

UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“HERMANOS SAÍZ MONTES DE OCA”
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS



**ANÁLISIS DE LA CALIDAD AMBIENTAL DE UN SECTOR DEL
ACUÍFERO GUANE**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Geología
(Mención Geología Ambiental)**

Autor: Ing. Waldemar Alfredo Hidalgo Aldana

Tutores: Dr. C. Rebeca Hernández Díaz

Dr. Fulvio Celico

**Pinar del Río
2015**

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Los resultados que se exponen en la presente tesis se han alcanzado como consecuencia del trabajo realizado por el autor y asesorado y/o respaldado por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y la Universidad de Pinar del Río. Por tanto, los resultados en cuestión son propiedad del autor y de estas instituciones y solo ellas podrán hacer uso de los mismos de forma conjunta y recibir los beneficios que se deriven de su utilización.

RESUMEN

La investigación evaluó el comportamiento de lluvias, hidrodinámico, hidrogeoquímico y biomolecular de un sector del acuífero Guane, para evaluar su calidad ambiental a partir del estudio de las precipitaciones registradas en las estaciones pluviométricas, la medición de los niveles piezométricos, composición química y microbiana de las facies hidroquímicas. Los métodos empleados incluyeron la modificación de la red de monitoreo, corrección de las cotas absolutas en los puntos de observación utilizando una nivelación técnica con doble puesta del GPS modelo LEICA-SR20. Las mediciones piezométricas se realizaron en 21 pozos con frecuencia mensual con una sonda eléctrica de precisión $\pm 0,5$ cm, se determinó las concentraciones de aniones y cationes, alcalinidad total, CO₂, potencial Redox, conductividad eléctrica, temperatura, pH, dureza y sólidos totales disueltos. Para el estudio biomolecular se utilizó las membranas filtrantes. Desde el punto de vista hidrogeológico el acuífero posee cierto grado de salinización, presentando un comportamiento variable de la zona de mezcla. La calidad de las aguas está determinada por los procesos de mezcla agua dulce – agua de mar que modifican la composición química mediante diversos procesos geoquímicos, entre ellos los de reducción anaeróbica de sulfato e de intercambio iónico, los cuales están sujetos a los regímenes de lluvias, de alimentación del acuífero y de mareas. Se encontró grandes diferencias entre las comunidades bacterianas de las muestras de agua de mar, agua superficial y agua subterránea tanto en la dirección horizontal como en la vertical, asociado a la variación significativa de las facies hidroquímicas correspondientes.

Palabras clave: Acuífero costero, Nivel piezométrico; Hidrogeoquímica; Comunidad microbiana, calidad ambiental.

ABSTRACT

The investigation compiles the rain, hydrodynamic, hydrogeochemical and biomolecular behavior of a sector of Guane aquifer in order to assess its environmental quality starting from the study of precipitations recorded in pluvial stations, the measurement of piezometric levels, chemical and microbial composition of the hydrochemical facie. The methods used included the modification of the monitoring main, correction of the absolute height in the observation points applying a technical leveling with a double use of the LEICA-SR20 GPS. Piezometric measuring were done in 21 wells once a month with an electric sounding line with $\pm 0,5$ cm accuracy, it was determined the concentration of anions and cations as well as the total alkalinity, CO₂, potential redox, electric conductivity, temperature, pH, hardness and total solids dissolved. Filtering membranes were used for the biomolecular study. The costal aquifer of the peninsula, in terms of hydrogeology possesses a certain grade of salinization, presenting a variable behavior of the transitional zone. The water quality is determined by the processes of mixture freshwater – sea water, modifiers of the chemical composition through various geochemical processes, such as reduction anaerobic and ionic interchange, which are subject to the regimens of rains, recharge of the aquifer and of tides. Also it is found that there are great differences among the bacterial communities in seawater, superficial water and subterranean water samples in the horizontal as well as in the vertical direction, associated with the significant variation of their hydrochemistry.

Key words: Costal aquifer, Freshwater head; Hydrogeochemical; Microbial community, environmental quality.

Exergo

7 כָּל־הַנְּחָלִים הֹלְכִים אֶל־תַּיִם וְתַיִם אֵינָנּוּ מִלֵּא
אֶל־מָקוֹם שֶׁהַנְּחָלִים הֹלְכִים שָׁם הֵם שָׁבִים לָלֶכֶת:

Los ríos todos van al mar, y el mar no se llena; al lugar de donde los ríos vinieron, allí vuelven para correr de nuevo.

Eclesiastés 1:7

כִּי בְּרַב חֲכָמָה רַב־כָּעַס וְיוֹסֵף יוֹסֵף דָּעַת יוֹסֵף מִכָּאֻב:

Porque en la mucha sabiduría, hay molestia; y quien añade ciencia, añade dolor.

Eclesiastés 1:18

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I. Marco teórico referencial	7
I.1. Historia de los trabajos hidrogeológicos anteriores	7
I.2. Estado del arte	9
I.2.1. Origen de la salinidad en las aguas	9
I.2.2. Proceso de intrusión marina	13
I.2.3. Consideraciones para la explotación de acuíferos costeros afectados por la intrusión marina.....	17
I.2.4. Condiciones estructurales, el carso, y su relación con la intrusión marina.....	18
I.2.5. Métodos de estudio y toma de datos en acuíferos afectados por la intrusión marina.	20
I.2.6. Uso de los SIG como plataforma para el estudio de la intrusión marina.....	28
Capítulo II. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio.....	32
II.1. Características físico-geográficas	32
II.1.1. Ubicación geográfica	32
II.1.2. Relieve	32
II.1.3. Vegetación y fauna	33
II.1.4. Vías de acceso.....	34
II.1.5. Clima.....	34
II.1.6. Desarrollo socio-económico	35
II.1.7. Hidrografía e hidrogeología.....	36
II.2. Características geológicas	37
II.2.1. Estratigrafía.....	37
II.2.2. Geomorfología	45
II.2.3. Tectónica.....	46
Capítulo III. Metodología de la investigación	47
III.1. Organización de la red de monitoreo.....	47
III.1.1. Para el estudio hidrodinámico	48
III.1.2. Para el estudio hidrogeoquímico	49
III.1.3. Para el estudio biomolecular	49

III.2. Trabajos topográficos	50
III.3. Metodología para el estudio de lluvias	51
III.3.1. Consideraciones sobre los datos existentes	51
III.3.2. Estimación del período óptimo.....	51
III.3.3. Estudio del régimen de lluvias	52
III.4. Metodología para el estudio hidrodinámico	54
III.4.1. Realización de controles y toma de datos en el campo	54
III.4.2. Elaboración y tratamiento de los datos	55
III.5. Metodología para el estudio hidrogeoquímico	55
III.5.1. Realización de observaciones.....	55
III.5.2. Método de toma de muestras	58
III.5.3. Determinación de los parámetros físico-químicos fundamentales en agua del acuífero y en agua de lluvia.....	59
III.5.4. Verificación secundaria	60
III.5.5. Elaboración y procesamiento de datos	61
III.5.5.1. Análisis exploratorio de datos	62
III.5.5.2. Análisis multivariado.....	63
III.5.5.3. Análisis variográfico	65
III.5.5.4. Estimación	66
III.6. Metodología para el estudio biomolecular	66
Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados	67
IV.1. Régimen de precipitaciones en el sector	67
IV.1.1. Análisis univariado.....	67
IV.1.2. Variabilidad espacial de las precipitaciones.....	69
IV.1.3. Variabilidad de las precipitaciones en el tiempo.....	71
IV.2. Distribución de niveles piezométricos en el acuífero.....	76
IV.3. Variables hidroquímicas simples y complejas	78
IV.3.1. Análisis exploratorio	78
IV.3.2. Comportamiento de las relaciones iónicas	80
IV.3.2.1. Relación $rCl^-/rHCO_3^-$	80
IV.3.2.2. Relación rSO_4^{2-}/rCl^-	81

IV.3.2.3. Relación rMg^{2+}/rCa^{2+}	82
IV.3.2.4. Relación rBr^-/rCl^-	83
IV.3.2.5. Análisis de variografía	84
IV.3.3. Análisis multivariado	85
IV.4. Relación entre la comunidad microbiana y las facies hidrogeoquímicas.....	88
IV.5 Clasificación y zonación de las aguas subterráneas	89
IV.5.1. Clasificación de las aguas	89
IV.5.2. Zonación espacial	91
IV.5.3. Zonación en profundidad	95
IV.6. Evaluación de la calidad ambiental del acuífero	97
IV.6.1. Disolución-precipitación de carbonatos	97
IV.6.2. Reducción de sulfatos en los pozos 33 y 18.....	98
IV.6.3. Comportamiento del pH, Eh y Oxígeno disuelto “In Situ”	99
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	105

INDICE DE FIGURAS

Figura II.1. Mapa esquemático de ubicación geográfica del sector de estudio	32
Figura II.2. Modelo de sombras representando la topografía del sector de estudio a escala 1:25000	33
Figura II.3. Mapa geológico del sector del estudio a escala 1:25 000 (modificado por el autor).....	39
Figura III.1. Mapa de datos reales, sector este del acuífero Guane escala 1:25 000	47
Figura III.2. El GPS modelo LEICA-SR20.....	50
Figura III.3. a) Sonda eléctrica portátil b) Medición “In situ” de la profundidad hasta el NE del pozo (Cortesía de la tutora)	54
Figura III.4 Sonda DL/N70 (Multiparamétrica: mide conductividad eléctrica (CE), Temperatura y Presión de agua	57
Figura III.5. Muestras de agua tomadas para los análisis químicos e isotópicos	58
Figura III.6. Proceso de filtración de las muestras destinadas al análisis de cationes	59
Figura III.7. a) Conductímetro b) Medidor redox y pHmetro	60
Figura IV.1. Prueba de normalidad Anderson Darling para las precipitaciones medias anuales en (mm), serie 1968-2013.....	68
Figura IV.3. Mapa de isoyetas del sector este del acuífero Guane, periodo seco 2011	70
Figura IV.4. Mapa de isoyetas del sector este del acuífero Guane, periodo húmedo 2011	70
Figura IV.5. Tendencia de las precipitaciones medias en las estaciones pluviométricas Isabel Rubio y Las Catalinas	72
Figura IV.6. Tendencia de las precipitaciones medias en las estaciones pluviométricas Laguna Grande y Pasada de Marín, 1962-2013	73
Figura IV.7. Tendencia de las precipitaciones medias en las estaciones pluviométricas La Bajada y Cabo de San Antonio	73
Figura IV.8. Representación gráfica de la anomalía del pluviómetro de la Estación Meteorológica Isabel Rubio 1968-2013	74
Figura IV.9. Representación gráfica de las anomalías en los pluviómetros (a) Estación Hidrológica Laguna Grande 1971-2013 y (b) Pasada de Marín, 1963-2013	75

Figura IV.10. Representación gráfica de la anomalía en el pluviómetro de la Estación Meteorológica la Bajada 1976-2013.....	76
Figura IV.11. Mapa de los niveles piezométricos medios a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, año hidrológico 2011-2012 (periodo seco).....	77
Figura IV.12. Comportamiento lognormal relación cloruro-bicarbonato	78
Figura IV.13. Ajuste a la función de densidad empírica de la relación cloruro-bicarbonato	79
Figura IV.14. Prueba de normalidad para SST. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	79
Figura IV.15. Mapa de la relación cloruro-bicarbonato a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	81
Figura IV.16. Mapa de la relación sulfato-cloruro a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	82
Figura IV.17. Mapa de la relación magnesio-calcio a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	83
Figura IV.18. Mapa de la relación bromuro-cloruro a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	84
Figura IV.19. Representación gráfica de los factores salinización, litología y sulfatos.....	86
Figura IV.20. Mapa del factor salinidad a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	87
Figura IV.21. Mapa del factor litología, a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	88
Figura IV.22. Diagrama de Stiff. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011	91
Figura IV.23. Mapa de δD ‰ (vs. V-SMOW) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011	92
Figura IV.24. Mapa de $\delta^{18}O$ ‰ (vs. V-SMOW) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011	93
Figura IV.25. Mapa de conductividad eléctrica) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	93

Figura IV.26. Mapas sales solubles totales (SST) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	94
Figura IV.27. Mapa de cloruros” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011	95
Figura IV.28. Relación litología, facies hidroquímica, temperatura y CE con la profundidad en el pozo 18. (Cortesía de la tutora)	96
Figura IV.29 Conductos y cavernas como resultado de procesos de disolución química. Fotos tomadas en las cercanías de: a. La Bajada b. P-18P, c. P-33P (Cortesía de la tutora)	97
Figura IV.30. Mapa de pH “In situ” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011	99
Figura IV.31. Mapas de Eh “In situ” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011	100
Figura IV.32. Mapa de oxígeno disuelto “In situ” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011	101

INDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Relaciones iónicas de uso frecuente en el estudio de la intrusión marina, (Hernández, 2001, modificado por el autor).....	26
Tabla III.1 Error permisible en análisis químicos	61
Tabla IV.1. Resultados del análisis exploratorio a las series temporales de precipitaciones en las estaciones pluviométricas del sector, 1949-2013.....	67
Tabla IV.2. Resultados del análisis de factores	85
Tabla IV.3. Clasificación de los tipos de aguas por muestras de pozos en el sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011.....	90

ANEXOS TEXTUALES

Anexo textual 1. Puntos de observaciones de la red de investigación del INRH.....	112
Anexo textual 2. Puntos de observaciones de la Red Cal utilizados en la investigación ...	112
Anexo textual 3. Puntos de observaciones de la red de monitoreo de niveles piezométricos.....	113
Anexo textual 4. Los puntos de observaciones de la red de monitoreo de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos	114
Anexo textual 5. Puntos de observaciones de la red de monitoreo de aguas superficiales	116
Anexo textual 6. Los puntos de mediciones de parámetros hidroquímicos “In situ”.....	116
Anexo textual 7. Denominación de los ensayos y métodos empleados para los análisis de laboratorio químico.....	117
Anexo textual 8. Mediciones de niveles piezométricos (m) en pozos de la red de investigación del INRH	118
Anexo textual 9. Mediciones “In situ” de parámetros hidroquímicos en pozos de investigación del INRH	119
Anexo textual 10. Resultados de los análisis químicos de componentes mayoritarios en pozos de la red de investigación del INRH.....	120
Anexo textual 11. Relaciones iónicas y SST de componentes mayoritarios en pozos de la red de investigación del INRH.....	121
Anexo textual 12. Balance iónico de los componentes mayoritarios en pozos la red de investigación del INRH	122
Anexo textual 13. Resultados de los análisis químicos de componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal del INRH.....	123
Anexo textual 14. Balance iónico de los componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal del INRH	124
Anexo textual 15. Relaciones iónicas y SST de componentes mayoritarios en la Red Cal del INRH	125
Anexo textual 16. Registro histórico de análisis químicos en pozos de la Red Cal del INRH (1a). Pozo RG-12, Comunidad Rural Limones	126

Anexo textual 17. Balance iónico de los componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal del INRH (1b). Pozo RG-12, Comunidad Rural Limones	127
Anexo textual 18. Fragmentos del registro histórico de componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal. Abasto poblado de la Fe (RGB-144A)	128
Anexo textual 19. Fragmentos del registro histórico de componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal. Pozo RGD-1 ^a	129
Anexo textual 20. Componentes minoritarios en los pozos de la red de investigación	130
Anexo textual 21. Resultados de los análisis isotópicos	131
Anexo textual 22a. Análisis químico de agua de lluvia	132
Anexo textual 22b. Muestras de análisis químicos de aguas superficiales	132
Anexo textual 23. Clasificación de las aguas según Shukarev. Red de investigación del INRH	133
Anexo textual 24. Clasificación de las aguas según Shukarev. Red Cal.....	134
Anexo textual 25. Ubicación de las estaciones pluviométricas en el sector de investigación.....	135
Anexo textual 26. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 477	136
Anexo textual 27. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 3	137
Anexo textual 28. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 367	138
Anexo textual 29. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 390	139
Anexo textual 30. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 396	140
Anexo textual 31. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 401	140
Anexo textual 32. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 438	141
Anexo textual 33. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 394	142
Anexo textual 34 Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 390	143

ANEXOS GRÁFICOS

Anexo gráfico 1. Prueba de normalidad Anderson-Darling para la relación Magnesio-Calcio.....	144
Anexo gráfico 3. Análisis de clúster de los perfiles DGGE hecho a través del software FPQuest. (Cortesía de Celico, F)	146
Anexo gráfico 4. Mapa de isoyetas del sector de estudio, año hidrológico 2012	147
Anexo gráfico 6. Anomalía del pluviómetro de Las Catalinas.....	149
Anexo gráfico 7. Variogramas experimentales de los factores y de las relaciones iónicas	150

INTRODUCCIÓN

El agua es la fuente primordial de vida para la mayoría de los seres vivos que habitan el planeta y progresivamente se ha convertido en una sustancia natural considerada como escasa en algunas regiones del mismo, no solamente en las zonas áridas o semiáridas, sino también en países industrializados con gran densidad de población. En esas zonas el balance hidráulico y el aprovechamiento de toda la disponibilidad de agua tanto superficial como subterránea se ha hecho indispensable.

La irresponsabilidad de la humanidad y las superpoblaciones puntuales, son las principales causas que han provocado la contaminación o sobreexplotación de las fuentes de abasto. Esto ha conducido a la comunidad científica internacional a un estado de alerta en cuanto a la forma rigurosa de la conservación y explotación adecuada del recurso agua, constituyendo una premisa fundamental para la existencia humana, aún más, si se tiene en cuenta que al igual que muchos otros recursos, sus reservas no son infinitas, pudiendo agotarse al no renovarse en la misma cuantía en que se explotan. (Díaz, 2010).

En zonas costeras es frecuente que se desarrolle una intensa actividad económica y por ende existan grandes despliegues urbanos, conllevando a la elevación constante de la demanda de agua. Esto ha estimulado la sobreexplotación de los acuíferos costeros, que por su ubicación son propicios a que manifiesten presencia de contaminación de sus aguas por salinidad, y como su causa fundamental la aparición de la intrusión marina.

El fenómeno de la intrusión marina es frecuente en los acuíferos costeros de la mayoría de las islas, por lo que Cuba no está exenta del mismo. Este es un proceso que afecta la calidad del agua y es de carácter prácticamente irreversible. Se traduce en un avance de la zona de mezcla agua dulce-agua de mar y de la cuña salina tierra adentro, con la progresiva salinización del agua subterránea. (González, 2003).

La península de Guanahacabibes, es una de las zonas de mayor importancia ecológica, tanto de Cuba como de América Latina. Esta riqueza faunística y florística es posible gracias a la existencia de distintos ecosistemas, que es a su vez consecuencia de un complejo equilibrio de distintos factores, entre los que tiene primordial importancia el agua (Hernández, 2001).

El acuífero cársico costero de la península, desde el punto de vista hidrogeológico posee cierto grado de salinización, presentando un comportamiento variable de la zona de mezcla, cuyo análisis es necesario para influir de forma racional en la conservación de estas aguas. El planteamiento de este problema no puede ser analizado sin esbozar algunas características de la evolución histórico-geológica del territorio en que se enmarca la región, como un factor significativo de la situación planteada.

Existen diferentes métodos para la exploración de un acuífero que permiten obtener las variables necesarias para determinar sus características hidrodinámicas, hidrogeológicas, hidrogeoquímicas y microbiológicas. Entre los más utilizados se reportan los métodos geofísicos, hidroquímicos, los de modelación digital, y la interpretación y mapeo de estructuras geológicas, los cuales constituyen herramientas para determinar los mecanismos de evolución y penetración del agua de mar tierra adentro.

Después de ser conocidas con suficiente precisión las características geológicas e hidrogeológicas de un determinado acuífero, cualquier enfoque de estudio de la intrusión marina debe basarse en el conocimiento previo de las características físico-químicas del agua presente en el mismo. Según Castillo y Morell (1988) en: González (2003) estos estudios hidroquímicos son de dos tipos: uno de Estudios de Control y Seguimiento, que son aquellos que tratan de poner de manifiesto el fenómeno sobre la base de una red de vigilancia, y el segundo Estudios Específicos, que son aquellos en los que se pretende estudiar un problema concreto, profundizando en los aspectos físico-químicos de la intrusión marina.

En este caso el alcance de la investigación se limitó al **Estudio de Control y Seguimiento**, donde se pretende caracterizar el comportamiento de la intrusión marina en el sector de un acuífero conocido, así como la calidad ambiental del acuífero en explotación, para el consumo humano y el riego agrícola. De forma general en Cuba la presencia de la intrusión marina es una problemática que se manifiesta en varios de los acuíferos costeros en explotación. En el análisis de las publicaciones nacionales citadas se evidencian enfoques similares en cuanto al modo de estudio, o sea a partir del empleo de métodos geofísicos, hidrogeoquímicos y geomorfológicos, demostrando que estos son los métodos más viables para este tipo de estudios.

En cuanto a la literatura internacional, existe una amplia relación de autores, donde según González (2003), constituyen trabajos pioneros sobre la geoquímica de los acuíferos cársicos litorales, los realizados en la Florida por Back y Hanshaw (1980; 1983), así como los de Herman (1982); Herman et al. (1986); y Plumier (1977). Estudios más recientes realizados en España señalan a Calvache (1997) y Rangel et al. (2003). Por su parte en Costa Rica se destacan los trabajos de Arias et al. (2003), que aplica la prospección geofísica como un complemento de los métodos hidrogeoquímicos.

El **problema científico** que resuelve esta investigación es el desconocimiento de la calidad ambiental del sector este del acuífero Guane, en la Península de Guanahacabibes, el cual impide realizar una gestión eficiente del recurso agua, para la planificación socioeconómica actual y futura de la región.

El **objeto de la investigación** es la calidad ambiental del sector este del acuífero Neógeno-Cuaternario Guane, en la Península de Guanahacabibes.

El **objetivo general** de la investigación es evaluar la calidad ambiental del sector este del acuífero Neógeno-Cuaternario Guane, en la Península de Guanahacabibes.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, los **objetivos específicos** de este trabajo se enmarcan en:

1. Analizar el régimen de lluvias del sector a partir del procesamiento de las series temporales y anomalías de las precipitaciones registradas en el sector de estudio, para determinar la tendencia y sus implicaciones en la recarga del acuífero.
2. Interpretar los procesos hidroquímicos que determinan la calidad ambiental del acuífero a través del estudio de los niveles piezométricos, las relaciones iónicas, índices hidrogeoquímicos, así como su distribución espacial, en relación con las características geológicas del sector de investigación.
3. Obtener la zonación de las aguas subterráneas a partir del análisis de sus componentes mayoritarios y minoritarios, en la dirección horizontal y vertical del acuífero.
4. Determinar la relación entre la distribución de la comunidad microbiana con las facies hidroquímicas de aguas subterráneas, mediante su estudio estadístico, la cual complementa la información sobre la calidad ambiental del acuífero.

La **hipótesis general** de la investigación se formuló como sigue:

La aplicación de diferentes métodos de estudio que permitan determinar las características del régimen de lluvia, hidrodinámica, hidroquímica y microbiología en el este sector del acuífero Neógeno–Cuaternario Guane, en la Península de Guanahacabibes, posibilitará evaluar su calidad ambiental.

Para darle cumplimiento a estos objetivos se llevaron a cabo las siguientes **tareas generales**, dentro de las cuales se ejecutaron **tareas específicas** en función del objetivo a alcanzar.

- Estudio bibliográfico y recopilación de datos sobre los aspectos geológicos, tectónicos, hidrogeológicos e hidroquímicos relacionados con la zona de estudio.
 - Consulta del mapa geológico regional digital de Cuba a escala 1: 100 000, (2005).
 - Consulta del mapa geológico regional de Cuba a escala 1: 250 000, (1985).
 - Recopilación y selección de fotos aéreas.
 - Consulta de los resultados del comportamiento hidroquímico de las aguas en los pozos pertenecientes a la Red Nacional de Calidad del Agua (Red Cal), próximos a la zona de estudio.
- Amplia recopilación y análisis sobre las propiedades hidroquímicas de los acuíferos en condiciones de mezcla con las aguas de mar y sus métodos de estudio.
 - Consulta bibliográfica de estudios relacionados con la intrusión marina.
- Diseño de la red de muestreo, determinación de los niveles estáticos, y la toma de muestras.
 - Muestreo batométrico de aguas en las calas y ensayos químicos a las mismas.
- Selección de los indicadores hidroquímicos a considerar para la determinación de las características hidroquímicas del acuífero, y la presencia de la intrusión marina.
- Recopilación de datos de lluvia de pluviómetros que caractericen la zona de estudio y consulta al mapa isoyético de Cuba.
- Procesamiento de los datos mediante programas de computación y confección de mapas temáticos de las diferentes variables que permitan revelar el comportamiento hidroquímico de las aguas y la zona contaminada por penetración marina.
 - Digitalización y procesamiento de toda la información.

- Creación de bases de datos (BD) en Excel.
- Procesamiento espacial y geoestadístico de los datos basado en el empleo de los Sistemas de Información Geográficos (SIG), en este caso el ArcGis 10.2.
- Creación de mapas temáticos que ilustran los resultados obtenidos a partir de la interpretación de las variables.

De forma general los **resultados finales esperados** son los siguientes:

- Esclarecimiento de la hidrodinámica del acuífero en este sector a partir del comportamiento del nivel estático, posibles zonas de recarga, acumulación y descarga, tipo de acuífero y su composición geológica.
- Se establece la relación entre las condiciones geólogo-estructurales y la alimentación del acuífero.
- Quedan determinadas las características de calidad del agua desde el punto de vista hidroquímico, microbiológico y la zona de influencia de la intrusión marina.
- Se emite criterio respecto a la posibilidad de uso del sector estudiado para la ubicación de nuevas fuentes de abasto.
- Se implanta una base de monitoreo que permite evaluar en el tiempo el comportamiento de la intrusión marina apoyada en el uso de los SIG.

