitando la generación de residuos contaminantes que pueden ser arrastrados por el agua lluvia hacia el acuífero San Andrés y transmitidas hidráulicamente a la Formación San Luis.

4. HIPÓTESIS

1. La contaminación de los acuíferos de la isla de San Andrés, se debe a que las actividades contaminantes se han desarrollado en las áreas de mayor vulnerabilidad?
2. Las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación cuentan con pocos servicios de saneamiento.
3. Un SIG permitirá determinar si las zonas altamente vulnerables a la contaminación corresponden a las zonas con déficit de servicios públicos

5. OBJETIVO GENERAL

1. Desarrollar un SIG para los acuíferos de la isla de San Andrés que permita mediante el análisis espacial de las características intrínsecas (geológicas, hidrogeológicas e hidráulicas) determinar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.

5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Recolectar y organizar la información geológica, hidrogeológica, hidráulica, red de piezómetros y de suelo de la isla de San Andrés.
2. Realizar un análisis espacial y clasificación de los diferentes niveles de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, para determinar las zonas críticas en donde se plantee estrategias de ordenamiento territorial y saneamiento básico.
3. Desarrollar una base de datos espacial que permita integrar en la metodología de análisis de vulnerabilidad, la información de piezometría recopilada en campo y cartografía de variables intrínsecas del acuífero, para determinar el grado de vulnerabilidad de los acuíferos.

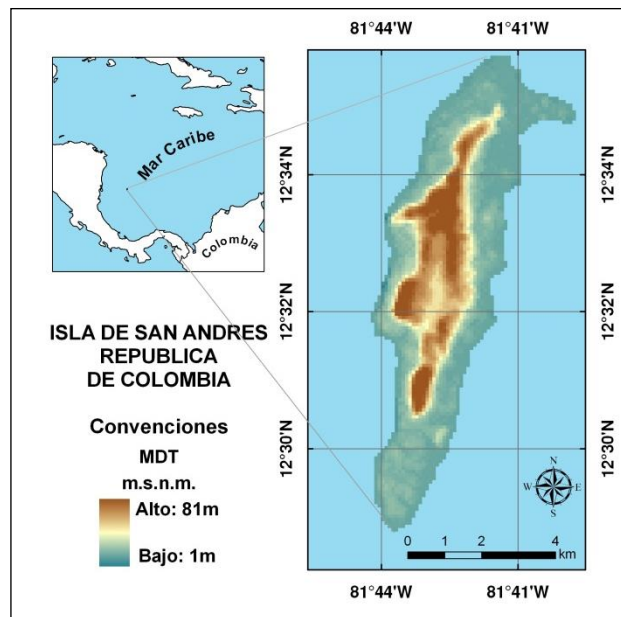
6. MARCO CONCEPTUAL

6.1. LOCALIZACION

La isla de San Andrés está ubicada en el mar Caribe en la Latitud Norte $12^{\circ}32'$ y Longitud Oeste $81^{\circ}42'$, a 715 Km al Nor-Oeste de Barranquilla, y es la isla principal del archipiélago de San Andrés, el cual también incluye las islas de Providencia y Santa Catalina, los cayos de Alburquerque, Roncador, Quitasueño, Serrana, el bajo Nuevo y los bancos de Alicia y Serranilla. En conjunto el archipiélago conforma un área de más de 250.000 Km^2 de aguas territoriales, lo que hace que sea el departamento más extenso de Colombia, sin embargo de aceptarse la decisión de la Corte Internacional de la Haya, ésta se vería reducida hasta en un 50%..

La isla tiene una extensión de aproximada de 26 Km^2 y una población actual de 65.000 habitantes. Sus principales actividades económicas son el turismo, el comercio y los servicios derivados de éstos. (Ver figura 1)

Figura 1. Localización de la Isla de san andrés



6.2. CLIMATOLOGIA

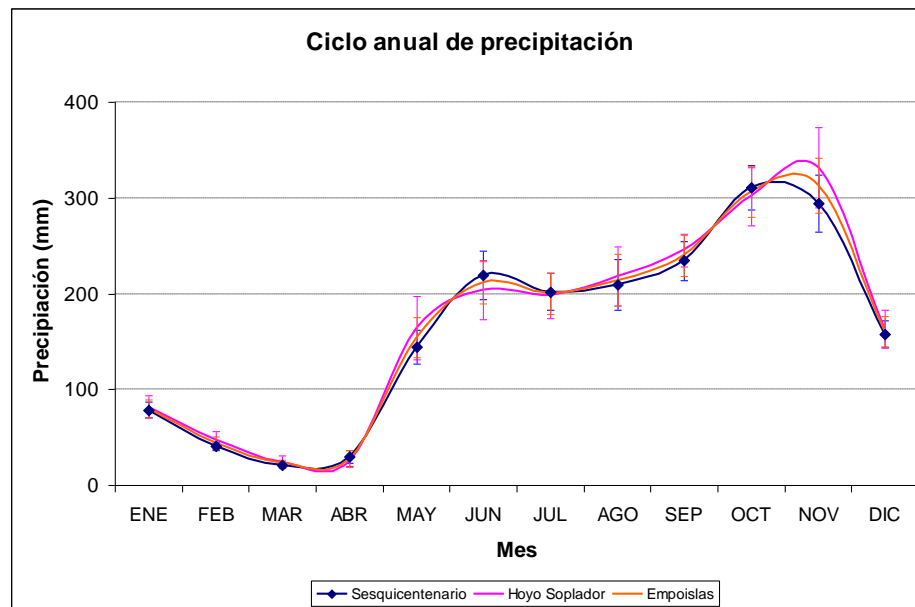
De acuerdo con el sistema de clasificación de Koeppen (1973), el clima ambiental del archipiélago es Tropical lluvioso de Bosque de tipo Ami, es decir, húmedo con

lluvias durante todo el año pero con periodos menos lluviosos. Según la clasificación por pisos térmicos y condiciones de humedad, el Archipiélago corresponde al clima Cálido Seco. (Tomado de Estudio Detallado de Suelos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 1998)

6.2.1. Ciclo anual de la Precipitación

La isla cuenta con un ciclo unimodal de la lluvia y se pueden definir fácilmente dos temporadas; una temporada de déficit de lluvias entre los meses de diciembre y mayo y una temporada de excesos de lluvias entre los meses de junio y noviembre. La precipitación promedio en la Isla es de 1973 ± 80 mm, con un periodo lluvioso entre los meses de junio y noviembre (1509 mm de lluvia acumulada), con un periodo de lluvias menores entre los meses de enero y abril (168 mm de lluvia acumulada) y dos meses de transición (mayo y diciembre). (Tomado de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010.) (Ver figura 2)

Figura 2. Ciclo anual promedio de las precipitaciones en las tres estaciones de registro

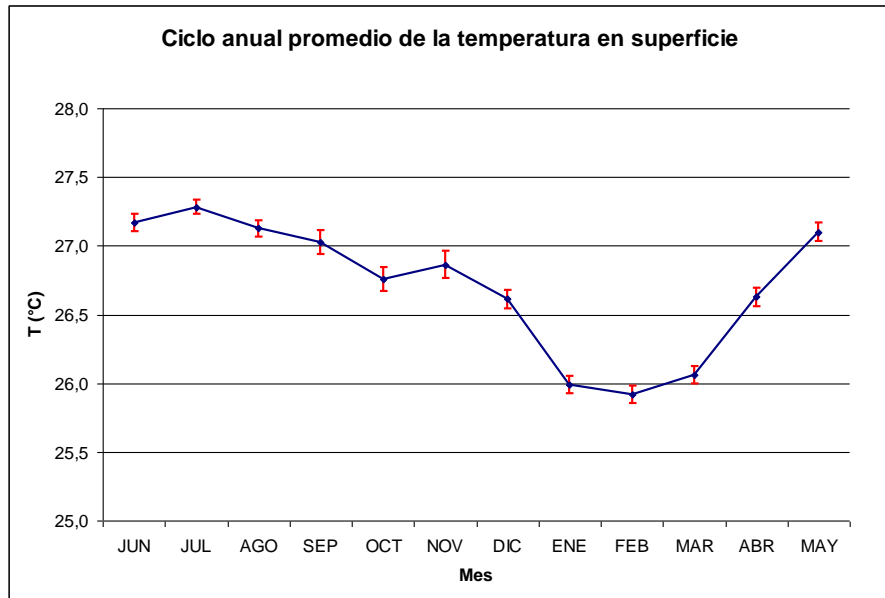


6.2.2. Ciclo anual de la Temperatura

El ciclo anual promedio de temperatura para la Isla de San Andrés, se puede observar en la Figura 3, 0 Corresponde a un ciclo unimodal de la temperatura, en el cual las temperaturas más bajas se dan en los meses de enero, febrero y

marzo, mientras que en los meses de junio, julio y agosto se presentan las temperaturas más altas. (Tomado de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010).

Figura 3. Ciclo anual promedio de la temperatura en superficie



6.2.3. Humedad relativa del aire

Este parámetro climático tiene relación directa con la distribución de la precipitación y depende de la situación geográfica. En el área de estudio se presentan valores promedios altos que oscilan entre 80 y 81%, por efecto de la humedad del mar.

A nivel temporal, la humedad relativa es mayor en las épocas lluviosas y disminuye en las temporadas secas.

6.2.4. Brillo solar

Esta región insular presenta una alta incidencia de brillo y radiación solar debido a su posición astronómica y a las características del relieve. Estos parámetros están asociados en forma inversa con la nubosidad, lo que directamente los relaciona con la distribución de la precipitación. (IDEAM, 1996).

El brillo solar se manifiesta con una intensidad de 2646.9 horas/año, en San Andrés y los registros más altos se presentan en el mes de marzo con valores de

9.1 horas/día. (Tomado de Estudio Detallado de Suelos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 1998)

6.2.5. Velocidad del viento

La evolución de la corriente de vientos esta alrededor de los 900 hPa, que tienen su máxima intensidad durante los trimestres de Junio-Julio-Agosto (JJA) y Diciembre-Enero-Febrero (DEF), con una velocidad promedio del orden de 7 m/s. (Tomado de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010).

6.2.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial calculada por el método de Penman, muestra en el área valores altos: 1881 mm en San Andrés (Tomado de Estudio Detallado de Suelos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 1998) y el método de Turc muestra valores de evapotranspiración real anual promedio del orden de 1253 ±26 mm/año. (Tomado de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010).

6.2.7. Recarga

El método desarrollado por Vélez et al. (2005) (basado en Bradbury et al (2000)) arroja una recarga potencial para la Isla de 255mm/año para un año catalogado en fase cálida (El Niño), de 498mm/año para un año normal y de 810mm/año para un año en fase fría (La Niña). (Tomado de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010).

6.3. GEOLOGIA

San Andrés tuvo su origen a partir de un cono volcánico hundido, cuyo basamento se encuentra actualmente a más de 1000 m de profundidad, que fue recubierto por calizas arrecifales formadas desde el Oligoceno-M, configurando así un atolón.

Los atolones se forman alrededor, en los flancos de un cráter volcánico, que sobresale la superficie del mar y está en profundidad muy somera debajo de la superficie del mar. Cuando el volcán termina su fase activa, actúa la erosión en él y por movimientos activos puede ser hundido lentamente. Durante el hundimiento los corales y los otros organismos del ecosistema se establecen en los flancos del volcán y construyen el arrecife. De este modo el volcán puede desaparecer

dejando un atolón con una laguna central.

Durante el Plioceno y parte del Pleistoceno, el atolón sufrió un basculamiento progresivo hacia su margen oriental, quedando emergida una considerable porción de las estructuras calcáreas miocenas de la parte occidental. La parte central de la isla actual es una formación calcárea con depósitos sedimentarios de la antigua laguna del atolón, y esta bordeada en las partes bajas de la isla por una amplia terraza coralina Pleistocénica.

Durante el Pleistoceno una serie de oscilaciones del nivel del mar produjeron significativas modificaciones geomorfológicas que se manifiestan en el truncamiento de las terrazas de abrasión y de los cantiles a diferentes niveles (Geister, 1973; Díaz., et.al., 2000).

Al occidente, la plataforma submarina comienza en la misma costa; en el norte y este de la isla se amplía hasta los arrecifes coralinos que la bordean, conformando una barrera que protege la isla del fuerte oleaje del mar abierto. En esta terraza submarina se han depositado fragmentos de corales, erizos y otros animales, dando origen a las arenas calcáreas. Algunos sectores están cubiertos de algas formando praderas marinas. El borde exterior de esta terraza se encuentra a 20 metros de profundidad aproximadamente, y el talud submarino desciende a todos los lados con declive escarpado hasta más de m de profundidad (IGAC, 1986).

Estratigráficamente, la isla está conformada por rocas calcáreas del Terciario y depósitos cuaternarios de distintas composiciones. Las rocas del Terciario se definen por dos formaciones que contrastan litológica y morfológicamente: la formación San Andrés, del Mioceno, y la Formación San Luis, del Plioceno. Los depósitos cuaternarios están representados por materiales de relleno artificial, rellenos sanitarios, hidráulicos; depósitos de origen lacustre, asociados a bosques mangláricos y de vertientes. (Ver Figura 4)

De acuerdo con el Servicio Geológico Nacional (1960) y Hubach (1956), en San Andrés se encuentran tres formaciones que van de la más reciente a la más antigua así:

La formación de plataforma marina, reciente hasta subreciente, conformada por arenas calcáreas ricas en restos de equínidos, foraminíferos y fragmentos de corales.

La formación de la plataforma terrestre o formación San Luis, ligeramente solevantada considerada subreciente hasta Pleistocénica. Es la que constituye las partes planas de la isla y está conformada en primer lugar por calizas coralígenas sobre las cuales se observan suelos con poco desarrollo pedogenético y escasa profundidad; en segundo lugar, por arcilla calcárea arenosa depositada en zonas pantanosas (marismas) que dan origen a suelos orgánicos.

La formación calcárea de San Andrés, que data del Mioceno, corresponde al cordón interior de la isla conformado en su gran mayoría por caliza blanca maciza, moluscos recristalizados en calcita y fisuras rellenas de material oolítico ferruginoso, que ha originado suelos con características vérticas y altos contenidos de carbonato de calcio.

El área de influencia de Bahía Hooker (zona de manglares) se caracteriza por estar constituida por rocas de edad terciaria y depósitos cuaternarios (algunos recientes antropogénicos). Las rocas que afloran son principalmente calizas coralinas, arenas y limos calcáreos, dispuestos en capas medias a delgadas, con laminación interna ondulada. En los alrededores de Bahía Hooker, las capas se encuentran buzando hacia el este y forman el flanco oriental del anticlinal de San Andrés (Hugett, 1989).

La isla presenta tres zonas fácilmente identificables: la zona norte, la zona occidental y la zona oriental. Contrario a lo observado en la cara occidental de la isla con su borde continuo de acantilado, la cara oriental se caracteriza por la alternancia de zonas acantiladas, playas y, en menor proporción, por linderos constituidos por bioma manglárigo. A partir del bioma de manglar de Hooker Bight (Bahía Hooker), ambiente alterado por la mano del hombre, hasta la rada de Los Icacos, se presentan lodos y arenas formadas dentro de un ambiente de baja energía que han sido depositados, probablemente, bajo la influencia de la transgresión del Holoceno. Sobre estos sedimentos ha colonizado un manglar, el cual se distribuye en forma amplia dentro del sector en cuestión.

6.4. HIDROGEOLOGIA

Los acuíferos de la isla de San Andrés están conformados por dos unidades hidroestratigráficas con características geológicas cársticas ambas clasificadas como acuíferos libres, denominadas Acuífero San Andrés (Tsa) y Acuífero San Luis (Tsl). (Ver figura 5)

El acuífero San Andrés comprende un área superficial de 17.13km² del territorio Insular, con alturas entre los 4 y 85 msnm y el San Luis presenta un área superficial 9.89km², con alturas entre los 0 y 44 msnm.

Figura 4. Mapa geológico de la isla de San Andrés

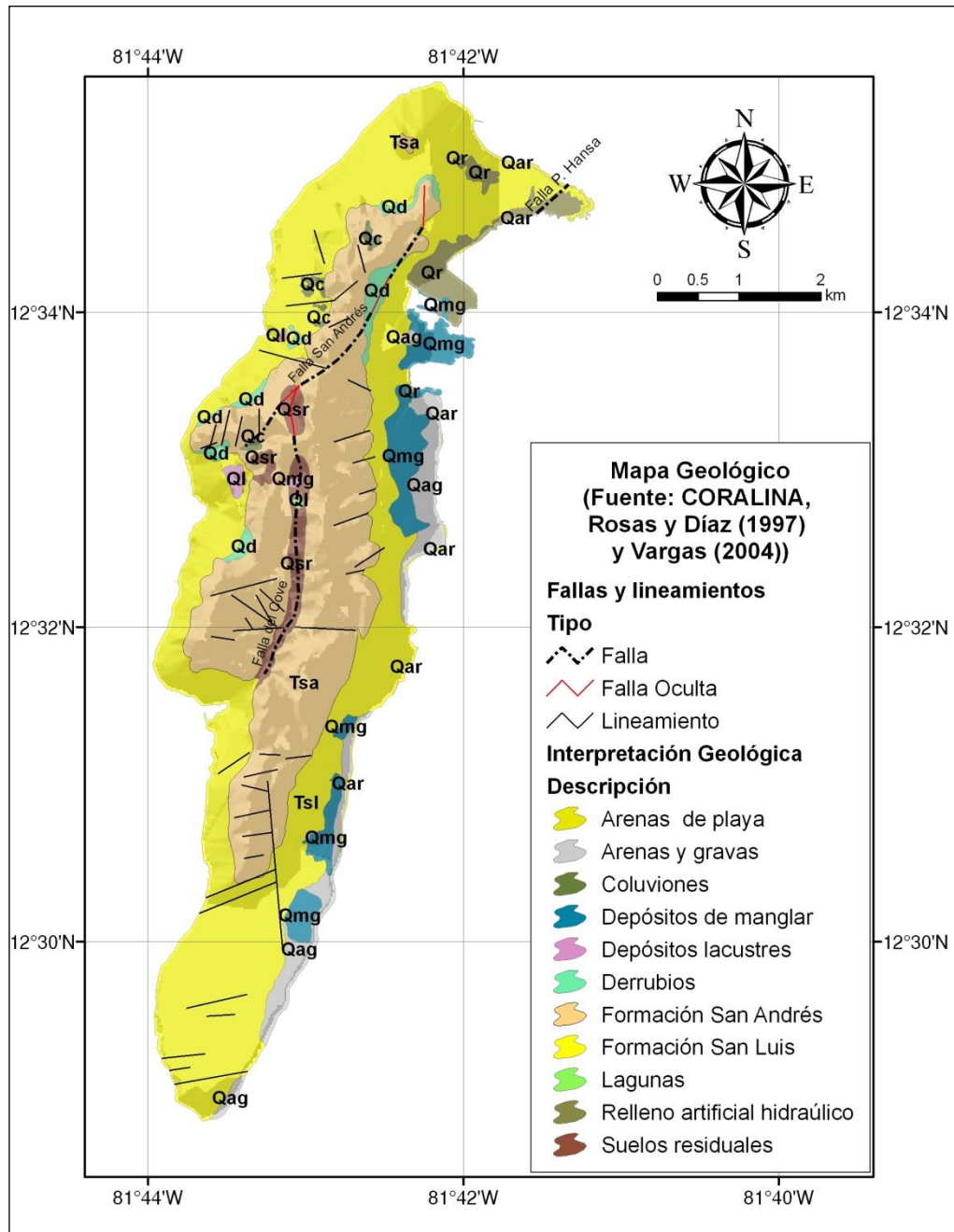
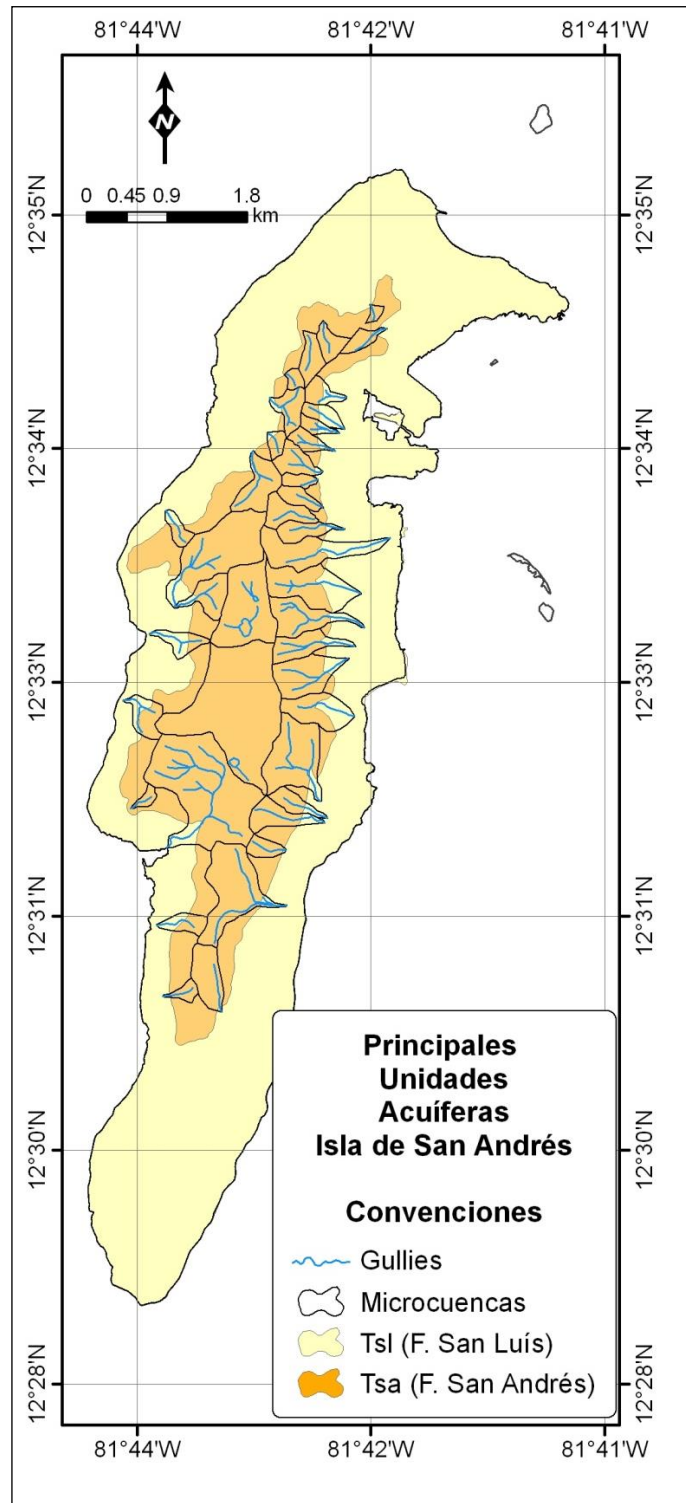
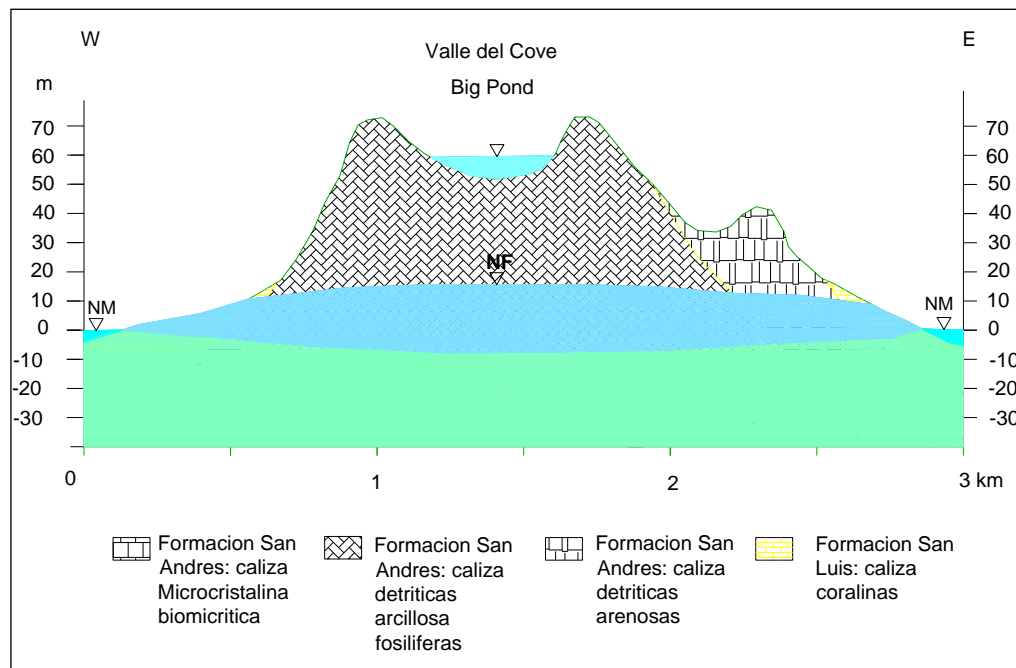


Figura 5. Principales unidades acuíferas de la Isla.



Se infirió el tope del basamento ígneo a 200 m bajo el nivel del mar, con base a los rangos que se han estimado en los diferentes estudios sobre el tema, primordialmente el trabajo de INGEOMINAS (1997) en Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010. Dado que el basamento se encuentra a esta profundidad los espesores del acuífero San Andrés alcanzan valores considerables, respecto a los de la formación San Luís que presenta espesores hasta de 20 m. Por ello, se plantea que el modelo conceptual de la Isla podría consistir en una sola capa, pero la separación se hace debido a las características en aspectos de recarga y calidad del agua en ambas formaciones (Figura 6). (Tomado de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010)

Figura 6. Modelo hidrogeológico conceptual.



7. METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS

7.1. DEFINICIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS.

Existen múltiples definiciones de vulnerabilidad de los acuíferos, a continuación se mencionan algunas retomadas de Mena G., & Montes J., 2010:

- *Vrba y Zaporzec (1994) definen a la vulnerabilidad como una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y naturales.*
- *Foster e Hirata (1991) dicen que la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta.*
- *Custodio (1995) señala que la vulnerabilidad a la polución expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales.*
- *Balairón (2000) entiende por vulnerabilidad de un acuífero, la facilidad con la que un contaminante puede acceder al acuífero a través del suelo y de la zona no saturada.*
- *Environmental Protection Agency (EPA) (1991) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica.*
- *National Research Council (1993) define vulnerabilidad de las aguas subterráneas como la tendencia o la probabilidad de que los contaminantes puedan llegar a una posición específica en el sistema de aguas subterráneas después de la introducción de contaminantes en algún lugar por encima del acuífero superior.*
- *Zektser (2000) dice que el concepto de vulnerabilidad del agua subterránea se basa en el supuesto de que el medio ambiente geológico puede proporcionar un cierto grado de protección a las aguas subterráneas naturales de un impacto antropogénico, la contaminación de la atmósfera particularmente, el suelo y la escorrentía superficial.*

- Pettyjohn et al (1991) dice que la susceptibilidad del acuífero se relaciona con la posibilidad de contaminación, es decir, los acuíferos que tienen un alto grado de vulnerabilidad son los que están en zonas de alta densidad poblacional.
- Auge (2004) considera a la vulnerabilidad como un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación.
- Balairón, 2000, p. 309:

Vulnerabilidad intrínseca: Depende exclusivamente de las características hidrogeológicas del acuífero. Estas determinarán la mayor o menor accesibilidad del medio a la penetración de los contaminantes, así como la capacidad de atenuación del medio como resultado de la retención físico-química o de la reacción de los polucionantes con el terreno.

Vulnerabilidad específica: Tendrá en cuenta factores de carácter externo, por ejemplo, de origen climatológico (pluviometría y temperatura.) y otros relativos a la carga contaminante: procedimiento y lugar de penetración del contaminante en el acuífero, movilidad y persistencia del contaminante en el terreno.

7.2. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Los métodos para evaluar la vulnerabilidad se pueden clasificar en 3 grupos de acuerdo a la metodología adoptada, los cuales son (Cerros, 2007 en Mena G., & Montes J., 2010):

- Ambientes Hidrogeológicos: Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos.
- Modelos Analógicos: Utilizan expresiones matemáticas para parámetros claves (tales como el tiempo de tránsito promedio en la zona no saturada) como un indicador del índice de vulnerabilidad.

Sistemas Paramétricos: Utilizan parámetros convenientemente seleccionados para representar la vulnerabilidad, a los cuales les asignan distintos rangos e interacciones para generar un índice de vulnerabilidad absoluto o relativo.

Modelos de simulación, este método es muy apropiado para analizar situaciones puntuales o con poca extensión espacial.

Los métodos estadísticos o de monitoreo no permiten determinar la vulnerabilidad, sino que se utilizan para realizar estudios probabilísticas, que evalúen la posible dispersión del contaminante.

7.2.1. Método Paramétrico GOD

Mediante la superposición de las capas de información y la multiplicación de los parámetros “G” “O” y “D”, usando Sistemas de Información Geográfica - SIG, se obtiene la zonificación de Vulnerabilidad de los Acuíferos a la Contaminación

GOD, es un índice utilizado para determinar la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante. Este método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Agüero y Pujol, 2002; Foster e Hirata, 1988; Vrba y Zoporozec, 1994 en Perez y Pacheco, 2004⁵).

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área (Bessouat et al., 2001). Para realizar estos se mapas se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG), que es una herramienta diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos de: información geográfica, cartografía digital, bases de datos de atributos y estadísticas, de una manera simultánea y automatizada (López y Granados, 2000 en Pérez y Pacheco, 2004).

En la aplicación de la metodología para determinar la vulnerabilidad se requieren datos geológicos e hidrogeológicos, etc., como por ejemplo: la profundidad al agua subterránea, la recarga neta, el medio acuífero, el tipo de suelo, la topografía y el impacto a la zona vadosa. La principal ventaja de estas metodologías, es que no es necesario obtener en campo dichos parámetros lo que implicaría mucho tiempo además de que son costosos; en lugar de esto se hace uso de los datos de dominio público. Los datos necesarios para la aplicación de la metodología se encuentran principalmente en CORALINA “Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina”, documentos de INGEOMINAS de cartografía hidrogeológica para la isla y diversos documentos técnicos generados que se encuentran en los archivos de CORALINA.

⁵ Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Rosela Pérez Ceballos1 y Julia Pacheco Ávila2. Artículo de Investigación. Pérez y Pacheco / Ingeniería 8-1 (2004) 33-42

7.2.1.1. Variables a utilizar para análisis de vulnerabilidad a la contaminación

Groundwater – G: la condición de confinamiento del acuífero, este parámetro está definido por el tipo de acuífero y el grado de confinamiento, el tipo de acuífero se puede catalogar de la siguiente manera (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002 en Mena G., & Montes J., 2010):

- Ninguno
- Surgente
- Confinado
- Semiconfinado
- No confinado (cubierto)
- No confinado

Para determinar este parámetro se necesita información sobre la geología local, estudios hidrogeológicos detallados, que estén soportados por estratigrafía proveniente de campañas de perforación de pozos.

- Overall - O: caracterización global de la zona que suprayace al acuífero o no saturada, en cuanto a la naturaleza litológica, al grado de consolidación y el fracturamiento de la roca. (porosidad, permeabilidad, compactación y grado de fracturamiento). Estos valores varían entre 0.4 y 1.0; y para la obtención de este parámetro es necesario contar con información hidrogeológica que esté soportada por estratigrafía proveniente de campañas de perforación de pozos
- Depth - D: Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados. El índice varia de 0.6 a 1.0 y para la obtención de este parámetro se necesita información sobre redes de piezometría, hidrogeología de la zona y nivelación de los pozos de la red.

7.2.1.2. Rangos de clasificación de vulnerabilidad

- Acuíferos con Vulnerabilidad Extrema (índices entre 0,7 y 1,0), se consideran susceptibles a la mayoría de contaminantes y con impacto relativamente rápido, en muchos escenarios de contaminación.
- Acuíferos con Vulnerabilidad Alta (índices entre 0,5 y 0,7), son vulnerables a muchos contaminantes, excepto a los absorbibles y/o fácilmente transformables, en muchos escenarios de contaminación.

- Acuíferos con Vulnerabilidad Moderada (índices entre 0,3 y 0,5), son vulnerables a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
- Acuíferos con Vulnerabilidad Baja (índices entre 0,1 y 0,3) son vulnerables a contaminantes conservativos, cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
- Acuíferos con Despreciable Vulnerabilidad (índices entre 0 y 1), las capas confinantes no permiten un flujo significativo hacia el acuífero.

El método tiene una estructura simple y fue desarrollado específicamente para zonas cuya información acerca del subsuelo y sistemas de agua subterránea es escasa (Custodio, 1995 en Mena G., & Montes J., 2010). (Ver figura 7)

La estimación del índice de vulnerabilidad GOD involucra una serie de etapas concretas (Foster et al., 2002 en Mena G., & Montes J., 2010):

1. Identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0.0 a 1.0.
2. Especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del Acuífero en términos de:
 - a. Grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras).
 - b. Tipo de litología (considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad de la matriz y contenido de humedad en la zona no saturada o retención específica) y, asignar un índice a este parámetro en una escala de 0.4 a 1.0.
3. Estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0.6 a 1.0.

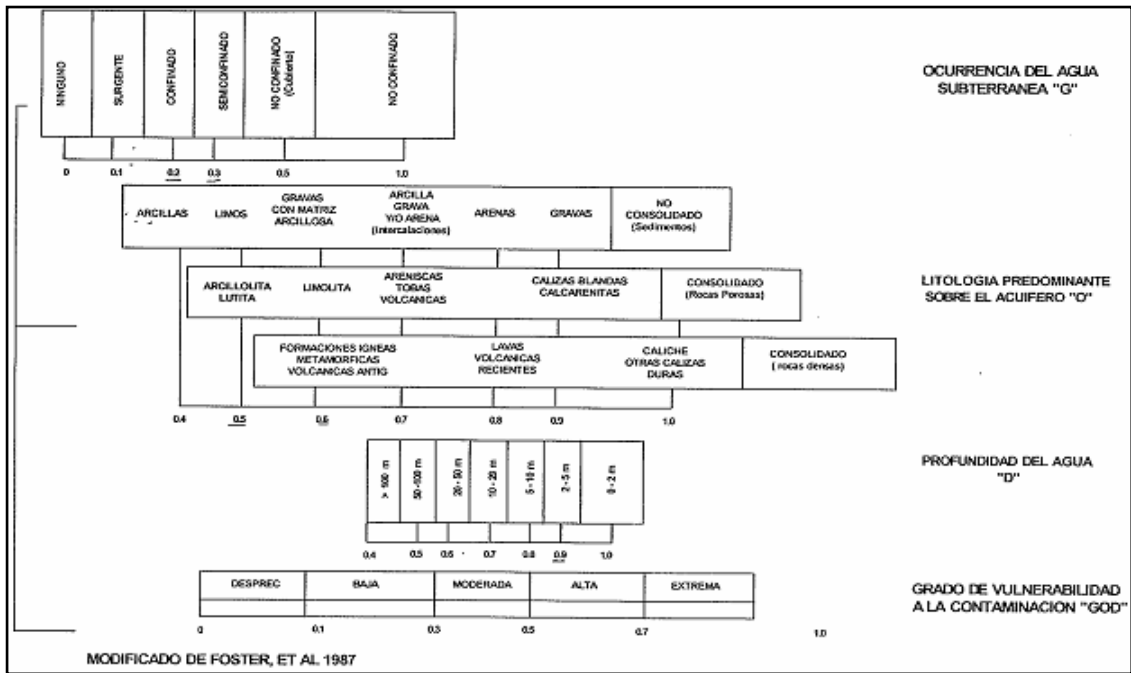
7.2.2. Técnicas y herramientas utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas

7.2.2.1. Perforación de pozos

El método más seguro para conocer las características de las formaciones que yacen por debajo de la superficie terrestre del terreno, es el de perforar a través de

éstas, obteniendo de este modo muestras geológicas mientras se perfora y llevando un registro litológico del pozo (Johnson División OUP Inc, 1975 en Mena G., & Montes J., 2010).

Figura 7. Sistema de indexación GOD, para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.



Para efectos del presente estudio se utilizaron las descripciones de pozos de los estudios de Perfopozos (1985, 1986), en donde se presenta la estratigrafía de los pozos (16, 17, 21, 19, 22) metro a metro, prueba de bombeo, cálculos hidráulicos, entre otros e información recopilada del estudio de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010.

7.2.2.2. Pozos de observación

Los pozos de observación corresponden a pozos en los que se puede medir el nivel del agua. Esta medición se hará por medio de un piezómetro que es un tubo de pequeño diámetro conectado hidráulicamente al acuífero y en cuyo interior el agua alcanza una altura que equilibra la presión del acuífero en el punto de conexión (Custodio & Llamas, 2001 en Mena G., & Montes J., 2010).

Para efectos del presente estudio se trabajó con el Estudio de contaminación de acuíferos en la isla de San Andrés "Perforación y construcción de la red de piezómetros del sur de la isla de San Andrés en el cual se reporta la construcción

de 12 piezómetros (PP-IV-1, PP-III-1, PP-II-1, PP-I-1, PP-III-6, PP-III-3, PP-III-4, PP-II-2, PP-II-3, PP-II-3.PP-0-1, PP-0-2) de INGEOMINAS (1998), e información recopilada del estudio de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010.

7.2.2.3. Inventario de pozos

Esta información se obtiene a partir de obras ya construidas correspondientes a pozos del sector comercial que se encuentran registrados en la base de concesiones de agua subterránea en CORALINA, dichos pozos en algunos casos cuentan en sus expedientes con información del perfil litológico y análisis de calidad del agua y en la base de datos se registran por medio de seguimientos niveles freáticos, volúmenes de agua y comportamiento de la explotación de agua.

7.2.2.4. Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos no miden directamente el tipo de roca, ni su porosidad, ni la permeabilidad o densidad de la formación, estos métodos evalúan otras propiedades de los materiales que constituyen el acuífero (Johnson División OUP Inc, 1975). Existe una gran diversidad de métodos de este tipo, pero los que se usan de forma más usualmente cuando se habla de aguas subterráneas son los método eléctrico resistivo y método de refracción sísmica.

Dentro de los métodos eléctricos el que más utiliza es el método eléctrico resistivo y la característica física utilizada es la resistividad o resistencia específica de los diferentes terrenos. Este método permite suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad.

En el presente estudio se realizó la revisión de la información de Vásquez E., (1993) en donde presenta la cronología de trabajos geofísicos anteriores, estableció el contacto agua dulce agua salada y tiene datos y análisis concretos de la variación lateral de la resistividad en el Valle del Cove.

7.2.2.5. Estudios hidrogeológicos.

En cuanto a los aspectos hidrogeológicos de forma inicial Diezemann W., y Delgado C., (1957), plantearon aspectos relacionados con el aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la isla de San Andrés y realizaron la descripción de las unidades hidrogeológicas, de igual manera en Planhidro (1974) en Biomar, 1991, en Ángel, 1993, en Rosas y Díaz, 1997, se realizó una caracterización hidrogeológica que caracterizó la Formación San Andrés.

Adicionalmente Huguett A., (1989) realizó para el INGEOMINAS la Compilación de la información hidrogeológica de las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, en donde planteó el mapa hidrogeológico con unidades acuíferas, determinando la existencia de dos unidades acuíferas de tipo cárstico, denominadas Acuífero San Luís y acuífero San Andrés. El primero en el cual la recarga proviene únicamente de lluvia y el acuífero San Andrés de tipo libre con extensión y flujo variable debido a que la acumulación del agua subterránea no obedece a la porosidad primaria de la roca sino a la continuidad horizontal y vertical de los planos de diaclasas, fracturas, fallas y a la interconexión y características que tengan las cavidades y conductos formados. Define también que la zona de explotación más importante está en el centro de la isla, en el valle del Cove, donde se presenta la disolución cárstica más intensa debido a la densidad del diaclasamiento (entre 15 y 70%), por varias fallas presentes en esta zona.

7.2.2.6. Mapas geológicos

A través de la cartografía geológica de la superficie, se registra la naturaleza litológica o estratigráfica las características estructurales de los afloramientos de las rocas, por medio de los perfiles geológicos y los diagramas tridimensionales que se puede adquirir una visión adecuada de la geometría de los acuíferos. (Custodio & Llamas, 2001 en Mena G., & Montes J., 2010).

Para el desarrollo del presente trabajo se revisó la caracterización geológica y litoestratigráfica de la isla de San Andrés realizada por Hubach E., (1956) en Huguett, 1989., en la cual definió tres formaciones: formación de la plataforma marina reciente y subreciente, formación de la plataforma terrestre de edad Pleistoceno, Formación San Andrés de edad Mioceno.

Por otro lado Geister J., junto con Delgado en el año 1992, realizaron una recopilación, definiendo 4 unidades geológicas: Rellenos artificiales y arrecifes de edad reciente, la formación de la bahía, en la cual se diferencian: arenas y gravas de playa, arenas y lodos y derrubios la formación San Luís de edad Pleistoceno, con dos unidades de terrazas coralinas bajas: reciente y actual y formación San Andrés de edad Mioceno constituida por moluscos u calizas coralinas y Guzmán G., y Hernández O. (1992) y Vargas G., (1999) realizaron para el INGEOMINAS la cartografía geológica de la isla de San Andrés, diferenciando la formación San Luís y la Formación San Andrés con dos miembros (calcáreo y arcilloso).

7.3. APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) A LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Un SIG es un conjunto informatizado de datos, que representa la realidad posibilitando la modelización de eventos a futuro, es decir; un conjunto de datos referenciados a puntos territoriales o espaciales que permiten la obtención de información indispensable para todo tipo de planificación y evaluación de gestión (Duarte et al, 2005 en Mena G., & Montes J., 2010).

En este sentido la aplicación de las herramientas suministradas por el SIG permiten evaluar la vulnerabilidad a la contaminación, ya que es posible realizar la superposición de información temática solicitada por las diversas metodologías de vulnerabilidad, organizar la información requerida y visualizar la información de manera práctica para su utilización.

7.3.1. Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos

El ArcGIS Desktop es como un conjunto de aplicaciones integradas: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, con las cuales se puede desarrollar actividades o tareas SIG, desde una muy simple hasta una muy avanzada, incluyendo mapeo, administración de datos, análisis geográfico, edición de datos y geoprocésamiento. (<http://www.geoinfo.cl/pdf/ArcView8.pdf>)

Para calcular el índice de vulnerabilidad con ArcGIS se deben seguir 3 pasos en los que se utilizarán análisis de superficie (slope), interpolación, reclasificación y álgebra de mapas, funciones de la herramienta Spatial Analyst (Tomado de <http://www.aguaysig.com/2011/02/determinacion-de-la-vulnerabilidad-de.html>).