La estructura del trabajo de diploma cuenta con cuatro capítulos conformados de la siguiente manera: Capítulo I. Marco teórico referencial, donde se dan a conocer temas relacionados con la intrusión marina en los acuíferos cársicos costeros tales como: estudio hidrodinámico, procesos de mezcla, relaciones iónicas, características de las aguas carbonatadas, química isotópica, estudio biomolecular (microbiológico), entre otros. Capítulo II. Características físico-geográficas, y geológicas del área de estudio, aquí se describen las particularidades de la región como ubicación geográfica, relieve, clima, hidrografía e hidrogeología, estratigrafía, geomorfología, tectónica, etc. Capítulo III. Metodología de los trabajos realizados. Esta etapa tuvo como meta, relacionar el desarrollo lógico, de forma secuencial de la investigación y que condujeron al logro de los resultados esperados, teniendo en cuenta la correspondencia entre el problema planteado, la información existente y las herramientas disponibles para la solución de las tareas propuestas en la investigación. Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados, en él se

exponen los principales resultados alcanzados en la investigación y del cual se derivan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en el área.

Los **resultados** de este estudio aportaron un conocimiento teórico al estado del arte y en la práctica, información sobre la posición de la cuña de intrusión marina y el comportamiento hidrodinámico del acuífero Neógeno – Cuaternario Guane, en el sector situado al este de la Península de Guanahacabibes. Tienen un valor práctico y ambiental, al contener una información preliminar que permite la toma de decisiones relacionadas con el adecuado manejo de un acuífero costero, en un sector altamente vulnerable.

Capítulo I. Marco teórico referencial

I.1. Historia de los trabajos hidrogeológicos anteriores

La Península de Guanahacabibes, ha sido desde el punto de vista geológico e hidrogeológico el territorio menos estudiado en la provincia de Pinar del Río. El primer trabajo que contempló la península en este sentido fue “División Hidrogeológica de la Región Guane–Mantua” realizado por Olkowski et al. (1967), en él se consideró a Guanahacabibes como una zona hidrogeológica y se menciona someramente sus condiciones geólogo – hidrogeológicas (Díaz, 2001).

En Abril de 1970 fue llevada a cabo una expedición geólogo – hidrogeológica compuesta por un grupo de investigadores encabezados por León, Álvarez y el hidrogeólogo búlgaro Tzankov, los resultados de ésta se encuentran recogidos fundamentalmente en dos informes (Septiembre y Diciembre del propio año) confeccionados por Tzankov, en los cuales se brindan apreciaciones preliminares de las condiciones geólogo–hidrogeológicas y señalan como recomendación, proceder a investigaciones detalladas (Díaz, 2001). Posteriormente, en 1980 Vengrazhanovich ejecutó algunos trabajos hidrogeológicos que abarcaron toda la Península de Guanahacabibes con el fin de conocer las posibilidades de obtención de agua potable (Camacho, 2002).

Las primeras investigaciones hidrodinámicas del acuífero Guane se remontan a los años 1985 como resultado del convenio de trabajo establecido por el gobierno de Cuba y la otrora Unión Soviética, la contraparte cubana estuvo representada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y la Empresa Geólogo-Minera de Occidente, estos estudios de carácter regional establecieron los principales parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos del acuífero que fue declarado como interés nacional por la reserva calculada de 30 000 000 hm³, una calidad tolerable y un residuo seco de 0,25-0,7 g/L (Hernández, 2001).

Es reconocido por todos, que los mayores impactos se refieren a la sobreexplotación del acuífero y a la contaminación del mismo. Como ejemplo citamos el informe de Takov (1985), que señala como zona crítica de explotación toda la franja costera y el trabajo de Hernández y Echevarría (1996), referente a la salinización por intrusión del acuífero y a la

evolución natural y explotación del mismo por el incremento de la actividad agrícola en la región.

Ghyben (1889) y Herzberg (1901) fueron los primeros que establecieron una fórmula para estimar la profundidad de la interface salina. Para ello consideraban al agua dulce y salada como dos fluidos de diferente densidad separados por una interface neta. Para su cálculo se consideran las siguientes simplificaciones: Existencia de un equilibrio hidrostático entre los fluidos, la superficie de separación entre el agua dulce-salada es plana, no existen gradientes verticales de carga y por último no existen pérdidas de carga del agua de mar en su avance tierra adentro.

Las variaciones críticas del flujo ponen de manifiesto el desacuerdo existente entre las leyes de flujo clásicas y la naturaleza de un medio tan original como el cársico (Mangin, 1975). Para el cálculo de estos parámetros se partió en primer lugar de un estudio del papel de la litología y de la evolución geomorfológica en el control de la carsificación subterránea; además, se consideraron los mecanismos de flujo y, por consiguiente, la teoría de infiltración.

De acuerdo con lo expresado por Guerra (1986), López y Chicano (1992), estas técnicas tienen una amplia gama de posibilidades a la hora de definir direcciones preferenciales de flujo, para lo cual se elaboró una matriz booleana en la que se tuvo en cuenta la edad y las formaciones geológicas (Hernández y Guerra, 1997); (Hernández y Quintín, 1998).

En toda la península de Guanahacabibes, el agua dulce se encuentra en forma de lentes de geometría variable en tiempo y espacio, en dependencia de las propiedades hidráulicas del acuífero, flotando sobre el agua de mar, la cual se localiza a una profundidad relativamente baja. Aunque existe bastante homogeneidad en la hidrogeología de la península de Guanahacabibes, algunos autores la dividieron en dos zonas: La Zona Oeste, que abarca desde el Cabo San Antonio hasta El Vallecito y la Zona Este, que comprende la parte más oriental del área de estudio, la misma se enmarca desde El Vallecito hasta Cortés (Hernández, 2001).

Blanco y Pereira (2011) plantean que la oscilación hiperanual del nivel piezométrico no es significativa entre el período húmedo y la época de sequía, este varía entre 0.3m - 0.7 m, respectivamente. La profundidad máxima de afloramiento del agua puede ser de hasta 9m en la Zona Este (Hernández, 2001). La conductividad hidráulica es muy variable,

pudiéndose alcanzar valores mayores de 400 m/d, lo cual está en correspondencia con el alto grado de carsificación y heterogeneidad que tiene la roca acuífera.

Arachchi (2012) determinó que la calidad de las aguas subterráneas del acuífero está afectada por la intrusión marina, a partir del estudio hidrogeoquímico definió que la mayor parte del agua está ubicada en la zona de dispersión o de mezcla del acuífero cársico desarrollado en ese sitio. La calidad de las aguas está determinada por los procesos de mezcla agua dulce-agua de mar (modificadores de la composición química mediante diversos procesos geoquímicos, entre ellos los de reducción anaeróbica de sulfato e intercambio iónico). Según este autor la dirección preferencial del flujo predominante de las aguas subterráneas, responde a: 190° (NE-SW), de 210°- 260° (NE-SW) y 130° (NW-SE), esto permitió determinar la vía fundamental de salinización del acuífero. Así mismo encontraron grandes diferencias entre las comunidades bacterianas de las muestras de agua de mar, agua superficial y agua subterránea, tanto en la dirección horizontal como en la vertical, debida a la presencia de la variación significativa de la hidrogeoquímica en las aguas subterráneas en el área de estudio. Las fluctuaciones en los valores de niveles piezométricos están relacionadas con la lluvia y posiblemente con las mareas o sencillamente con la evapotranspiración por plantas freatófitas al acuífero.

I.2. Estado del arte

Se analizan los antecedentes existentes en la literatura internacional y nacional, relacionados con los estudios de salinidad de las aguas y específicamente del fenómeno de intrusión marina, valorando lo planteado por diversos autores en las investigaciones referidas al fenómeno.

I.2.1. Origen de la salinidad en las aguas

Las aguas naturales según Stumm y Morgan (1981) en: González (2003) conforman un sistema de cierta complejidad, no homogéneo, que puede estar constituido por una fase acuosa, una gaseosa y una o más fases sólidas. La misma adquiere su composición química mediante un proceso complejo, donde intervienen factores de tipo químico-físicos, geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos, antrópicos, microbiológicos y otros, (Fagundo, 1990 en: González, 2003).

Los cambios en la composición química del agua subterránea están caracterizados por dos procesos químicos principales: disolución y precipitación de minerales. Ambos procesos son importantes en la meteorización química, (González, 2003). Las sales más importantes y abundantes, presentes en los materiales acuíferos, afectadas por estos dos procesos son: el carbonato de calcio, presente en la calcita; el carbonato de calcio y magnesio, presente en la dolomita; el carbonato de magnesio, presente en la magnesita; el cloruro de sodio, presente en el mineral halita, el sulfato de calcio anhidro, presente en la anhidrita y el sulfato de calcio dihidratado, presente en el yeso. De esto se obtiene que los iones predominantes en las aguas naturales sean: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . (González, 2003).

La alteración de algunos de estos elementos puede influir en los procesos de salinización de las aguas, así por ejemplo es común en los estudios hidrogeológicos de los acuíferos costeros seguir de cerca el comportamiento de las concentraciones de cloruro de sodio, o sus iones por separado, dado que son indicadores de la posible presencia de contaminación por penetración de agua de mar. Esto se revierte en elevadas concentraciones de sales solubles totales (SST), que es proporcional a su vez con la conductividad eléctrica (CE) del agua.

Según Hernández (2001), algunos autores entre los que destacan Lloyd y Heathcote (1985); McArthur et al. (1989); y Appelo y Postma (1993), establecen principalmente cuatro procesos de salinización diferentes a la intrusión marina. Las diferencias que existen entre ellos son en ocasiones muy sutiles, de tal modo que la división establecida obedece más a la intención de ordenar conceptos que a un mero orden genético (Hernández, 2001). Así mismo, no siempre es fácil delimitar el campo de actuación de cada uno, habitualmente todos participan en mayor o menor grado. Estos procesos son: mezcla con aguas saladas de diferentes orígenes, disolución de sales por contacto agua-roca, condiciones hidroquímicas específicas, y salinización en condiciones áridas. A continuación, se describen cada uno de ellos:

- **Mezcla con aguas saladas de diferentes orígenes**

Salmueras: tienen su origen en la evaporación directa del agua de mar. La evaporación elimina moléculas de agua y concentra los solutos en solución. Las sales precipitan según una secuencia, comenzando con las menos solubles (carbonatos) y finalizando con las más

solubles (sales de magnesio). La concentración de sulfatos en el agua de mar es superior a la de calcio, y por ello la precipitación de yeso elimina todo el calcio de la solución.

Aguas connatas o de formación: estas son las que existen en los acuíferos desde que los materiales que lo forman se depositaron. La existencia de este tipo de agua es poco común, a excepción de las que se puede encontrar en sedimentos muy recientes. Se entiende que las aguas connatas de las rocas sedimentarias proceden generalmente de las aguas de mar atrapadas con los sedimentos durante la etapa de su depósito y que han visto alterada su composición por diferentes procesos (mezcla con aguas meteóricas, reacciones con minerales y materia orgánica).

Aguas fósiles: de génesis muy parecida a las aguas connatas con pequeñas diferencias. En una cuenca marina sometida a la evaporación tienen lugar diferentes etapas evolutivas. El agua de mar abierto es un prototipo de agua clorurada y sus facies químicas resultan bastante bien definidas y constantes, comenzando a modificarse cuando se pasa de las condiciones de mar abierto a condiciones más restringidas. Entre el agua de mar abierto y el agua fósil, existe una gama de tipos de aguas que se refleja en su composición estequiométrica, edad y características de los yacimientos de los que proviene.

- **Disolución de sales por contacto agua-roca**

La salinidad del agua subterránea se incrementa con el flujo y tiempo de residencia y depende de la permeabilidad del acuífero, (Lloyd y Heatchcote, 1985 en: Hernández, 2001). La velocidad de disolución es en general mayor si aumenta la temperatura y el grado de división y superficie de contacto agua-roca. Las rocas permeables por porosidad, ceden más sales que las permeables por fisuración. Con el aumento del tiempo de contacto del agua con la roca, se incrementa la capacidad de disolución del agua hasta alcanzarse los respectivos productos de solubilidad.

- **Condiciones hidroquímicas**

Desde el punto de vista hidrogeoquímico la intrusión marina implica dos procesos fundamentales: mezcla agua dulce-agua de mar, que se traduce en un incremento de la salinidad de las aguas, y fenómenos modificadores de la calidad del agua subterránea y procesos diagenéticos, derivados de la interacción mezcla-roca, dentro de los que se

incluyen: la precipitación y disolución de carbonatos, el intercambio iónico y la reducción de sulfatos, los que hacen más compleja la hidrogeoquímica del sistema. (González, 2003).

- **Salinización en condiciones áridas**

En zonas áridas y semiáridas, las aguas de las recargas pueden ser notablemente salinas. También se pueden encontrar aguas salinas antiguas, en general de origen marino, pero prácticamente estacionarias en el tiempo o con un proceso muy lento de expulsión. En ocasiones pueden existir sales solubles en el terreno, capaces de producir aguas muy salinas, incluso más que el agua de mar, (Custodio, 1976).

Como se puede apreciar es frecuente que exista confusión entre la determinación del origen de la salinidad de un acuífero, debido a que concurren varios procesos que pueden causar este fenómeno. Hernández (2001) y González (2003) exponen claramente como los procesos que causan la salinización de las aguas traen como resultado que de las interacciones químicas y bioquímicas que tienen lugar entre el agua y los materiales a través de los cuales fluye, el agua adquiere una salinidad proporcional a su “experiencia” de flujo (tiempo de residencia), y que esta salinidad puede ser adquirida dentro del terreno, introducida durante la deposición de la matriz del acuífero, o debido al movimiento del agua a través del mismo. Esto puede variar en dependencia de las condiciones naturales del acuífero, ya sea su ubicación, características de la matriz rocosa, su porosidad, fisuración, composición química de las aguas y la roca, así como por las características hidrodinámicas propias de cada acuífero.

Este problema se agudiza en los casos en que las aguas salinas estén en contacto hidráulico con las aguas dulces, donde se genera un proceso de difusión en sus propiedades químicas (Lloyd y Heatchcote, 1985 en: Hernández, 2001). En estos casos la salinidad del agua se incrementa fundamentalmente por la presencia del agua de mar, aunque pueden intervenir el resto de los procesos de forma simultánea. Esto es común en los acuíferos costeros donde existe la presencia del fenómeno de la intrusión marina, que, en ocasiones debido a la acción antrópica, fundamentalmente la sobreexplotación del acuífero alterara el equilibrio natural existente entre el agua de mar y el agua dulce proveniente del continente, permitiendo un avance de la cuña salina hacia tierra firme aumentando la zona de mezcla.

Por otra parte, en los estudios de salinidad de las aguas no se puede descartar la acción del factor antrópico sobre la composición química de las aguas naturales, particularmente cuando éstas son utilizadas para el abasto a la población, la industria o la agricultura, mostrando especial interés cuando la disposición de residuales agroindustriales y urbanos se vierten sobre los cuerpos receptores y son introducidos en el acuífero cambiando las propiedades químico-físicas de las aguas.

Esto evidencia que la principal dificultad en estos estudios radica en ser capaz de identificar el origen de la salinidad en cualquier área, y esclarecer el mecanismo responsable de la abundancia de cada elemento presente, para buscar la mejor solución al problema. Sin embargo, en las zonas de acuíferos costeros de pequeñas islas, con marcada manifestación del carso como suele ocurrir con frecuencia en el sur de Cuba y específicamente en el caso que ocupa esta investigación donde solamente se ejecuta un estudio de control y seguimiento, puede asumirse como causa fundamental de la salinización de las aguas subterráneas la influencia de la intrusión marina, y considerar el resto de las causas de su origen como secundarias.

I.2.2. Proceso de intrusión marina

Después de un análisis previo de las diferentes condiciones naturales necesarias para que se origine un agua salinizada, se hace necesario hacer referencia al origen natural de la intrusión marina, como principal fenómeno que afecta la calidad ambiental en acuíferos cársticos libres, como el caso de estudio de esta investigación.

En el proceso natural del flujo de las aguas subterráneas continentales estas circulan por el litoral hasta los océanos, y por su parte, las aguas saladas oceánicas se infiltran en el subsuelo submarino y fluyen hacia los continentes. Se plantea que: dada la diferencia de densidad, se establece un equilibrio y el contacto entre las aguas dulces y aguas saladas forma una superficie inclinada hacia el interior del continente, Castany (1971); por lo que a partir de este análisis se puede definir la intrusión marina como *“el proceso de penetración de las aguas marinas hacia el continente y su mezcla con las aguas continentales de los acuíferos costeros”*, definición que permitirá interpretar el fenómeno que está ocurriendo en la zona objeto de estudio de la presente tesis.

Los primeros estudios relacionados con este fenómeno se reportan de 1900, cuando Herzberg según refiere Castany (1971), encontró que la profundidad hasta el agua salada en las islas arenosas en el mar del norte, cerca de las costas de Alemania, estaba en función de la altitud del nivel estático (NE) y de la densidad del agua de mar. Detectó que, en poco tiempo debido a la diferencia de densidades, el agua dulce flota sobre el agua salada y el fluido más leve se proyecta a una distancia cierta por encima del más pesado.

La interpretación del movimiento de las aguas continentales hacia los océanos y de su equilibrio con las aguas saladas, se publicó por primera vez en 1901. Este principio también fue desarrollado por W. Badon Ghyben (1889), en la costa de Holanda. El fenómeno está reconocido en la literatura como la ley de Ghyben-Herzberg, Castany (1971); Cedestrom (1971), que establece desde el punto de vista matemático una relación de $40H$, donde H es el Nivel Piezométrico (NP) del agua dulce.

Esta es una teoría válida hasta nuestros tiempos, aunque su principal limitante radica en que no consideró una zona de mezcla y si una línea de contacto entre ambos tipos de agua. No obstante, fue el primer acercamiento para la estimación de la zona de interfaz agua dulce-agua salada, muy útil para el pronóstico de la potencia de agua dulce, la cual en muchas de las islas del planeta representa la única fuente de agua dulce.

Por su parte M. K. Hubbert propuso una corrección a la relación anterior incorporando un flujo al problema, y a partir de esto estableció una nueva ecuación que pronostica una posición más real del límite entre agua dulce-agua salada, la cual es más profunda que la de Ghyben-Herzberg, (M. K. Hubbert en: G. Castany, 1971) y con un acercamiento más preciso del fenómeno.

La limitante de todos estos métodos radica en la necesidad de contar con puntos de observación del acuífero para poder medir el comportamiento del Nivel Estático (NE) tanto en la zona de agua dulce, como la de agua salada lo cual no siempre es posible, así como conocer con precisión la densidad de las aguas.

Finalmente, el enunciado de Luszczinsky en: Gonzalez (2003), considera la interface como una zona de mezcla con un espesor determinado, donde el contacto entre las facies se considera neto. En este caso la complicación radica en que se requieren tres puntos de observación: uno en el agua dulce, otro en el agua salada y un tercero en la zona de mezcla,

lo que supone una infraestructura realmente compleja sobre todo si se desconoce la ubicación espacial de la zona de interfaz.

Todos estos métodos teóricos están influenciados por la heterogeneidad y anisotropía del medio, así como por las condiciones hidrodinámicas del acuífero, que impiden un comportamiento regular de la geometría de la interface, lo que hace que el problema no sea tan simple, de ahí la necesidad de ejecutar estudios morfológicos e hidrodinámicos previos. Con esta premisa, y en situaciones estacionarias normales, la masa de agua salada adquiere la forma de cuña, apoyada en la base del acuífero y con el vértice orientada tierra adentro González (2003). La separación del agua dulce y salada se establece mediante la denominada interface que, debido a la miscibilidad entre ambas fases acuosas, puede tener espesor variable, dando lugar a una zona de contacto, de mezcla o de difusión. Este comportamiento en condiciones de explotación del acuífero, sobre todo en casos de una sobreexplotación es alterado, aumentando el avance de la cuña salina tierra adentro causando un trastorno al ambiente que requiere de un período muy largo de recuperación, a partir de la eliminación de su causa.

En Cuba el problema de la intrusión marina ha sido reportado en diferentes partes del país, de modo general asociada casi siempre a la costa sur. Se ha detectado su presencia al sur de Matanzas (1997), sur de La Habana (1998), la cuenca Juraguá en la provincia de Cienfuegos (2007), la zona suroeste de Santi Spíritus (2008) y toda la llanura sur de Pinar del Río.

- **Comportamiento de la zona de interfaz**

La zona de contacto entre el agua dulce-agua salada genera una zona de mezcla que varía en cuanto a sus características hidroquímicas, ya sea disminuyendo las concentraciones de sales hacia la superficie o aumentando hacia la cuña de penetración de agua de mar (zona de difusión). Esta franja se conoce como zona de interfaz, (Pérez-Franco, 2006).

A partir del conocimiento de las leyes generales que rigen el origen y comportamiento de la misma, y de las incertidumbres que existen a la hora de estudiar un acuífero afectado por dicho fenómeno, la comunidad científica ha considerado la necesidad de estudios regionales o puntuales para establecer la verdadera posición de la línea divisoria o zona de interfaz en un acuífero; debido a que en dependencia de la hidrodinámica del acuífero y sus

relaciones estructurales esta interfaz puede variar su posición y resulta difícil de ubicar o pronosticar, como ocurre en el caso de estudio, cuestión necesaria para el establecimiento de un régimen de explotación en un acuífero con estas características.

Los acuíferos costeros no confinados están generalmente caracterizados por la presencia de una zona superior de agua potable, la cual sobreyace al agua salobre más densa, Castany (1971); Cedestrom (1971). La interfaz que separa el agua potable de la salobre, se encuentra a mayor profundidad con el aumento de la distancia a la línea de costa, Pérez-Franco (2006); y una sobreexplotación de los acuíferos puede provocar la formación de un cono de depresión que motive un aumento de la penetración de la cuña de intrusión marina con carácter prácticamente irreversible, (Valdés, 2002).

La posición de la interfaz agua dulce-agua salada varía de profundidad por muy diversas causas naturales o artificiales (antrópicas). Cuanto más cerca de la superficie del terreno se encuentra dicha interfaz, mayor peligro existirá de contaminación de las aguas potables.

Esta situación varía de acuerdo al volumen de las precipitaciones anuales y durante una serie de años. La sequía generalmente provoca el avance de las aguas saladas hacia el interior de la tierra firme, pues el volumen de agua dulce que alimenta al acuífero disminuye, y en caso contrario mejora la calidad del agua en la zona de interfaz (Castany, 1971; Jiménez, 2009). Dado este planteamiento se hace necesario estudiar el comportamiento de las lluvias y su influencia sobre el acuífero, asociado a la cuenca hidrológica sobre la que actúa. Esto permite interpretar el comportamiento natural del acuífero y su respuesta a la intensidad de las precipitaciones.

Otro aspecto que influye en el comportamiento de la cuña salina es el incremento del nivel de los mares, que provoca el aumento de la presión del agua salada hacia el acuífero y estas penetran más en el mismo, aspecto que cobra notable importancia en la actualidad debido a los efectos del cambio climático, Peñate (2009), y a procesos geológicos recientes (movimientos tectónicos), que pueden tanto hundir como elevar el terreno en las zonas costeras, y provocar ya sea un incremento de las tierras emergidas (levantamientos) o una reducción o desaparición de las mismas (hundimiento); posibles causas de la constante subida del nivel del mar, que se manifiesta actualmente en zonas bajas del sur de nuestro país, Iturralde-Vinent (2009), provocando variación en la posición de la zona de interfaz.

Por otra parte, el bombeo excesivo de agua en los pozos puede generar una elevación local de la interfaz agua dulce-agua salada, y contaminar el acuífero. Este proceso es válido durante la explotación de pozos aislados, pero sobre todo cuando se extraen grandes volúmenes de agua subterránea para su aprovechamiento industrial, agropecuario y humano, (Martínez, 1997a; Pérez-Franco, 2006). Este es uno de los mayores riesgos a que están sometidos los recursos de aguas subterráneas costeras de Cuba, seguido por el peligro de contaminación desde la superficie, evidenciado por la coincidencia en los reportes de zonas contaminadas con zonas de explotación de acuíferos.

Miranda (2008) plantea que debido a este riesgo es necesario conocer la posición de la zona de interfaz en todo momento. Este aspecto resulta el reto principal de un estudio relacionado con la intrusión marina, tanto para una etapa de simple detección del fenómeno como para una etapa de control del mismo, ya que esta es la única forma de establecer un modo adecuado de explotación del recurso agua en un acuífero ya afectado.

Varios de los autores consultados tales como Granada (1988); Morell et al. (1997); González (2003); Pérez-Franco (2006), Miranda (2008); Rodríguez (2009), entre otros, han planteado el empleo de diferentes métodos para localizar la zona de interfaz, aunque de forma general hay un predominio del empleo de la determinación de parámetros físico-químicos (conductividad, temperatura, etc.) a lo largo de sondeos, penetrantes en el sustrato salino. Además recomiendan los métodos geofísicos fundamentalmente los métodos eléctricos, que a pesar de ser indirectos aportan un conocimiento regional del fenómeno, debido a la relación proporcional existente entre la CE y la salinidad de las aguas.

I.2.3. Consideraciones para la explotación de acuíferos costeros afectados por la intrusión marina

De la forma, localización y evolución de la zona de interfaz depende una adecuada explotación de las aguas dulces en acuíferos afectados por la intrusión marina, en los cuales si no es bien establecido el régimen de explotación puede conllevar a la sobreexplotación y con ella la contaminación de las aguas dulces.

Este proceso de contaminación de las aguas potables por bombeo, donde el agua dulce yace sobre agua salada más densa, está bien explicado por Pérez-Franco (2006). Plantea que generalmente existen dos formas de explotación de los acuíferos afectados por la intrusión

marina: trincheras de penetración superficial y pozos de penetración parcial, en los que: la interfaz agua salada-agua dulce se desplaza verticalmente hacia arriba en dirección del fondo del pozo, formando lo que se ha denominado un cono de intrusión. Bajo ciertas condiciones se formará a determinada profundidad por debajo del pozo un cono de intrusión estable, y se extraerá agua dulce del pozo a pesar de existir dicho cono. En otras condiciones, sin embargo, el cono será inestable y la interfaz ascenderá abruptamente hacia el fondo del pozo, ocasionando que se extraiga agua salinizada. De ese modo, el ascenso crítico del cono de intrusión, (Z_{ac}), se define como el que se produce hasta un lugar, por encima del cual puede existir solamente un cono de intrusión estable, (Pérez-Franco, 1969 en: Pérez-Franco, 2006).