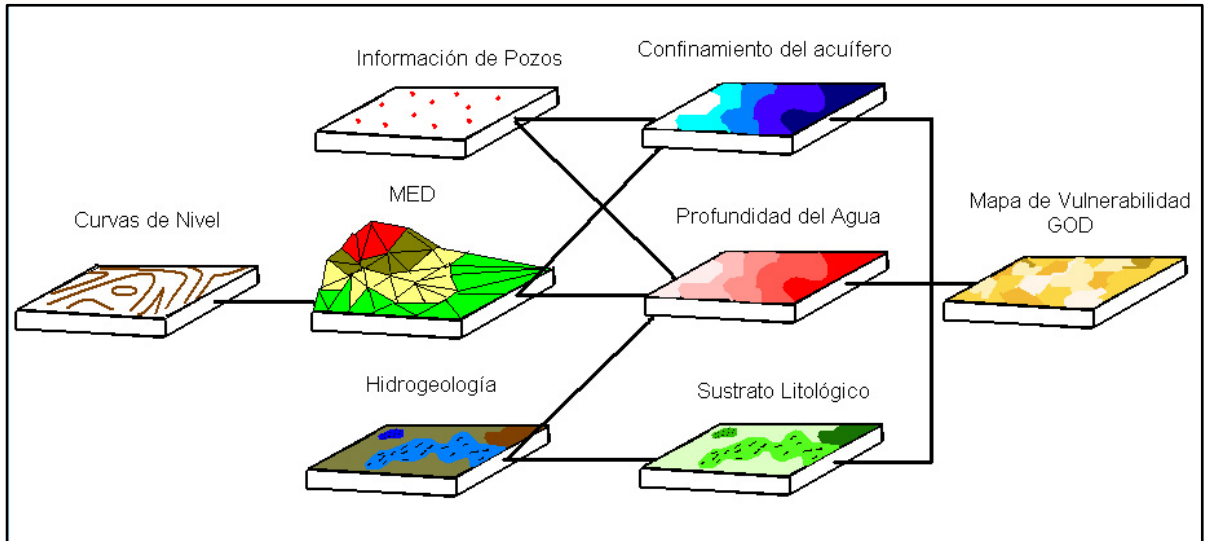
Paso 1. Construir los mapas que representan la distribución espacial de cada una de las variables, para ello se puede utilizar ya sea métodos determinísticos (IDW, Spline) o geoestadísticos (Krigin).

Paso 2. Consiste en Reclasificar los mapas obtenidos para cada una de las variables de acuerdo a los datos relacionados en la metodología utilizada. Esto se realiza por medio de la función Reclassify de la extensión Spatial Analyst. Para los datos no numéricos como Formación geológica que constituye el acuífero, etc, se le da una valoración al tipo de material de acuerdo a las tablas para construir el raster correspondiente.

Paso 3. Álgebra de mapas. Con los mapas ya reclasificados de acuerdo al paso anterior, se debe realizar la suma ponderada de cada uno de ellos. Para ello ArcGis cuenta con la herramienta Raster Calculator de la extensión Spatial Analyst.

El resultado obtenido en el paso anterior se reclasifica de acuerdo a la metodología GOD para finalmente obtener el mapa de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero. (Ver Figura 8)

Figura 8. Descripción esquemática del método GOD, Tomado de Vergara V., et Al, 2009



8. ESTADO DEL ARTE

La primera caracterización geológica y litoestratigráfica de la isla de San Andrés fue realizada por Hubach E., (1956) en Huguett, 1989., en la cual definió tres formaciones: formación de la plataforma marina reciente y subreciente, formación de la plataforma terrestre de edad Pleistoceno, Formación San Andrés de edad Mioceno.

Sin embargo diversos autores como Diezemann, 1957 en Boletín Geológico, vol V. num 1, retomaron esta información y describieron además condiciones hidrológicas, geológicas, climatológicas, hidroquímicas y la sugerencias acerca de la futura construcción de captaciones de agua en la isla, dentro de los aspectos más importantes de este estudio se encuentra las explicaciones de la porosidad de estos materiales y la relación de esta con la génesis de las rocas coralinas, también presenta las zonas favorables hidrogeológicamente y sus rendimientos basados en pruebas de bombeo, finalmente presenta la hidroquímicas de algunos puntos .

Por su parte Kocurko M., (1972), describe los ambientes de deposición de las unidades de la isla de San Andrés, desde los escarpes emergidos, playas y escarpes submarinos y los organismos coralinos asociados y presenta una datación de estos, con el fin de determinar relaciones estratigráficas y edad de las formaciones presentes en la isla.

Por otro lado Geister J., realizó varios estudios en los años y junto con Delgado en el año 1992, realizaron una recopilación de la mayoría de ellos, definiendo 4 unidades geológicas: Rellenos artificiales y arrecifes de edad reciente, la formación de la bahía, en la cual se diferencian: arenas y gravas de playa, arenas y lodos y derrubios la formación San Luís de edad Pleistoceno, con dos unidades de terrazas coralinas bajas: reciente y actual y formación San Andrés de edad Mioceno constituida por moluscos u calizas coralinas y Guzmán G., y Hernández O. (1992) y Vargas G., (1999) realizaron para el INGEOMINAS la cartografía geológica de la isla de San Andrés, diferenciando la formación San Luís y la Formación San Andrés con dos miembros (calcáreo y arcilloso), presenta una recopilación de los trabajos geológicos anteriores, se explica el marco sismo-tectónico regional, la geología estructural y con gran detalle se explican las características litológicas de la Formación San Andrés, la Formación San Luís y los depósitos cuaternarios.

En cuanto a los aspectos hidrogeológicos de forma inicial Diezemann W., y Delgado C., (1957), platearon aspectos relacionados con el aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la isla de San Andrés y realizaron la descripción de las unidades hidrogeológicas, zonas favorables, rendimientos basados en pruebas de bombeo, junto con algunos resultados hidrogeoquímicos

del acuífero, de igual manera en Planhidro (1974) en Biomar, 1991, en Ángel, 1993, en Rosas y Díaz, 1997, se realizó una caracterización hidrogeológica que determinó que la Formación San Andrés está caracterizada por tres facies no diferenciadas: una calcárea cristalina, una calcárea arenosa y una calcárea arcillosa.

En términos más detallados se encuentran las descripciones de pozos de los estudios de Perfopozos (1985, 1986), en donde se presenta la estratigrafía de los pozos (16, 17, 21, 19, 22) metro a metro, prueba de bombeo, cálculos hidráulicos, entre otros.

Huguett A., (1989) realizó para el INGEOMINAS la Compilación de la información hidrogeológica de las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia, genera el mapa hidrogeológico con unidades acuíferas, determinando la existencia de dos unidades acuíferas de tipo cárstico, denominadas Acuífero San Luís y acuífero San Andrés. El primero en el cual la recarga proviene únicamente de lluvia y el acuífero San Andrés tiene de tipo libre con extensión y flujo variable debido a que la acumulación del agua subterránea no obedece a la porosidad primaria de la roca sino a la continuidad horizontal y vertical de los planos de diaclasas, fracturas, fallas y a la interconexión y características que tengan las cavidades y conductos formados. Define también que la zona de explotación más importante está en el centro de la isla, en el valle del Cove, donde se presenta la disolución cárstica más intensa debido a la densidad del diaclasamiento (entre 15 y 70%), por varias fallas presentes en esta zona.

En cuanto a los parámetros hidráulicos de los acuíferos Ángel C., (1993) determinó que la formación San Andrés reviste mayor importancia hidrogeológica con reservas mínimas totales de 14.75Hm³ de agua dulce, seguido por la formación San Luís, ambos acuíferos de carácter libre y características cársticas. Se reportan permeabilidades moderadas a altas (3 a 30 m/d) en el Valle del Cove aumentando en sentido NW-SE, Vásquez E., (1993) presenta la cronología de trabajos geofísicos anteriores, estableció el contacto agua dulce agua salada y tiene datos y análisis concretos de la variación lateral de la resistividad en el Valle del Cove, Cañas H., y Martínez C., (1993) realizaron pruebas de bombeo en los pozos del campo de pozos del Cove interpretadas según el método de Jacob, las cuales indicaron una alta heterogeneidad de la permeabilidad en el acuífero.

Respecto a la calidad del agua subterránea de los acuíferos Vargas M., (1993) realizó el estudio hidroquímico de la isla de San Andrés y menciona que las características químicas del agua subterránea están controladas por la composición mineralógica de las unidades, los procesos de fracturamiento y la intrusión marina. El agua del Valle del Cove presenta las mejores características físicoquímicas (conductividad < 160mS/m) y bacteriológicas (no coliformes y se mapean líneas de iso-conductividad que muestran tener relación con las características del flujo subterráneo. Por otro lado INGEOMINAS (1998) Realizó el

Estudio de contaminación de acuíferos en la isla de San Andrés "perforación y construcción de la red de piezómetros del sur de la isla de San Andrés en el cual se reporta la construcción de 12 piezómetros (PP-IV-1, PP-III-1, PP-II-1, PP-I-1, PP-III-6, PP-III-3, PP-III-4, PP-II-2, PP-II-3, PP-II-3.PP-0-1, PP-0-2), con el fin de tener una red de monitoreo de niveles del agua subterránea y de calidad.

Para efectos de conocer el sistema hidrogeológico de la isla Rosas J., y Díaz R., (1997) formularon el modelo hidrogeológico basado en la información hidrológica, geología, geofísica, pruebas de bombeo, características hidráulicas e hidrológicas del acuífero, geoquímica e hidrológica isotópica disponible, lograron describir el comportamiento hidrogeológico general asociado a las características cársticas de las calizas con dolinas, cavernas y flujos turbulentos.

En términos de evaluaciones de vulnerabilidad a la contaminación Vargas M. Et a.,l (1997) realizó la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, cuyo alcance fue el análisis de vulnerabilidad, a través de la metodología aplicada para determinar la vulnerabilidad (GODS Foster Modificada 1987) se determinó una vulnerabilidad extrema para el acuífero san Luis y alta para el acuífero San Andrés y se identificaron las fuentes potenciales de contaminación entre las que se encuentran el saneamiento in situ (pozos sépticos) y la industria. Los datos utilizados en cuanto a la hidrogeología fueron tomados de los estudios realizados por INGEOMINAS, los niveles del agua subterránea fueron determinados por los datos del inventario de puntos de agua realizado por el estudio hidrogeológico de 1993 y de INGEOMINAS medidos en 18 piezómetros de la zona norte en 1996. La información sobre suelos se tomó del Estudio Semidetallado de Suelos (IGAC, 1975) y del informe denominado Características Físicoquímicas de los Suelos de la Isla de San Andrés y su relación con contenido de algunos metales pesados (Vargas, O. 1995). La herramienta informática utilizada para la implementación de esta metodología fue ARC/INFO.

Por otro lado Toro 2000 realizó el análisis de un muestreo de agua subterránea con el fin de evaluar su calidad, concluyendo que no se cumplen las normas colombianas de calidad para las aguas extraídas del acuífero de San Luis, en cuanto al acuífero San Andrés muestran todavía poca evidencia de contaminación, aunque en época de lluvias, la falta de zonas de protección alrededor de los pozos de abastecimiento público facilita el ingreso de sustancias de origen fecal diluidas en el agua lluvia.

Estos trabajos previos sobre la naturaleza de los acuíferos fueron materia prima importante para la primera aproximación del conocimiento del agua subterránea en la isla, e insumo fundamental para la formulación del Plan de Manejo de aguas subterráneas PMAS (2000) y el cual en combinación con aspectos sociales y económicos con los técnicos y legales permitieron a CORALINA evaluar el problema hídrico de la Isla desde un punto de vista integral y generar un

mecanismo de manejo sostenible del recurso, regulando la extracción del agua subterránea por medio de concesiones basadas en pruebas de bombeo.

La información generada en el PMAS se convirtió en insumo del Plan de Manejo de la Cuenca del Cove, mecanismo de regulación que determinó la importancia y los medios de proteger la cuenca del Cove como zona principal de recarga de los acuíferos.

9. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

9.1. DETERMINACION DE PARAMETROS GOD

9.1.1. Groundwater Occurrence (G)

El parámetro G se obtiene a partir del estudio geológico del acuífero, perforaciones, sondeos geofísicos, registros de pozos, estudios hidrogeológicos, etc, lo cual permite establecer el tipo de roca que conforma el acuífero y tipo de acuífero.

El mapa desplegado corresponde a un Shape File de Polígonos (Ver figura 9), por lo cual se procede a convertirlo a Raster, y dado que este mapa no representa valor numérico, lo que se realizará es valorar la litología y reclasificar los valores. Tabla 1. Con ello obtendremos el nuevo mapa Raster de valoración de la litología del acuífero de acuerdo a la valoración de GOD. (Ver figura 10)

9.1.2. Overall Lithology (O)

Se refiere al tipo de suelo que compone la zona no saturada, define la facilidad o dificultad con que podría viajar un contaminante por este medio, la información también se obtiene de estudios geológicos del acuífero, perforaciones, sondeos geofísicos, registros de pozos, etc.

Se utilizó el mapa de polígonos de litología para la isla de San Andrés (Ver figura 11), se realizó su transformación a formato Raster y su posterior reclasificación para la asignación de la valoración GOD para este parámetro (Ver figura 12 y tabla 2)

9.1.3. Depth To Groundwater (D)

9.1.3.1. Descripción de las redes piezométricas de la isla

9.1.3.1.1. Red de piezómetros de la zona norte

Comenzó sus funciones en el año 1996 y se conformó con 19 pozos de los cuales 12 se encontraban en funcionamiento para el año 2006 y actualmente se encuentran en funcionamiento 9. (Ver Figura 13 y tabla 3).

Figura 9. Mapa de polígonos Groundwather

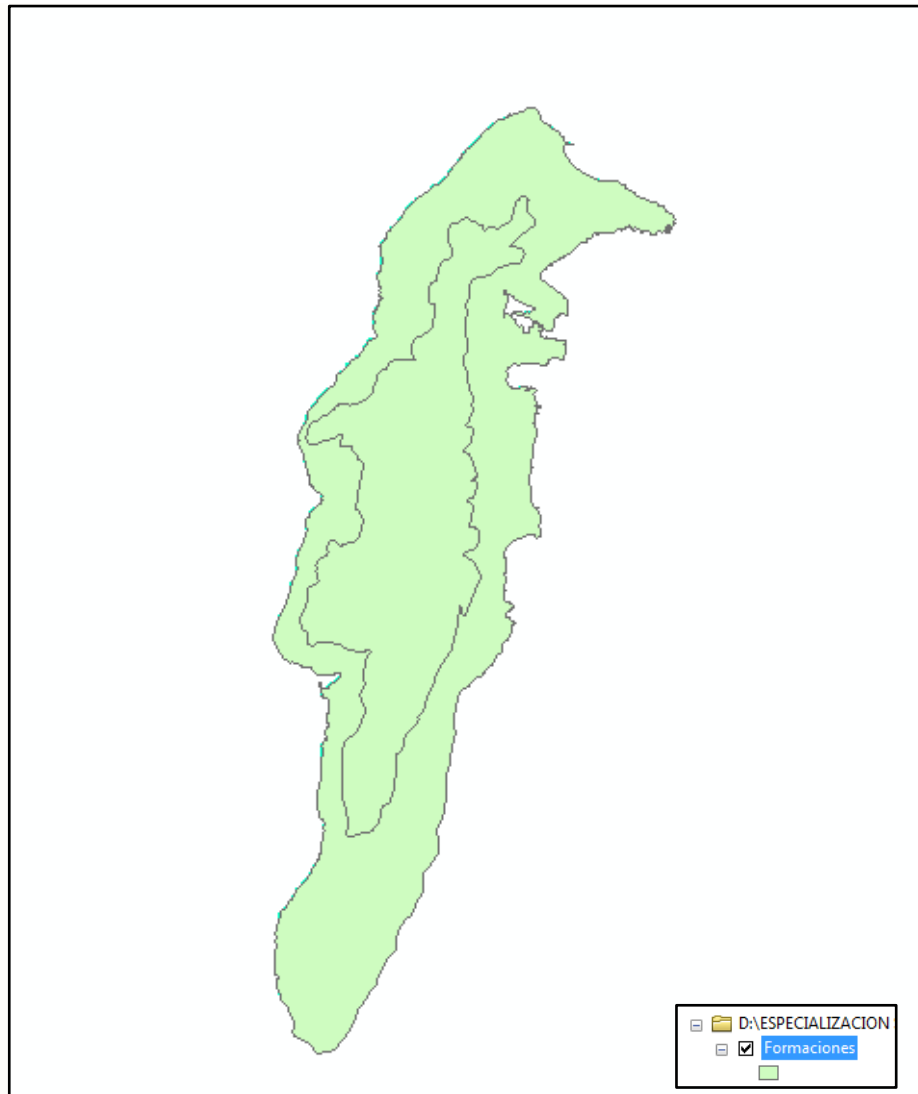


Tabla 1. Tabla de atributos del Shp Groundwather

Table				
Formaciones				
	FID	Shape *	LITOL	AQUAVU98
▶	0	Polygon	Formación_San_Luis_(Pioceno)	6
	1	Polygon	Formacion San Andres	0

Figura 10. Mapa Raster Groundwather

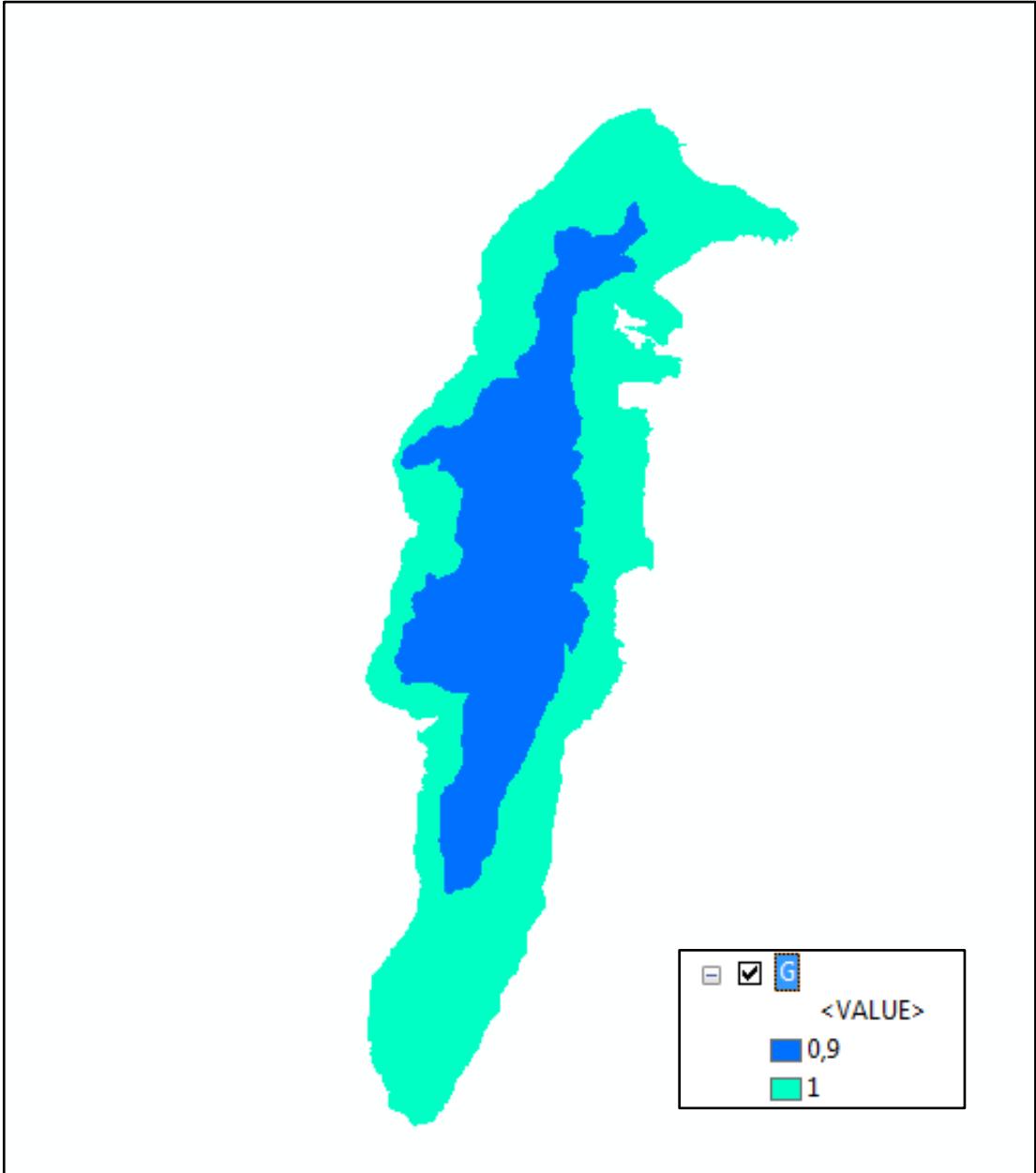


Figura 11. Mapa de polígonos de Overall Lithology

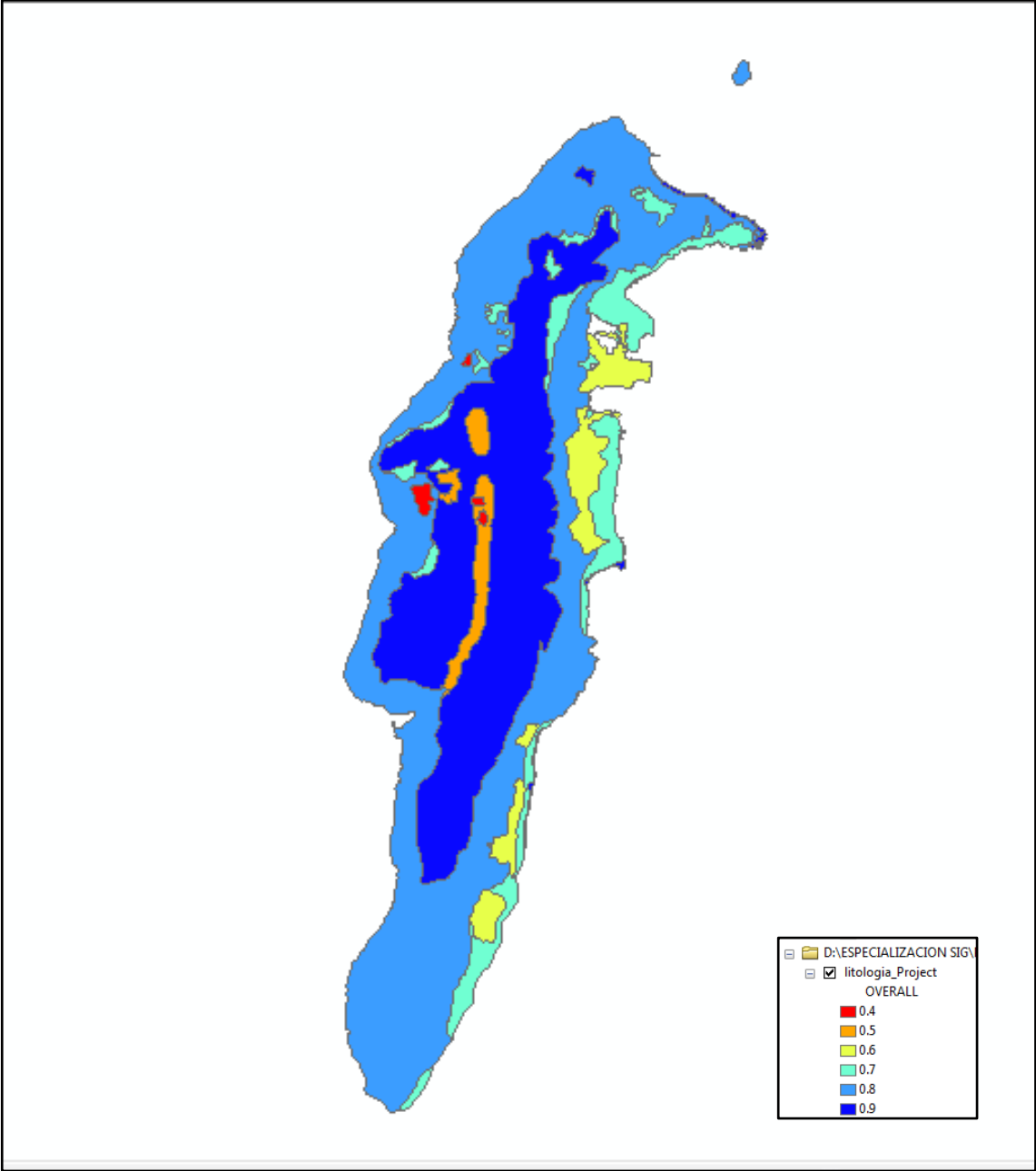
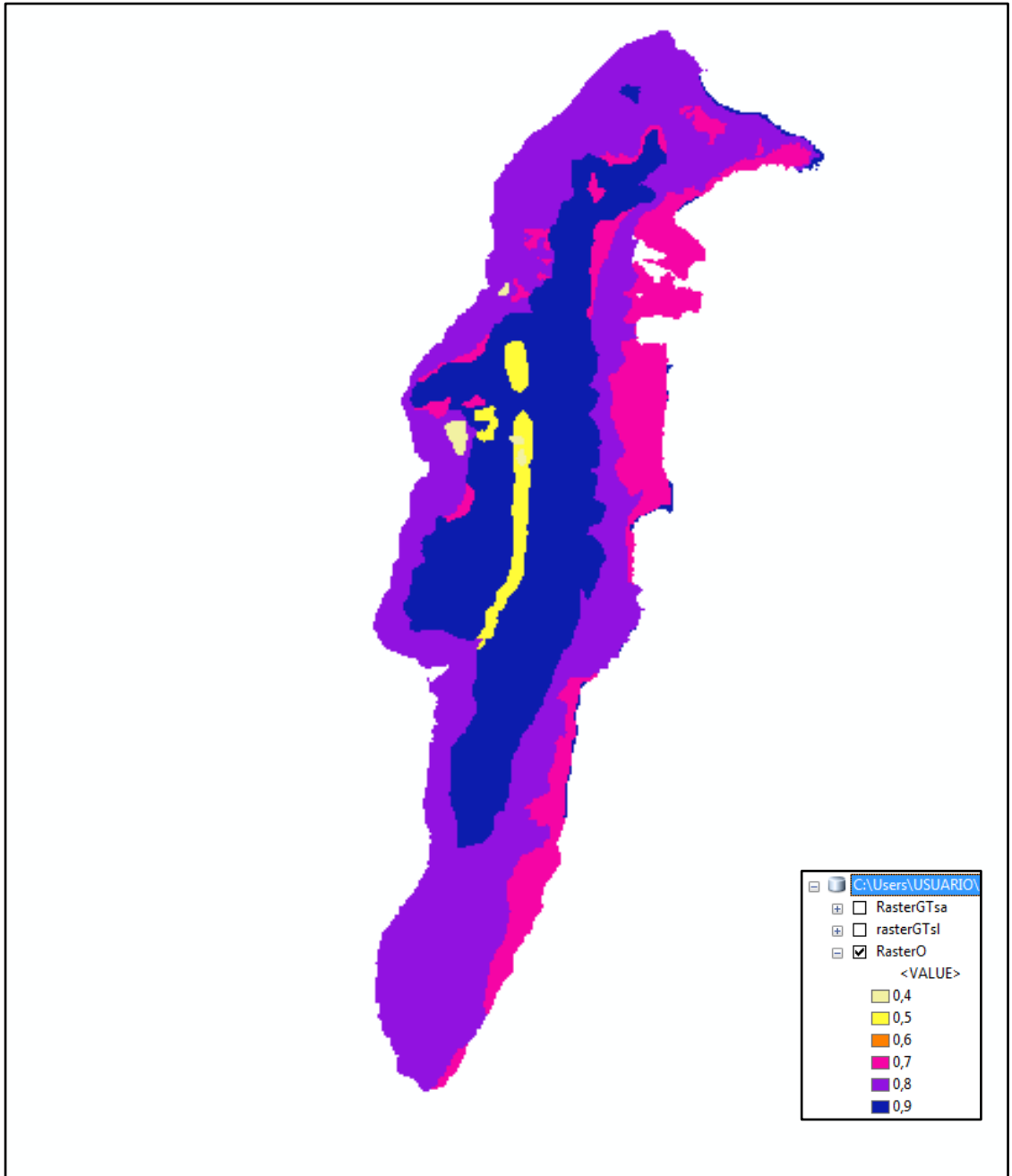


Tabla 2. Tabla de atributos Shp Overall Lithology

Table				
litologia_Project				
FID	Shape *	LITOLO	AQUAVU98	OVERALL
2	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
4	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
16	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
20	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
43	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
44	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
46	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
47	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
48	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
49	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
50	Polygon	Arenas_de_playa	6	0.7
3	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
5	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
10	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
45	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
25	Polygon	Coluviones	8	0.7
33	Polygon	Coluviones	8	0.7
34	Polygon	Coluviones	8	0.7
35	Polygon	Coluviones	8	0.7
36	Polygon	Coluviones	8	0.7
7	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
9	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
11	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
13	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
14	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
15	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
21	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
18	Polygon	Depósitos_lacustres	4	0.4
24	Polygon	Depósitos_lacustres	4	0.4
31	Polygon	Depósitos_lacustres	4	0.4
22	Polygon	Derrubios	6	0.7
26	Polygon	Derrubios	6	0.7
27	Polygon	Derrubios	6	0.7
28	Polygon	Derrubios	6	0.7
32	Polygon	Derrubios	6	0.7
37	Polygon	Derrubios	6	0.7
38	Polygon	Derrubios	6	0.7
17	Polygon	Formación_San_Andrés_(Mioceno)	9	1.0
39	Polygon	Formación_San_Andrés_(Mioceno)	9	1.0
0	Polygon	Formación_San_Luis_(Plioceno)	5	0.9
1	Polygon	Formación_San_Luis_(Plioceno)	5	0.9
29	Polygon	Lagunas	6	0.4
6	Polygon	Relleno_artificial_hidráulico	3	0.7
8	Polygon	Relleno_artificial_hidráulico	3	0.7
12	Polygon	Relleno_artificial_hidráulico	3	0.7

Figura 12. Mapa Raster Overall Lithology



Las situaciones relacionadas con la no funcionalidad de 10 pozos de la red norte, obedecen a su construcción en predios privados que han sido dispuestos para diferentes actividades, las cuales han perjudicado los seguimientos a las captaciones y en muchas ocasiones han sido sellados por los propietarios de dichos predios en proyectos de ampliación de inmuebles.

En esta medida la información valiosa recolectada en dichos monitoreos ha sido interrumpida y por lo tanto los análisis presentan ciertas restricciones en su interpretación por la existencia de series de datos incompletas

9.1.3.1.2. Red de piezómetros de la Cuenca del Valle del Cove

Esta red fue diseñada y construida por medio de un convenio interinstitucional entre CORALINA e INGEOMINAS en el año 1996, por medio de dicho convenio fueron perforados 14 piezómetros, monitoreados actualmente 11. (Ver Figura 14 y tabla 3).

Las situaciones relacionadas con la no funcionalidad de 3 pozos de la red Cove, obedecen a su construcción en predios privados que han sido dispuestos para diferentes actividades las cuales han perjudicado los seguimientos a las captaciones y en muchas ocasiones no se ha permitido el ingreso a los predios por parte de los propietarios; por otro lado se han presentado derrumbamientos de algunos pozos los cuales han perdido su funcionalidad para lo cual es necesario un diagnóstico que permita definir acciones de re perforación y/o mantenimiento a la estructura interna.

En esta medida la información valiosa recolectada en dichos monitoreos ha sido interrumpida y por lo tanto los análisis presentan ciertas restricciones en su interpretación por la existencia de series de datos incompletas

9.1.3.2. Análisis estadístico de los niveles

Luego de contar con la revisión realizada a la red de piezometría por A. Piñeros en el año 2006, se procedió a recalcular los valores del nivel freático para la red Norte desde el año 1996 y hasta 2010 y a procesar la información medida desde 1996, analizando estadísticamente las series de los pozos de observación o piezómetros con el fin de determinar su homogeneidad de la serie de datos y de esta forma obtener los mapas de isopiezas de niveles freáticos promedio para verano e invierno. A continuación se presentan las distribuciones estadísticas realizadas.

Figura 13. Mapa de localización piezómetros red del Sector Norte

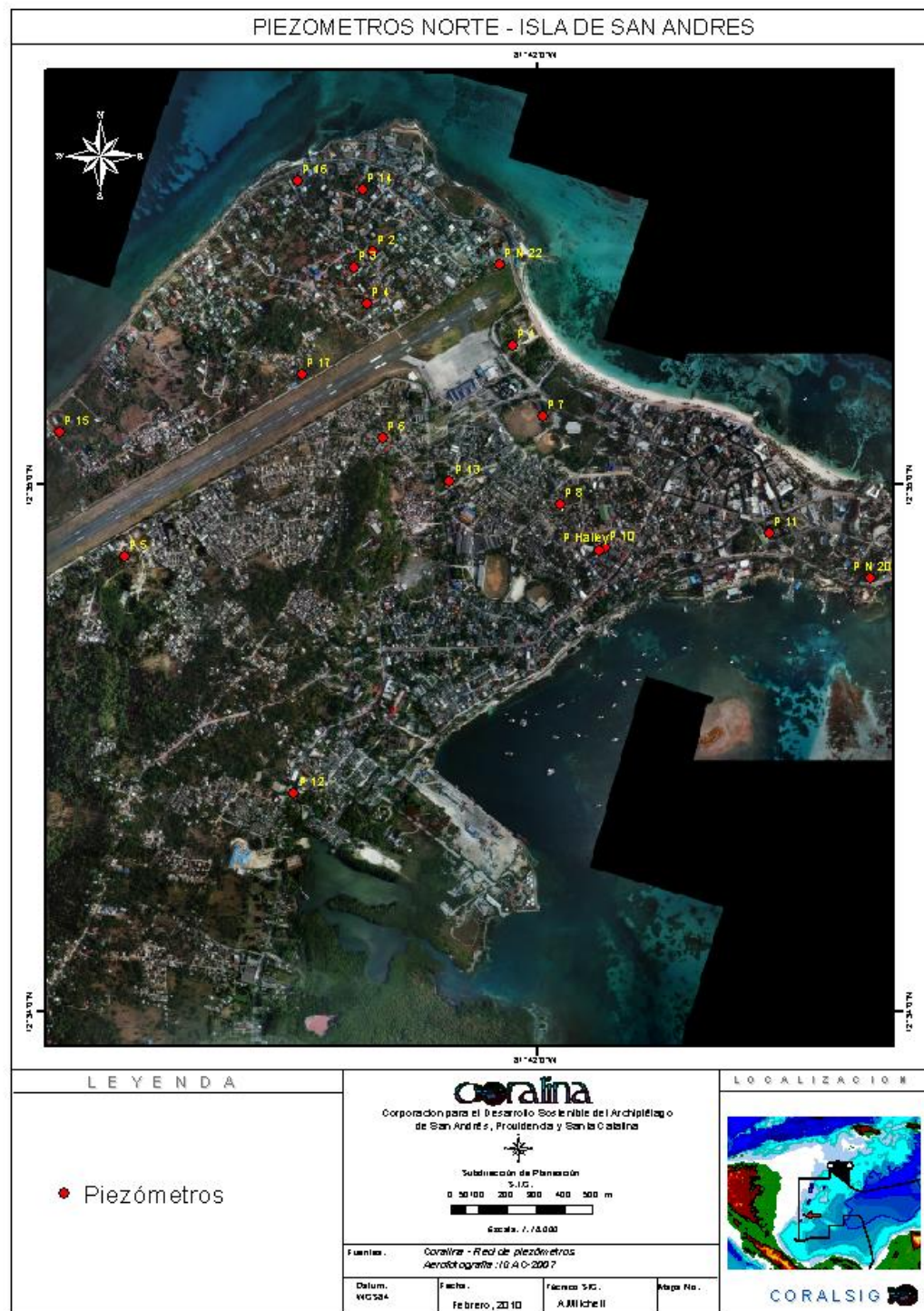


Figura 14. Mapa de localización piezómetros de la Red del Valle del Cove

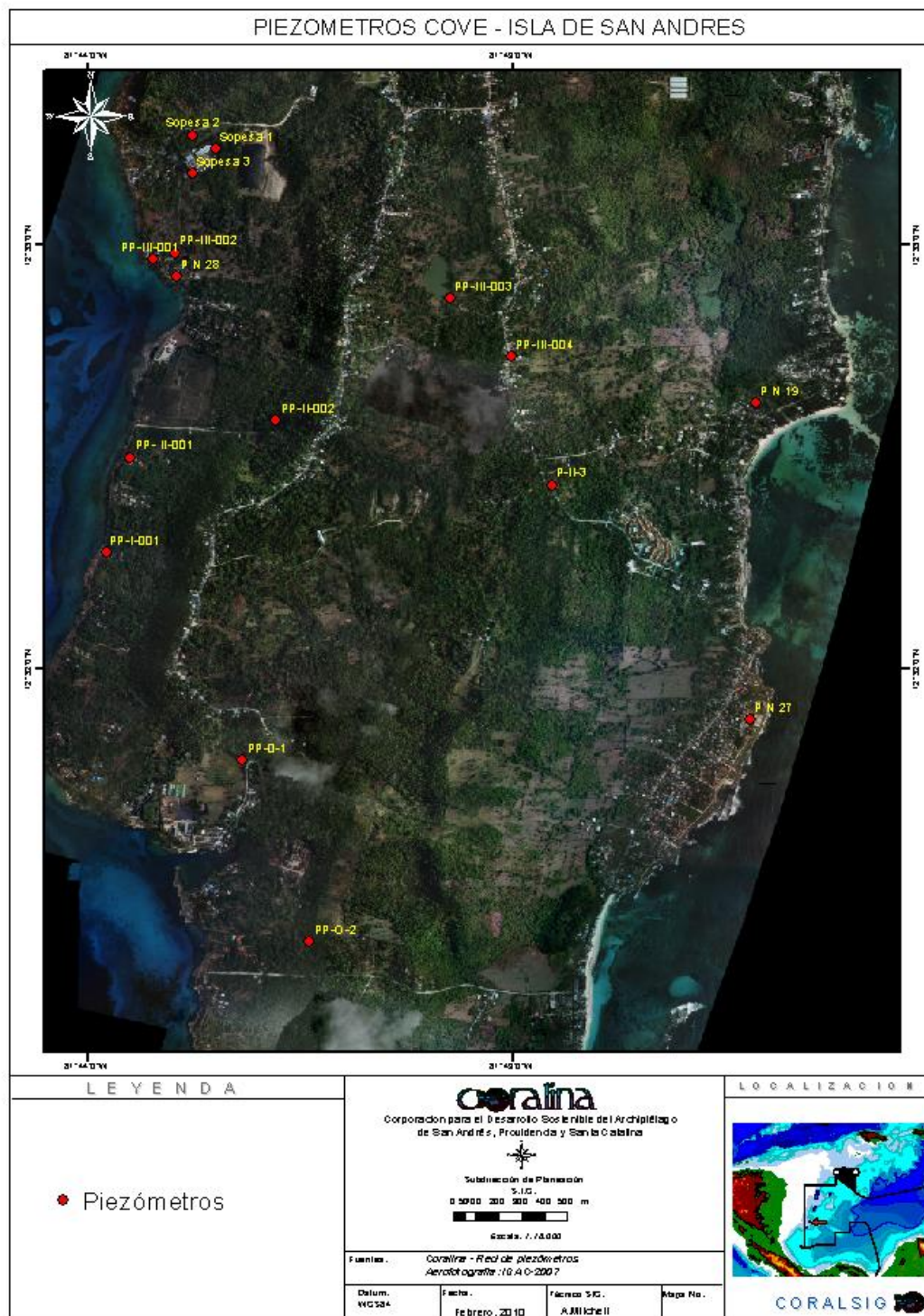


Tabla 3. Pozos de observación que conforman la red de piezometría

FID	Pozo	X	Y	Sitio	Latitud	Longitud
0	PP-I-001	493569	1882817	Valle de Cove - Modelo Adventista - Casa de Gringos	12,537874	-81,732656
1	PP-III-001	493791	1884094	Valle de Cove - Frente bomba texaco (BOMBA DE LENO)	12,549414	-81,730827
2	PP-II-002	494307	1883380	Valle de Cove - Camilo	12,543063	-81,725979
3	PP-III-002	493887	1884118	Valle de Cove - Frente bomba texaco (DETRUS BOMBA DE LENO)	12,549646	-81,729951
4	PP-III-004	495315	1883642	Valle de Cove-Barack (Av principal)	12,545584	-81,716777
5	PP-IV-001	494029	1885165	Valle de Cove - Cerca casa Museo	12,559101	-81,728818
6	PP-O-2	494410	1881100	Morgaviria	12,522538	-81,724666
7	P-II-3	495480	1883077	Barack (Diagonal entrada Duppy Gully)	12,54052	-81,715173
8	Sopesa 2	493972	1884630	Schooner Bight	12,554272	-81,729254
9	Sopesa 1	494070,74	1884567,24	Schooner Bight	12,553722	-81,728338
10	Sopesa 3	493968,4	1884461,6	Schooner Bight	12,552754	-81,72926
11	P 3	496597,53	1888569,09	Sarie Bay, Brenda Hooker (Diagonal Iglesia Hispana)	12,59018	-81,70581
12	P 4	496642,85	1888440,59	Sarie Bay, Alcidez Ramirez (Diagonal Antigua Postobon)	12,589029	-81,705374
13	P 5	495788,47	1887566,93	Dentro de canteras San Andres	12,581022	-81,713069
14	P 6	496688,85	1887968,53	Daniel Lois Soto Mofles, (Antiguo cementerio School House)	12,584783	-81,704876
15	P 7	497243,39	1888033,32	Coliseo Rosado parte occidental	12,585455	-81,699799
16	P 10	497446,98	1887568,37	Restaurante la mamita (Entrada a Caribe Libros)	12,581298	-81,697857
17	P 11	498014,9	1887608,73	Antiguo Hotel Morgan	12,581752	-81,692654
18	P 12	496358,83	1886728,01	Diagonal Parque Archbold (Mauricio Gallardo)	12,573554	-81,707702
19	P 14	496632,5	1888842,86	Frente del hospital Santander, CII 3 Cra 19 (Casa del Castillo)	12,592652	-81,705534
20	P 15	495572,1	1888009,37	La Rocosa (Circunvalar contiguo casa finca Gallardo)	12,584974	-81,715126
21	P 17	496411,16	1888197,08	Tablitas en predios de la Policia(Vja Areopuerto)	12,586798	-81,70746
22	P Halley	497427,7	1887561,8	Agua pura Halley	12,581236	-81,698033
23	P N 19	496361,08	1883421,04	CAJASAI sede recreacional	12,543759	-81,707148
24	P N 20	498361,06	1887448,53	Conjunto Residencial Bay Point	12,580363	-81,689453
25	P N 21	496153,22	1885348,97	CORALINA nueva sede	12,561096	-81,709365
26	P N 22	497101,76	1888570,7	ESTACION DE BOMBEO No 2 Proactiva	12,590274	-81,701185
27	P N 24	493243,2	1877822,15	Universidad Cristiana	12,492821	-81,734836

28	P N 26	495518, 66	1880398, 15	Cementerio San Luis	12,51639	-81,714386
29	P N 27	496314, 24	1882035, 68	Colegio Antonia Santos el Rancho	12,53127	-81,707354
30	P N 28	493893, 22	1884013, 01	Escuela Maria Auxiliadora	12,548701	-81,729877
31	P N 29	493593, 83	1878706, 3	Hotel Sunset	12,500842	-81,731764

9.1.3.2.1. Análisis de la media aritmética, varianza y la desviación estándar anual para cada piezómetro

Este procedimiento estadístico consistió en tomar cada dato medido sobre el nivel estático a partir de 1996 y de 1999 (para la red del Valle del Cove y para la Zona norte de la Isla respectivamente) hasta 2010.