Debido a que las zonas costeras son muy favorables para grandes asentamientos humanos, y para la ubicación de producciones agrarias, con frecuencia se incurre en explotaciones intensivas del agua subterránea sin considerar lo antes planteado, ocasionando una contaminación de los acuíferos potables por intrusión marina. Es por esto que los criterios expresados por Pérez-Franco (2006), resultan aplicables al caso de estudio, donde necesariamente habrá que interactuar con este fenómeno durante la explotación del recurso agua. No obstante es de considerar, que lo más aconsejable para evitar la posible afectación de un acuífero por esta vía, es tratar de salirse de la cuña de penetración o alejarse lo más posible de ella según lo expresa Cedestrom (1971), puesto que los factores subjetivos y humanos siempre tendrán en riesgo el cumplimiento estricto de los regímenes de explotación, a la vez que las condiciones climáticas y naturales del acuífero pueden ser cambiadas por la influencia de los procesos geológicos y de cambios climáticos que actualmente afectan a nuestro planeta.

I.2.4. Condiciones estructurales, el carso, y su relación con la intrusión marina

Para un adecuado pronóstico del comportamiento de la intrusión marina en un acuífero es necesario conocer además de la hidroquímica del acuífero, su hidrodinámica, basada principalmente en la dirección del drenaje subterráneo, el gradiente con que se mueve, y su relación estructural, lo que permite valorar su influencia sobre el comportamiento de la cuña de intrusión marina.

Estos elementos suelen tener un comportamiento diferente en determinados sectores de un acuífero, influenciados por el medio geológico, que en la gran mayoría de los casos no es homogéneo. En casos específicos como lo son los acuíferos cársicos o fisurados cársicos, pueden estar alterados por zonas preferenciales de carsificación o flujos predominantes, regidos a su vez por factores tectónicos, (Sarduy, 1998). Esto aumenta la complejidad de predicción del comportamiento de la cuña salina debido a su difícil pronóstico y comprensión. Como el acuífero caso de estudio es de tipo cársico, se hace indispensable un conocimiento general del carso y su descripción conceptual, de la que existe un arsenal de conocimientos reportados por reconocidos autores internacionales y otros cubanos.

Para la toma de decisiones con respecto al análisis e investigación del carso, como proceso y como sistema, independientemente de otros aspectos importantes como las características geomorfológicas, profundidad de yacencia de las aguas subterráneas, etc., es necesario analizar algunos conceptos imprescindibles, los cuales se asocian directamente a la tectónica y el agrietamiento, por ejemplo: “Los pequeños conductos crecen por disolución en dependencia de su interconexión con la red de fisuras del macizo y al régimen hídrico a que estén expuestos, pero una vez integrada a una línea de drenaje preferencial, el volumen de conductos crece, como también la erosión mecánica”, Eraso (1976). También Molerio (1989) declara que: “La zona de óptima disolución está formada por la intersección de los planos de fisuración o estratificación. En esta unión es por donde, con mayor intensidad, se producirán los efectos de disolución y erosión de las rocas carbonatadas; en tanto correspondan con zonas de conjugación de superficie de máxima concentración de flujo y máxima concentración de solvente”.

En todos estos conceptos se inscriben, como elemento común, la disolución y su relación con los planos de fisuración o estratificación, que a su vez guardan relación con las zonas preferenciales y de concentración de flujo, convirtiéndose estos en variables de análisis para la interpretación del comportamiento de la intrusión marina y la ubicación de nuevas fuentes de abasto. Por lo tanto, si desciframos con claridad el comportamiento regional de la tectónica, y se le asocia la zona preferencial de mayor desarrollo cársico, es posible asumir estas direcciones como direcciones preferenciales de flujo de agua en cualquiera de los sentidos, tanto de la tierra al mar como del mar al continente.

A los métodos que estudian tales aspectos, se denominan: “métodos de análisis de las estructuras de las formaciones acuíferas”, en los cuales las variables a estudiar pertenecen al campo de las propiedades físicas del medio tales como: elementos estructurales de los estratos y fisuras, como rumbo, acimut, ángulo de buzamiento, y alineaciones de formas cársicas o morfológicas. (Sarduy, 1998).

Si a esto le incorporamos los nuevos criterios que interpretan la tectónica basados en indicadores cinemáticos para identificar el sentido del cizallamiento de las fallas, y de la correcta aplicación de la cartografía geológica, Cáceres (2009); Cofiño (2009), se estará incorporando un nuevo elemento para alcanzar una mejor aproximación del comportamiento espacial del acuífero y su relación con la intrusión marina, lo cual permitirá a su vez optimizar la ubicación de puntos de control o explotación. Estas consideraciones son aplicables a la zona de estudio, para demostrar que la disposición, intensidad de la salinidad y comportamiento espacial de la cuña de intrusión marina, puede estar influenciado por la presencia de estas estructuras, especialmente por los elementos estructurales de los estratos, fisuras y las alineaciones morfológicas.

I.2.5. Métodos de estudio y toma de datos en acuíferos afectados por la intrusión marina.

Investigadores nacionales e internacionales han ejecutado estudios profundos sobre el fenómeno de intrusión marina haciendo exploraciones puntuales o regionales en diferentes zonas afectadas, logrando la toma de datos necesarios para la interpretación del fenómeno en cuestión. Se emplean una diversa gama de métodos de investigación que se aplican en dependencia de la magnitud del estudio a realizar y la disponibilidad real de ejecución. Es muy común que para este tipo de estudios se apliquen los métodos de Modelación Matemática, Geofísicos, Hidroquímicos, Hidrodinámicos y Microbiológicos.

- **Modelación matemática**

Según Calvache (1997), el problema de la intrusión marina se ha abordado principalmente mediante la aplicación de metodologías a posteriori, es decir, una vez detectado el proceso de intrusión, se establece el control de niveles piezométricos y contenidos en cloruros de las aguas subterráneas, y sobre la base de estos datos se adoptan las medidas correctoras

adecuadas. Por ello propone la modelación matemática como una metodología que puede constituir no solo una técnica importante de cara a la prevención de procesos de intrusión marina en acuíferos costeros, sino que representa una de las técnicas más útiles para controlar su evolución y la eficacia de las medidas aplicables para controlar este proceso.

En su estudio maneja dos fundamentos teóricos que permiten el modelaje matemático del contacto agua dulce-agua salada, considerando: en uno el contacto como fluidos inmiscibles, siendo, por tanto, el contacto entre ambos, una simple superficie denominada interfaz neta. El segundo caso fue considerar fluidos miscibles que se tratan como un solo fluido de densidad variable, por lo tanto, ya no se considera una interfaz sino una franja de mezcla que tendrá un espesor muy variable en función de las condiciones de cada caso.

Para una adecuada modelación se requiere de una serie de datos que varía en dependencia del modelo empleado, por lo que sería interesante acotar que en dependencia de la fuente de datos que se utilice estos obtienen mayor o menor validez.

Es por esto que Calvache (1997) considera que la simulación matemática no está exenta de obstáculos, debido fundamentalmente al notable volumen de datos que se requiere, los cuales en su mayoría no son fáciles de obtener y requieren de un nivel de inversión y desarrollo tecnológico que facilite el acceso a ellos. En este caso se necesitan entre otros: niveles piezométricos, profundidad inicial de la interfaz, resultados de aforos, caudales de agua dulce o salada que entran o salen del acuífero, valores de precipitaciones y temperaturas, análisis de calidad de agua, y por último propiedades hidrodinámicas del acuífero, (transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento, entre otros).

De todos estos datos el que mayor incertidumbre presenta es el contacto entre el agua dulce-agua salada, ya que rara vez se conoce su posición exacta. En el caso de la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento es difícil conocer su distribución espacial ya que estos se obtienen de forma puntual a partir de aforos, por lo que es necesario un modelaje particular para lograr su distribución.

Algunos softwares son más empleados en las investigaciones hidrogeológicas, y contienen módulos que simulan este tipo de fenómeno, por ejemplo: el ModFlow de origen americano y el Feflow, este último de procedencia alemana y de gran potencial de modelaje. Ambos permiten el modelaje tridimensional de un acuífero a partir de la calibración y entrada de los datos necesarios.

- **Métodos geofísicos**

Habitualmente se asocia el papel de la geofísica en la hidrogeología a la resolución de aspectos relativos a la geometría de las formaciones rocosas del subsuelo. La aplicación de técnicas geofísicas para estudios de la intrusión marina se define como un ámbito perfectamente delimitado por rasgos específicos. Existe un parámetro geofísico representativo de las características del subsuelo que es inversamente dependiente de la salinidad del agua que rellena el espacio poral de las formaciones rocosas. Este parámetro es la Resistividad Eléctrica, (Granada, 1988; Rodríguez, 2009). Observando cualquiera de los ábacos que relacionan resistividad con salinidad se destaca la acusada dependencia entre ambos parámetros. La resistividad de una disolución disminuye drásticamente con el aumento de la salinidad llegando a valores extremadamente bajos. Consecuentemente las medidas de resistividad realizadas mediante técnicas de superficie constituyen a priori un método directo para la detección de zonas salinizadas, (Granada, 1988). Sin embargo, en la ejecución de las mediciones en superficie influyen una serie de factores tales como naturaleza litológica de las rocas, porosidad, condiciones superficiales, etc., que pueden enmascarar parcialmente el efecto de los cambios de salinidad del agua. Dicho, en otros términos, aunque el comportamiento de las disoluciones puede ser conocido con precisión, los otros factores introducen un cierto nivel de incertidumbre en las medidas y en su interpretación.

De cualquier modo, el fenómeno que afecta a la mayoría de los métodos eléctricos aplicados en hidrogeología es la conducción iónica, que tiene lugar mayoritariamente a través de las disoluciones que saturan las rocas y a través del agua de constitución de las mismas. Consecuentemente en cualquier medida va a predominar el efecto de la mayor o menor salinidad de los fluidos del subsuelo (Granada, 1988). En los casos en que existe homogeneidad litológica de las formaciones y también en las condiciones superficiales; cuando las variaciones de resistividad son asignables exclusivamente a los cambios de salinidad en los acuíferos; los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) permiten obtener resultados de gran calidad y muy representativos, siempre que el rango de profundidad se limite a algún centenar de metros como máximo, (Granada, 1988). De aquí nace la gran

utilidad de los métodos de resistividad en cualquiera de sus variantes para el caso que ocupa.

Otro aspecto específico de las técnicas geofísicas aplicadas al estudio de la intrusión marina es su carácter marcadamente cualitativo. En la mayor parte de las aplicaciones se pretende detectar contrastes de resistividad dentro de un rango de valores generalmente bajos y conocer su evolución en el tiempo, más que determinar los valores concretos de la resistividad característica de un rango de profundidad, (Granada, 1988).

Sin embargo, la posibilidad de determinar los valores de la resistividad característicos de un rango de profundidad, permite zonificar el comportamiento de la cuña de intrusión marina a diferentes profundidades, pretendiendo dar una ubicación espacial a su comportamiento. Esto se logra empleando métodos de interpolación adecuados como lo puede ser el Kriging. La presentación de resultados en forma de pseudosecciones o planos de isovalores de resistividad aparente en la opinión de Granada (1988), es la vía de presentación más acorde con la naturaleza física del problema de la intrusión. De acuerdo con este criterio se puede considerar emplear las posibilidades de interpolación lateral a intervalos de profundidad obtenidos de $1/3 \cdot AB/2$, donde AB es la abertura exterior del sondeo geofísico, usando métodos geoestadísticos de interpolación, que ofrecen un resultado confiable.

El procesamiento geoestadístico tiene como objetivo realizar un análisis de la distribución espacial de los datos, con el fin de caracterizar el comportamiento espacial, teniendo en cuenta las localizaciones de los mismos, (Quintín, 2009). A partir de esta premisa se analizan las poblaciones de datos obtenidas, y empleando diferentes programas informáticos disponibles, como puede ser el paquete geoestadístico que ofrece el ArcGis10.2, se establece un semivariograma de los datos ajustado a un modelo teórico y se pueden obtener excelentes resultados de interpolación que mapeen el fenómeno.

En resumen, se puede trabajar el aspecto cuantitativo de las mediciones de resistividad aparente, captando los valores asociados a una profundidad determinada, de forma tal que se puede establecer el comportamiento por intervalos de profundidad de la variación de este parámetro en el horizonte acuífero. Como resultado se obtiene un mapa temático de la resistividad aparente por profundidades, que expuesto de forma tridimensional muestra la disposición de la cuña salina en el acuífero.

También es conocido que la técnica de tomografía eléctrica está siendo introducida como una nueva forma de estudio de estos fenómenos, pero aun no fue encontrada información suficiente para abordarla en detalle. Tiene como finalidad estudiar las variaciones laterales de resistividad del subsuelo. Se trata pues, de un método de investigación, muy apropiado (por su alta resolución lateral) para detectar cambios geológicos verticales o inclinados, tales como diaclasas o fracturas. Este método es de mayor potencial por la innovación de los instrumentos y software interpretativos (Rodríguez, 2009). Al aplicar los mismos principios de la dependencia de la salinidad con la resistividad eléctrica del suelo, se puede aplicar con buenos resultados en este tipo de estudios.

Otro método aplicable a estos estudios es la geofísica de pozo la cual permite estimar los parámetros del flujo del agua en el pozo, y los mismos pueden utilizarse, además, para estimar las propiedades hidráulicas de los acuíferos, es decir, la velocidad de flujo (V_f), permeabilidad (K_f), y la transmisividad (T) de los acuíferos individuales. Los parámetros anteriormente mencionados son estimados a partir de los registros obtenidos por el Método de Cuerpo Cargado, el cual a partir de las curvas obtenidas de las mediciones es posible localizar los estratos permeables, y determinar la velocidad de flujo.

Del análisis de la documentación consultada en Granada (1988) y Rodríguez (2009), es posible plantear que los métodos geofísicos son ampliamente usados, aportando resultados confiables y relativamente a bajos costos.

- **Método hidroquímico**

La aplicación de la hidroquímica al estudio de la intrusión marina, ha tenido mayor desarrollo en la medida que han avanzado los métodos químicos de análisis de aguas, tanto a nivel de laboratorio como de campo; así como, el desarrollo de nuevas tecnologías para el registro de parámetros físico-químicos y de programas de computación que permiten el almacenaje, procesamiento e interpretación de la gran cantidad de datos que se genera durante un estudio hidroquímico, (González, 2003).

En el caso específico de la intrusión marina las determinaciones directas de la posición de la interface pueden llevarse a cabo a través de las medidas de determinados parámetros físico-químicos tales como CE, temperatura, etc., a lo largo de sondeos penetrantes en el

sustrato salino, las cuales pueden aportar mejor información, si la estratificación hidroquímica en el sondeo se corresponde con la del acuífero.

Los métodos hidrogeoquímicos e isotópicos constituyen una herramienta básica, que complementa la metodología anterior y también requiere una adecuada red de observación. Implica una correcta caracterización físico-química de las aguas subterráneas, a partir de la cual se podrá llevar a cabo una adecuada evaluación hidrogeoquímica del fenómeno, pudiéndose, de esta forma, definir tipos de aguas, origen y evolución espacio-temporal de la salinización, variaciones en la composición mineralógica del material acuífero, así como dilucidar algunas de sus propiedades hidrodinámicas e hidrogeológicas, y por último, la modelación hidrogeoquímica para la identificación y cuantificación de los procesos geoquímicos que rigen los sistemas de mezcla agua dulce-agua de mar, (González, 2003).

En muchas ocasiones para establecer la existencia de un proceso de salinización por intrusión marina se utilizan algunas relaciones iónicas, entre las que destaca la relación $rCl^- / rHCO_3^-$ (tabla 2.2). Dado que el cloruro prevalece en el agua de mar y que el bicarbonato caracteriza a la mayor parte de las aguas dulces, siendo muy baja su concentración en el agua de mar, el rápido incremento de esta relación es un excelente trazador de la invasión marina. En el agua de mar sus valores oscilan entre 20 y 50, mientras que en las aguas dulces varían en el rango entre 0.1 y 5.0

También la relación rSO_4^{2-} / rCl^- es de gran interés para identificar el proceso de intrusión marina, ya que tiene un valor característico (0.1) en el agua de mar. Un acercamiento de los valores de esta relación en el agua salina, puede ser indicio de contaminación por agua de mar.

Finalmente, la relación rMg^{2+} / rCa^{2+} puede considerarse indicativa de contaminación marina, especialmente cuando su incremento va acompañado de un aumento del contenido de cloruros y de la relación $rCl^- / rHCO_3^-$. En el agua de mar alcanza valores en torno a 5, mientras que en las aguas dulces es de 0.3 a 1.5. Estas relaciones son interesantes, siempre y cuando no existan fenómenos físico-químicos que interfieran modificando sustancialmente las concentraciones iónicas.

Tabla I.1. Relaciones iónicas de uso frecuente en el estudio de la intrusión marina, (Hernández, 2001, modificado por el autor)

Relaciones	Agua de Mar	Agua Dulce	Comentario
1) $rCl^-/rHCO_3^-$	20-50	0.1-5	> Límite superior indica invasión salina
2) rSO_4^{2-}/rCl^-	0.1	-	= 0.1 no existe reducción de sulfatos
3) rMg^{2+}/rCa^{2+}	5	0.3-1.5	> Límite superior indica invasión salina
4) rBr^-/rCl^-	$1.5-1.6 \times 10^{-3}$	-	= Valores límites indica invasión salina

Los isótopos brindan importante información sobre el área de recarga, grado de mezcla, edad absoluta y otros. Normalmente se determina el Deuterio, Tritio, Radón y los isótopos del Carbono, (González, 2003). Su uso tiene limitaciones derivadas fundamentalmente de la dificultad analítica ya que es compleja y costosa. Cuando la salinidad es el resultado de la mezcla de un agua salada con otra dulce, las aguas salobres resultantes tienen salinidades y composiciones isotópicas diferentes. Ya sabemos que la composición isotópica del agua de mar es diferente a la del agua dulce. Por tanto, los valores del ^{18}O y Deuterio, individualmente o en conjunto con el Cl están linealmente correlacionadas sobre una línea de mezcla, dentro de unos límites definidos por el agua de mar y el agua dulce. Normalmente, las salmueras, aguas fósiles, aguas de formación y fluidos magmáticos o geotermales muestran una composición isotópica distintiva, de modo que su mezcla con aguas subterráneas puede ser identificada fácilmente mediante la combinación de análisis químicos e isotópicos.

Entre los isótopos radioactivos el tritio puede aportar alguna información, referente a las condiciones de intrusión moderna, pero esta información puede ser superflua en la determinación de otros parámetros. El ^{14}C no puede ser interpretado fácilmente con salinidades significativas, debido al problema de un posible fraccionamiento. Su uso se ve así restringido a aguas salobres, adyacentes a acuíferos salinos (Lloyd y Howard, 1979).

Además, los autores plantean que cuando los cambios climáticos han tenido un papel significativo, en la paleohidrogeología, es posible que los isótopos estables D y ^{18}O puedan aportar confirmación de aguas salinas antiguas. Ellos lo confirman por los ejemplos de las aguas antiguas salinas de los acuíferos de areniscas triásicas de Merseyside (Reino Unido), que tienen contenidos isotópicos significativamente inferiores incluso que las aguas subterráneas locales dulces. A pesar de que esto podría ser útil para distinguirlas, de las

aguas modernas de intrusión marina, en la práctica, la intensa mezcla con el agua subterránea dulce tiende a enmascarar la diferencia.

La composición isotópica del SO_4^{2-} disuelto depende mucho de la fuente de aporte del SO_4^{2-} y, además, de la composición isotópica del S del agua de mar, que ha variado de forma apreciable a lo largo de la historia geológica. Este puede ser, por tanto, un método para determinar el origen, y posiblemente la edad de las aguas salinas. Sin embargo, la reducción del SO_4^{2-} acompaña a menudo a la intrusión, y esto modifica el contenido isotópico (Rye *et al.*, 1981 en: Lloyd y Tellam, 1988). A pesar de que se ha trabajado mucho acerca de la composición en SO_4^{2-} isotópico, en los ambientes marino/costeros (Chantar *et al.*, 1987 en: Lloyd y Tellam, 1988), es necesaria una investigación más profunda en áreas de intrusión marina actual.

Los isótopos del Sr se han empleado en investigaciones de salmueras en campos petrolíferos, pero en muy pocas ocasiones en estudios de intrusión poco profunda, y se ha mostrado que la composición de isótopos del Sr ha variado, considerablemente, durante el fanerozoico, y es posible, por tanto, que los isótopos del Sr puedan utilizarse para determinar la edad y procedencia de las aguas salinas (Lloyd y Tellam, 1988).

El ^{36}Cl se ha utilizado para determinar el origen de las aguas salinas y, el ^{12}C de relativamente larga vida media, ha permitido una buena datación, más allá de los límites posibles con el ^{14}C (Bentley *et al.*, 1986 en: Lloyd y Tellam, 1988). En algunos casos el ^{36}Cl puede utilizarse como una alternativa al tritio, ya que algunas de las explosiones de bombas nucleares han afectado a los contenidos globales de ^{36}Cl .

Las limitaciones de recursos y tecnologías apropiadas ocasionan que, en estudios de *Control y Seguimiento*, el empleo de estos métodos hidroquímicos en ocasiones se reduzcan a la caracterización de las aguas por concentraciones de SST, ion cloruro (Cl^-) y CE, analizando sus comportamientos en muestras tomadas directamente del acuífero a diferentes profundidades (batimetría), estableciendo una frontera o zona de mezcla de la columna de agua dulce-agua salada a partir de los resultados obtenidos.

Los criterios para valorar la calidad de agua parten del empleo de la NC 93-02:1985, que normaliza los valores máximos permisibles (VMP) de cada elemento químico presente, la cual plantea por ejemplo que el VMP del ión Cl^- es de 250 mg/L, y que en muestras con concentraciones de SST superiores a 1000 mg/L ya se consideran como no aptas para el

consumo humano. Esto constituyó en el caso de estudio un punto de partida para valorar la calidad del agua con respecto a su posible explotación para el consumo y la detección de la presencia de contaminación salina.

- **Método microbiológico**

El estudio biomolecular del acuífero, además de caracterizar desde el punto de vista bacteriológico la calidad del agua brindará mayor información sobre la zonalidad de la intrusión marina, según sea la distribución de la comunidad microbiana. La diversidad de las características físicas y químicas, tiene una influencia significativa en la diversidad microbiana (Celico *et al.*, 2008).

A pesar de que Coliformes fecales y *Escherichia coli* históricamente han sido usados como microorganismos indicadores de la calidad del agua, más que *Enterococcus faecalis*, no se han realizados investigaciones detalladas para analizar la influencia de halotolerancia sobre sus realibilidades en el agua subterránea salada. (W.H.O., 2006). Eso significa que *Enterococcus faecalis* tradicionalmente han sido usados solo para el monitoreo de agua marina (Celico *et al.*, 2008). Estos autores plantean que la polución microbiológica de las aguas salinas no se detecta con indicadores bacterianos no halofíticos, tales como coliformes fecales. *Enterococcus faecalis* son mejores indicadores, debido a su mayor halotolerancia, comprobaron que la contaminación bacteriana, de origen fecal, indica que la mezcla de aguas hipersalinas y de baja salinidad se relaciona con la infiltración local. Celico *et al.*, (2010) realizaron una investigación sobre el uso potencial de las investigaciones de la comunidad microbiana para analizar el comportamiento del sistema hidrotermal en Italia y comprobaron que existe una relación entre la temperatura del agua y la distribución de las comunidades bacterianas en él.

I.2.6. Uso de los SIG como plataforma para el estudio de la intrusión marina

El empleo de los SIG está muy difundido en el mundo actual. Existen varios SIG a disposición de los investigadores, entre ellos se encuentran el ArcView, SURFER, Global Mapper, MapInfo, CadCorp SIS 6.2, ArcGis, entre muchos otros. En los trabajos de Martínez, (1998) y Acosta, (2006) hacen referencia a varios autores que definen un SIG como:

Cebrian y Mark (1986): Un SIG es una base de datos computarizada que contiene información espacial.

Burrough (1988): Un SIG es un conjunto de herramientas para reunir, introducir (en el ordenador), almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos.

Bracken y Webster (1990): Un SIG es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes.

De modo general todos coinciden en que son una herramienta computarizada que almacena y maneja datos espacialmente georeferenciados, y que permiten procesar esta información. Recientemente Peifeng (2009), plantea que: “un GIS es un sistema de Hardware, Software y procedimientos que facilitan la dirección, manejo, análisis, modelación y representación de bases de datos georeferenciadas para resolver problemas complejos con respecto a la planificación y dirección de recursos”. Esta definición resulta la más completa, ya que considera la necesidad de Hardware y Software, así como procedimientos que permiten el manejo de las bases de datos. Actualmente la velocidad y capacidad de los Hardware, así como las posibilidades de los Software que incluyen la mayoría de las especialidades, viabilizan la aplicación de los SIG en estudios relacionadas con las ciencias de la tierra, incluyendo el análisis de la intrusión marina en acuíferos costeros.

Uno de los SIG más difundido y empleado por los profesionales que estudian las ciencias de la tierra en el mundo es el ArgGis, que ofrece una amplia gama de posibilidades y herramientas que abarcan la mayoría de las necesidades de mapeo y geoprocésamiento de bases de datos (BD), necesarios para estos tipos de estudios, (Peifeng, 2009). Con respecto al uso de los SIG en las investigaciones relacionadas con la intrusión marina. No obstante dada las grandes ventajas que ofrece el ArcGis10.2, se decidió emplear en este estudio como plataforma base, interactuando además con el SURFER, AutoCad_Map 2004 y el Global Mapper, permitiendo el diseño y manejo de una “Base de Datos” o “Geodatabase” que enlaza información con localización geográfica, permitiendo ver y analizar los datos de una forma nueva, o en un concepto más ampliado, facilitando la dirección, la manipulación, el análisis, planeamiento, representación y despliegue de los datos georeferenciados para resolver el problema y objetivos planteados. (Acosta, 2009).