Con la anterior información agrupada anualmente y por red, se aplicó un modelo estadístico con el cual se obtuvo la media y la desviación estándar, seguidamente se graficaron estos parámetros y se pudo observar que en algunos puntos la dispersión era ocasionada por errores al digitar la información, o al utilizar la plantilla con datos de años anteriores, lo que se evidencia por la heterogeneidad en la distribución anualmente; para corregir dichos errores se revisaron las bases de datos, se eliminaron los valores repetidos y/o anormales para la serie y fueron introducidos los valores correctos y/o las celdas se dejaron sin información.

En las Figuras 15 y 16 se pueden observar la media y la desviación estándar para la red de piezómetros del Sector Norte en el año 1996 y 2010. La media se encuentra representada por cada punto, mientras que la desviación es la barra o línea vertical; la cual dependiendo de su longitud determina que tan disperso se encuentra el valor medido de la media.

De igual forma en la Figuras 17 y 18 se pueden observar la media y la desviación estándar para la red de piezómetros del Sector Cove en el año 1999 y 2010.

Se pudo concluir que las series analizadas sobre niveles piezométricos pueden ser promediadas y que además se pueden obtener los mapas de isopiezas ya que anualmente su distribución es homogénea y la dispersión del dato medido y la media es pequeña.

9.1.3.2.2. Distribución anual de los niveles piezométricos

Ya que los pozos de observación o piezómetros son las captaciones por medio de las cuales se puede medir el nivel del agua y están conformadas por un tubo de pequeño diámetro conectado hidráulicamente al acuífero y en cuyo interior el agua

alcanza una altura que equilibra la presión del acuífero en el punto de conexión, la observación de las variaciones del nivel piezométrico realizadas periódicamente por medio de las redes de monitoreo, proporcionan en términos generales información sobre la respuesta del acuífero a procesos de recarga o de extracción así como la tendencia del almacenamiento.⁶

Figura 15. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 1996

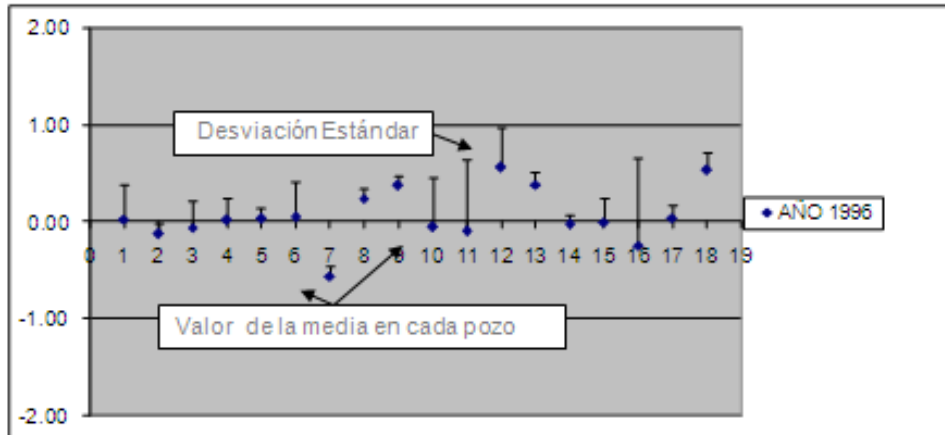
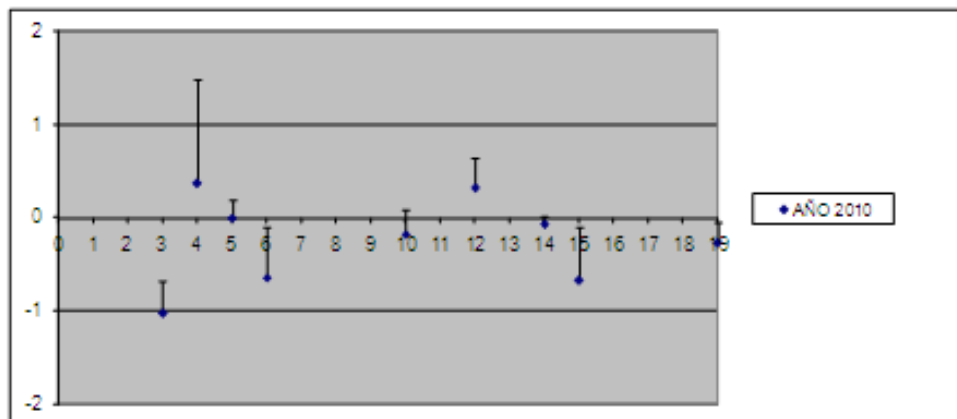


Figura 16. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 2010.



⁶ INTRUSION MARINA EN ACUIFEROS COSTEROS Y SU APLICACIÓN AL LITORAL ESPAÑOL. TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros (Granada, España). 1988

Figura 17. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 1999.

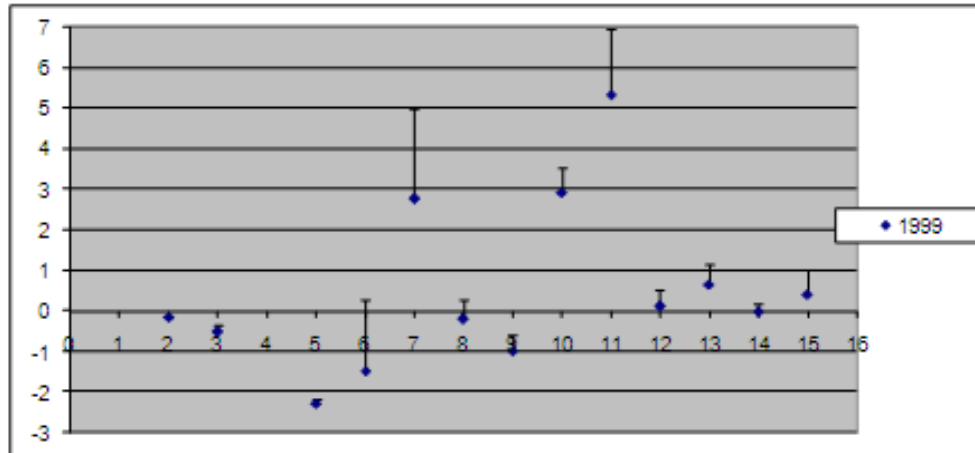
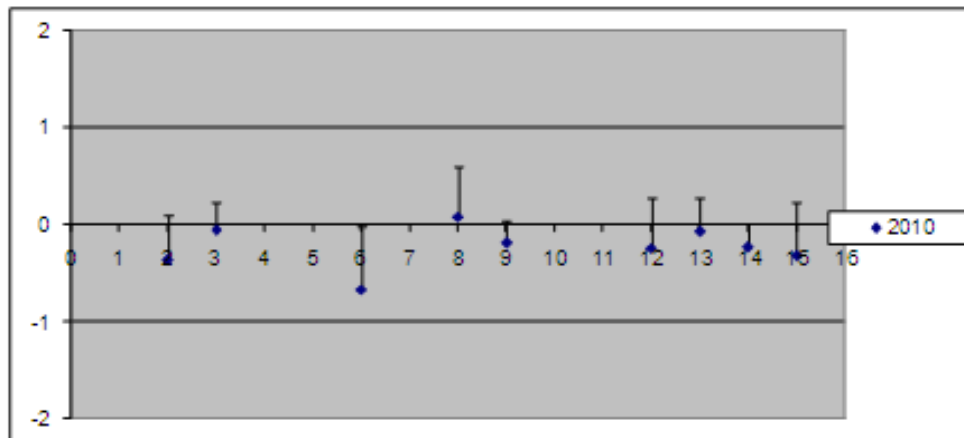


Figura 18. Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 2010.



Específicamente para las áreas costeras y conformadas geológicamente por rocas karstificadas como es el caso de los acuíferos de San Andrés, la circulación de agua se da a favor de conductos o zonas de permeabilidad preferente ligadas a la disolución de los materiales a través de las discontinuidades del macizo rocoso (Fallas, diaclasas, cavernas). Esas discontinuidades condicionan un medio anisótropo con diferentes respuestas según las porciones analizadas.

De otro lado las variaciones de los niveles además de estar condicionadas por la litología, también lo están por las interacciones con el nivel base del mar, por las mareas, por fenómenos climáticos que pueden alterar el sistema de acuerdo con la variación del nivel, por fenómenos de recarga o ausencia de ella y por las modificaciones antrópicas que están relacionadas con la extracción de agua subterránea en las zonas costeras, la ejecución de obras de ingeniería que

aumentan la escorrentía superficial y por lo tanto la salida del agua dulce directamente hacia el mar.

En este sentido los promedios anuales para periodos secos y húmedos analizados en este documento, evidencian variaciones de los niveles piezométricos a lo largo del año, variaciones fundamentales para la selección de datos a utilizar en el procesamiento SIG.

Estos promedios anuales para periodos secos y húmedos, se determinaron con base en los datos de las estaciones de lluvia, por medio de los cuales se construyeron los ciclos anuales de precipitación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se generaron promedios anuales de la información piezométrica conservando tanto los meses secos como los meses lluviosos.

9.1.3.3. Selección de serie de datos a utilizar para efectos del mapa de vulnerabilidad

Luego de realizar la revisión estadística de los datos históricos de niveles freático provenientes de la red piezométrica de la isla de San Andrés y de su agrupación de acuerdo a los periodos secos y húmedos del año, se procedió a seleccionar los años representativos para trabajar, durante los cuales los niveles freáticos presentaron valores críticos por debajo del nivel del mar.

Para tener una aproximación más precisa de los años críticos en donde los niveles freáticos presentaron profundizaciones anómalas, fue necesario comparar las series de datos piezométricas con los fenómenos de variabilidad climática ENSO (El Niño Southern Oscillation), mejor conocido en sus fases extremas como Niño (Fase cálida) y Niña (Fase fría).

Históricamente el territorio nacional ha sido afectado por el efecto climático del El Niño, en los últimos 30 años se han presentado eventos cálidos como los de 1991-1992 y 1997 y 1998, que generaron grandes impactos económicos como el apagón por racionamiento energético como consecuencia del déficit hídrico.

El Niño es el termino originalmente usado para describir la aparición de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas de lo normal en el pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y Sur de Colombia. Este calentamiento de la superficie del Océano Pacífico cubre grandes extensiones y por su magnitud afecta el clima en diferentes regiones del planeta, dentro de las que se encuentra el norte de Suramérica donde está situado el territorio colombiano. (Tomado de posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia. 2012)

A continuación se presentan los episodios históricos de El Niño, según análisis realizado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration en posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia. 2012) (Ver tabla 4)

Tabla 4. Episodios históricos del El Niño

El Niño	Highest ONI (Índice Oceánico del Niño) Value
JJA 1951 –DJF 1951/52	1,2
DJF 1952/53 – JFM 1954	0,8
MAM 1957 – JJA 1958	1,8
OND 1958 – FMA 1959	0,6
MJJ 1963 –JFM 1964	1,4
AMJ 1965 – MAM 1966	1,9
JAS 1968 – DJF 1969/70	1,1
AMJ 1972 – FMA 1973	2,1
ASO 1976 – JFM 1977	0,8
ASO 1977 – JFM 1978	0,8
AMJ 1982 – MJJ 1983	2,2
JAS 1986 – JFM 1988	1,6
AMJ 1991 – MJJ 1992	1,6
ASO 1994 – FMA 1995	1,2
AMJ 1997 - MAM 1998	2,4
AMJ 2002 – JFM 2003	1,3
JJA 2004 – DJF 2004/05	0,7
ASO 2006 – DJF 2006/07	1,0
JJA 2009 – MAM 2010	1,6

De acuerdo a la tabla anterior y a la serie de datos de piezometría disponible, los años con mayor índice ONI corresponden a 1997 (Abril a junio) – 1998 (Marzo a Mayo), 2002 (abril a junio) – 2003 (enero a marzo) y 2009 (junio a agosto) – 2010 (marzo a mayo).

Debido a que los periodos Niño seleccionados tuvieron efectos sobre no solo un año sino en diversos meses en dos años, es necesario utilizar la información de piezometría invierno – verano según corresponda al periodo evaluado.

En este sentido la información a utilizar corresponde a los siguientes periodos (Ver tabla 5):

Tabla 5. Periodos piezométricos a utilizar

Periodo Niño	Periodo piezometría a utilizar
AMJ 1997 - MAM 1998	Invierno 1997 – verano 1998
AMJ 2002 – JFM 2003	Invierno 2002 – verano 2003
JJA 2009 – MAM 2010	Invierno 2009 – verano 2010

9.1.3.4. Generación de superficies piezométricas de series de datos niño y selección del método de interpolación

Las superficies piezométricas corresponden a un espacio geométrico que contiene puntos que marcan alturas piezométricas de cada parte de un acuífero con respecto a su profundidad; se representan mediante líneas de igual altura piezométrica llamadas isopiezas.

La profundidad del nivel piezométrico se mide desde una determinada referencia, para la cual es necesario conocer su cota respecto a un punto fijo como lo es el nivel del mar.

Las curvas de isopiezas se generan de datos puntuales recolectados con la medición en campo de la profundidad de los niveles freáticos, para un determinado tiempo y los métodos analíticos que se utilizan para obtenerlas, son los mismos que se emplean en topografía, para este caso específico, corresponden a los años Niño 1997-1998, 2002-2003 y 2009 -2010.

Las curvas se trazan teniendo en cuenta las curvas de nivel y la altura sobre el nivel del mar de los piezómetros monitoreados.

Para efectos de realizar el análisis de las redes en la isla de San Andrés, se obtuvieron los mapas de isopiezas de los niveles freáticos por medio del software ARGIS el cual ofrece diversas herramientas de interpolación por medio de las cuales se pueden construir las líneas de isovalores entre pozos. Debido a que hay una variedad de métodos para realizar este tipo de interpolaciones, la mejor opción que reproduce la superficie es la que se debe seleccionar (Caruso y Quarta, 1998 en D. Coaguila et Al).

Se realizó una comparación de los valores obtenidos – superficies – por dos diferentes métodos de interpolación de datos puntuales para la generación del mapa de isovalores de profundidad. Los métodos evaluados fueron IDW y Kriging Simple y Kriging Ordinario.

Inicialmente se realizó un análisis de los métodos IDW y Kriging Simple, con los valores por defecto del modelo de predicción.

Para efectos realizar la comparación de los resultados arrojados por ambos métodos se utilizó la herramienta Geostatistical Analyst, en primera instancia, se tomó una muestra del año 2010 y se interpoló por el método de Kriging simple, y IDW, obteniéndose los mapas de predicción que a continuación se presentan (Ver figuras 19 y 20).

Figura 19. Mapa Metodo Kriging Simple

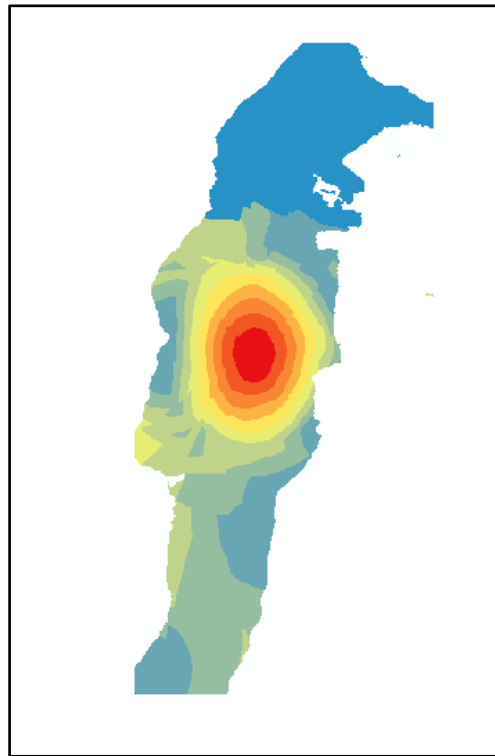
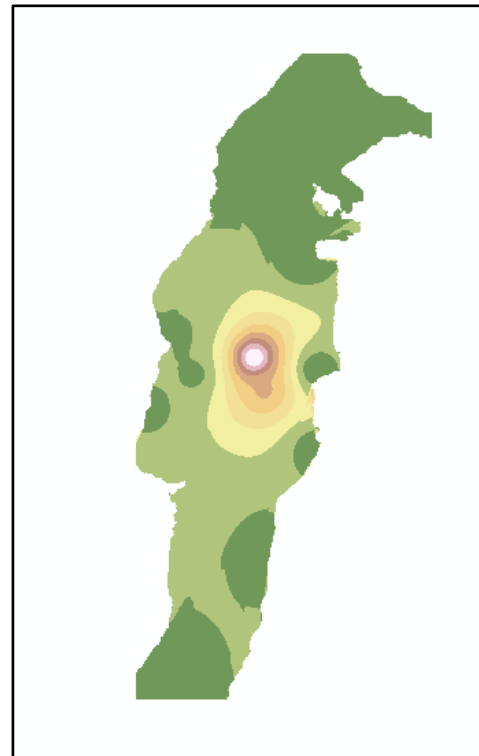


Figura 20. Mapa Metodo IDW



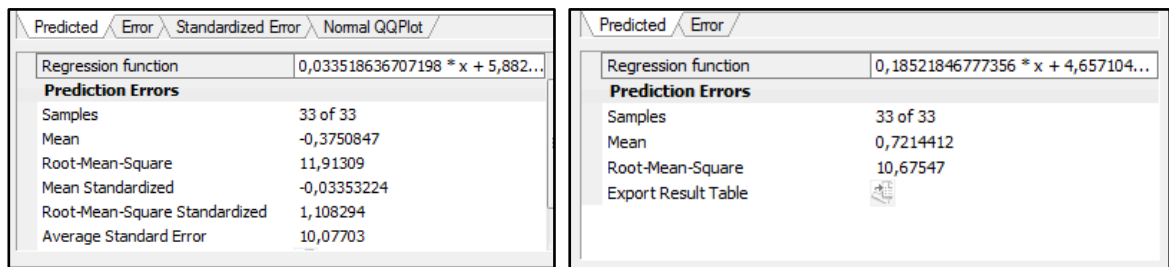
En cuanto a la comparación visual realizada entre los dos métodos, se pudo observar que el método IDW tiende a producir patrones poco reales conocidos como tipo "ojo de buey" alrededor de los puntos muestreados. Lo anterior expresa el peso que se le puede dar a la variación particular del valor de un punto de muestreo sobre los que están alrededor (Gotway 1996 en Villatoro, M. Et Al, 2008).

La interpolación de los datos con el método de Kriging fue menos brusca con el que con el IDW, debido a que en este se cuantifica la estructura espacial de los datos -mediante el uso de variogramas llamados algunas veces semivariogramas debido a su similitud en el cálculo- y los predice mediante la interpolación, usando estadística. Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés. (Tomado de Villatoro, M. Et Al, 2008).

En este sentido relacionado con los mapas de predicción, el método Kriging se comportó mejor, adicionalmente la interpolación realizada con este método es mucho más real respecto a los valores encontrados en campo.

Por otro lado se analizaron ambos métodos teniendo en cuenta los resultados del análisis de validación cruzada obtenido por la herramienta Geostatistical Analyst, en donde se obtuvo que el Mean más cercano al 0 fue el del método de Kriging simple en comparación con el IDW, sin embargo IDW presenta un menor RMS en comparación con el Kriging Simple Ver Figura 21, sin embargo la curva QQplot arrojada por el kriging, evidencia que la distribución de los datos no es normal respecto a la estándar, debido a que los datos se separan de la curva estándar en muchos segmentos de los registros graficados (Ver figura 22)

Figura 21. Validación cruzada entre Kriging simple e IDW



Se procedió entonces a realizar la comparación de los resultados obtenidos con el kriging simple con el método de interpolación Kriging Ordinario, sin ningún procesamiento previo (Ver Figura 23), los resultados arrojados indican que el parámetro Mean incrementó respecto al kriging simple, sin embargo datos de Root Mean Square y Average Standard Error, presentaron valores inferiores. Adicionalmente la curva QQplot del Kriging Ordinario se ajustó mejor a la curva estándar en comparación con el kriging simple.

En cuanto a las salidas graficas de dichos métodos (Ver Figuras 24 y 25), se observa que el kriging ordinario representa mejor la superficie piezométrica respecto a la superficie modelada con el kriging simple.

Para efectos de verificar si la superficie interpolada con el kriging ordinario presenta algún grado de tendencia, se realizó el análisis de los datos con Geostatistical Analyst.