Esto permite obtener mapas temáticos representativos de cada aspecto que se trata, lográndose que el total de las salidas de figuras y mapas que ilustran la investigación se representen en esta plataforma.

Como se puede deducir esto constituye un punto de partida para el futuro empleo de esta herramienta en los estudios de intrusión marina y permitir la toma de decisiones, en cuanto a la forma e intensidad en que se debe de utilizar un territorio y cada una de sus partes, incluyendo los asentamientos humanos, y las entidades sociales y productivas. Por ende, el empleo de los SIG permite una correcta planificación ambiental, que es un instrumento preventivo de la gestión ambiental, en todas y cada una de sus múltiples formas. Rodríguez (2008).

Después de analizado e interpretado todo lo expuesto hasta el momento se puede expresar que:

1. En el origen y procesos de salinización de las aguas intervienen varios factores modificadores de la calidad de las aguas, entre ellos la intrusión marina se muestra como el proceso que comúnmente afecta a los acuíferos costeros con más intensidad, aunque se ha comprobado que factores hidroquímicos y de intercambio de iones, así como los de origen antrópico también inciden de forma notable en la calidad de las aguas de estos acuíferos.
2. Toda investigación relacionada con la intrusión marina requiere el monitoreo de la zona de interfaz y el conocimiento detallado de su evolución, lo que permitirá explotar racionalmente el recurso agua.
3. Para la investigación de la salinización se emplean fundamentalmente métodos hidrogeoquímicos, biomoleculares, geofísicos y modelación matemática para la interpretación del comportamiento de la intrusión marina.
4. La incorporación a los métodos de estudio de la intrusión marina de criterios relacionados con el análisis de las estructuras de las formaciones acuíferas, puede constituir un elemento importante a la hora de interpretar la forma y manifestación de la intrusión marina en el acuífero.
5. Es factible el uso de los Sistemas de Información Geográficos como herramientas integradoras y soporte general de toda la Base de Datos que pueda brindar

información sobre el comportamiento de la intrusión marina, permitiendo una correcta planificación ambiental, como instrumento preventivo de la gestión ambiental.

6. En Cuba ha sido reportado el fenómeno de la intrusión marina en diferentes partes del país, generalmente asociado a la costa sur de la isla. En Pinar del Río, se ha identificado la presencia de este fenómeno en la Llanura Sur.

Capítulo II. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio

II.1. Características físico-geográficas

II.1.1. Ubicación geográfica

El sector de estudio se localiza al este de la Península de Guanahacabibes, ubicada en la porción más occidental de la provincia de Pinar del Río, y por sus características espaciales, de gran importancia ambiental, la tipifican como Reserva de la Biosfera.

El sector de estudio, abarca aproximadamente una extensión de 836,4 km², está enmarcado dentro de las coordenadas $X_{mín} = 153\ 820$, $X_{máx} = 198\ 475$; $Y_{mín} = 238\ 190$, $Y_{máx} = 262\ 450$. Los límites son: al Norte-Noreste la cordillera de Guaniguanico, al Este y Sur-Sureste por el mar Caribe, al Suroeste por el Cabo Corrientes, al Oeste por Cabo San Antonio y al Noroeste por el Golfo de México (Figura I.1).

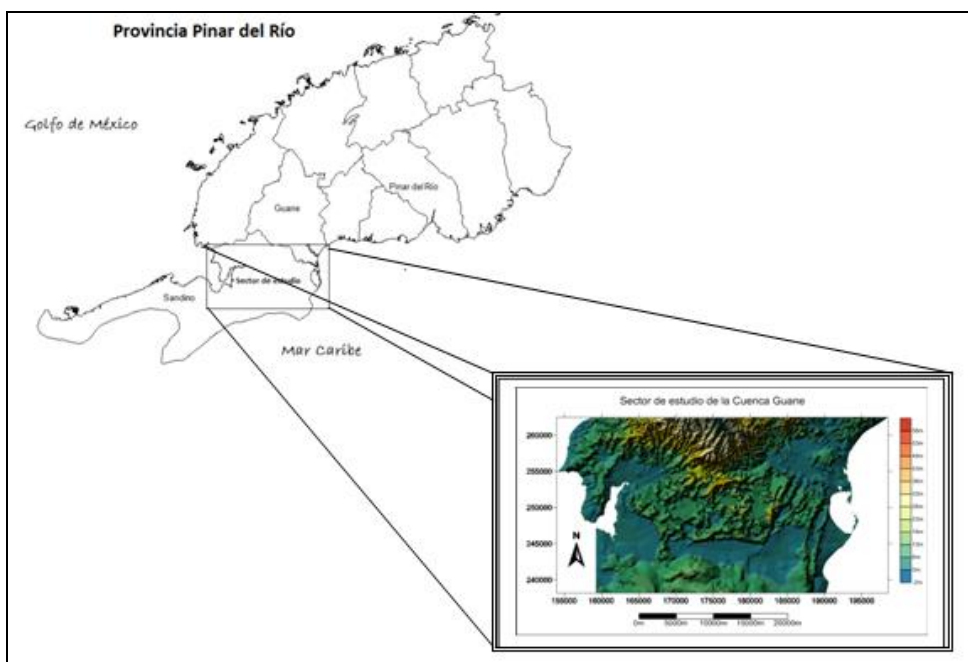


Figura II.1. Mapa esquemático de ubicación geográfica del sector de estudio

II.1.2. Relieve

La península de Guanahacabibes en general está formada por una llanura cársica activa, en la cual existe una intensa topografía cársica, con abundantes formas superficiales, como: lapiés, dolinas y casimbas. En muy pocos lugares las cotas superan los 10-12 m de altura (Figura 1.2). Las máximas elevaciones corresponden a la costa Sur del territorio entre Punta

Caimán y Cabo Cruz, con un valor de 19.2 m sobre el nivel del mar. Existen depresiones aisladas que se encuentran en el interior de la península rellenas de agua formando zonas bajas y pantanosas, que muchas veces se corresponden con las dolinas cársticas o lagunas cerradas.

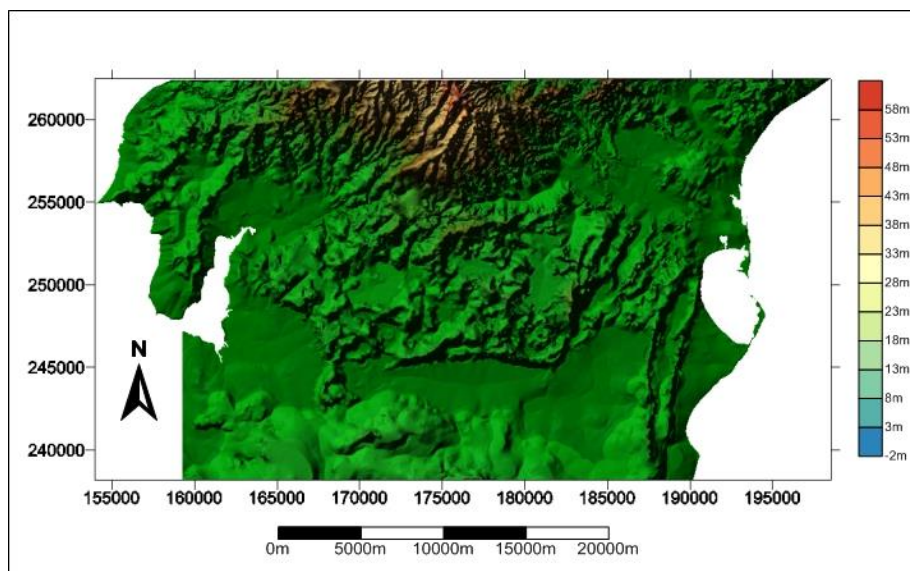


Figura II.2. Modelo de sombras representando la topografía del sector de estudio a escala 1:25000

II.1.3. Vegetación y fauna

La península de Guanahacabibes en general presenta una vegetación homogénea y con características propias. Las formaciones de vegetales identificadas en el área de estudio están directamente relacionadas con las características edafológicas e hidroclimáticas en que se desarrollan, las cuales determinan su estructura y composición florística. Los cambios de estos componentes abióticos hacen posible la aparición de variantes en las formaciones vegetales y generalmente se manifiestan en franjas alargadas y estrechas, paralelas a la línea de costa.

En los terrenos calcáreo-carbonosos habitan el humus, sabicú, ébano carbonero, la yaya, el roble blanco y los jagüeyes, mientras en los lugares bajos pantanosos abundan la ciperácea, la majagua, el ocuje y la magüira fundamentalmente. En los bosques son abundantes las maderas preciosas, como son: el cedro, la caoba, el yaití, pico de gallo, cerillo y el carey, entre otros.

Otro rasgo significativo de la península, es su variada fauna, actualmente habitan en el área 16 especies de anfibios, 35 de reptiles, 140 de aves, 18 de mamíferos y 86 de mariposas diurnas, por citar algunos de los más relevantes grupos faunísticos. Entre los reptiles se destacan: majá de Santa María, tortugas e iguanas. Guanahacabibes constituye uno de los escasos refugios de supervivencia, al contar con tres, de las siete especies de tortuga marina, que existen en el planeta, todas de carne y caparazón altamente cotizados. La clase de las aves es la más numerosa y diversa representada por especies, tales como: el zunzuncito, (ave más pequeña del mundo y endémica de Cuba), la torcaza boba, la paloma perdiz (endémica de la región), la yaguasa, etc. Los mamíferos por su parte tienen una buena representación en la zona, presentando una gran parte de ellos un alto interés económico. Entre los reportados se pueden citar: ganado vacuno asilvestrado, puercos jíbaros, venado de cola blanca, jutías congas y carabalíes, ratas y diferentes especies de murciélagos.

II.1.4. Vías de acceso

En el sector de estudio la red de carreteras y caminos está medianamente desarrollada. Está representada por la carretera Panamericana, la cual une la capital provincial con los municipios más occidentales de esta provincia. En los casos de los poblados de Sandino, La Fe, Manuel Lazo, Valle San Juan, Las Martinas, Cortés y Guane se encuentran unidos por la misma vía. Además, existe un sistema de caminos forestales y agrícolas, así como vías alternativas, que permiten el acceso a la región.

II.1.5. Clima

El clima de la península de Guanahacabibes está influenciado notablemente por sus particularidades geográficas y geomorfológicas, al ser una franja de tierra estrecha y alargada con una distribución lineal, por franjas, de los principales ecosistemas y paisajes que evolucionan en este lugar. De acuerdo con el criterio de clasificación del clima (e.g., Kopen, 1948, en Denis y Díaz, 1993), en la península de Guanahacabibes es considerado como tropical o tropical oceánico. Esto está condicionado no solo por la localización con respecto al trópico, sino también por su proximidad al continente americano, por la presencia de importantes sistemas oceánicos y continentales muy próximos, como: la

Corriente del Golfo, el anticiclón subtropical del Atlántico Norte, las bajas extratropicales, los frentes fríos, las ondas tropicales, los ciclones tropicales, y el hecho de que durante todo el año, las costas son bañadas por ramificaciones de dos potentes y calientes corrientes oceánicas: la del Noralisio y la del Suralisio, que forman la corriente del Golfo. Por lo expuesto anteriormente, se deducen dos períodos o estaciones bien definidas: una de lluvia, que se extiende desde mayo hasta octubre, en la cual cae el 70% del total de lluvia anual, con actividades de ciclones y huracanes, y otra de seca entre los meses de noviembre y abril. El promedio de precipitaciones en la región es de 1 200 a 1 450 mm anuales.

El período de menor humedad se extiende entre los meses de diciembre a marzo, por la influencia de las altas presiones continentales con aire frío y seco sobre la región y el retiro del anticiclón oceánico del Atlántico. Los valores medios de humedad oscilan entre 70 y 80 %; en estos meses sólo se registran los valores de humedad más altos en las costas y en los bosques de ciénaga y manglares, donde llegan hasta el 85 %. En el resto del territorio la humedad relativa está entre 71-76 %.

En este territorio la radiación solar global media diaria alcanza valores que van desde los 13.1 hasta los 22.9 MJ/m², con un período de valores más bajos que promedian 15.2 MJ/m², desde septiembre hasta febrero, y otro de mayor duración, desde marzo hasta agosto, con valor medio de 21.0 MJ/m². El tiempo de iluminación varía entre 2664 y 2665 horas como promedio, desde enero a diciembre.

Las temperaturas medias mensuales varían entre los 22,7 y 27, 5 °C, registrándose las máximas anuales de 34,6 °C y las mínimas de 6 °C.

II.1.6. Desarrollo socio-económico

La península de Guanahacabibes, hoy Reserva de la Biosfera, fue el último refugio de los aborígenes del occidente que huían de los conquistadores. Antes de la llegada del hombre europeo, estuvo poblada por los más primitivos y antiguos habitantes originales de Cuba, cuya actividad se restringía a la recolección de alimentos, la pesca y caza. El Faro Roncali, ubicado en el Cabo de San Antonio, testigo de naufragios se hace notar entre la belleza y la naturaleza que le acompaña desde el 15 de septiembre de 1850, fecha en la cual fue construido, la única edificación realizada en el período colonial en el extremo occidental.

Esta porción más occidental fue refugio de piratas y corsarios, y puerto de desembarque de la infame trata de esclavos; Guanahacabibes fue por su aislamiento, un punto de embarque y llegada de expediciones y cargamentos de armas de los patriotas durante la Guerra de Independencia, entre 1896 y 1897. A pesar de la guerra, se producía ganado, cera y miel, y el medio poseía condiciones excepcionales para adquirir allí maderas preciosas, alimentos y agua.

La extracción de madera y el carbón atraieron a un mayor número de familias desde finales del siglo XIX y surgieron así pequeños asentamientos humanos en el mayor de los abandonos, hasta que la Revolución se encargó de transformar el nivel de vida de los habitantes de la península. Hoy en día la región es eminentemente agrícola, siendo los principales cultivos los cítricos y el tabaco. Otro renglón de importancia económica es la pesca y, además, se cuenta con un programa de desarrollo turístico, que atrae cada vez a mayor cantidad de visitantes, debido a las riquezas de este ecosistema.

II.1.7. Hidrografía e hidrogeología

En la península de Guanahacabibes el escurrimiento superficial es prácticamente inexistente y se caracteriza por no presentar cobertura de sedimentos deleznales (areno-arcilloso). Las rocas que contienen el acuífero son principalmente carbonatadas y pertenecen al Neógeno-Cuaternario, estas están muy afectadas por los procesos cársicos, definiéndose como un acuífero cársico, libre con descarga de las aguas subterráneas al mar, donde se cumplen las elementales leyes hidrostáticas.

En toda la península de Guanahacabibes, el agua dulce se encuentra en forma de lentes de geometría variable en tiempo y espacio, en dependencia de las propiedades hidráulicas del acuífero, flotando sobre el agua de mar, la cual se localiza a una profundidad relativamente baja.

Aunque existe bastante homogeneidad en la hidrogeología de la península de Guanahacabibes, algunos autores lo dividieron en dos zonas: La Zona Oeste, que abarca desde el Cabo San Antonio hasta El Vallecito y la Zona Este, que comprende la parte más oriental del área de estudio, la misma se enmarca desde El Vallecito hasta Cortés (Hernández, 2001).

Blanco y Pereira (2011) plantean que la oscilación hiperanual del nivel piezométrico no es significativa entre el período húmedo y la época de sequía, este varía entre 0.3m - 0.7 m, respectivamente. La profundidad máxima de afloramiento del agua puede ser de hasta 9m en la Zona Este (Hernández, 2001). La conductividad hidráulica es muy variable, pudiéndose alcanzar valores mayores de 400 m/d, lo cual está en correspondencia con el alto grado de carsificación y heterogeneidad que tiene la roca acuífera.

En la península de Guanahacabibes se encuentra la mayor área lacustre del país con más de 120 lagunas entre las ensenadas de Guadiana y Cortés, con lagos como El Pesquero, Algodonal, Alcatraz Grande y otros de menor tamaño. Hacia la porción oriental de la península se encuentran lagunas cársticas como la del Valle San Juan, de 25 m de profundidad y cerca de 110 m de diámetro.

La península cuenta con 20 playas, las que ocupan 15,3 km de extensión (6% del total de costas). Entre las de mayor atractivo, por sus blancas y finas arenas y la bondad de sus fondos, resaltan Las Tumbas, Perjuicio, El Holandés, Las Canas y María la Gorda, situadas estas dos últimas en el litoral occidental de Cabo Corrientes.

II.2. Características geológicas

El corte estratigráfico de la península de Guanahacabibes representa un ejemplo del desarrollo geológico más reciente con una amplia presencia de rocas carbonatadas pliocénicas y cuaternarias, que han sido modeladas por procesos conformadores del relieve, sobre todo de tipo cársico (Denis y Díaz, 1993). La litología que se presentan en este sector está constituida principalmente por rocas calcáreas que dan lugar a un extraordinario relieve cársico, lo cual dificulta obtener las mediciones de los elementos de yacencia. A través de los trabajos de perforaciones se han comprobado que en las profundidades las capas manifiestan una yacencia casi horizontal. Hacia la parte norte del área afloran en superficie las formaciones San Cayetano, Guasasa y Paso Real.

II.2.1. Estratigrafía

La base del corte estratigráfico del sector de estudio está constituida por las Formaciones Vedado y Guane.

La Formación Vedado, carbonatada de ambiente arrecifal, constituye el núcleo principal de la superficie emergida de la península y las rocas de mayor distribución en el área (Figura II.3). La Formación Guane, terrígena de origen aluvial continental, aflora hacia el Este de la región. La edad de ambas formaciones se estima entre el Plioceno parte alta hasta el Pleistoceno Inferior.

La Formación Jaimanitas, de edad Pleistoceno Medio a Superior, representada por calizas arrecifales biodetríticas y coralinas, yace sobre la Formación Vedado, ocupando la primera terraza marina. También se encuentran los depósitos aluviales (Pleistoceno Medio a Superior) los cuales yacen discordantemente sobre las formaciones Guane, Paso Real y Cayo Piedras, constituyen por originalmente de una llanura aluvial que luego fue cubierta por el mar. Los materiales que entran en la composición de las arenas se han derivados de las cortezas de intemperismo de la Fm. Guane, y de la Fm. San Cayetano. Su límite superior es erosivo.

Durante la regresión del Wisconsin, sobre la Formación Jaimanitas, se depositaron las calcarenitas laminares con estratificación cruzada, que constituyen dunas eólicas. Extendiéndose, posiblemente al Pleistoceno superior, se encuentra la Formación Cayo Piedras de edad Pleistoceno Medio, compuesta por biocalcarenitas oolíticas. En el parte más superior del corte estratigráfico se observan depósitos Holocénicos de diversa génesis (Figura II.3).

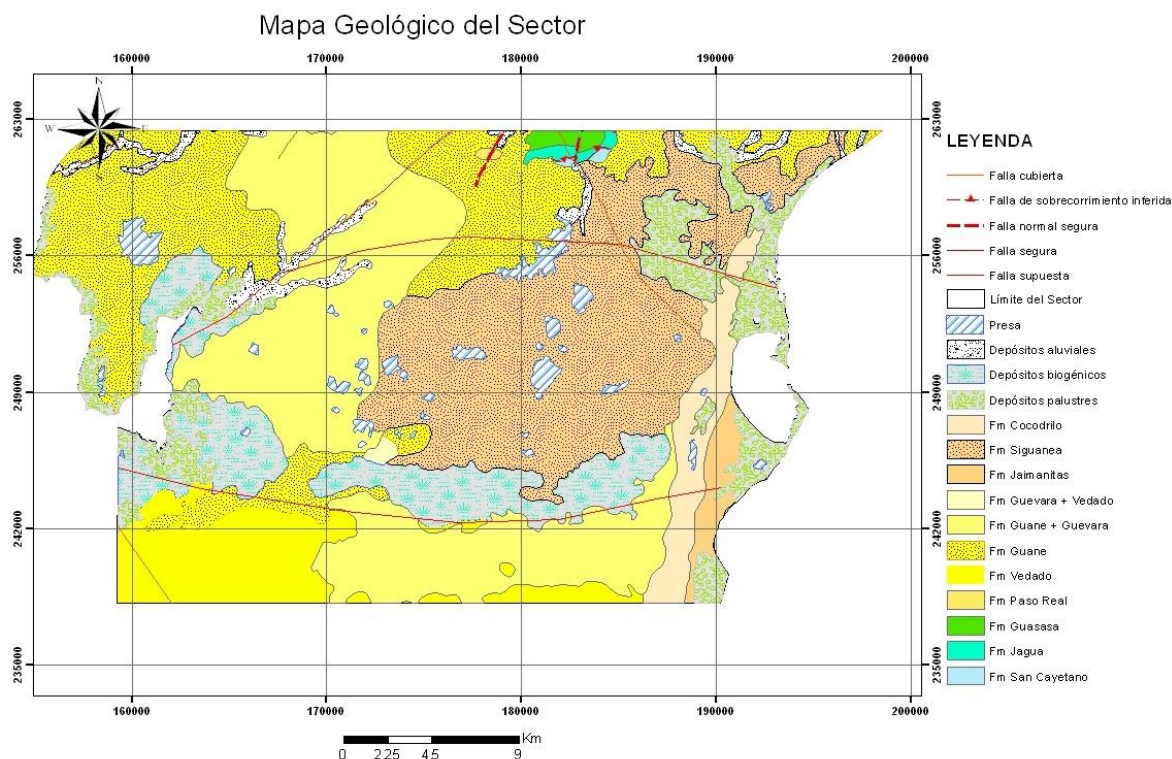


Figura II.3. Mapa geológico del sector del estudio a escala 1:25 000 (modificado por el autor)

A continuación, se describen las características estratigráficas de las formaciones del corte estratigráfico que presentan en el sector de estudio; para ello, utilizaremos las denominaciones dadas por diferentes autores recogidos en el Léxico Estratigráfico de Cuba (Álvarez, 2002).

Formación San Cayetano. (Sc)

Distribución geográfica: Desarrollada en toda la Cordillera de Guaniguanico, entre los pueblos de Guane y Soroa, provincia de Pinar del Río.

Litología diagnóstico: Intercalaciones de areniscas grises oscuras, de grano fino y medio, con lutitas y limolitas arcillosas grises o grises oscuras. Al intemperizarse toman colores rojizos y carmelitosos.

Relaciones estratigráficas: Se desconocen sus contactos inferiores. Está cubierta, concordantemente, por las formaciones Artemisa (Mbros. La Zarza), Francisco y Jagua (Mbros. Pan de Azúcar), y discordantemente, por las formaciones Guane, Paso Real y Villarroja.

Correlación: Es correlacionable, en parte, con las formaciones Agua Santa y Cañada, de Cuba Occidental; La Chispa, Loma La Gloria y la unidad informal esquistos verdes Felicidad, de Cuba Central. También es correlacionable con los depósitos metaterrígenos de la Fm. Arroyo Cangre, de la subzona Sierra de los Órganos.

Edad: Jurásico Inferior- Jurásico Superior (Oxfordiano medio).

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un mar somero, influido por sedimentación deltaica. En la secuencia de la Sierra de los Órganos la sedimentación carbonatada comenzó mientras todavía se acumulaban depósitos terrígenos.

Espesor: No sobrepasa los 6 000 m

Observaciones: La composición litológica de la Formación es bastante variada y en diferentes perfiles, las secuencias litológicas son distintas. Además, las complejas relaciones estructurales, en muchos casos, no permiten establecer categóricamente la posición estratigráfica de los complejos litológicos de esta unidad. La cuestión más difícil, y en ocasiones, imposible de establecer, es la presencia de los estratos que ocupan la posición más baja en el perfil, pero la mayoría de los autores consideran que las capas más antiguas son las más arcillosas y ricas en restos vegetales.

Formación Jagua. (jg)

Distribución geográfica: Se desarrolla en la Sierra de los Órganos, provincia de Pinar del Río

Litología diagnóstico: Calizas micríticas, esquistos arcilloso-margosos, lutitas calcáreas.

Relaciones estratigráficas: Yace concordantemente sobre la Fm. San Cayetano. Está cubierta concordantemente por el Gr. Viñales (Fm. Guasasa). En algunas regiones contacta tectónicamente con la Fm. Arroyo Cangre.

Correlación: Es correlacionable cronoestratigráficamente con las formaciones Artemisa y Francisco y en parte con el Gr. Gerona de Cuba Occidental; su parte baja lo es con la Fm. Saúco de Cuba Central.

Edad: Jurásico Superior (Oxfordiano Medio- Superior).

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente reductor nerítico poco profundo dentro de la plataforma. Es probable que sea un equivalente de la Formación San Cayetano de Cuba Occidental.

Espesor: Puede llegar hasta los 160 m

Formación Guasasa. (gs)

Distribución geográfica: Se desarrolla en la Sierra de los Órganos, provincia de Pinar del Río.

Litología diagnóstico: Calizas micríticas, calcarenitas y lentes de pedernales. Las calizas a veces son granulares y frecuentemente laminadas.

Relaciones estratigráficas: Yace concordantemente sobre el Mbro. Pimienta (Fm. Jagua). Está cubierta discordantemente por las formaciones Ancón, Guane, Manacas y Pons. En algunas regiones contacta tectónicamente con la Fm. Arroyo Cangre.

Correlación: Es correlacionable, en parte, cronoestratigráficamente con las formaciones Artemisa, Polier y el Gr. Buenavista de Cuba Occidental.

Edad: Jurásico Superior (Oxfordiano Superior)- Cretácico Inferior (Valanginiano).

Ambiente de sedimentación: Se depositó hasta el Tithoniano Inferior en aguas someras, comenzando después la deposición de sedimentos pelágicos.

Espesor: Oscila entre 300 y 800 m

Formación Paso Real (psr).

Distribución geográfica: Es la formación más extendida en el territorio cubano, constituyendo una faja discontinua entre Guane, en el extremo occidental de Cuba, y el sur de la provincia de Holguín.