Figura 22. Curva QQplot del método Kriging Simple

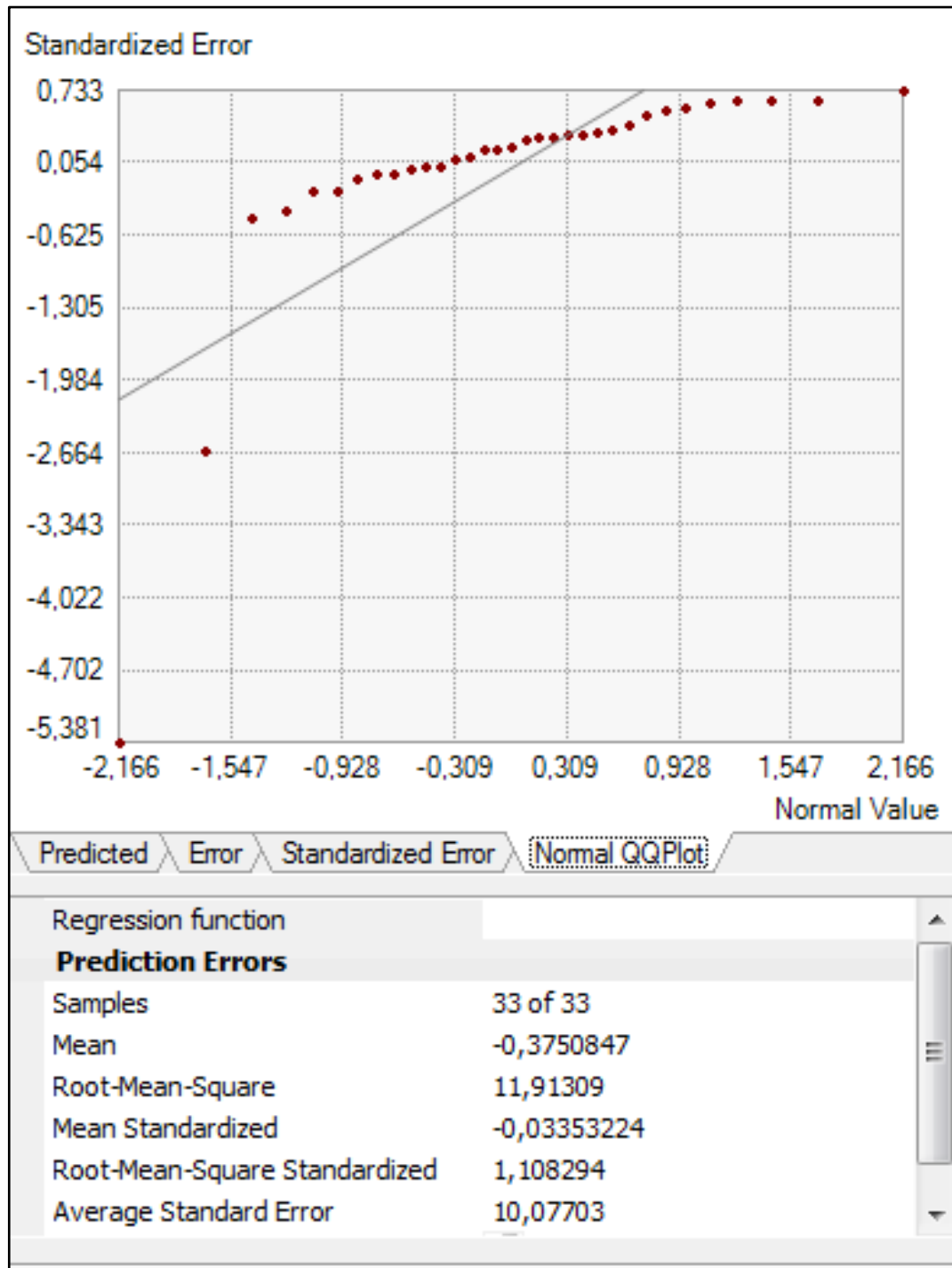
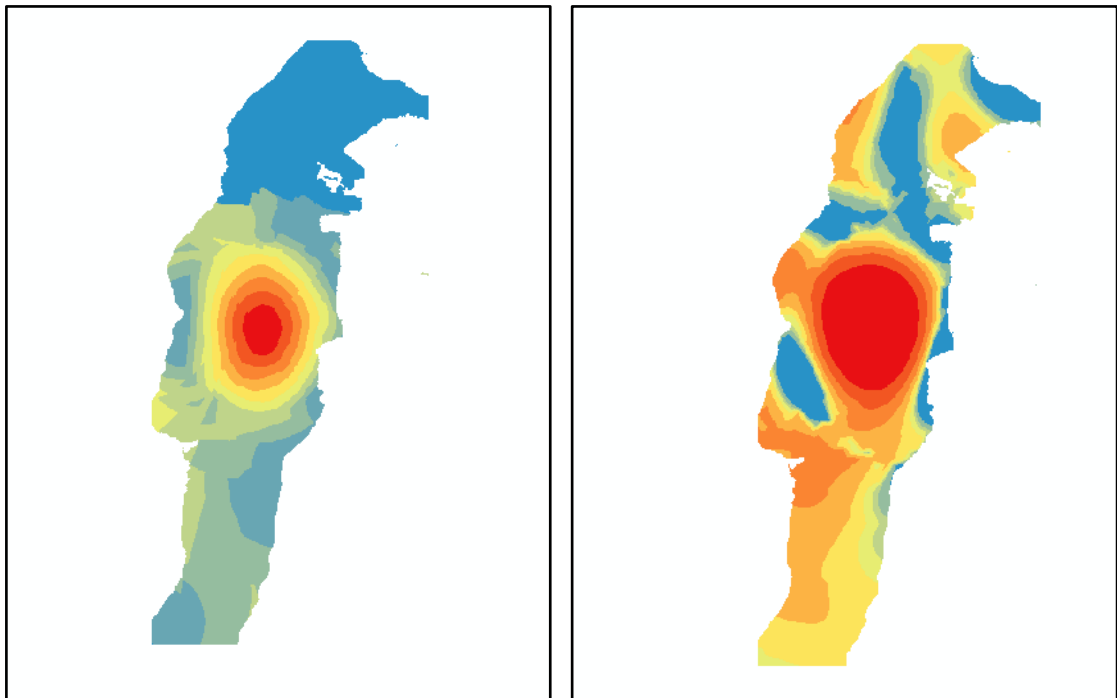


Figura 23. Validación cruzada entre Kriging Simple y Ordinario

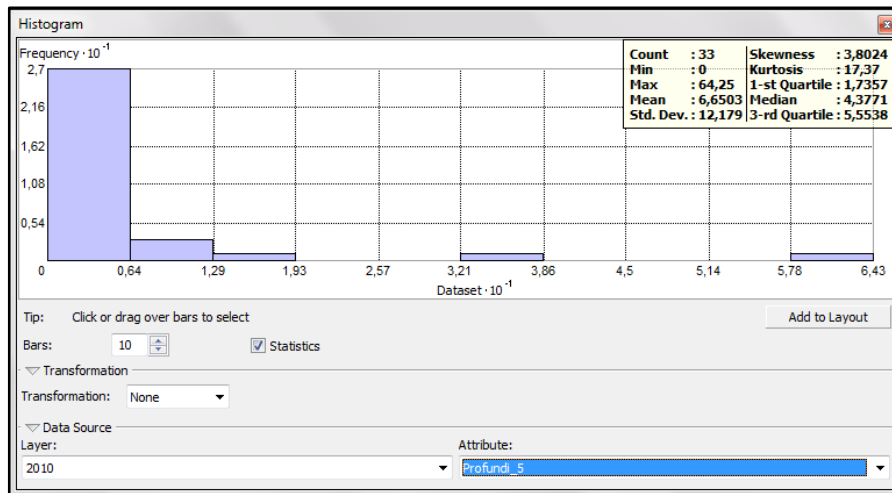


Figura 24. Mapa Método Kriging simple Figura 25. Mapa Método Kriging Ordinario



En cuanto a la distribución observada en el histograma (Ver figura 26), esta muestra que es de tipo unimodal y asimétrica, tanto Mean como Median difieren en valor, por lo cual se interpreta que el histograma es de tipo no normal y por lo cual se requeriría preliminarmente una transformación para convertirla en normal, para que la superficie generada arroje mejores datos.

Figura 26. Histograma Kriging Ordinario



En cuanto a la curva Normal QQplot (Ver figura 27), esta indica que la distribución de los puntos no están cerca a la curva de distribución estándar normal, por lo cual nuevamente hay indicios que se debe utilizar algún tipo de transformación de los datos para obtener una distribución normal antes de utilizar las técnicas de interpolación.

Para verificar lo anterior, se realizó un análisis de tendencias (Ver figura 28), en el cual se observó que los datos se ven representados por un lado con una línea verde curva en forma de U, exhibiendo una tendencia mediana en dirección este oeste y por el otro con una línea curva color azul en forma de U, exhibiendo una tendencia menos predominante en sentido norte sur.

En este caso debido a que hay una clara tendencia en forma de U, una buena opción para la tendencia local estaría representada en un segundo orden polinomial. La tendencia es NE-SW y posiblemente está relacionada con que la distribución de los puntos monitoreados obedece espacialmente a que la orientación de la superficie en dicho eje es mayor que en el eje contrario, por otro lado podría estar también relacionada con la variación topográfica.

Por otro lado analizando la opción Semivariogram/Covariance Cloud (Ver figura 29), se determinó en cuanto a la auto correlación espacial entre las muestras medidas, que los valores con semivariogramas altos corresponden a los valores

de pares de datos que comparan zonas planas con zonas altas, por lo tanto hay grandes diferencias entre estos conjuntos, se considera en este caso que hay influencia direccional dada por la topografía.

Figura 27. Curva Normal QQplot Kriging Ordinario

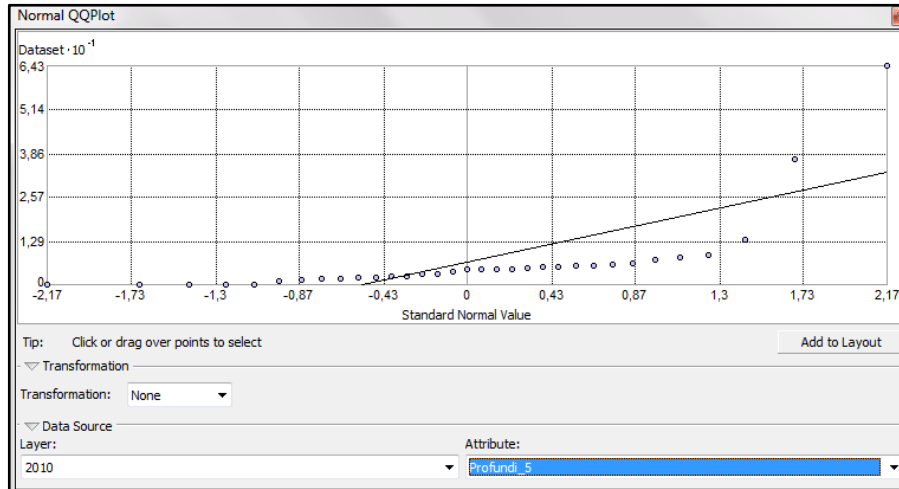


Figura 28. Análisis de tendencias Kriging Ordinario

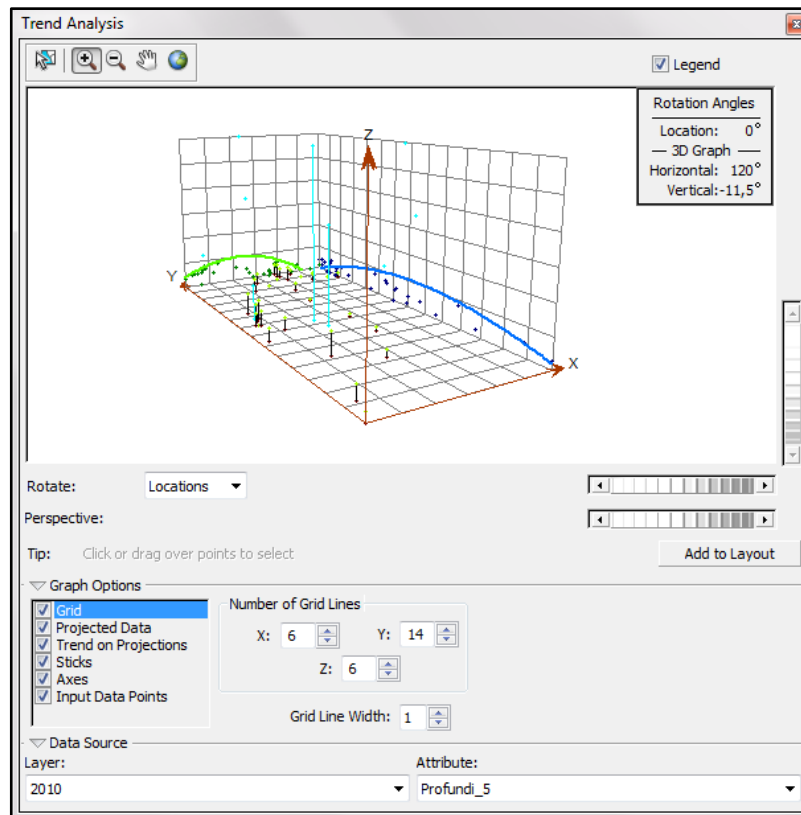
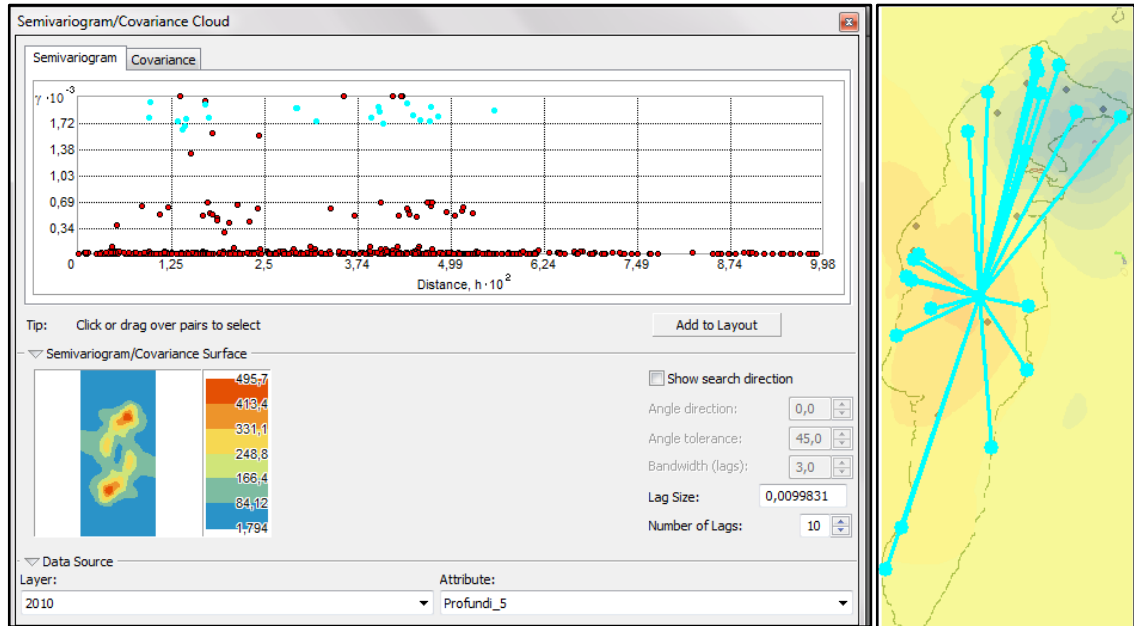


Figura 29. Semivariogram/Covariance Cloud



Se procedió entonces a implementar el método de kriging ordinario realizando la incorporación de la tendencia al proceso de interpolación, para lo cual se utilizó nuevamente la herramienta Geostatistical Wizard, seleccionado el método de interpolación Kriging Ordinario, seleccionado en la casilla de Order of trend removal, el segundo orden polinomial, la cual indica que los cambios más rápidos se dan la dirección NW-SE debido a que la isla tiene una forma achatada en esta dirección y más corta en comparación con el otro eje y los cambios graduales se dan NE-SW debido a que es un eje más largo en términos territoriales. Ver figura Figura 30

Para efectos de corroborar la influencia direccional se generaron los semivariogramas con el moldelamiento, lo cual indicó nuevamente que la dirección del eje mayor al NE-SW. (Ver figura 31)

Finalmente se utilizó la opción Cross Validation para saber qué tan bueno puede ser el modelo en la medida que los puntos se ajusten a la línea estándar. Las predicciones de este modelo en comparación con los anteriormente analizados son mejores en algunos de los parámetros de predicción.

El kriging Ordinario procesado en comparación con el no procesado presenta parámetros menores tales como Mean, Mean Standardized, Root Mean Square y Average Estándar Error. (Ver figura 32)

En cuanto a las superficies de interpolación generadas con ambos métodos, el Kriging Ordinario con procesamiento ofrece mejor salida gráfica y con mayor aproximación a las superficies piezométricas de los acuíferos. (Ver figuras 33 y 34)

En esta medida, se seleccionó finalmente este modelo de predicción para generar las superficies piezométricas interpoladas y propiciar un mejor desarrollo del cálculo de vulnerabilidad. (Ver figuras 35 a 40)