Litología diagnóstico: Son característicos en ella los cambios litológicos bruscos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margosa-arenácea. En general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita) que contienen en algunos horizontes pirita, yeso, halita y lignito.

Edad: Oligoceno Superior- Mioceno Superior basal.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente sublitoral limitado y en áreas lagunares de circulación restringida, señaladas éstas por la asociación Ammonia-Ostrácodos y la presencia de yeso, halita, pirita y lignito en sedimentos arcillosos.

Espesor: Oscila entre 30 y 1 640 m (este último en el pozo Candelaria 1 e incluye al Miembro Baños).

Formación Guane (gne)

Distribución geográfica: Se desarrolla por el borde N de la llanura meridional de la provincia de Pinar del Río. También se ha observado al N de la ciénaga de Lanier, Isla de la Juventud. Igualmente, al noreste de Colón y al sureste de Sancti Espíritus.

Litología diagnóstica: Conglomerados, gravas, arenas y arcillas arenosas, débilmente cementados por arcillas. Presentan en sus depósitos estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada. El material clásico es redondeado y subredondeado. Su composición es oligomítica, con predominio de las rocas silíceas. El cemento arcilloso aparece en las partes no intemperizadas del corte compuesto por los siguientes tipos faciales: caolinítico, hidromicáceo-caolinítico y esmectítico. En su parte alta contiene concreciones ferruginosas y hardpan. Colores abigarrados.

Relaciones estratigráficas: Yace transgresivamente sobre las formaciones Agua Santa, Cañada, Capdevila, Esperanza, Guasasa, Manacas, Paso Real, San Cayetano Colón, Santa Teresa y Lagunillas. Está cubierta discordantemente por las formaciones Jaimanitas, Guevara y Villarroja. Lateralmente transiciona con la Formación Vedado.

Correlación: Es correlacionable con las formaciones Dátil, Bayamo y Río Maya de Cuba Oriental; así como con Vedado de Cuba Centro-Occidental y Alegrías del Archipiélago Sabana-Camagüey.

Edad: De acuerdo a su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente aluvial con influencia marina

Espesor: Según datos de perforaciones puede alcanzar hasta 50 m.

Formación Vedado, (vd)

Distribución geográfica: Se desarrolla en forma de franja estrecha y discontinua, en la costa N de las provincias de Artemisa, Mayabeque, La Habana, Matanzas y Península de

Guanahacabibes, y en la costa S de las provincias de Matanzas, Cienfuegos y Sancti Spíritus.

Litología diagnóstica: Calizas biohémicas coralino-algáceas y biodetríticas, masivas o con estratificación local poco clara, duras, a veces aporcelanadas, en parte porosas y cavernosas, recristalizadas, que contienen corales en posición de crecimiento o sus fragmentos, con frecuencia dolomitizadas. Su matriz puede ser micrítica o micrítico-arenítica. Contienen, por lo general, numerosas impresiones tubulares del coral *Acropora prolifera*. Contienen rellenos de un material rojizo carbonático-arcilloso con goethita. Puede contener lentes de calcarenitas. Colores blancos, amarillentos y a veces rosados. Relaciones estratigráficas: Yace, concordantemente, sobre la Formación Canímar (parte no diferenciada y sus miembros El Abra y Maica) y, discordantemente, sobre las formaciones Bellamar (parte indiferenciada), Cojímar, Güines, Paso Real y el Mbro. El Maíz (Formación Bellamar). Está cubierta, discordantemente, por las formaciones Cocodrilo y Jaimanitas. Transiciona, lateralmente, con la Formación Guane.

Correlación: Es correlacionable con las formaciones Guane, de Cuba Occidental, Río Maya, Dátil y Bayamo, de Cuba Oriental y Alegrías del Archipiélago- Sabana-Camagüey.

Edad: Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior

Ambiente de sedimentación: Son depósitos del complejo arrecifal. Es característica la asociación *Amphistegina*- *Archaias*.

Espesor: Hasta 196 m, según observaciones de L.L. Peñalver y J. Rudnicki, en una perforación realizada en Playa Girón

Formación Jaimanitas, (js)

Distribución geográfica: Faja casi continua que bordea la costa cubana, gran parte de los cayos adyacentes y la Isla de la Juventud. Compone prácticamente todo el zócalo rocoso de la plataforma marina insular.

Litología diagnóstica: Calizas biodetríticas masivas, generalmente carstificadas, muy fosilíferas, conteniendo principalmente conchas bien preservadas, corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos. Los bolsones cársticos a veces se encuentran rellenos por una fina mezcla carbonático- arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. Pasan a biocalcarenitas de granulometría y estratificación variables o masivas. En mayor o menor

cantidad, contienen fragmentos de sedimentos terrígenos, incluyendo calizas preexistentes. Es frecuente encontrar variaciones litofaciales y biofaciales. En general la cementación es variable y en su superficie presenta un casquete recrystalizado de evaporita y caliche combinados, de 1 a 2 m de espesor, por debajo del cual, en ocasiones, la roca aparece desintegrada, convertida en un material terroso. La coloración predominante es blancuzca, rosácea o amarillenta.

Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones, Grande, Güines, La Cruz, Mícara, Río Maya, Vázquez, Vedado, Versalles, Guanabo, los grupos Nipe (formaciones Júcaro y Río Jagüeyes), Remedios y la unidad informal calciruditas Feliz. Está cubierta discordantemente por las formaciones Salado, La Cabaña, Los Pinos, Guillermo y Playa Santa Fe y los depósitos innominados del Holoceno en el territorio emergido y en la plataforma marina insular.

Correlación: Puede ser correlacionada con las formaciones Camacho, Jamaica y Cauto de Cuba Oriental, y Siguanea de Isla de la Juventud.

Edad: Según datos radiométricos, criterios geomorfológicos y por su posición estratigráfica, su edad ha sido considerada como Pleistoceno Superior temprano. (Correspondiente al Sangamon)

Ambiente de sedimentación: En esta formación predominan las facies de playa, postarrecifal y arrecifal.

Espesor: Probablemente excede de los 10 m.

Formación Cayo Piedras (cyp)

Distribución geográfica: Se desarrolla en la mayor parte de la llanura cársica de la Isla de la Juventud y en pequeñas regiones de las penínsulas de Zapata y de Guanahacabibes. Depósitos parecidos aparecen en la región de Gibara, provincia de Holguín.

Litología diagnóstica: Biocalcarenitas, calcarenitas pseudoolíticas y oolíticas y calizas arcillo-arenáceas. Coloración blanco-amarillento a crema.

Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones Agua Santa, Cañada, Punta del Este y Vedado. Está cubierta discordantemente por la Fm. Jaimanitas.

Correlación: Es correlacionable con las formaciones La Cabaña y Versalles de Cuba Occidental y calcarenita López Orta de Cuba Central.

Edad: Pleistoceno Medio.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente sublitoral a litoral (facies de playa).

Espesor: No excede los 10 m, según datos de pozos.

Depósitos costeros marítimos - Materiales del Cuaternario, formados por arena arcillosa, arcilla arenosa, arcilla. El espesor aproximado es de 10–15 m.

Depósitos aluviales - Materiales del Cuaternario reciente, formados por arena gravosa, arcilla arenosa, arcillas. El espesor es muy variable en toda la zona desde 0.5m – 9.0 m.

Depósitos aluviales-proluviales - Materiales del Cuaternario más tardío, constituidos fundamentalmente por arenas, arenas arcillosas, arcilla arenosa y arcillas.

Depósitos del Neógeno-Cuaternario - Materiales arenosos, arena arcillosa, arcilla arenosa y arcilla.

II.2.2. Geomorfología

En cuanto a su geomorfología, la península de Guanahacabibes se corresponde con una llanura carsificada de origen marino con basculamiento geotectónico de 4 a 6 grados, principalmente hacia el norte, dando como resultado que su topografía se presente con un litoral norte en proceso de sumersión, en el cual existen formaciones de manglares y pantanos.

Denis y Díaz (1993) afirman que la evolución de la península está asociada a los eventos geológicos desarrollados desde el Oligoceno hasta la actualidad, no obstante, la hidrogeología también ha cambiado desde esa época hasta la actualidad. En el bloque oriental predominan las formas denudativas, siendo este el que topográficamente se encuentra más elevado. Los puntos más altos de la península se encuentran al sur en los acantilados, con alturas que pueden llegar hasta 20 m sobre el nivel del mar. En el bloque occidental predominan las formas acumulativas, manifestándose importantes áreas de pantanos interiores entre el abanico de barras arrecifales recientemente emergidas. A continuación, se describen los tres tipos del relieve emergidos que se clasificaron por Denis y Díaz (1993) de la siguiente manera:

- ✓ *Llanura marina abrasivo-acumulativa*, prácticamente no diseccionada, de edad Pleistoceno Medio - Holoceno, que se desarrolla a lo largo de toda la península, ocupando gran parte de su faja central y sur. Está conformada por dos terrazas marinas: Terraza marina abrasivo-denudativa de edad Pleistoceno Medio, donde afloran las rocas de la Formación Vedado, y conforma un escalón geomorfológico paralelo al litoral sur y Terraza marina abrasivo-acumulativa de edad Holoceno, donde afloran las rocas de la Formación Jaimanitas.
- ✓ *Llanura aluvial marina abrasivo-acumulativa* ligeramente diseccionada, de edad Pleistoceno Medio, donde afloran los depósitos aluviales marinos de la Formación Guane, ocupa el centro-este de la región.
- ✓ *Llanura acumulativa*, plana, muy pantanosa, de edad Holoceno, a la que corresponden los depósitos biogénicos palustres y de manglar.

Entre los tipos de relieve sumergido están *llanura acumulativa*, que forman los fondos de la costa norte y *llanura abrasivo-acumulativa* de la costa sur y oeste. Dentro de las formas del relieve más importantes se encuentran en formas marinas, barras paralitorales emergidas.

II.2.3. Tectónica

El comportamiento tectónico de la región está poco estudiado y se tiene muy poca información al respecto. De acuerdo con estudios realizados por (Denis y Díaz, 1993) se ha considerado la existencia de una falla que atraviesa la parte suroeste, ubicándose la ciénaga precisamente, en una zona de debilidad tectónica de naturaleza compleja (Figura 1.3) y no esclarecida aún. Es decir, la Ciénaga los Remates está ubicada en un graben, Esta zona es el área de afloramiento del acuífero.

Pérez *et al.*, (2004) plantean que entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano, intervino un fenómeno tectónico de forma abrupta en la evolución geológica de la región fragmentando el territorio Los estudios realizados por Denis y Díaz, (1993) muestran que en el Pleistoceno, ocurren movimientos geotectónicos que provocan el ascenso del territorio y su fraccionamiento, formándose canales entre las distintas partes fraccionadas, donde se produce el acarreo y deposición por las corrientes marinas del material derivado de la erosión del territorio emergido, dando origen a barras paralitorales que describen una especie de movimiento en abanico (Blanco y Pereira, 2011).

las estaciones pluviométricas asociadas (Anexos 25-34), a ésta información añadimos los datos de observaciones y controles de cada periodo del año hidrológico (2011-2012), que incluyó además de estos análisis, la medición de niveles (Anexo textual 3 y 8).

Consideramos que la Red Cal no está distribuida homogéneamente en toda el área de estudio, por tanto, usar sus datos solamente, para caracterizar los fenómenos y procesos que afectan la calidad del agua en este sector del acuífero, nos conduciría inexorablemente a interpretaciones erróneas acerca de la evolución y estado actual de la calidad ambiental del recurso. Es evidente que el propósito general de esta red estriba en la vigilancia físico-química y bacteriológica de los pozos de abasto a las poblaciones, para garantizar un servicio estable de agua con la calidad a las personas que viven en estos poblados, según las exigencias de las Normas Cubanas para el Abasto.

Teniendo en cuenta los elementos señalados anteriormente se procedió a la modificación de la red de investigación, añadiendo aquellos pozos de la red de investigación del INRH que no se monitorean en la Red Cal, por encontrarse inactivos para el propósito inicial de captación de aguas: por ejemplo, los pozos de 14 escuelas en el campo (ESBEC, IPUEC, IPA) (ver Anexo textual 1) y otros pozos que se mantienen en explotación. Esta red densifica la Red Cal y en su conjunto, los datos que pueden obtenerse a partir de ambas redes si son representativas de los fenómenos y procesos hidroquímicos que ocurren el sector de estudio. Es válido señalar, además, que las observaciones de aguas superficiales en el sector adolecen de una red de monitoreo representativa para el estudiar su calidad y las relaciones de transferencia con las aguas subterráneas.

III.1.1. Para el estudio hidrodinámico

La red de monitoreo de niveles se organizó a partir de los siguientes criterios:

1. La inclusión del mayor número de puntos de la red del INRH, puesto que los mismos normalmente disponen de series largas de observaciones (mayores de 15 años).
2. La cantidad de puntos y su distribución debían ser tales que permitiesen obtener información no sólo del sector con mayores problemas (la zona central y sur del área de estudio: Las Martinas - Manuel Lazo - Sandino) sino también del resto, incluyendo las áreas cabeceras de poblados del municipio Sandino, donde los signos de salinización eran también evidentes.

La red de control del estudio hidrodinámico se representa en el Anexo textual 3. Esta red de monitoreo debía contar con algunas características, tales como: Fácil acceso (próximos a caminos o carreteras), facilidad para la toma de muestras, información disponible (columna de pozos, equipamiento, acuífero captado, espesor saturado), existencia de puntos de bombeo próximos, entre otros.

III.1.2. Para el estudio hidrogeoquímico

Para el estudio hidrogeoquímico se seleccionaron 36 pozos para aguas subterráneas y 8 puntos para aguas superficiales, de ellos: 2 en la Ciénaga de Remates de Guane, 1 en laguna El Pesquero y 1 en Laguna Grande, 1 en el Río Cuyaguateje, uno en la estación pluviométrica La Bajada y 2 en mares (Mar Bahía Cortés y Mar Bahía Guadiana), los cuales reunían características óptimas como:

1. Localización del encargado de controlar la red.
2. Funcionamiento en el caso de los sondeos equipados para bombeo.
3. Facilidad para introducir las sondas en caso de los registros verticales.

La cantidad de puntos de control fue variable y con frecuencia hubo que rectificarlos a partir de la información obtenida en el campo y del reconocimiento sobre el terreno de aspectos tales como:

1. La facilidad de acceso al punto.
2. La posibilidad de toma de muestras en pozos equipados y/o pozos abiertos.
3. La accesibilidad a medidas “in situ”.
4. La representatividad del punto.
5. La eliminación de ciertos puntos por problemas diversos (sellado de la obra, desaparición del punto, etc.).

La red de control del estudio hidrogeoquímico se representa en el anexo textual 5.

III.1.3. Para el estudio biomolecular

Se establecieron 37 puntos de monitoreo (Anexo textual 4) en toda la península (a pesar de que la zona de estudio no abarca toda el área), que representan las características de

diferentes facies hidrogeoquímicas, incluyendo aguas subterráneas, superficiales y agua de mar.

III.2. Trabajos topográficos

Los trabajos topográficos ejecutados consistieron en modificar la cota topográfica de los pozos de monitoreo y su ubicación planimétrica-altimétrica. Utilizando un GPS modelo LEICA-SR20 (Figura III.2), que posee una precisión nominal igual a $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ p.p.m}$, se pudo realizar la ubicación espacial (coordenadas X y Y) de los puntos de monitoreo y se determinó la cota topográfica utilizando una nivelación técnica con doble puesta de instrumento, con una precisión de $0,50\sqrt{n}$ (n = distancia de la nivelación), partiendo de cotas conocidas de las redes geodésicas nacionales del sistema de altura Siboney.



Figura III.2. El GPS modelo LEICA-SR20

De acuerdo con el área de trabajo y los objetivos de esta investigación, se definió que la escala de trabajo a utilizar sería 1:25 000.

III.3. Metodología para el estudio de lluvias

III.3.1. Consideraciones sobre los datos existentes

El estudio se inicia tomando los datos pertenecientes a observaciones realizadas en las estaciones meteorológicas y pluviométricas. La ubicación geográfica de las estaciones referidas se muestra en la Figura III.1 Para el tratamiento se seleccionaron todas las estaciones (10), de ellas (7) se encuentran dentro del área de estudio, con datos no siempre continuos, pero confiables. De las 10 estaciones no hay ninguna de primer orden, tres son termopluviométricas (de segundo orden) y el resto son sólo pluviométricas (de tercer orden). Las estaciones meteorológicas objeto de estudio, sus coordenadas UTM, altitud (ALT), y pluviometría (P) se muestran en los Anexos 25-35.

Aunque el estudio hidrogeológico se centra en el sector de investigación, para el análisis de los elementos climáticos se amplía hacia fuera del sector, siendo de gran utilidad en el caso de la variable precipitaciones, que por supuesto, tiene gran dependencia de las características geográficas. Los datos de las series originales se han recopilado de las bases de datos existentes en el INRH.

Se ha realizado el inventario de 10 estaciones pluviométricas que pertenecen a la cuenca hidrogeológica Cuyaguateje. En el Anexo 25 se registran el número de orden según el Servicio Hidrológico Nacional, los centros hidrográficos correspondientes y las observaciones hasta 2014, (durante los años 1995-1997 no se habían recepcionado completamente por limitaciones del período especial), tal es el caso de los pluviómetros 3, 390, 396, 401, 477, algunos de ellos han prolongado la interrupción de las observaciones hasta finales de la década 90. Las estaciones de corto período de observaciones (hasta 9 años), como es el caso del pluviómetro 477 son inutilizables para el fin perseguido.

III.3.2. Estimación del período óptimo.

Los períodos óptimos que en el trabajo se adoptan se ajustan a los indicados por las publicaciones de la Organización Meteorológica Mundial, que recomienda un período mínimo de 30 años realizándose, en fechas posteriores, una modificación a 40 años para estudios climáticos de zonas costeras (Castillo et al., 1989).

El periodo considerado es de 34 años como mínimo (Pluviómetro Las Catalinas, (anexo 27), desde 1963 hasta 2014, teniendo en cuenta que el año hidrológico comienza en mayo y

finaliza en abril del siguiente año, por lo que en esta estación el período ha sido desde 1963/64 – 2013/2014. Este periodo varía de una estación a otra en concordancia con los registros de cada estación desde que se instaló hasta la fecha. En el caso de la estación Cabo de San Antonio las observaciones iniciaron en el año 1946 (anexo 35) y se han mantenido ininterrumpidamente por 65 años, lo que hace posible obtener con mayor confiabilidad predicciones futuras del comportamiento de esta variable en la región circundante al sector de estudio.

III.3.3. Estudio del régimen de lluvias

La metodología que se ha seguido en esta investigación se adapta a la que expone Heras (1976), similar al empleado por Nieto (1973):

1. Recopilación de los valores mensuales de precipitación en las estaciones seleccionadas.
2. Análisis de los datos de las estaciones con el fin de desechar aquellos que se han estimado anómalos, poco representativos, o que presentan una serie de datos muy incompleta; debido a esto, se han eliminado 7 estaciones correspondientes a series originales con menos de 30 años.
3. Aplicación del método U.S. Weather Bureau (Benítez, 1972) para las estaciones en cuyas series originales faltan datos de 3 meses, o menos, consistente en completar los datos ausentes por atribución de la media aritmética de 3 estaciones próximas de características similares, aproximadamente equidistantes. Para valores mensuales el método es preciso, siempre y cuando se cumplan los principios de proximidad de cotas similares, igual orientación y situados en la misma vertiente (Pulido-Bosch, 1979).
4. Comparación de los resultados con el método de correlación lineal, para el cual el valor permisible adoptado en la regresión se corresponde con un coeficiente de correlación $R \geq 0.7$.
5. Permanencia de algunas estaciones, con años completos faltantes o casi incompletos, que debido a la posición estratégica que tenían en el área de estudio y la importancia de las mismas son útiles para la obtención de los mapas de isoyetas.

6. Construcción de los mapas de isoyetas de medias estimativas, tomando como base las estaciones que tienen series con un mínimo de datos del 50% del período de 30 años (Figura IV.9, 10). El trazado se ha efectuado de forma automática con el programa Surfer, empleando los métodos de la “curvatura mínima”, “inverso de la distancia” y “Kriging lineal”, cuyos resultados al ser comparados permitió definir que el segundo se adecua mejor a las características del sector de estudio. Este programa se utilizó para todos los cálculos de interpolación espacial de los valores mensuales.
7. Se realizó un análisis de anomalías a las series existentes. El análisis de anomalías brinda una valiosa información que está relacionada con las desviaciones respecto a la media histórica de una serie de datos, y muestra la intensidad de los periodos de sequía y humedad (en series hidrológicas) en un área determinada. A su vez muestran la tendencia del comportamiento de estas, y guarda una estrecha relación con el clima, por lo que se puede tener una idea bien precisa de la incidencia del cambio climático en el régimen hídrico de una región. Este análisis se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{X_m - X_p}{X_p}, \quad \text{Donde A: anomalía de la serie; } X_m: \text{media anual; } X_p: \text{media de toda la serie.}$$

Las observaciones de precipitaciones han sido facilitadas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y el Centro Meteorológico Provincial del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) de Pinar del Río para las estaciones Isabel Rubio, La Bajada y Cabo de San Antonio, como estaciones completas, y el resto sólo de carácter pluviométrico. Los datos tomados son las medias mensuales de precipitación correspondientes a un período variable de 1963 a 2014.

Los datos ofrecidos por el servicio meteorológico han sido depurados y completados por métodos estadísticos (regresión simple, análisis estadístico gráfico, etc.). Han sido utilizados los programas Rock Works v.16 para el análisis de datos hidrológicos; Surfer, para la construcción de mapas de lluvias; y Excel y MiniTab v.16 para todo el procesamiento estadístico. Las series a utilizar no siempre son completas, siendo frecuente la ausencia de datos en determinados años y la presencia de errores en los existentes (Anexo 26-35). Esto hace que la utilización de los valores disponibles ofrezca poca garantía

en algunos casos; si lo que se pretende es obtener resultados fiables, entonces es necesario elaborar previamente los datos disponibles, según los métodos estadísticos, con la finalidad de detectar y corregir los errores presentes en ellos, así como para completar las series en las que faltan algunos de estos datos.

III.4. Metodología para el estudio hidrodinámico

III.4.1. Realización de controles y toma de datos en el campo

Las mediciones de los niveles piezométricos se realizaron en 22 pozos mediante un monitoreo mensual durante nueve meses (agosto 2011- abril 2012). Partiendo de esta premisa, las medidas se realizaron con sonda eléctrica equipada con 100 m de cable anti-alargamiento con una precisión de $\pm 0,5$ cm (Figura III.3 a y b).

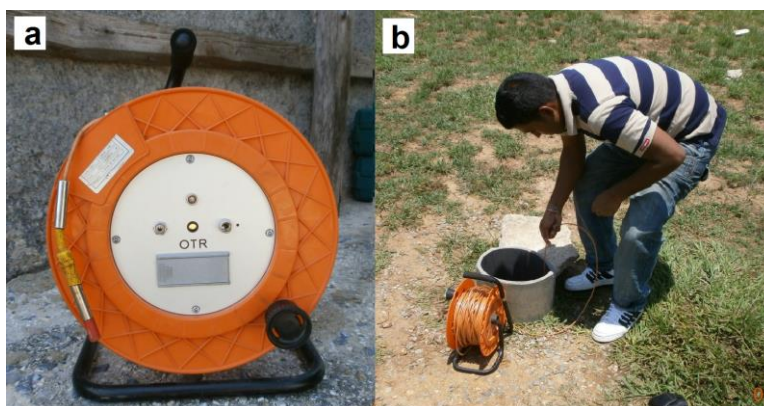


Figura III.3. a) Sonda eléctrica portátil b) Medición “In situ” de la profundidad hasta el NE del pozo (Cortesía de la tutora)

Entre las exigencias que se mantuvieron constantes durante las mediciones se destacan las siguientes:

- ✓ Frecuencia de medida mensual.
- ✓ Toma de datos en condiciones estáticas (aunque de antemano se sabía que este era un concepto relativo en el sector occidental - central del acuífero, muy afectado por la sobreexplotación).
- ✓ Realización de medidas en el conjunto de la red en el menor tiempo posible (el diseño de la misma permitía completar su medida en 48-72 horas).

- ✓ Empleo del mismo equipo en las sucesivas campañas, y que éste fuese manejado siempre por la misma persona con la finalidad de tratar de mantener constantes los errores de medición.
- ✓ Realización de medidas en la misma fecha (hacia los días 27, cada mes).

En el mes agosto 2011, cerca del pozo de abasto RGB 179, estaban bombeando agua por lo cual se dificultó la obtención de mediciones. También en septiembre 2011, en el pozo 29 (IPA Marien Ngoubi), no se midió el nivel de agua por llevar más de 12 horas de bombeo.

III.4.2. Elaboración y tratamiento de los datos

En esta fase se diseñó un archivo introducir datos de campo (cota topográfica del pozo, altura de referencia y profundidad hasta el agua), obtener salidas numéricas y/o gráficas de profundidad del agua y de nivel piezométrico y mantener actualizada la red permanentemente por altas o bajas de puntos.

Con los resultados de las salidas numéricas se realizaron diagramas de evolución temporal de niveles, así como mapas de niveles piezométricos que permitieron conocer el funcionamiento hidrodinámico del sistema y los cambios experimentados durante la investigación.

III.5. Metodología para el estudio hidrogeoquímico

III.5.1. Realización de observaciones

Los controles se realizaron mediante un monitoreo mensual durante los meses junio 2011 y agosto 2011 en 18 puntos de observaciones (Anexo textual 9,10, 11). Se siguió el criterio de mínima profundidad de la toma de muestra (siempre que fue posible) con relación al nivel estático, para el procesamiento estadístico y espacial, criterio que se fundamenta en la similitud de profundidad de colocación de las tomas de agua para la explotación. Se trabajó intensamente en la limpieza de datos a partiendo de su organización en tablas, el balance iónico, y la no inclusión en el procesamiento y análisis de aquellas muestras que no fueron tomadas en los pozos de la red de investigación, de esta forma las aguas superficiales de lagunas, ríos, ciénagas, lluvias y mares fueron analizadas independientemente, agrupándolas según su localización y composición.

Para ello se tuvo en cuenta la naturaleza de la red en la determinación de diferentes parámetros físico-químicos:

1. En la red de calidad se contó con las concentraciones de aniones y cationes principales, los análisis isotópicos (Carbono 14, Deuterio y Tritio), alcalinidad total, CO₂, potencial redox, así como de conductividad eléctrica, temperatura, pH, dureza, TDS.
2. Para el monitoreo de la intrusión marina se dispuso de datos de la concentración en Cl⁻ y de conductividad eléctrica, y las medidas de esta última se realizaron en dos maneras:

- a) Medidas instantáneas en diferentes profundidades (Perfiles verticales de CE).

Los datos de CE, temperatura y presión de agua se registraron mediante la denominada "sonda DL/N70" (Figura III.4) en cinco pozos (Pozo-3, Pozo-18, Pozo Pacheco y Pozo-33), variando la profundidad.

- b) Medidas continuas en una profundidad fija.

Las medidas continuas en una profundidad fija se llevan a cabo mediante la "sonda DL/N70" instalada a una profundidad de 39 m aproximadamente en el pozo 18 y cada una hora, durante nueve meses (agosto 2011 – abril 2012) se registraron automáticamente los datos de CE, temperatura y presión de agua en dicha profundidad. Con el apoyo del software "DL/N70" se convirtieron los datos a formato digital.



Figura III.4 Sonda DL/N70 (Multiparamétrica: mide conductividad eléctrica (CE), Temperatura y Presión de agua)

El planteamiento de cada uno de estos controles responde a los objetivos siguientes:

- ✓ Seguimiento de los cloruros en puntos de la red situados en los sectores de mayor riesgo del acuífero por salinización.
- ✓ Determinar las variaciones espaciales de los parámetros físico-químicos, por lo que en el diseño de la red se tuvo en cuenta que los puntos seleccionados debían estar distribuidos espacialmente, de forma que proporcionasen información sobre la mayor parte de la superficie objeto de estudio (836,4 km²).
- ✓ Determinar las variaciones estacionales de los parámetros en el seguimiento del fenómeno de salinización, seleccionándose entre ellos la conductividad y los cloruros.

En cuanto a los análisis de las aguas de lluvia, se tomaron tres muestras en los meses septiembre y octubre, en la estación pluviométrica de la Bajada, para realizar los ensayos químicos de componentes mayoritarios e isotópicos de las aguas de lluvia que precipita sobre la península de Guanahacabibes (Figura III.5).



Figura III.5. Muestras de agua tomadas para los análisis químicos e isotópicos

III.5.2. Método de toma de muestras

Los procedimientos para la toma de muestras y análisis químicos fueron uniformes a fin de garantizar la posibilidad de comparar los resultados de análisis procedentes de puntos de control muy distantes, y muestreados por diferentes personas, mediante diversos sistemas de toma de muestras, además de analizados en diferentes laboratorios.

A continuación, se describe el procedimiento utilizado para la toma de muestras en esta investigación.

1. Las muestras se tomaron por un batómetro.
2. Tras la toma de cada muestra, los envases fueron correctamente lavados con ácido nítrico diluido al 30% y enjuagados 3-4 veces con agua destilada.
3. Los envases fueron nuevos de polipropileno y de cierre hermético, con doble tapón (interno y externo).
4. Antes de recoger las muestras se lavaron las botellas 2-3 veces con el agua de la captación. Los envases se llenaron hasta el borde, previa adición de los conservadores necesarios, procurando no dejar una cámara de aire entre el agua y el tapón de cierre.
5. Las muestras destinadas al análisis de cationes fueron filtradas in situ con una membrana filtrante de tamaño de poro de $0,45\ \mu\text{m}$ (Figura III.6), para prevenir la adsorción o desorción y acidificadas con ácido nítrico hasta un pH inferior a 2.



Figura III.6. Proceso de filtración de las muestras destinadas al análisis de cationes

III.5.3. Determinación de los parámetros físico-químicos fundamentales en agua del acuífero y en agua de lluvia

La temperatura, conductividad eléctrica (CE), pH y Eh se midieron *in situ* utilizando los equipos: conductímetro, pHmetro y medidor redox (Figura III.7 a y b), corroborándose en el laboratorio.

En cuanto a los análisis de los componentes mayoritarios de las muestras del acuífero, se realizaron en los laboratorios de análisis químicos de la Universidad de Molise, Italia y en el laboratorio del INRH de Pinar del Río, con el objetivo de tener mayor confiabilidad y validar los resultados.

Los análisis hidrogeoquímicos de las aguas de lluvia se realizaron en el laboratorio del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Pinar del Río, procurando siempre que la ejecución de los mismos fuese lo más rápida posible (a lo sumo dos días de desfase), manteniendo las muestras en cámara frigorífica a 4 °C, tras haber añadido “*in situ*” los conservantes adecuados a cada caso particular.

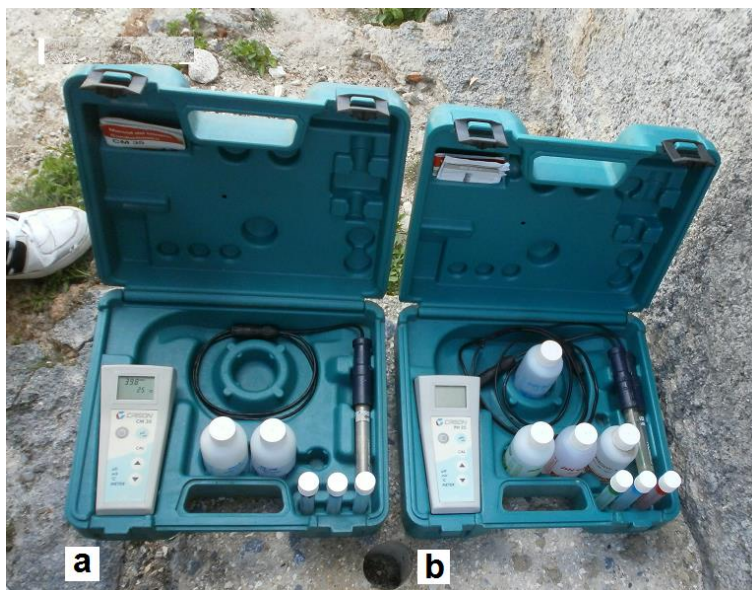


Figura III.7. a) Conductímetro b) Medidor redox y pHmetro

En el anexo textual 7 se refleja la denominación de cada ensayo, así como el método utilizado para los análisis de laboratorio.

Las técnicas desarrolladas en cada uno de los ensayos se corresponden con las descritas en los Métodos Estándar que aparecen detallados en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Ed. 20th. 1998”.

Los datos de los resultados de los análisis químicos de los meses junio-2011 y agosto-2011 y las aguas de lluvia, se muestran en los anexos textuales 9, 10, 11, 12, 22a y 22b. Las concentraciones de los iones mayoritarios están expresadas en mg/L.

III.5.4. Verificación secundaria

A partir de los resultados analíticos se determinó el error del balance iónico (Anexo textuales 12, 14, 17), empleando la ecuación (1). La interpretación se realizó según la tabla III.1.

Tabla III.1 Error permisible en análisis químicos

$\sum \text{aniones (meq/L)}$	<i>diferencia aceptable</i>
0-3.0	$\pm 0.2 \text{ meq/L}$
3.0-10.0	$\pm 2\%$
10.0-800	5 %

$$(1) e = \frac{\sum cat - \sum ani}{\sum cat + \sum ani} \times 100$$

e (%): error de balance (meq/L)

$\sum ani$ y $\sum cat$: suma de aniones y suma de cationes (meq/L).

III.5.5. Elaboración y procesamiento de datos

Antes de la interpretación de los resultados, los datos fueron elaborados y tratados principalmente en soporte informático para archivo y salida gráfica y/o numérica, tales como: Saphiq (Álvarez y Fagundo, 1991), Surfer (v. 12), Rockworks (v.16), Grapher (v. 10), Excel, ArGIS (v. 10.1), Minitab (v.16). También se elaboraron gráficos y mapas de isolíneas que agilizaron el trabajo y permitieron seguir la evolución temporal y espacial de las principales características hidrogeoquímicas, sus tendencias de variación, su influencia en la mayor o menor salinidad de determinados sectores, etc., aspectos de gran interés para la interpretación del fenómeno de salinización.

El soporte informático para archivo y tratamiento de datos hidrogeoquímicos se diseñó de forma que permitiera esencialmente:

- Almacenamiento de un gran volumen de información.
- Modificación y actualización de los datos.
- Cálculo automático de las relaciones iónicas de interés en el estudio, tales como: $rCl^- / rHCO_3^-$, rSO_4^{2-} / rCl^- y rMg^{2+} / rCa^{2+} , rBr^- / rCl^- .
- Transformaciones de unidades (por ejemplo, en los ficheros de datos hidrogeoquímicos se convierten los mg/L en meq/L y % meq/L).
- Obtención de salidas numéricas y/o gráficas de forma selectiva.

III.5.5.1. Análisis exploratorio de datos

Inicialmente se realiza un análisis exploratorio de datos a partir de las medidas de tendencia central y de dispersión (media, mediana, varianza, curtosis, asimetría, coeficiente de variación y otros). Este análisis tiene como propósito determinar el comportamiento de la distribución de los datos (normal, lognormal, o si no se ajustan a una distribución teórica de probabilidad), así como, predecir el comportamiento inicial de cada parámetro y su variabilidad espacial.

Media: Es la media aritmética de la distribución

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Mediana: La mediana es también llamada percentil 50, es el valor para el cual la mitad de los datos son menores y la otra mitad están por encima de este valor.

$M = X_{(n+1)/2}$ si n es impar y si n es par $(X_{n/2} + X_{n/2+1})/2$.

Asimetría: Describe la simetría de la distribución relativa a la distribución normal. En la distribución normal la asimetría tiene valor cero, un valor negativo indica una cola a la izquierda y un valor positivo indica una cola a la derecha.

$$\alpha_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^3 / S^3$$

Curtosis: Describe la esbeltez de la distribución. La distribución normal tiene curtosis igual a cero (mesocúrtica). Distribuciones más agudas, con colas relativamente anchas (leptocúrticas), tienen valores de curtosis mayores que cero, y las distribuciones más bien achatadas en el centro (platicúrticas), tienen valores menores que cero.

$$\alpha_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^4 / S^4$$

Coeficiente de Variación: Es una medida de la variación relativa de los datos $CV = S/X_m$ y en porcentaje como: $100 CV = 100 (S/X_m) \%$. Proporciona una comparación entre la variación de grandes valores y la variación de pequeños valores. Las técnicas de Geoestadística Lineal producen buenos resultados cuando el coeficiente de variación es menor que uno, $CV < 1$. Para $CV > 1$ se recomiendan técnicas Geoestadística no lineal.

Histograma simple con ajuste

Parte inicialmente de un histograma que representa en el eje de las abscisas los rangos de la variable a analizar $rCl^-/rHCO_3^-$, rSO_4^{2-}/rCl^- , rMg^{2+}/rCa^{2+} y rBr^-/rCl^- , en las ordenadas la frecuencia con que aparece este valor. Posteriormente se ajusta una curva de distribución normal. Para evaluar la exactitud de los datos que alcanzan el valor objetivo (percentil 50%) y si estos se ajustan a una distribución normal o lognormal

CDF (Curva de distribución acumulada)

Las gráficas cdf empírica se emplearon para evaluar el ajuste de las distribuciones a sus datos o para comparar diferentes distribuciones de muestra. Por opción predeterminada, las gráficas incluyen una función de distribución acumulada empírica (cdf) con los datos de la muestra y una función de distribución acumulada normal ajustada (cdf). El uso de las curvas de distribución de frecuencia se emplea para ver en qué grado la distribución de los datos originales se ajusta a una distribución normal.

Pruebas de normalidad

Las hipótesis estadísticas son la transformación de las hipótesis de investigación, nulas y alternativas en símbolos estadísticos. Es una expresión en términos estadísticos de las relaciones estadísticas deducidas de las hipótesis de investigación.

Para probar la normalidad de una población se emplean varias pruebas de hipótesis entre las más usadas encontramos la Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Chi-Cuadrado y otras.

El análisis de la distribución de los datos se efectuó a partir de la prueba Anderson-Darling. En la misma se parte de la hipótesis nula (H_0) con el supuesto de que los datos se ajustan a una distribución normal y la hipótesis alternativa de que si cumple con este postulado. El nivel de significación del error es de 0.05 y la prueba a realizar es de una sola cola. El análisis parte del cálculo del estadígrafo de la media y esta probabilidad calculada (p) se compara con el nivel de significación α , cuando $p > \alpha$ no se rechaza H_0 .

III.5.5.2. Análisis multivariado

El objetivo de aplicar esta técnica geoestadística es determinar la contribución de un conjunto de índices originales de una población, para obtener un número determinado de factores. Los factores de estudio son los llamados factores de riesgo, variables

independientes o explicativas. Los valores de mayor repercusión son denominados factores comunales y los restantes no comunales o singulares. La influencia de estos últimos sobre el sistema de variables inicial no presenta una regularidad definida, sino que poseen un comportamiento aleatorio respecto al efecto de los comunales.

El modelo de análisis factorial se expresa por la siguiente ecuación matemática.

$$X_j = \sum_{r=1}^q a_{jr} f_r + e_j \quad (1)$$

Dónde X_j : variables originales, "p" x "q": número predicho de factores

$\sum_{r=1}^q a_{jr} f_r$: representa la influencia de q factores comunales sobre la variable X_j

a_{jr} : Coeficiente que representa la correlación de j' - enésima variable sobre el r' -enésimo factor

f_r : r' - enésimo factor

e_j : Varianza única relativa de variables originales X_j . Singularidad de varianza

X_j : representa la influencia aleatoria de p – q factores no comunales o singulares.

Estos índices son expresados en términos de vectores de un sistema de coordenadas ortogonales, en que un componente representa la magnitud, agrupada conforme a las relaciones entre sí. Esas agrupaciones de vectores pasan a ser, denominados factores, que son obtenidos por las proyecciones de los vectores sobre esos ejes o carga factorial.

Es necesario aplicar la rotación de estos factores; la finalidad de esta rotación es maximizar estos factores, colocando estos ejes en varias posiciones, lo cual permite que cada factor pueda ser interpretado con la mayor correlación posible con el menor número de variables iniciales posibles. Para resolver dicho problema se aplica la Regla de Kaiser, según esta regla deben ser considerados todos los factores que posean varianza mayor o igual a uno. En la práctica se aconseja considerar como factores aquellos componentes principales con varianza mayor o igual a 0.7. Es necesario la aplicación de un criterio de maximización de la varianza, para ello se emplea la rotación de estos factores. Para realizar este procedimiento se emplean diversos algoritmos. En nuestro caso usamos varimax.

III.5.5.3. Análisis variográfico

En la geoestadística el concepto del variograma es uno de los más importantes. En Journel (1978) y David (1977), se define el variograma como la varianza de las diferencias de los valores de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia h , o sea:

$\text{Var}(x_i, x_{i+h}) = \text{Var} \{Z(x_i) - Z(x_{i+h})\} = 2 \gamma(x_i, x_{i+h})$ donde la magnitud:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Este análisis se realizó para determinar la continuidad espacial de los factores determinados anteriormente. Esta herramienta juega el rol central en la geoestadística, es denominado el prerrequisito para la estimación Geoestadística. Los parámetros del semivariograma caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo que son: la discontinuidad en el origen (Efecto Pepita), el valor máximo de variabilidad (Meseta), y el área de influencia de la correlación (Alcance).

El semivariograma muestral debe ser considerado solamente para pequeñas distancias por lo que generalmente, se estima para valores de (h) menores que la mitad de la distancia máxima ($h < d_{\max}/2$). La elección del número de intervalos es arbitraria. No obstante, se considera que un número máximo de 25 intervalos es suficiente para cualquier propósito, y un mínimo de 10 debe ser usado para determinar con precisión el rango y la meseta del semivariograma.

El cálculo del semivariograma está relacionado con: las direcciones (α, β) en que se estudiará la variabilidad del atributo de interés y las distancias (h) en las cuales se quieren obtener los valores del semivariograma. El ángulo que fija la dirección debe variar entre 0 y 179 grados, lo que requiere para no ser estrictos en el cálculo, de definir tolerancias angular $(d\alpha, d\beta)$ y lineal (dh) .

Para cada distancia (h) , calcular la expresión (1), con la cantidad de pares que se encuentran separados a una distancia $h-dh \leq h \leq h+dh$, y que estén incluidos en los ángulos $(\alpha-d\alpha \leq \alpha \leq \alpha+d\alpha)$ para dos dimensiones y además $(\beta-d\beta \leq \beta \leq \beta+d\beta)$ para tres dimensiones, donde α y β son los ángulos definidos por la dirección de la recta que une los dos puntos del par en cuestión. A partir de los datos proporcionados por el variograma teórico se realizará la estimación por krigeaje.

III.5.5.4. Estimación

Existen varias técnicas de estimación muy utilizadas en la estimación de recursos, las cuales son: Kriging Ordinario, Aproximación por Polígonos, Interpolación Triangular, Splines Cúbicos y el Método del Inverso de la Distancia. De las técnicas de estimación mencionadas con anterioridad, nos enfocaremos en el Kriging Ordinario y el Método del Inverso de la Distancia. El análisis de las variables que intervienen en el fenómeno de intrusión marina se realizó empleando el interpolador inverso de la distancia. La geometría de la red posee las siguientes características: $X_{min}=153820$, $X_{max}=197475$, $Spacing=25$, $Y_{min}=238190$, $Y_{max}=262450$, $Spacing=25$.

III.6. Metodología para el estudio biomolecular

Se realizó con el objetivo de conocer la relación y distribución de la comunidad microbiana con las facies hidroquímicas de aguas subterráneas del acuífero en la Península de Guanahacabibes. Para los análisis bacteriológicos se tomaron muestras de aguas en 37 puntos de observaciones, en botellas estériles de 1,000 ml y transportadas en condiciones de refrigeración al laboratorio.

Los procesos de filtración se realizaron dentro de las 2 horas posteriores a la toma por los métodos clásicos de filtración de agua con membranas estériles filtrantes (GN-6 Metricel, tamaño de poro de 0.45 μm), y se hizo el diagrama de clúster de los perfiles de DGGE con el apoyo del software FPQuest, además usamos los datos proporcionados por la Red Cal del INRH, el NMP de Coliformes totales y fecales como criterio valorativo de la calidad bacteriológica de los pozos de abasto de los poblados situados en el sector de estudio. .

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados

IV.1. Régimen de precipitaciones en el sector

En los estudios ambientales de acuíferos resulta necesario conocer, con la mayor fiabilidad posible, la precipitación caída en el sector de investigación con el propósito de calcular los valores de la infiltración directa de la lluvia (transferencia de lluvia al acuífero) y su variación tanto en el espacio como en el tiempo, así como las implicaciones de éstas en la calidad ambiental del agua.

IV.1.1. Análisis univariado

Los datos fueron procesados por medio de la estadística univariada con el propósito conocer la ley de distribución que siguen, para garantizar los requerimientos de las pruebas estadísticas que exigen comportamiento normal u otra función de densidad. La tabla IV.1 resume los resultados de este análisis.

Tabla IV.1. Resultados del análisis exploratorio a las series temporales de precipitaciones en las estaciones pluviométricas del sector, 1949-2013

Pluviómetros	N años	Xm(mm) Lluvias medias			S (mm) Desviación Estándar			Test Normalidad	
		Anual	Húmedo	Seco	Anual	Húmedo	Seco	A-D	ρ
Las Catalinas	31	110,3	165,42	57,80	35,92	54,11	31,66	0,190	0,891
C. San Antonio	65	119,8	184,96	54,68	27,16	47,77	23,00	0,584	0,123
Isabel Rubio	46	110,6	167,88	53,44	30,78	49,85	25,05	0,384	0,382
La Bajada	37	115,6	175,91	55,23	29,91	47,32	31,39	0,294	0,581
Pasada de Marín	49	96,42	141,61	49,55	28,45	46,89	28,49	0,229	0,798
Laguna Grande	43	123,7	191,00	56,49	29,91	51,37	26,09	0,214	0,840

Nota: en rojo se marcan las observaciones de estaciones que siguen una distribución lognormal.

Los datos de las estaciones pluviométricas siguen un comportamiento desigual, en dos estaciones de las cuatro enclavadas en el sector de estudio, los datos siguen un comportamiento lognormal: la Estación Meteorológica Isabel Rubio y el Pluviómetro de Las Catalinas. La ley de distribución que siguen los datos de las estaciones restantes es normal: Hidrológica Laguna Grande, Pluviómetro de Pasada de Marín, Meteorológicas La Bajada y Cabo de San Antonio. Las estaciones meteorológicas La Bajada, localizada a

11,95 km del límite mínimo por el eje de las abscisas y a unos 2 km de la costa se incluyó en los análisis por su cercanía al sector de investigación. La Estación Meteorológica Cabo de San Antonio se encuentra muy distante del área de estudio, sin embargo, a los efectos de estudios del clima, (especialmente la variable precipitaciones) resultó muy conveniente emplear sus observaciones, no solamente por la confiabilidad de su registro histórico, sino por la información que aporta. El gráfico de la Figura IV.1 representa el comportamiento lognormal de los datos de la estación de Isabel Rubio.

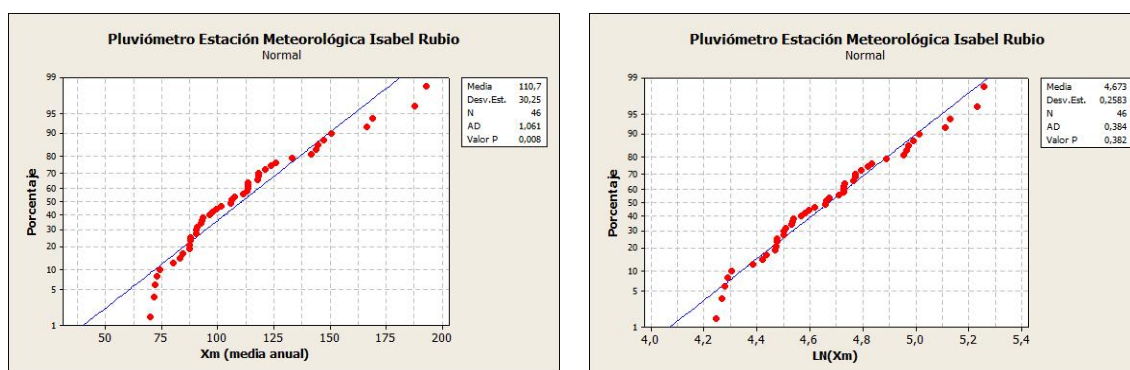


Figura IV.1. Prueba de normalidad Anderson Darling para las precipitaciones medias anuales en (mm), serie 1968-2013

El comportamiento de la variable precipitaciones medias en el pluviómetro de Laguna Grande se muestra en la Figura IV.2, aquí se aprecia que los datos obtenidos en el pluviómetro siguen una distribución normal, hecho que por demás quedó demostrado con la prueba de normalidad Anderson Darling (Tabla IV.1).

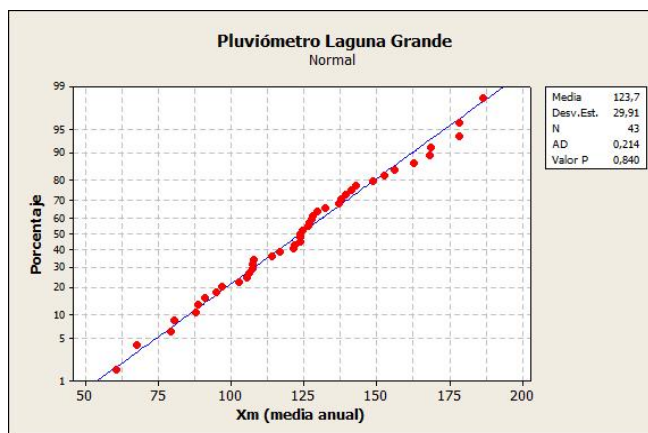


Figura IV.2. Precipitaciones medias en el pluviómetro de la estación hidrológica Laguna Grande, serie 1971-2013

IV.1.2. Variabilidad espacial de las precipitaciones

Durante el año hidrológico 2011 se observa en los mapas de isoyetas (Figuras IV.3 y IV.4) una distribución espacial con patrones estacionarios similares. El comportamiento de la lluvia por estaciones muestra que, tanto en el periodo seco como en el lluvioso, las zonas de recarga del acuífero situadas hacia el norte del sector recibieron la menor cantidad de precipitaciones registradas: 20-28 mm en el periodo seco y 160-180 mm en el periodo lluvioso.

Las áreas ubicadas al NW, aledañas a la estación 367 (Laguna Grande) recibieron una mayor cantidad de precipitaciones: 32-36 mm en el periodo seco, mientras que el lluvioso de 184-204 mm. De forma análoga el área SE, en las inmediaciones de la estación 121 (Pasada de Marín) registró un saldo favorable de precipitaciones con relación al área N-NE durante el estiaje 36-52 mm y 184-188 mm en la estación lluviosa.

El área S-SE muestra el mayor acumulado de precipitaciones durante el estiaje. La cantidad de agua infiltrada, como resultado de la pobre cubierta sobre las formaciones carbonatadas, contribuye a la recuperación de los niveles (hecho favorable), aunque la calidad se puede ver afectada por los arrastres de sólidos hacia las captaciones.