Figura 30. Trend removal

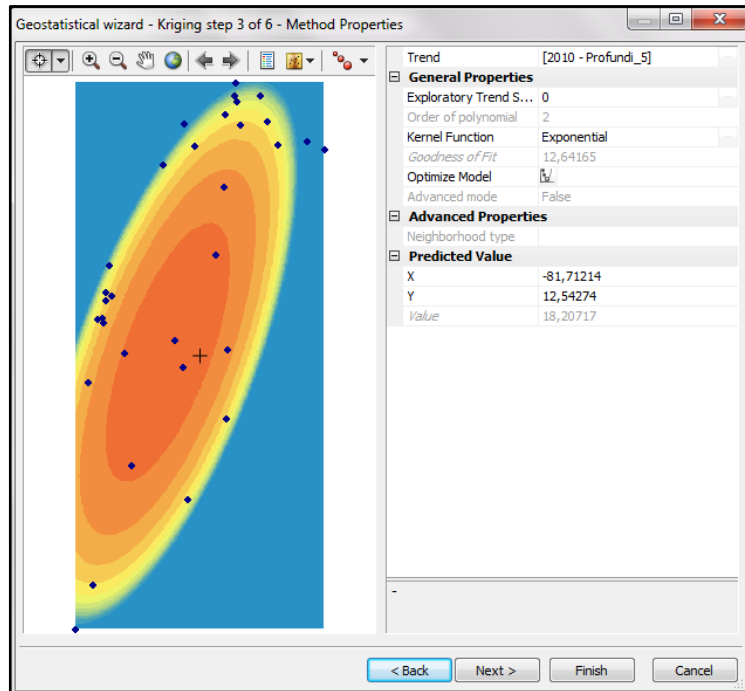


Figura 31. Semivariogram7Covariance Modeling

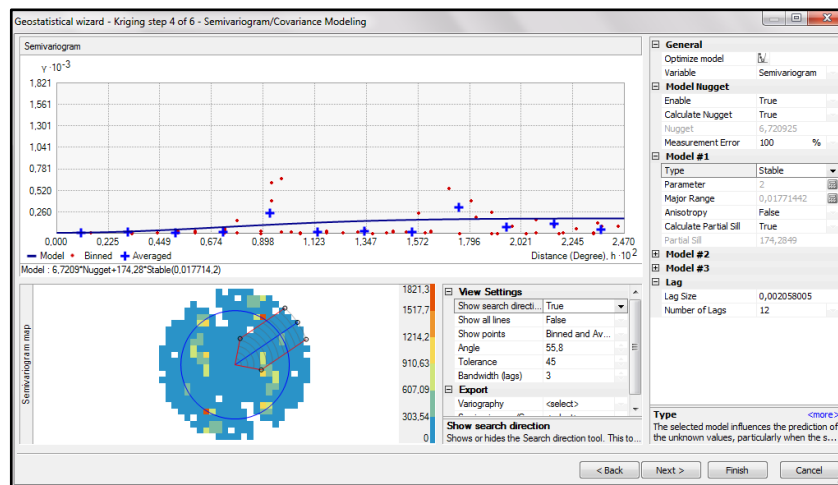


Figura 32. Cross Validation Kriging Ordinario con y sin trend

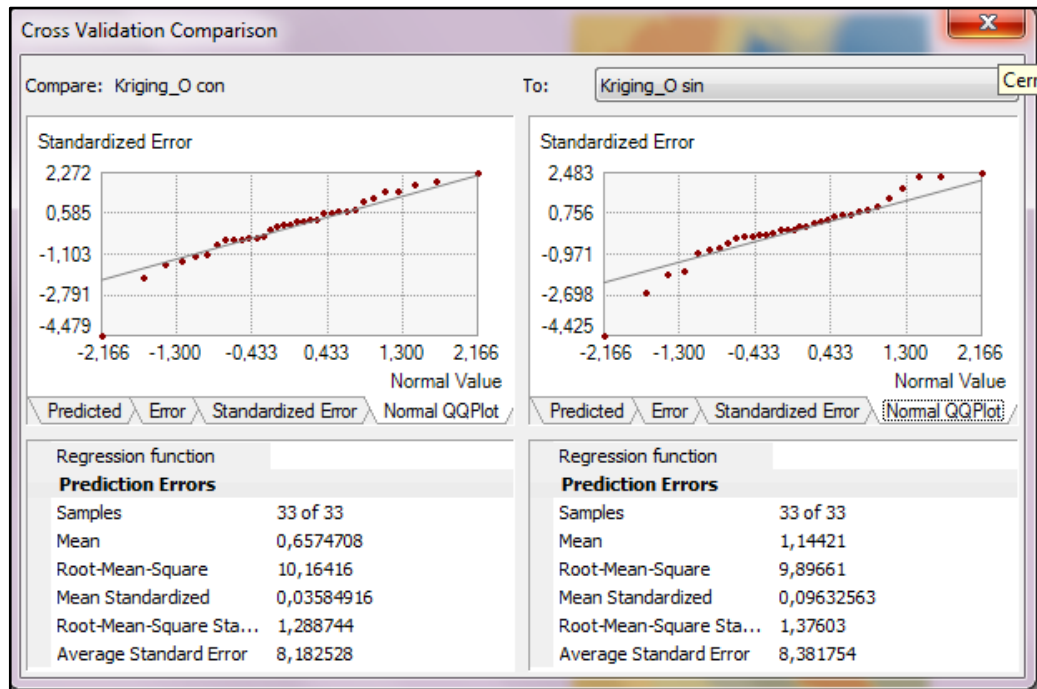


Figura 33. Mapa Kriging Ordinario sin procesamiento

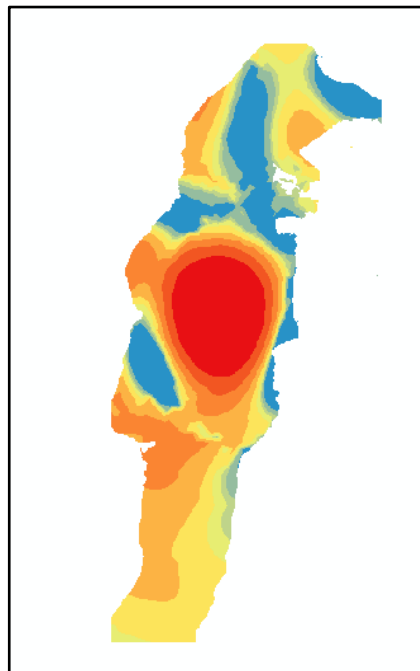


Figura 34. Mapa Kriging Ordinario con procesamiento

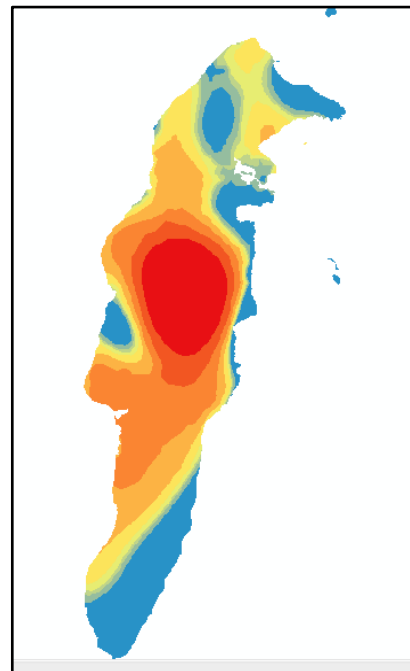


Figura 35. Mapa de piezometría 1997

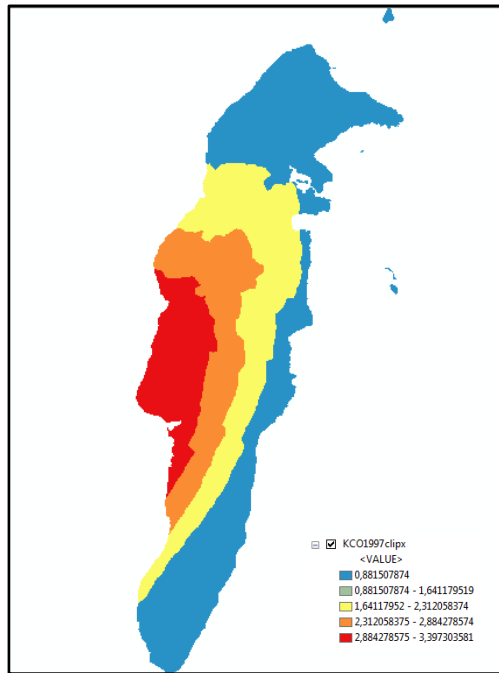


Figura 36. Mapa de piezometría 1998

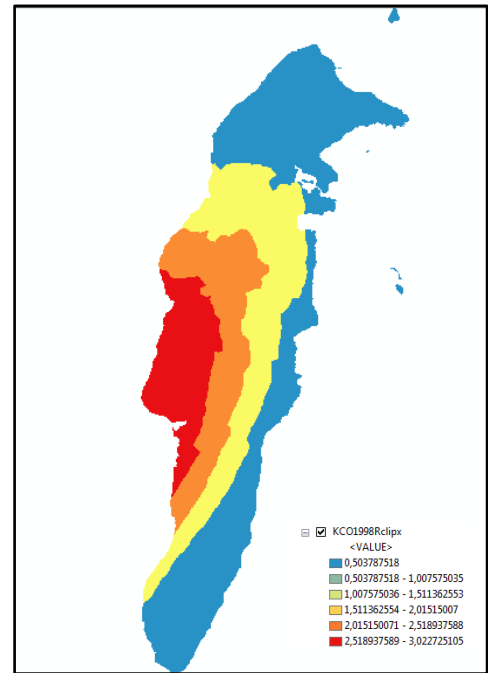


Figura 37. Mapa de piezometría 2002

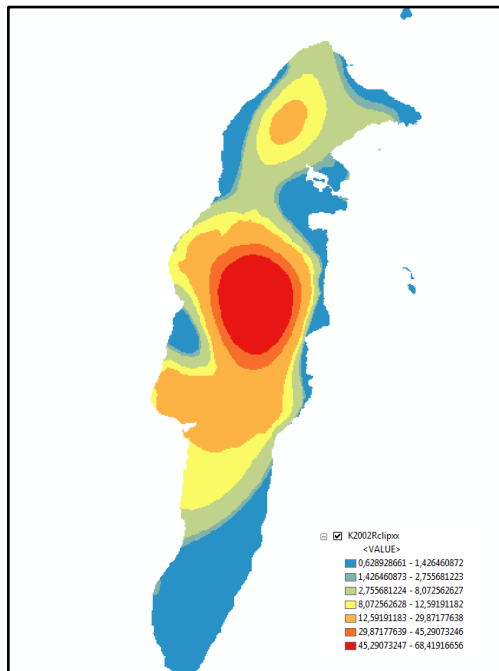


Figura 38. Mapa de piezometría 2003

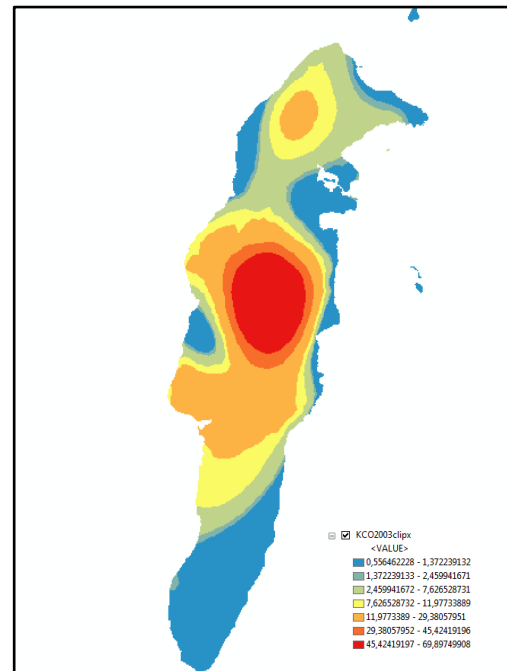
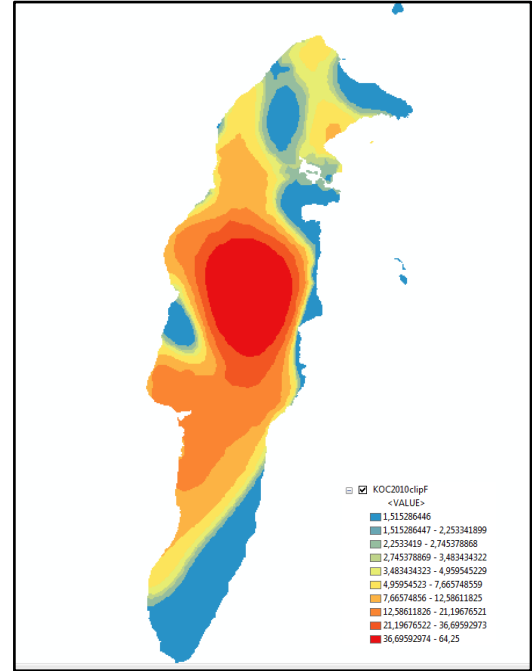
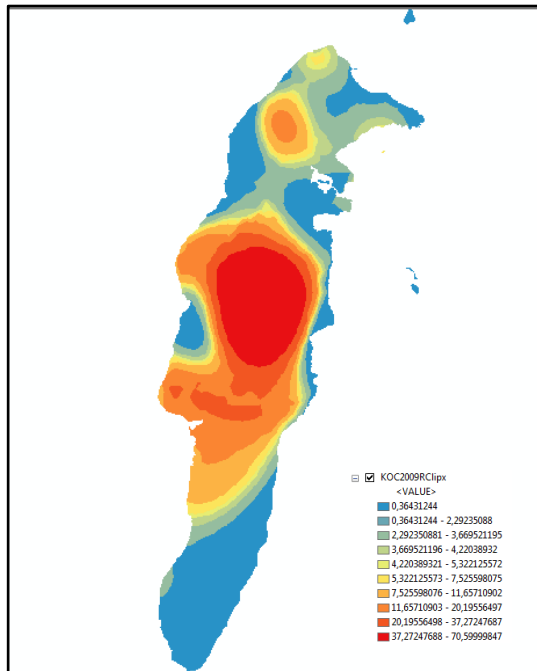


Figura 39. Mapa de piezometría 2009

Figura 40. Mapa de piezometría 2010



Luego de la generación de la superficie piezométrica, se procedió a reclasificar los mapas generados para unificar los mapas de acuerdo a los parámetros que establece la metodología GOD para niveles piezométricos.

Para lo anterior se utilizó la herramienta Spatial Analyst / Reclassify, en donde se introdujo la nueva valoración para cada uno de los rangos que aparecen (según datos de la Figura 41) y el mapa de valoración de la profundidad del nivel freático del acuífero. Ver imágenes 42 a 47.

Figura 41. Reclasificación según parámetros GOD

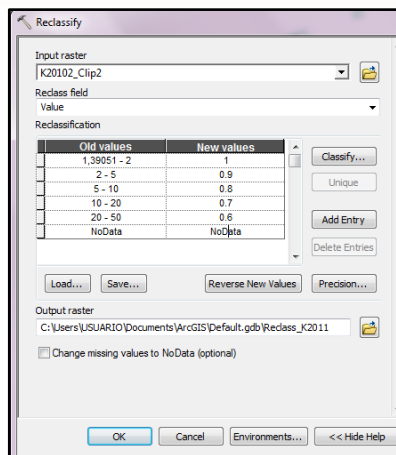


Figura 42. Mapa de piezometría reclasificado 1997

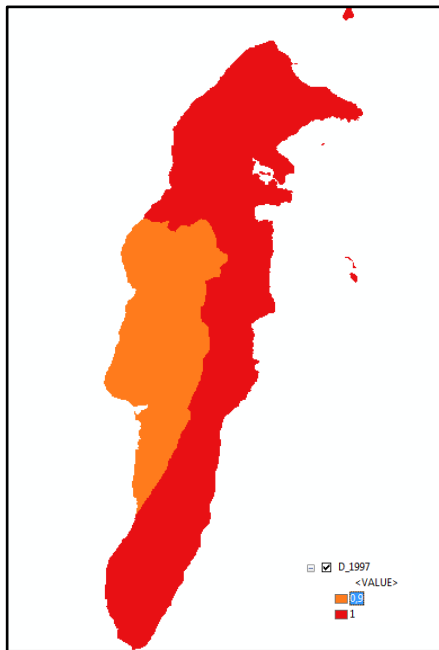


Figura 43. Mapa de piezometría reclasificado 1998

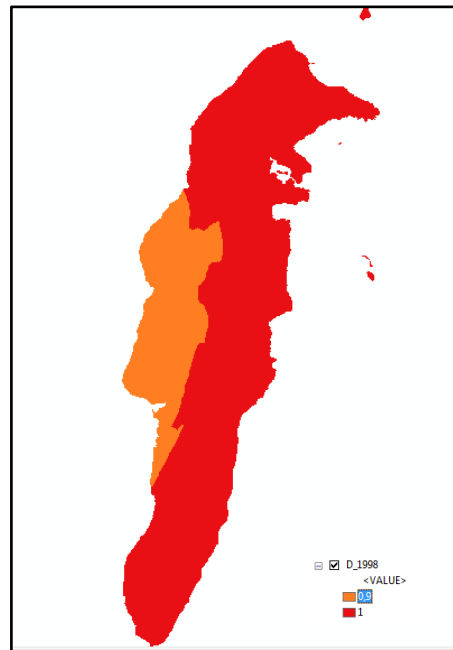


Figura 44. Mapa de piezometría reclasificado 2002

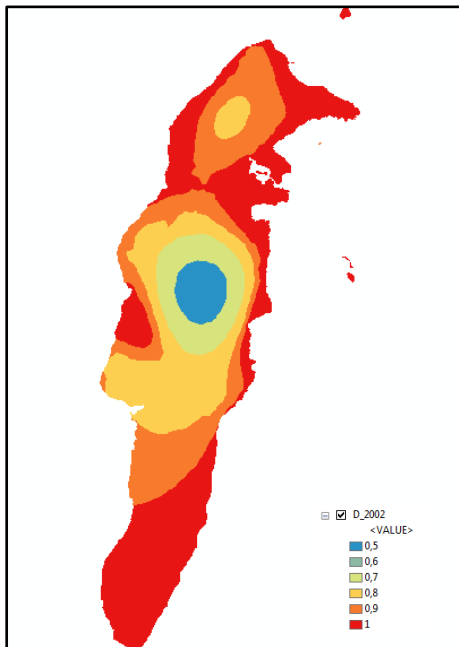


Figura 45. Mapa de piezometría reclasificado 2003

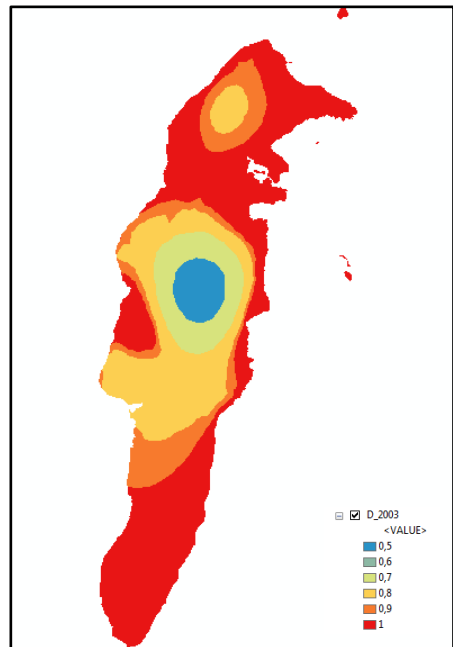


Figura 46. Mapa de piezometría reclasificado 2009

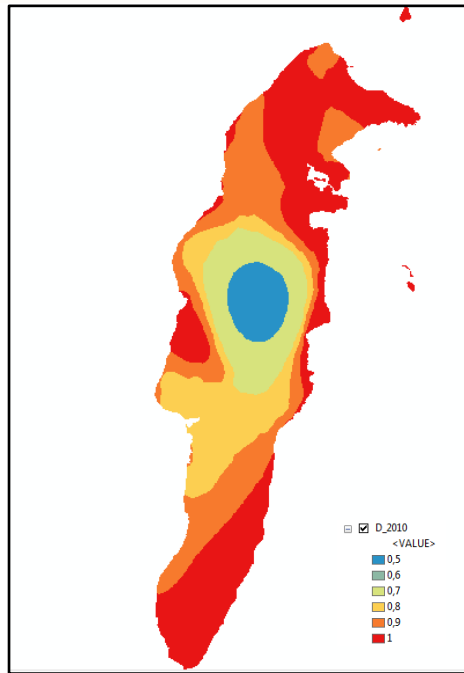
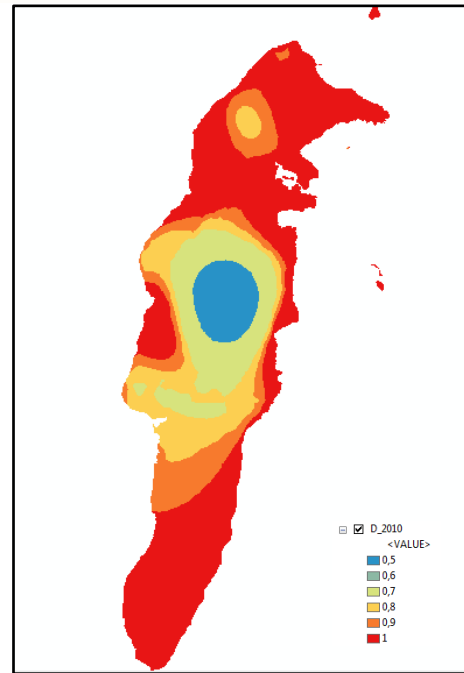


Figura 47. Mapa de piezometría reclasificado 2010



9.2. MAPA DE VULNERABILIDAD

Luego de generar los mapas correspondientes a Ground Water Occurrence (G), Overall Lithology (O) y Depth to Groundwater (D) y sus respectivas reclasificaciones a los parámetros datos por la metodología GOD (Ver imágenes 48 y 49), se procedió a realizar el álgebra de mapas que arrojará el mapa final de vulnerabilidad a la contaminación, partiendo de la siguiente ecuación:

$$\text{VULNERABILIDAD} = \text{G} \times \text{O} \times \text{D}$$

Para ello se utilizó la herramienta Spatial Analyst/Raster Calculator, obteniéndose los mapas ilustrados en las figuras 50 A 55:

Figura 48. Ponderación numérica GOD

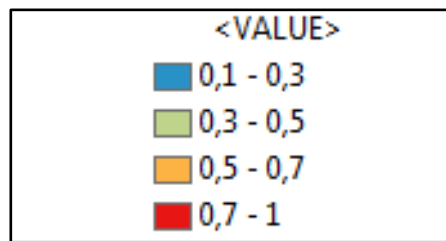


Figura 49. Ponderación cualitativa GOD

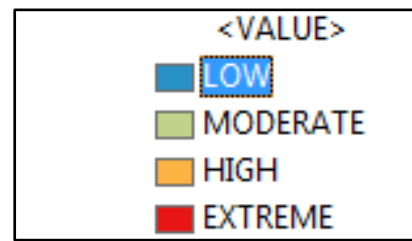


Figura 50. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1997

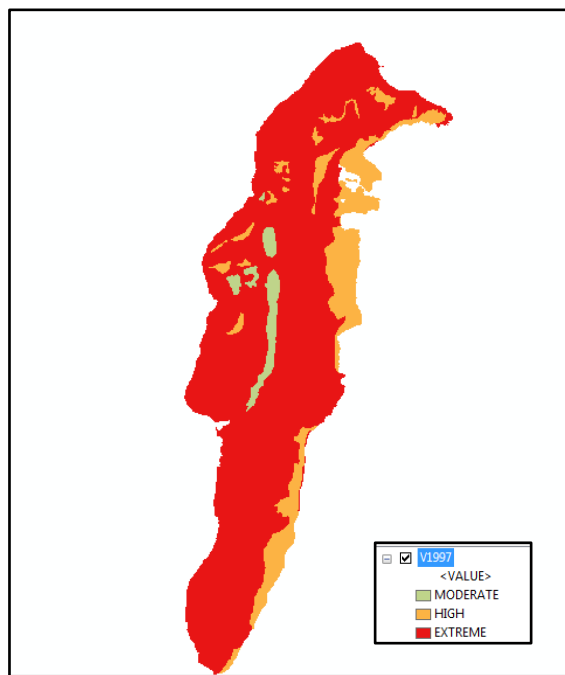


Figura 51. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1998

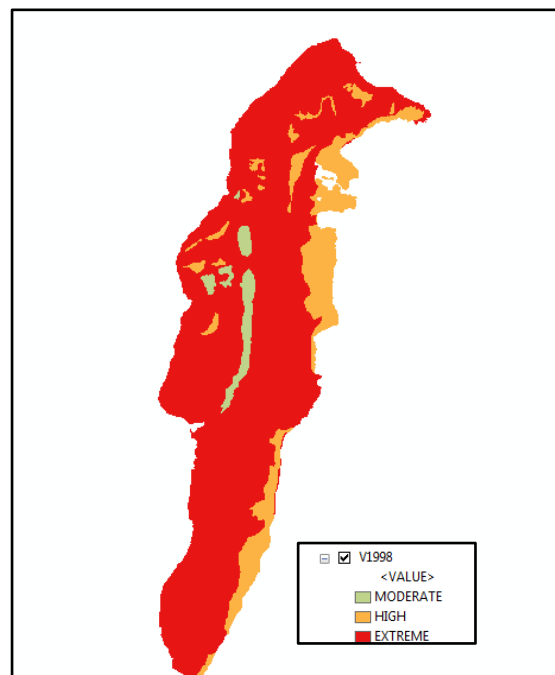


Figura 52. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2002

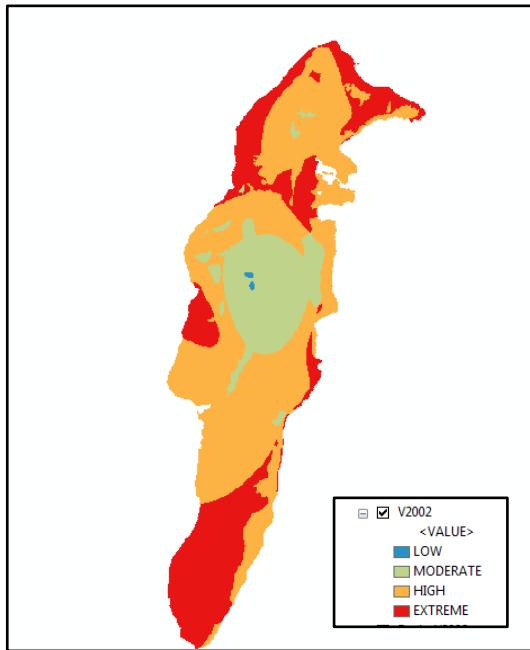


Figura 53. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2003

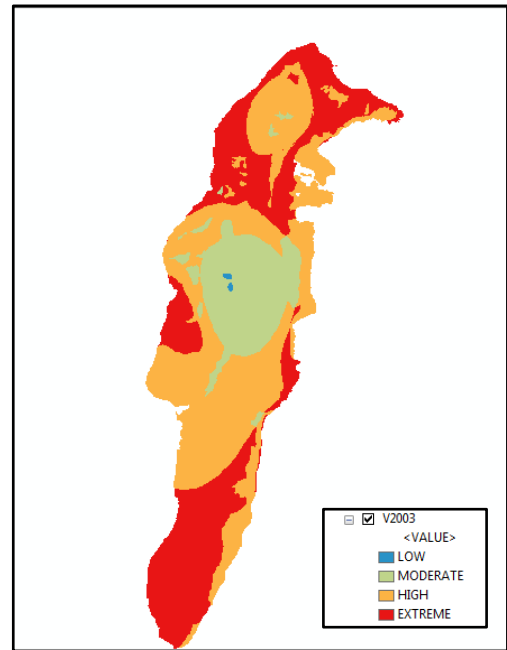


Figura 54. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2009

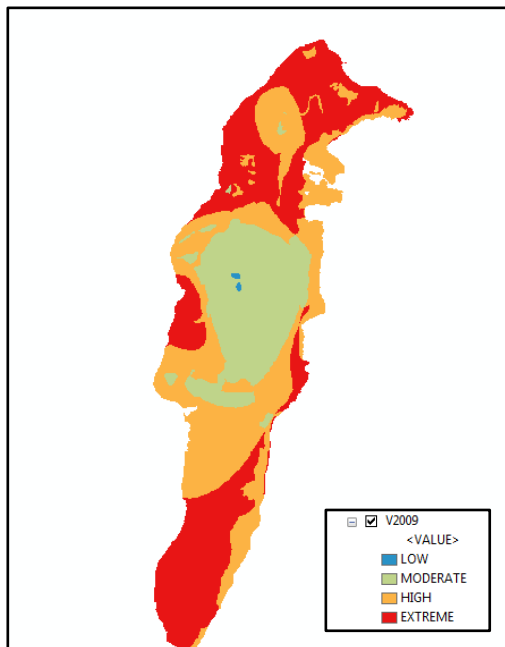
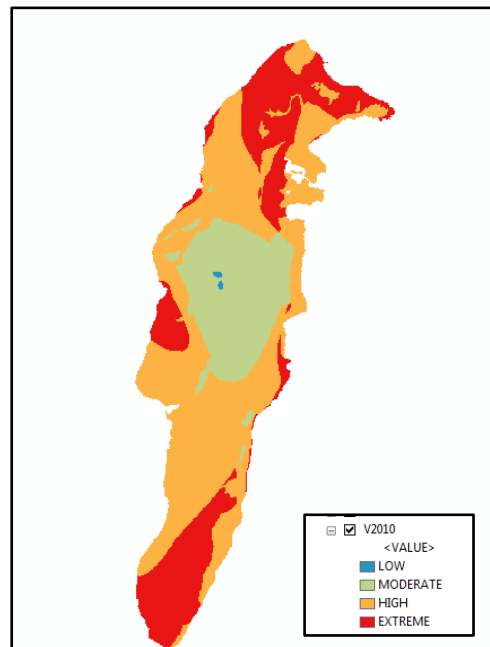


Figura 55. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2010



En cuanto a los resultados obtenidos con el álgebra de mapas, se observa que luego de realizar la reclasificación de los datos, es mucho más fácil hacer el análisis espacio temporal de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en la isla de San Andrés.