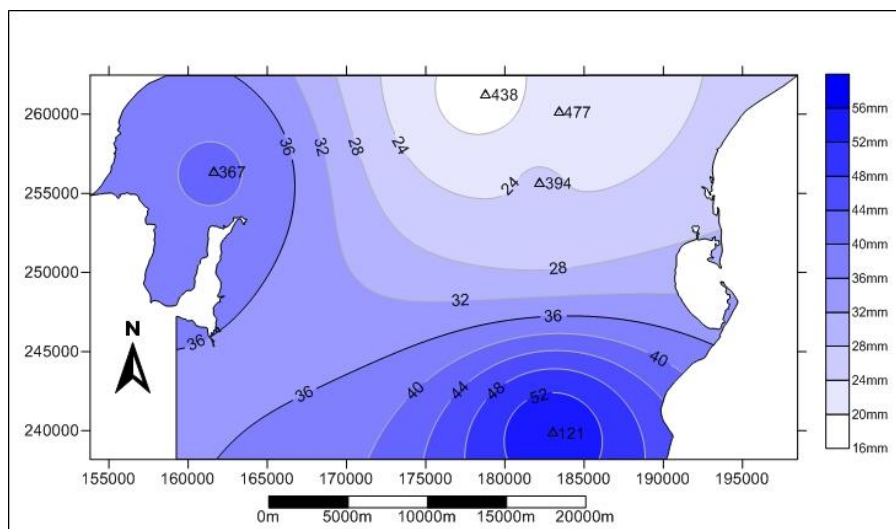


Figura IV.3. Mapa de isoyetas del sector este del acuífero Guane, periodo seco 2011

Las precipitaciones medias en el periodo de estiaje no superaron la media histórica de la serie para el pluviómetro de Laguna Grande, mientras que el registro del pluviómetro de Pasada de Marín superó esta cifra (Tabla IV.1). La situación para la estación lluviosa fue favorable para ambas estaciones (NW y SE), pues superaron la media histórica de la serie.

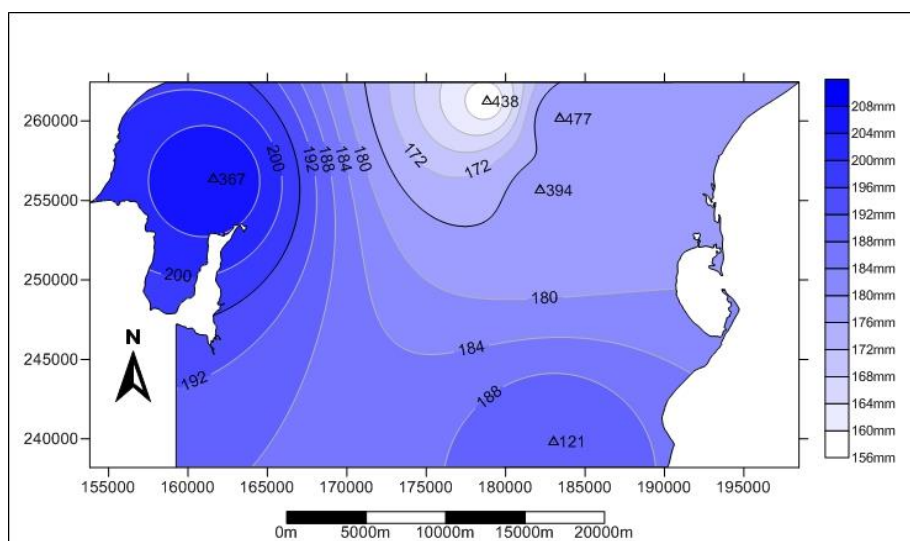


Figura IV.4. Mapa de isoyetas del sector este del acuífero Guane, periodo húmedo 2011

En la figura, en el área NW se registró el mayor acumulado de precipitaciones, favoreciendo la recuperación de niveles y calidad del agua, en sentido general. La cubierta del acuífero alcanza un mayor espesor, actuando como un filtro natural para las aguas de

escorrentía (Figura II.3), lo cual favorece la calidad del agua en el acuífero, pero a su vez retarda la llegada de las aguas meteóricas infiltradas.

Si observamos el comportamiento espacial de los mapas de lluvias medias para los años hidrológicos 2012 y 2013 (Anexo gráficos 4-5) y los comparamos con los mapas de lluvias del 2011, notaremos de inmediato una regularidad cíclica en el patrón estacionario, particularmente las estaciones pluviométricas situadas en la lineación SE-NW, coincidente con la dirección predominante de avance de la cuña de intrusión salina. Las precipitaciones registradas en estas estaciones responden a cambios climáticos regionales, desde el sur la influencia del Caribe occidental y por el norte, las corrientes del Golfo de México, la singularidad de la dirección de los vientos y otros factores climatológicos.

IV.1.3. Variabilidad de las precipitaciones en el tiempo

El análisis descriptivo muestra una gran variabilidad temporal de las precipitaciones. En todas las estaciones pluviométricas algunos meses las precipitaciones han sido nulas, principalmente en los meses de enero-abril. Los valores medios de las precipitaciones oscilan en un rango 49,55-191,00 mm/mes, con máximas que superan los 500 mm/mes, y en algunos casos los 1.000 mm/mes. Los meses que muestran valores extremadamente elevados de lluvia mensual acumulada, pueden ser explicados por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos ocurridos en el área.

La lluvia tiene un marcado componente estacional, reconociéndose claramente dos estaciones en el año, de acuerdo con la distribución de la lámina de lluvia. Un período menos lluvioso, extendido de noviembre a abril, con una lámina total media de aproximadamente 54,53 mm y una estación lluviosa, de mayo a octubre, en la que precipitan, como promedio, 170,13 mm. El período lluvioso presenta una distribución bimodal, con dos máximos: uno en junio y otro en septiembre. El mínimo del período lluvioso ocurre en el mes de julio. El período menos lluvioso exhibe un máximo en febrero-marzo. La lluvia anual del registro histórico territorial es de unos 112,74 mm.

- **Series temporales**

El estudio de las series temporales de precipitaciones medias anuales, calculadas a partir de las observaciones registradas en los pluviómetros pone de manifiesto que: las estaciones

localizadas hacia el N y NE (Isabel Rubio y Las Catalinas) se comportan de manera diferente, a pesar de la cercanía entre ambas, (Figura IV.5). En el pluviómetro de Isabel Rubio las precipitaciones medias tienen una tendencia al aumento, mientras que en el pluviómetro de las Catalinas la tendencia es a disminuir, sin embargo, la forma del diagrama hasta el año 1993 (que se interrumpe la serie de las Catalinas) es muy similar, lo cual puede confundir al investigador. Las precipitaciones medias anuales superan la media histórica (Tabla IV.1), en ambas series, en el caso de la estación Isabel Rubio con 46,7% y Las Catalinas con 41,9 %.

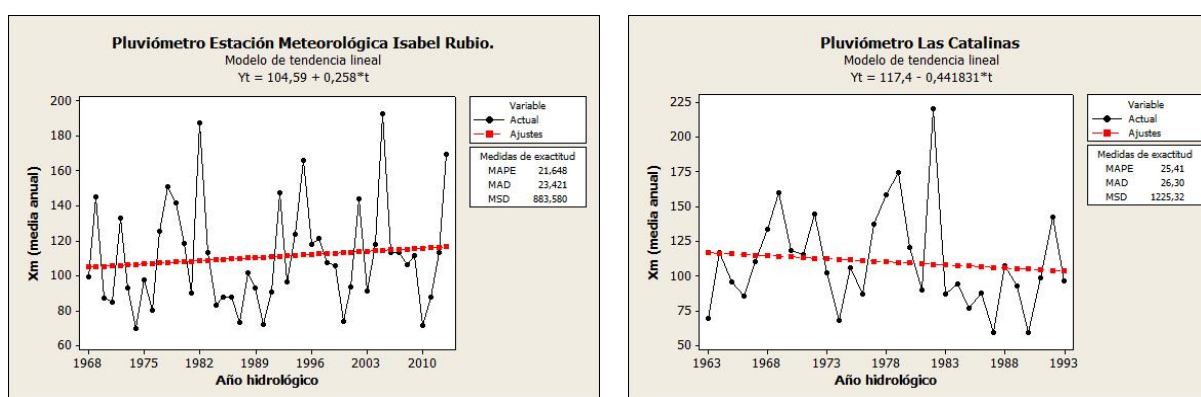


Figura IV.5. Tendencia de las precipitaciones medias en las estaciones pluviométricas Isabel Rubio y Las Catalinas

Hacia el NW y SE observamos una tendencia al aumento de las precipitaciones medias anuales (X_m), aunque en ocasiones puede suceder de manera alternada. Este fenómeno se aprecia con claridad en los mapas de isoyetas por periodos del año 2013 (Anexo gráfico 5). El comportamiento de las estaciones está sujeto a variaciones climatológicas regionales asociadas con el Golfo de México para el caso de la estación de Laguna Grande y Mar Caribe para la estación de Pasada de Marín. Las precipitaciones medias anuales en las estaciones superan la media histórica en un 52.4% y 50 % respectivamente (Figura IV.6).

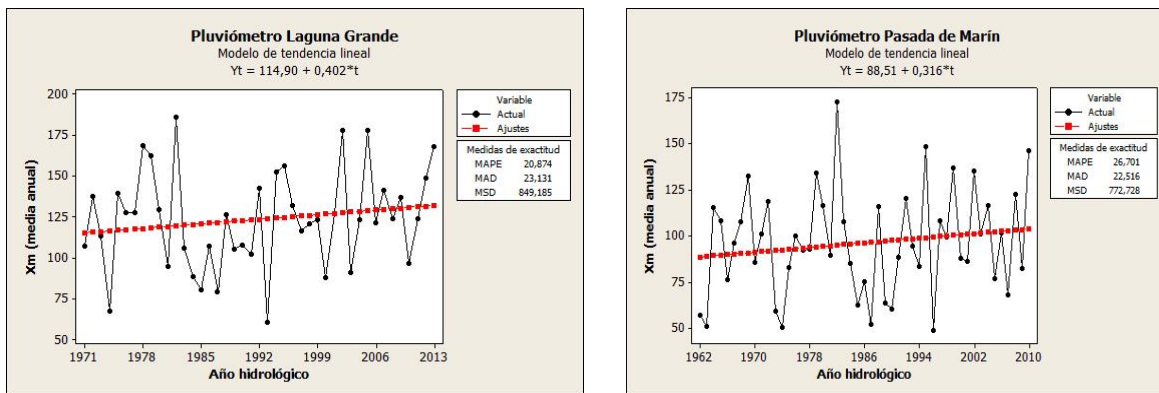


Figura IV.6. Tendencia de las precipitaciones medias en las estaciones pluviométricas Laguna Grande y Pasada de Marín, 1962-2013

La tendencia en las precipitaciones medias calculadas para los pluviómetros de La Bajada y Cabo de San Antonio es estable (Figura IV.7), se mantiene estático el régimen de lluvia, los valores medios de precipitaciones superan a la media histórica de cada serie, en el caso de la Bajada 48.6% y el Cabo de San Antonio 45.7%.

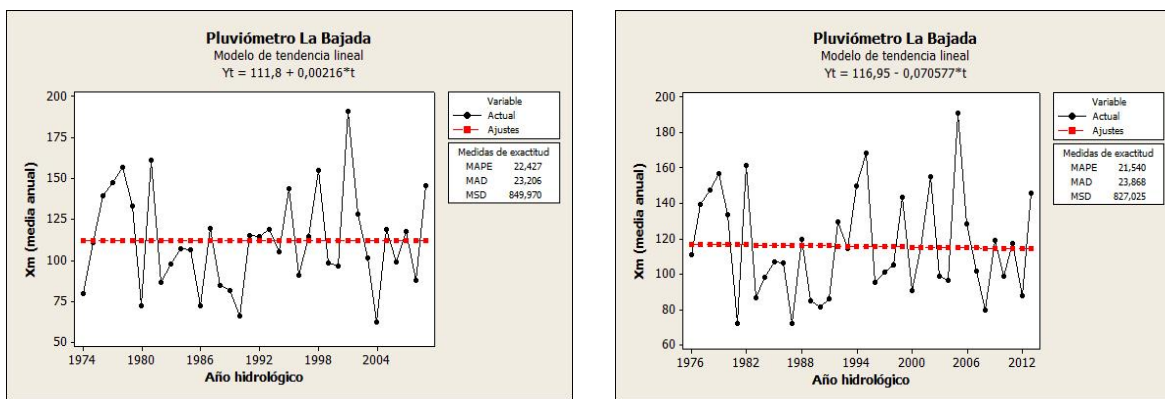


Figura IV.7. Tendencia de las precipitaciones medias en las estaciones pluviométricas La Bajada y Cabo de San Antonio

• Análisis de anomalías

El análisis de las anomalías de las precipitaciones se realizó solamente con los pluviómetros ubicados dentro del área de estudio y el de La Bajada, por cuanto es la estación que caracteriza el límite occidental del sector. El comportamiento de las anomalías de las precipitaciones registradas en el pluviómetro de la Estación Meteorológica de Isabel Rubio (Figura IV.8) muestra una relación años secos-años húmedos igual a 1.3, esto

significa que la serie tiende al aumento en años secos. Por tal motivo el acuífero en las zonas circundantes, consideradas como recarga recibe cada vez menos agua de escorrentía y por ende la calidad del agua en el acuífero tiende al deterioro. Los eventos meteorológicos extremos, por ejemplo, intensas lluvias y huracanes, a pesar de traer pérdidas económicas y de bienestar a la sociedad, actúan como procesos naturales que mejoran la calidad del acuífero. Estos fenómenos se aprecian en los valores extremos positivos sobre la línea de ajuste de tendencia lineal, en los años 1978, 1982, 1995, 2005, 2013.

El pluviómetro de la estación Las Catalinas (Anexo gráfico 6) muestra una relación de 1.58 años secos-años húmedos. Tomando el criterio de anomalía los pluviómetros del N-NE registran una relación mayor de años secos-años húmedos que los demás pluviómetros del sector de estudio.

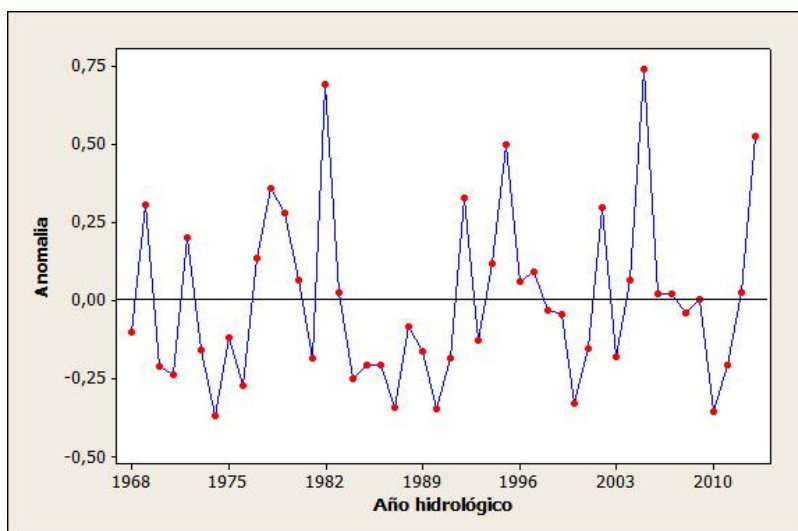


Figura IV.8. Representación gráfica de la anomalía del pluviómetro de la Estación Meteorológica Isabel Rubio 1968-2013

Analizando la serie en las décadas observamos que desde 1970 hasta el presente, el comportamiento de la anomalía es cíclico, un patrón que tipifica la serie. Los años más húmedos han sido 1982 y 2005 (asociados a eventos meteorológicos extremos), como años secos se destacan 1974, 1990, 2000 y 2010.

El comportamiento de las anomalías de precipitaciones registradas en las estaciones pluviométricas que se ubican al NW y SE del sector de estudio (Figura III.1); en las

localidades Laguna Grande y Pasada de Marín, respectivamente, es similar a partir del año 1971 (Figura IV.9), el balance de años secos contra años húmedos en la serie tiende a disminuir a razón de 0.79 y 1.17 respectivamente. Se verifican ciclos en los decenios de 2-4 años húmedos contra 6-8 años secos, sin embargo, en la zona de Pasada de Marín en el decenio 2000-2010 la razón de año seco-año húmedo es igual a 1. Los años más húmedos en la serie Laguna Grande fueron: 1982, 2001 y 2004, mientras que los años más secos 1974 y 1993. Para Pasada de Marín los años 1982, 1996 y 2010, fueron los más húmedos y los años más secos 1964, 1975, 1988, 1997, 2012.

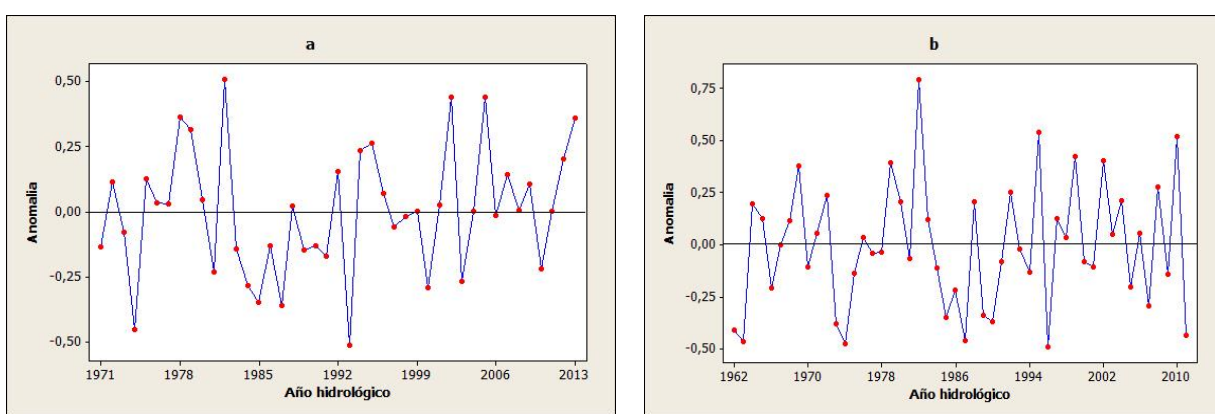


Figura IV.9. Representación gráfica de las anomalías en los pluviómetros (a) Estación Hidrológica Laguna Grande 1971-2013 y (b) Pasada de Marín, 1963-2013

La relación año seco contra año húmedo en la serie del pluviómetro La Bajada (Figura IV.10) es de 1.1. El año más húmedo fue 2005, mientras que el más seco fue el 1981. La relación años secos-húmedos tiende al equilibrio, pero si observamos las décadas nos damos cuenta del comportamiento cíclico, en una predomina los años secos, la siguiente es predominantemente húmeda y así sucesivamente.

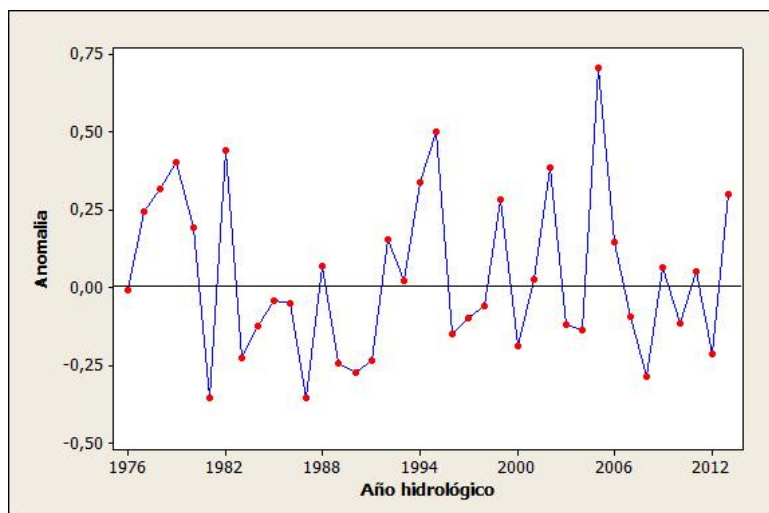


Figura IV.10. Representación gráfica de la anomalía en el pluviómetro de la Estación Meteorológica la Bajada 1976-2013

IV.2. Distribución de niveles piezométricos en el acuífero

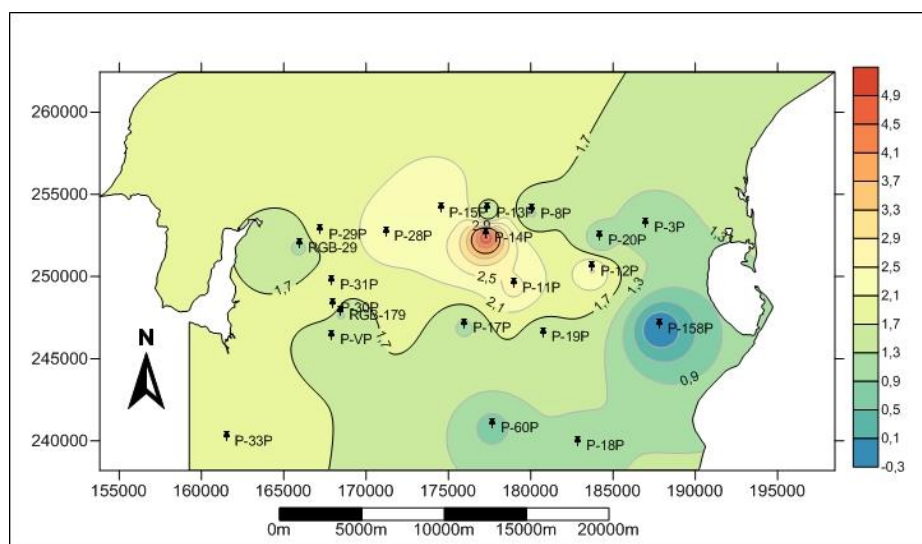
El mapa de niveles piezométricos resume el estudio de los niveles medios calculados para cada periodo del año hidrológico, el anexo 10 recoge los resultados de los valores por meses de monitoreo y los valores medios de niveles piezométricos estáticos (NPEm) que fueron utilizados para la construcción de los mapas de niveles. A pesar de no contar con pozos de monitoreo de niveles hacia la parte norte del sector, y hacia el sur la densidad de pozos de monitoreo, no satisface aún la precisión que se requiere en estos trabajos, la geometría que adopta el sistema responde al desarrollo geomorfológico del sector de estudio (comparar Figuras IV.11& II.2), los niveles se comportan de manera estable para cada periodo.

La zona norte del sector, se considera un borde impermeable, mientras que la zona sur un borde permeable conectado a nivel constante con la línea de costa, comportándose como un acuífero libre. En la parte central de la zona de estudio existe un gran complejo de lagunas considerado como una línea de potencial hidráulico constante (Hernández 2001).

En el mapa de niveles (Figura IV.11) del acuífero Neógeno-Cuaternario se han diferenciado tres zonas en función del gradiente piezométrico: la primera zona, ubicada hacia el noroeste y centro y suroeste del sector con un gradiente mayor, coincidente con las mayores altitudes del terreno, los valores de niveles oscilan entre 1,8 m- 5m snm durante el periodo lluvioso, con una diferencia de menos 0,1 m snm para el periodo seco. La segunda se distribuye por

toda la zona de altitud media del terreno y los valores de los niveles piezométricos oscilan entre 1,4 m-1,8 m snm para el periodo lluvioso, manteniendo la diferencia de menos 0,1m snm con relación al periodo seco del año hidrológico. La tercera zona se ubica en las proximidades de la línea de costa (P-158P) donde los valores pueden oscilar en el orden de 1,4m hasta -0,2 m snm.

Los valores de niveles piezométricos, son interesantes, porque hay muchas fluctuaciones relacionadas con la lluvia y posiblemente con las mareas, especialmente hacia la tercera zona. No siempre hay relación entre las fluctuaciones piezométricas y los periodos lluviosos observados en los colectores (Hernández, 2001).



IV.3. Variables hidroquímicas simples y complejas

IV.3.1. Análisis exploratorio

Los datos hidroquímicos fueron procesados de manera análoga a los datos de lluvias. Pero a diferencia de ellos, las variables componentes mayoritarios y SST siguen una distribución normal, mientras que los componentes minoritarios, así como las relaciones iónicas resultantes siguen una distribución lognormal. Las pruebas de normalidad confirman esta declaración, ejemplo: los resultados del test Anderson-Darling (Figuras IV.3 y IV.4), para la relación cloruro-bicarbonato, cuyo valor de probabilidad $p=0.260 > \alpha=0.05$, (por tanto, no se rechaza H_0), se cumple la hipótesis de nulidad, la cual plantea que los datos siguen una distribución normal. Las relaciones que resultan de cloruro-bicarbonato, sulfato-cloruro, magnesio-calcio y bromuro-cloruro, se comportan como datos que siguen una distribución lognormal (ver anexo gráfico1)

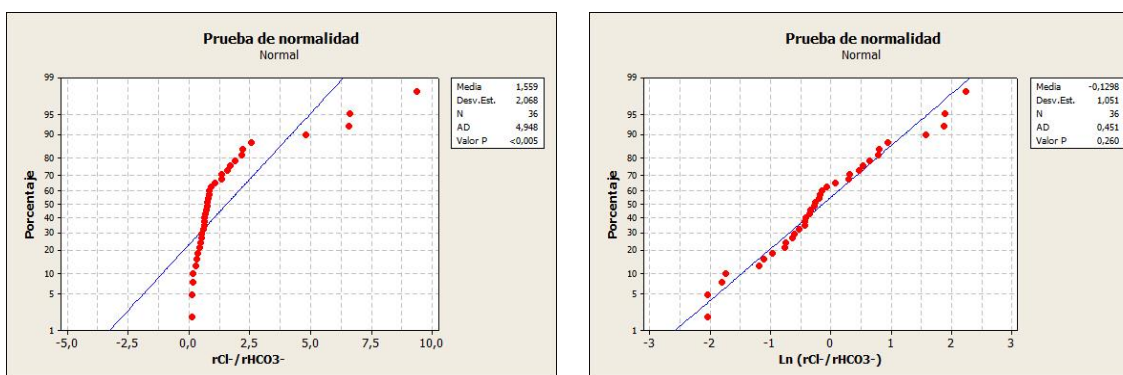


Figura IV.12. Comportamiento lognormal relación cloruro-bicarbonato

La Figura IV.13 muestra la función de densidad acumulada que tipifica el comportamiento logaritmizado de la relación cloruro-bicarbonato, nótese que el ajuste de los datos a la función (color azul). Este comportamiento es análogo para el resto de las relaciones iónicas usadas en la investigación.