Los mapas de vulnerabilidad de los años 1997 y 1998 no presentaron variaciones aunque representaban dos periodos diferentes para un mismo año niño.

Los mapas de vulnerabilidad de los años 2002 y 2003, evidencian variaciones en cuanto a que las áreas de vulnerabilidad extrema, ya que son mayores para el año 2003 que para 2002 y se encuentran relacionadas posiblemente con procesos de recarga en el acuífero San Luis que posibilita mayor cercanía de la superficie freática a la superficie.

Los mapas de vulnerabilidad de los años 2009 y 2010, evidencia variaciones en cuanto a las áreas de vulnerabilidad extrema, ya que disminuyen en 2010 en comparación con el año 2009 y en el caso de la vulnerabilidad moderada generada en 2009, algunos casos pasa a vulnerabilidad Alta para 2010, se observa también que a 2010 incrementan las áreas de vulnerabilidad alta y disminuyen las áreas de vulnerabilidad extrema.

Realizando un comparativo entre los tres periodos seleccionados, es evidente que las áreas de vulnerabilidad extrema disminuyen considerablemente desde 1997 y hasta 2010, lo cual es debido a la variación en profundidad de los niveles freáticos y a su profundización a lo largo de los años, lo cual hace que sean de menos accesibilidad a los contaminantes. Sin embargo esta situación trae consigo otro tipo de interpretaciones, como la posibilidad de la disminución en la recarga de los acuíferos, lo cual hace que la tabla de agua se encuentre más profunda con los años, posibilitando un desabastecimiento en cierta medida.

10. GEODATABASE

Arcgis usa un modelo de datos orientado a objetos denominado modelo de datos Geodatabase, el cual provee un marco estandarizado de varios tipos de datos pueden ser cargados almacenando entidades espaciales (datos geográficos) definidas por un tipo de geometría (punto, línea, polígono) y una referencia geográfica (coordenadas X, Y).

Las Geodatabase generalmente incluye además atributos, relaciones y reglas de comportamiento de los elementos, es por eso que para efectos de llevar a cabo la Geodatabase, se procedió a plantear el esquema de base de datos espacial en Arc Catalog, realizar la automatización de datos y finalmente realizar el cargue de datos en GDB. (Ver Figuras 56, 57 y 58)

Figura 56. Geodatabase GOD

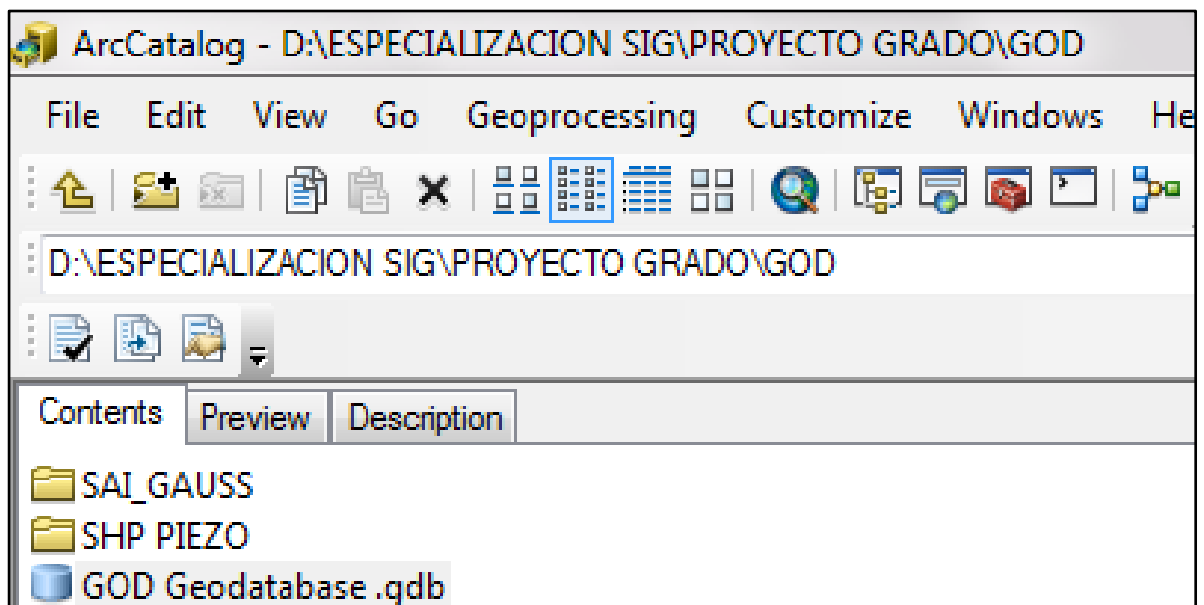


Figura 57. Datos cargados en la Geodatabase GOD

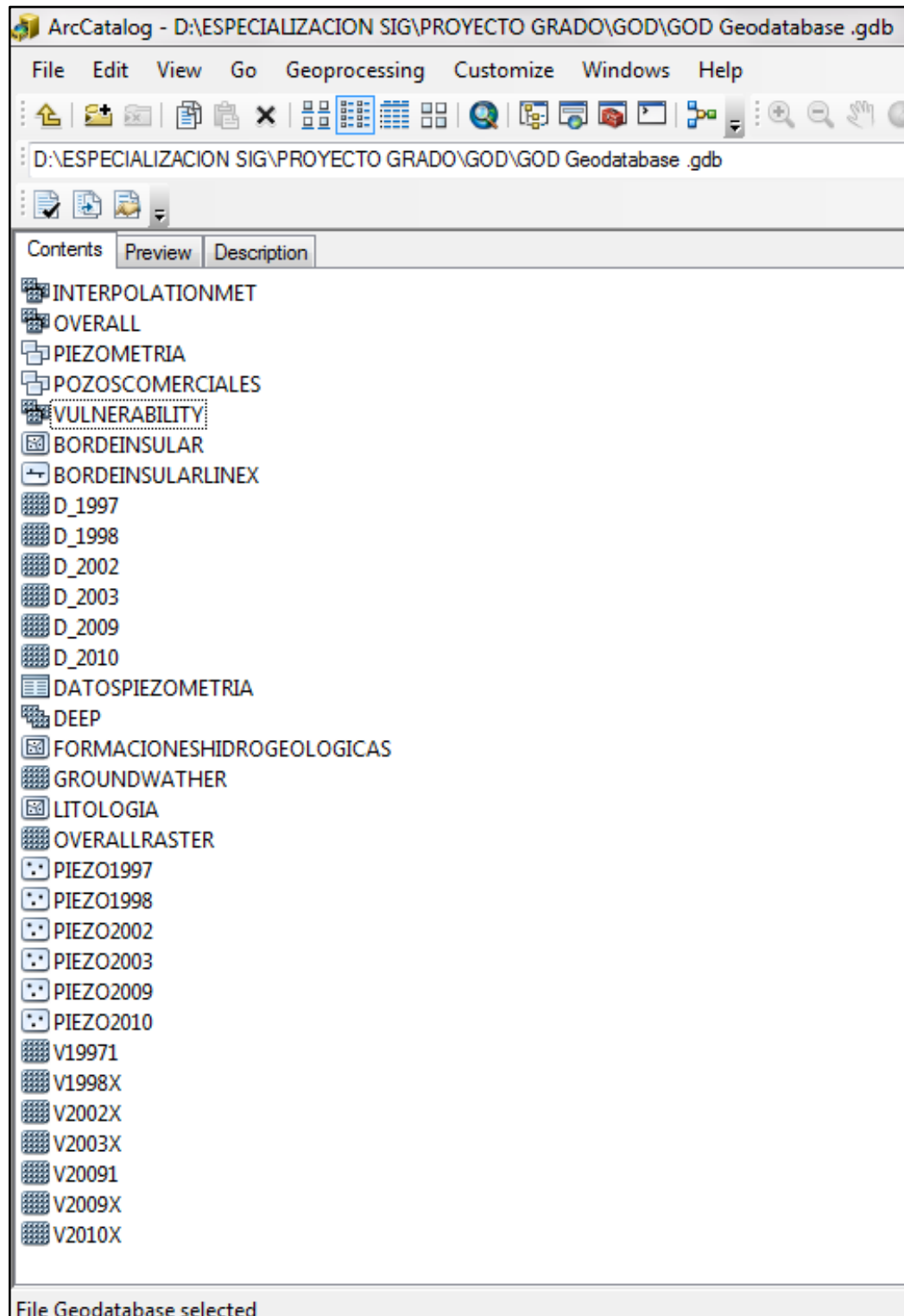
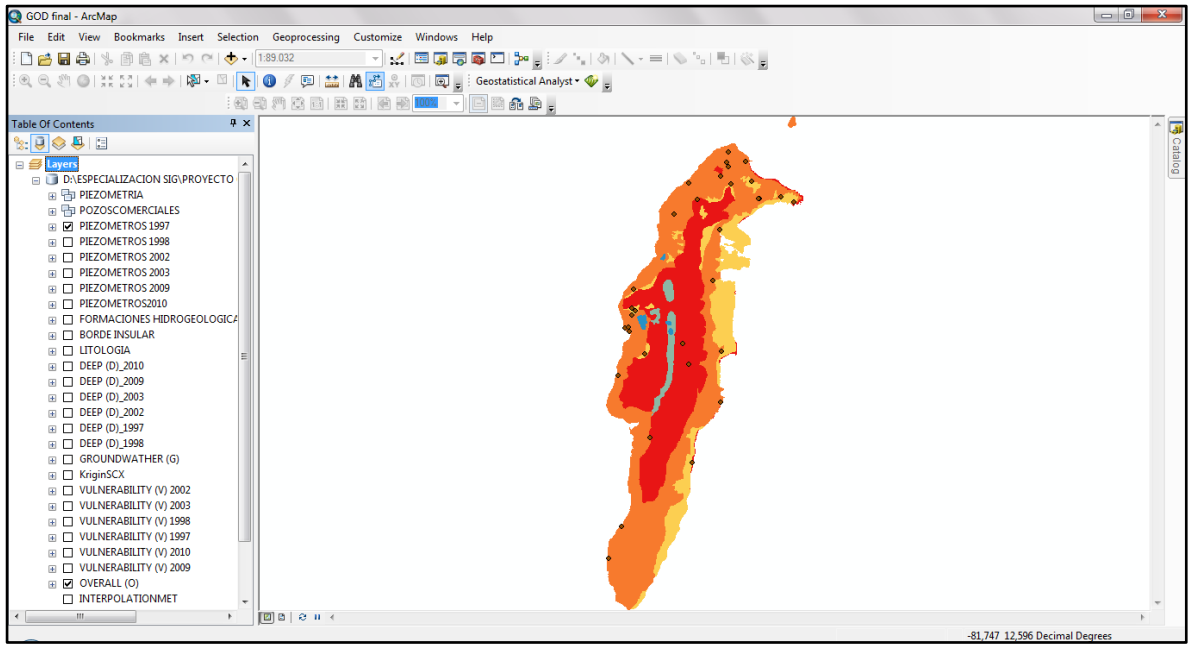


Figura 58. Visualización de la Geodatabase en ArcMap



CONCLUSIONES

- Las herramientas SIG como la utilizada para este trabajo, son de gran ayuda para la generación de información de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, ya que permite integrar, consultar, manipular y aplicar los datos de información geográfica, cartografía digital y bases de datos de información relacionada con los niveles freáticos, de manera eficaz.
- Es muy importante tener en cuenta que la información tomada de bases de datos de niveles freáticos históricas requiere un procesamiento estadístico básico para ser utilizado en procesos de interpolación con el fin de eliminar las lecturas erróneas y sesgos de la información.
- Las herramientas del SIG son de gran utilidad siempre y cuando exista un profesional idóneo que conozca las condiciones hidrogeológicas del territorio y haya realizado controles de campo que le permitan realizar la reclasificación de las variables de Overall, Deep y Ground Water de acuerdo a la metodología GOD.
- En cuanto a la interpolación de los niveles freáticos como medida de adquisición de superficies continuas de la tabla de agua, es necesario evaluar geoestadística y visualmente los diferentes procesos de interpolación, ya que la bibliografía geológica se restringe a recomendar el método de Kriging simple como el método más utilizado y adecuado para la disciplina; en este sentido cada proyecto debe evaluar la distribución y coherencia de la información modelada con la realidad. Para ello es necesario hacer uso de las herramientas facilitadas por el programa utilizado en cuanto a geoestadística, lo que permitió diferir entre las superficies generadas entre los métodos IDW, Kriging simple, y Kriging Ordinario, siendo este último, el modelo con mejor ajuste y llegando un poco más lejos aún, eliminar los trends evidenciados en la información para resultados más coherentes y aproximados a la realidad.
- La información compilada y generada en este procesos contribuye a la toma de decisiones concernientes a la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos, para identificar áreas más vulnerables a la contaminación, y por medio de este conocimiento re direccionar las investigaciones y redes de monitoreo más efectivas.
- Por otro lado los resultados obtenidos de manera espacial, permiten generar estrategias informativas localizadas en las áreas críticas, sobre la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea.
- De igual forma por medio de la implementación de las herramientas SIG, con metodologías de valoración contribuyen al incremento del conocimiento de los

procesos que tienen lugar en la zona no saturada de los acuíferos, lo que permitirá perfeccionar la modelación de los sistemas subterráneos.

- En cuanto a los resultados generados, se pudo observar en primera instancia que la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos está influenciada fuertemente por los procesos de variabilidad climática y a lo largo de periodos cortos de tiempo, posiblemente debido a la conformación geológica de la isla, que la hace más susceptible al ingreso directo de los contaminantes a la superficie freática.
- Este estudio evidencia la importancia de modelar las variables GOD con periodicidad anual, para determinar las variaciones interanuales de la vulnerabilidad a la contaminación y contribuir con ello a la toma de decisiones de vigilancia y control ambiental.
- Es necesario integrar los resultados obtenidos a un sistema gestor de datos que permita consultas a los tomadores de decisión para la aprobación de proyectos potencialmente contaminantes.
- En cuanto a estudios anteriores de vulnerabilidad a la contaminación, el presente estudio arroja mayores detalles de zonas particulares que no fueron precisadas en los anteriores y precisa la clasificación generalizada de vulnerabilidad extrema para la Formación San Luis y Moderada para la Formación San Andrés, ya que existen otro tipo de zonas con formaciones suprayacentes que particularmente le imprimen al modelo mayor información.

BIBLIOGRAFIA

ÁNGEL C., Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Hidrogeología de la isla de San Andrés”. INGEOMINAS. 1993.

CAÑAS H., y MARTÍNEZ C., Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Recuperación, Mantenimiento y Pruebas de Bombeo en el Campo de Pozos de la Isla de San Andrés”. INGEOMINAS. 1993.

COAGUILA D., et Al, Análisis Comparativo de Métodos de Interpolación Espacial, Utilizando Datos de Evapotranspiración. XVI Simposio Brasileiro de Sensoramiento Remoto –SBSR. Brazil, 2013.

CORALINA, Plan de Manejo de las Aguas Subterráneas (PMAS), Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. 2000.

CORALINA. Plan de Manejo de la Cuenca del Cove, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. 2005.

DIEZEMANN, Aprovechamiento del Depósito de Agua Subterránea Dulce en la Isla De San Andrés en Boletín Geológico, vol V. num 1,. Pag 87-109, 1957.

GUZMÁN G., y HERNÁNDEZ O. Cartografía Geológica de la Isla de San Andrés, INGEOMINAS. 1992

IGAC, Estudio Detallado de Suelos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 1998.

HUGUETT, A., Compilación Hidrogeológica De Las Islas De San Andrés Providencia Y Santa Catalina Colombia. INGEOMINAS1989.
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia. 2012. Bogotá D.C., Julio de 2012

INGEOMINAS, Estudio de Contaminación de Acuíferos en la Isla de San Andrés "Perforación y Construcción de la Red de Piezómetros del Sur de la Isla de San Andrés, Construcción de 12 piezómetros (PP-IV-1, PP-III-1, PP-II-1, PP-I-1, PP-III-6, PP-III-3, PP-III-4, PP-II-2, PP-II-3, PP-II-3.PP-0-1, PP-0-2). 1998.

INGEOMINAS, Caracterización y Modelación del Régimen de las Aguas Subterráneas. Evaluación del Riesgo de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Isla de San Andrés. 1997.

KOCURKO M., A Paleoenvironmental investigation of San Andrés Island, Colombia: A study carbonates Rocks. 1972

MENA, G. & MONTES, J., Evaluación de la Vulnerabilidad de las Aguas Subterráneas Aplicada al Antiguo Botadero de Desechos Sólidos de Mariona, Departamento de San Salvador. Universidad del Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil. Para optar al título de Ingeniero Civil, 2010.

PERFOPOZOS LTDA, Informe técnico Pozos No. 16, 17, 19, 21 y 22 Zonas Harmony Hall Hill, Zona Electrificadora y Zona Cove. 1985 – 1986.

PÉREZ, R y PACHECO J. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Artículo de Investigación. Pérez y Pacheco / Ingeniería 8-1 (2004) 33-42.
Proyecto INAP-Colombia”, CORALINA - Facultad de Minas Universidad Nacional, Informe Final “Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010.

ROSAS y DÍAZ, Identificación y Formulación Del Modelo Hidrogeológico Conceptual De La Isla De San Andrés. Tesis y otros Trabajos de Grado, Universidad Nacional de Colombia, 1997.

TORO, Diagnóstico del Riesgo y Grado de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Isla de San Andrés. Artículo de una publicación seriada (Revista). CORALINA. 2000.

VARGAS G., Geología de la Isla de San Andrés. Memoria Explicativa. BOGOTA INGEOMINAS. 1999.

VARGAS M., Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Estudio Hidroquímico de la Isla de San Andrés”. INGEOMINAS. 1993.

VÁSQUEZ E., Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Prospección Geoeléctrica en la Isla de San Andrés” INGEOMINAS. 1993.

VERGARA V., GUTIÉRREZ G., Flórez H., Evaluación de la Vulnerabilidad del Acuífero Morroa a Contaminación por Plaguicidas Aplicando la metodología DRASTIC. Artículo Científico. Ingeniería y Desarrollo Numero 26, Julio-diciembre, 2009. ISSN: 0122-3461. Universidad de Sucre, Sincelejo (Colombia)

VILLATORO, M. Et Al. Comparación de los Interpoladores IDW y Kriging en la Variación Espacial de Ph, Ca, CICE y P del Suelo. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.2008

Determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a través del método DRASTIC utilizando ArcGIS 9.3. Agua y SIG, Hidrología, Arcgis y Agua Subterránea. Febrero 2011. <http://www.aguaysig.com/2011/02/determinacion-de-la-vulnerabilidad-de.html>

GEOINFORMACION Sistema de información Geográfico, Sensores Remotos, Geofísica. Marín 0164 • Providencia. Santiago-Chile. <http://www.geoinfo.cl/pdf/ArcView8.pdf>