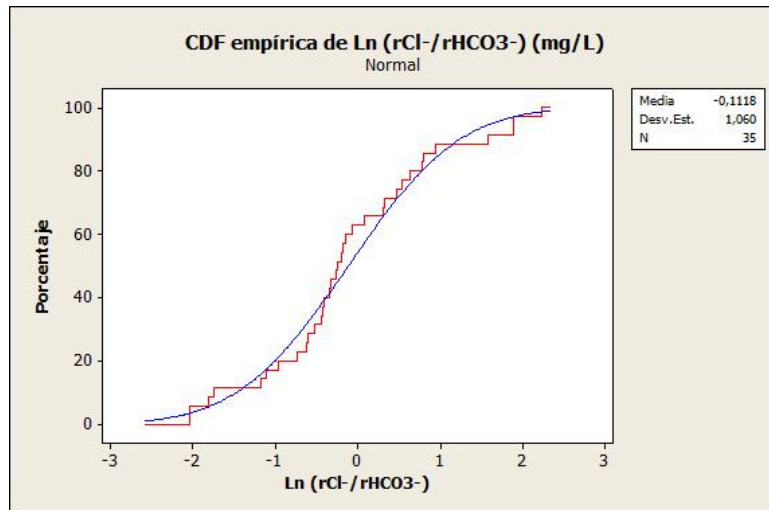


Figura IV.13. Ajuste a la función de densidad empírica de la relación cloruro-bicarbonato

Es significativo que las SST se ajustan a la función de densidad acumulada, siempre y cuando los valores sean menores que 1g/L. La prueba de normalidad (Figura IV.14) nos confirma que los datos siguen una distribución normal, el valor de probabilidad calculada es $p=0.511 > \alpha=0.05$, por tanto, se cumple H_0 , es interesante ver en la como los valores extremos (5%) no se ajustan a la curva de probabilidad.

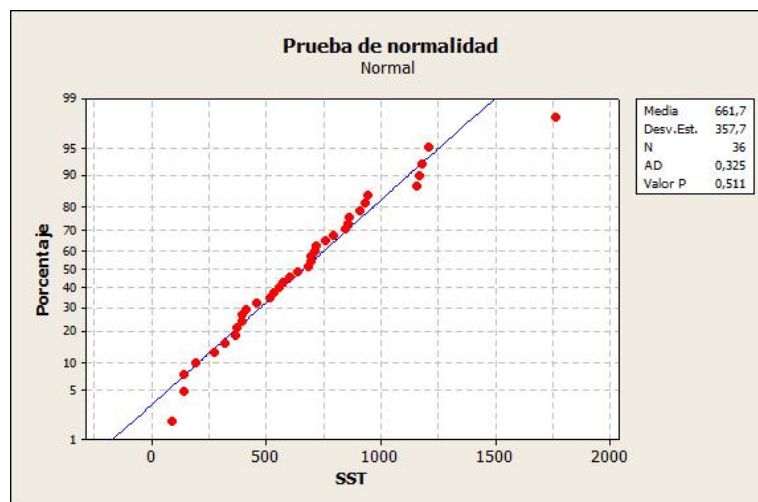


Figura IV.14. Prueba de normalidad para SST. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

IV.3.2. Comportamiento de las relaciones iónicas

Las relaciones iónicas constituyen un índice que revela la distribución espacial del fenómeno de salinización, en la tabla I.1 se muestran los valores que toman estas relaciones en aguas naturales dulces y saladas. La alteración de sus valores normales, en el caso de las aguas dulces, aproximándose o igualando los valores alcanzados por el agua de mar, constituye un fuerte criterio para evaluar la presencia de contaminación por intrusión salina en el acuífero. En la investigación definimos como criterio final para asegurar la presencia de la salinización en pozos, la combinación de más de una relación iónica anómala, conjuntamente con la SST superiores al valor máximo permisible (1 g/L). Es válido recordar que para el muestreo en estos pozos se siguió el criterio de mínima profundidad con relación al nivel estático, por cuanto las tomas para la explotación de estos pozos se colocan muy cerca de esta profundidad.

IV.3.2.1. Relación $rCl/rHCO_3^-$

La relación cloruros-bicarbonatos como se observa en la Figura IV.15 nos indica que los pozos 12, 18, y 11 se ven afectados por intrusión salina, además el pozo 28 está próximo al umbral anómalo (5), ver tabla I.1.

Los valores de SST (Anexos 13) excepto para el pozo 12 están por encima del valor permisible. La parte norte del área alcanza el rango 0-2, lo que indica que es una zona fuera de peligro en cuanto a la ocurrencia del fenómeno estudiado, hacia la parte central del sector de estudio los valores de la relación están el orden de 3-5, lo cual indica que estamos en presencia de aguas de mezcla. La isolínea de valor 4 delimita la geometría del factor salinización.

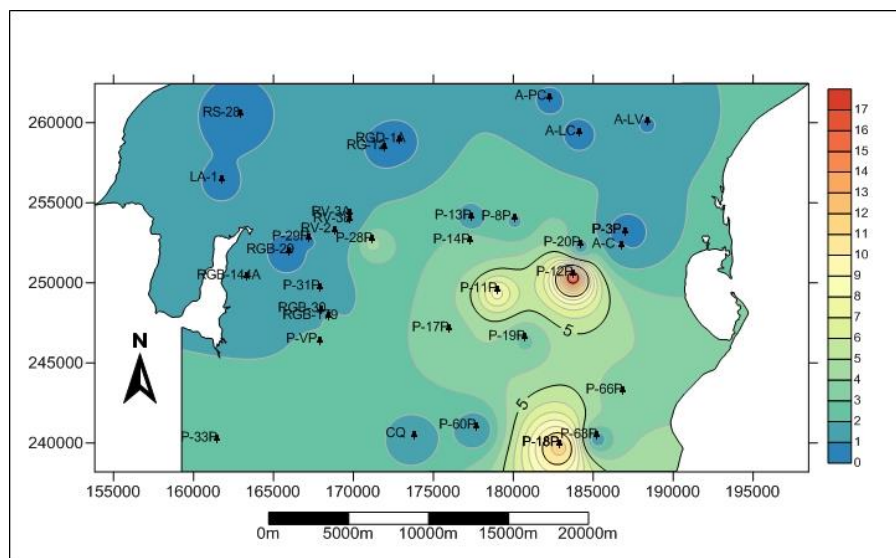


Figura IV.15. Mapa de la relación cloruro-bicarbonato a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

IV.3.2.2. Relación $rSO_4^{2-}/r Cl^-$

Una rápida observación de la distribución espacial de esta relación (Figura IV.16) nos pone en alerta, pues el umbral anómalo de esta relación que indica presencia de salinización por intrusión salina es 0.1, este valor revela además que no existe reducción de sulfato. Los pozos de los acueductos Punto de Control, Las Catalinas y la comunidad rural Laguna Vieja están afectados por esta relación, siendo zonas de alto peligro de contaminación por intrusión salina.

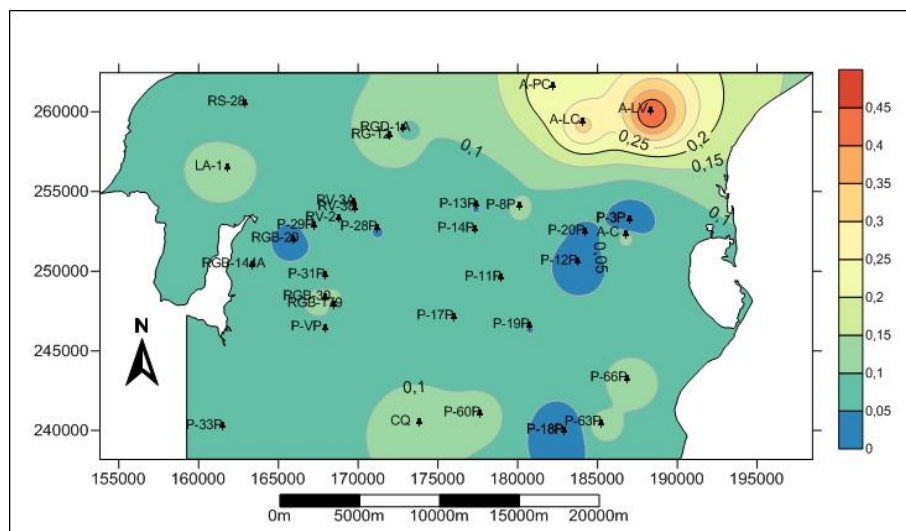


Figura IV.16. Mapa de la relación sulfato-cloruro a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

Estos pozos están asociados con la cuenca del río Cuyaguaje, que desemboca al NE del sector. La SST en estos pozos está muy próxima al valor máximo permisible (anexo 15). Además de los pozos señalados anteriormente, se observa un grupo de pozos que se encuentran en el intervalo 0,1-0,15 y que tienen claros indicios de contaminación, estos pozos son: LA-1, RG-12, RGD- 1A, P-8P, P-63P, P-66P, P-60P, CQ, RGB-30, RGB-179.

IV.3.2.3. Relación rMg^{2+}/rCa^{2+}

La geometría de esta relación mapea con precisión, la zona de mezcla agua dulce-agua de mar como se aprecia en la figura 4.17, en el pozo 18 está presente la salinización por intrusión salina, alcanzando el valor 2,25 (anexo 11), los pozos 11, 17, 33, 28 y RGB-179 se acercan al umbral anómalo, por lo que las extracciones en éstos deben ser rigurosamente controladas, para evitar la inutilización de los pozos por contaminación.

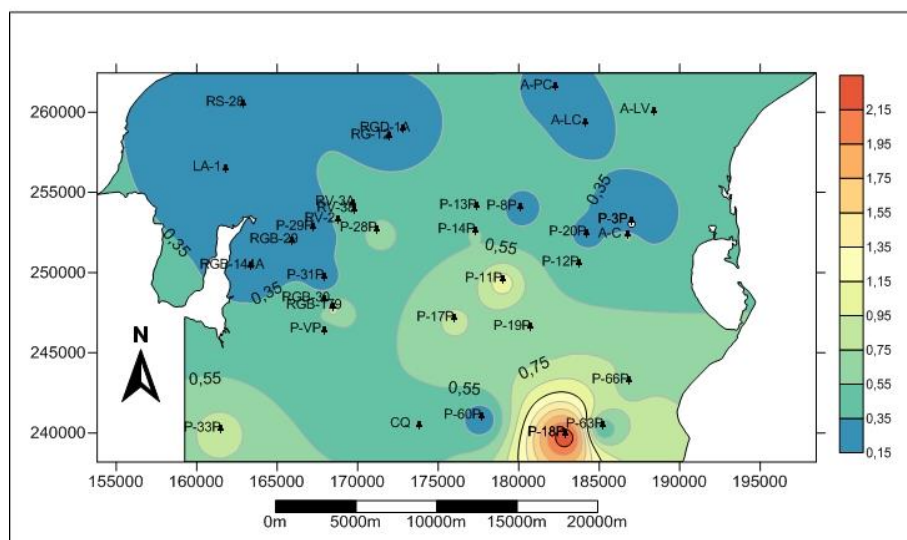


Figura IV.17. Mapa de la relación magnesio-calcio a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

En las inmediaciones del pozo 33 la isolínea 0,55 marca el límite de la interfaz por la alineación NE-SW. La isolínea de este valor mapea el contorno de la zona de mezcla agua dulce-agua de mar en la zona SE, la dirección preferencial de la intrusión salina apunta hacia el rumbo NW-SE.

IV.3.2.4. Relación rBr⁻/rCl⁻

La relación entre el Br^- y el Cl^- en las aguas es referida en numerosos estudios, su presencia en las aguas subterráneas de áreas costeras se atribuye generalmente a procesos de intrusión marina. En estos casos la relación será similar a la del agua de mar. Las muestras patrones de las Bahías Cortés (E) y Guadiana (W) obtenida a partir de los análisis químicos es 0,0015 y 0,0016 respectivamente (anexo 11). La detección de aportes anómalos puede hacerse mediante la utilización de la relación Br^-/Cl^- , ya que, si ambos proceden del agua de mar, la relación iónica tendrá un valor similar al del agua de mar.

Valores más bajos se pueden atribuir a aportes suplementarios de ión Cl^- , mientras que valores superiores al agua de mar pueden corresponder a aguas enriquecidas en ión bromuro: en aguas de cuencas cerradas, casi estancadas, donde las relaciones $r\text{Br}^-/r\text{Cl}^-$ son habitualmente mayores que en las zonas de circulación activa, por tanto, esta relación puede ser indicativa de las condiciones hidrodinámicas locales. El Br^- puede ser aportado

también por fuentes no naturales, relacionadas con la contaminación antrópica; por ejemplo, los metilbromuros y otros componentes orgánicos bromurados son utilizados en la práctica agrícola como fumigantes para suelos, granos, frutas y hortalizas. En la figura IV.18 se aprecia la isolínea 0,0016, que marca el valor de la relación en el agua de mar, lo cual nos indica que la zona interior de la isolínea está afectada por intrusión salina.

Como se observa en la figura IV.18 el área central y sur del sector son las zonas más afectadas por el proceso. Es interesante destacar que la anomalía en la alineación NE-SW, (en las inmediaciones de los pozos 3 hasta el 19) la relación aumenta hasta alcanzar valores superiores a 0,0018. La ausencia de datos en las zonas NW, NE y SW del sector de investigación crea incertidumbre en el comportamiento de esta relación.

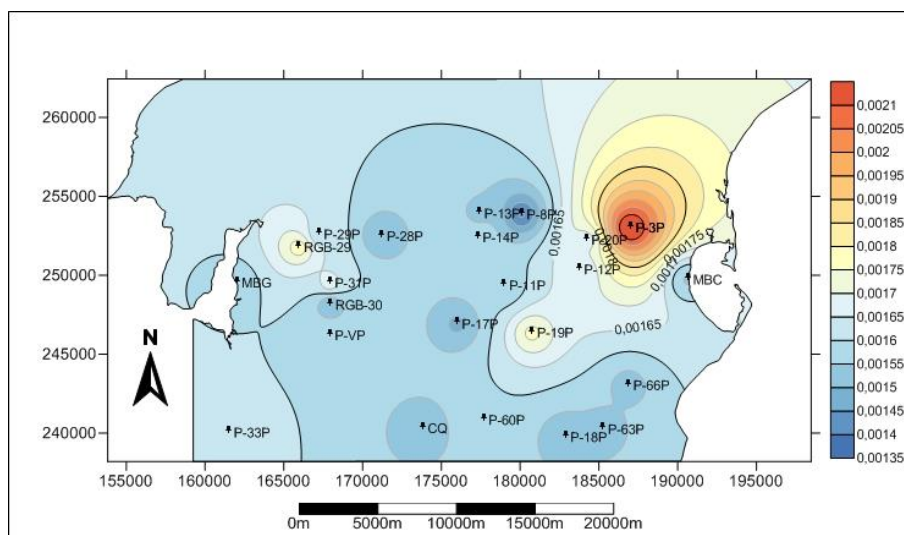


Figura IV.18. Mapa de la relación bromuro-cloruro a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

Esta tendencia puede estar relacionada con el sistema hidrodinámico local de la desembocadura del Cuyaguateje y la actividad antrópica que se genera en torno a este sistema fluvial, principalmente la agricultura.

IV.3.2.5. Análisis de variografía

El cálculo del semivariograma medio (anexo gráfico 7) con tolerancia angular 90 grado y dirección 0 grado incluye la mayor cantidad de pares y da una idea global de la variabilidad espacial y los valores que tomarán los diferentes parámetros del semivariograma (efecto

pepita, meseta y rango). Los variogramas de las $rCl^-/rHCO_3^-$, rSO_4^{2-}/rCl^- y rMg^{2+}/rCa^{2+} muestran una falta de correlación espacial entre los valores. Para el caso del factor salinidad y el litológico estos datos no presentan una dirección de máxima o mínima continuidad. Ninguno de los variogramas experimentales anteriores poseen continuidad espacial definida, los variogramas experimentales no se ajustan a ningún modelo teórico, por lo que no se puede aplicar la estimación mediante Kriging, en su lugar se decide aplicar el Inverso de la distancia al cuadrado.

IV.3.3. Análisis multivariado

El análisis de factores revela las variables externas que inciden en la composición química de las aguas del acuífero. Los resultados se verifican en la tabla IV.2, donde se observan resaltadas en rojo la importancia de las variables en el factor.

Tabla IV.2. Resultados del análisis de factores

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7	Factor 8	Comunalidad
CE	0,946	-0,211	-0,185	0,013	-0,093	0,003	0,133	-0,002	1,000
Na ⁺	0,984	-0,003	-0,162	-0,001	-0,042	0,017	-0,033	0,044	1,000
K ⁺	0,935	0,150	-0,053	-0,054	0,311	0,018	-0,008	0,000	1,000
Mg ²⁺	0,815	-0,326	-0,313	0,361	-0,037	-0,004	0,000	-0,001	1,000
Ca ²⁺	0,052	-0,950	-0,234	0,037	-0,055	-0,188	0,002	-0,003	1,000
Cl ⁻	0,982	0,033	-0,147	0,051	-0,045	-0,053	-0,063	-0,043	1,000
SO ₄ ²⁻	0,325	-0,456	-0,828	0,034	0,000	-0,003	0,002	0,000	1,000
HCO ₃ ⁻	-0,023	-0,975	-0,145	0,022	0,018	0,167	0,010	0,003	1,000
Varianza	4,4742	2,2357	0,9433	0,1393	0,1142	0,0666	0,0229	0,0038	8,0000
% Var	0,559	0,279	0,118	0,017	0,014	0,008	0,003	0,0000	1,0000
Valores propios	%Factores 83,8 95,6								
Factor1	4,98425073	Se aplica la Regla de Kaiser, se escogen los factores cuyos valores propios superen el valor 1. En este caso los factores 1 y 2 los cuales denominamos Salinización por intrusión marina y Litología , respectivamente. Estos factores explican el 83,8% de la variabilidad espacial de los componentes mayoritarios de las aguas del acuífero.							
Factor2	2,35495656								
Factor3	0,36315853								
Factor4	0,13804898								
Factor5	0,07933582								
Factor6	0,05797092								
Factor7	0,01882642								
Factor8	0,00345205								

En la figura IV.19 se aprecia la asociación de las variables Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- y CE en el primer factor denominado salinización, el segundo factor está relacionado con la litología y agrupa los iones Ca^{2+} y HCO_3^- . Estos factores explican el 83.8% de la variabilidad del sistema.

El tercer factor SO_4^{2-} responde al proceso de oxidación de azufre en los humedales y zonas de escasa circulación en superficie, por ejemplo, en la Ciénaga de Remates de Guane y la reducción de sulfatos que se verifica en los pozos 33 y 18 a la profundidad de 31 m (Hernández 2001). Aunque el valor propio del ion sulfato no alcanza la cifra requerida para aplicar la regla de Kaiser consideramos esta variable por criterio de expertos como un posible tercer factor que explica la ocurrencia de procesos de oxidación de azufre y reducción de sulfatos. La combinación de los tres factores explica el 95.6% de la variabilidad del sistema.

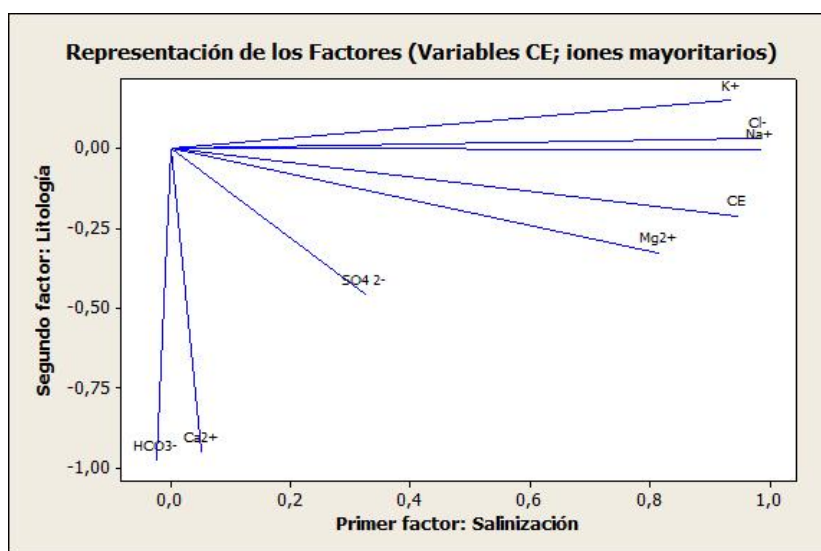


Figura IV.19. Representación gráfica de los factores salinización, litología y sulfatos

El mapa del factor salinidad (Figura IV.20), tiene una alta coincidencia con los mapas de sales solubles totales conductividad eléctrica, y cloruros, así como los mapas de las relaciones iónicas. La anomalía de la alineación SE-NW representa la dirección de avance de la cuña salina hacia el centro del sector de estudio (isolínea 0.3), esto concuerda con lo planteado por Hernández, (2001), también se observa hacia el SW otra anomalía en el pozo 33 que indica la presencia local del fenómeno.

La zona NE presenta valores bajos de este factor, lo cual indica que la salinización por intrusión salina no afecta estas zonas del sector. Aquí los mapas de relaciones iónicas se comportan diferentes al resto del área, esto se explica por la presencia de la cuenca del Río Cuyaguaje y toda la actividad antrópica asociada a este ambiente fluvial, en particular la agricultura.

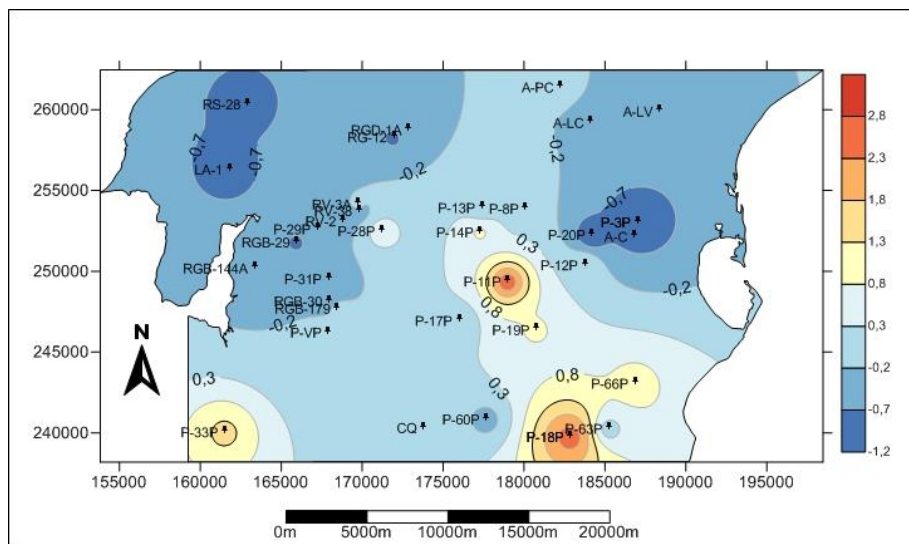


Figura IV.20. Mapa del factor salinidad a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

El factor litología (Figura IV.21), es de gran importancia para comprender la génesis de la composición de las aguas del acuífero, existe una relación estrecha entre la litología y los rasgos geomorfológicos del sector de estudio, hecho que se verifica en la morfología de las isolíneas del mapa y las formas de relieve. En el mapa a partir de la isolínea de valor 0 se localizan la mayor parte de los pozos con aguas bicarbonatadas. Las anomalías del valor con valor menor que -0.4 pueden ser identificadas hacia el norte con rocas carbonatadas cretácicas mientras que hacia el S la litología predominante son las calizas del Plioceno-Pleistoceno de la formación Vedado.

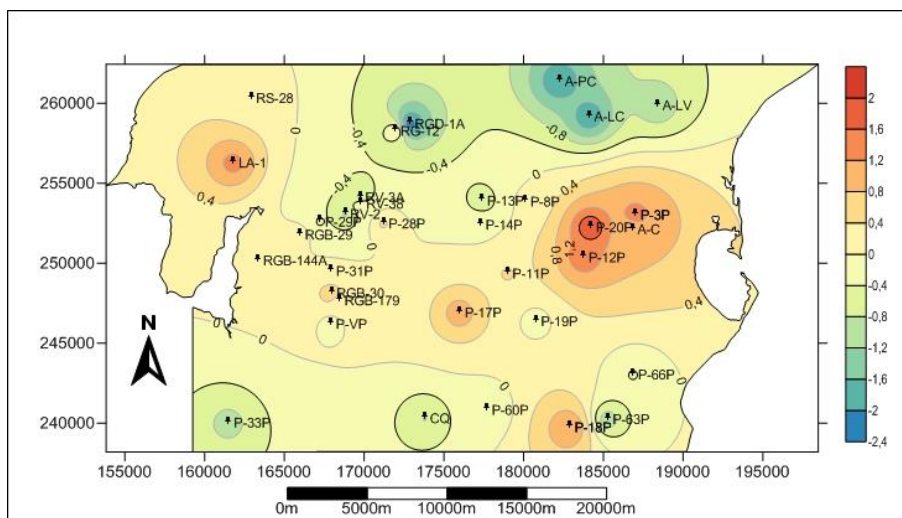


Figura IV.21. Mapa del factor litología, a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

IV.4. Relación entre la comunidad microbiana y las facies hidrogeoquímicas

Los resultados obtenidos a partir de los análisis de clúster de los perfiles DGGE de la comunidad microbiana (Anexo gráfico 3), se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Se pueden encontrar algunas diferencias importantes entre las muestras del mismo tipo de agua, lo cual sugiere la existencia de diferentes factores, sitios o zonas específicas que influyen en las comunidades bacterianas, esto se observa en los pozos de los grupos clúster superiores, que están localizados en la parte N del área de estudio donde el nivel piezométrico es más alto.
2. En el caso del pozo 18, se ha detectado una comunidad muy similar a lo largo del perfil investigado, sin embargo, puede distinguirse 3 subgrupos en ella, dependiendo de la profundidad del muestreo, sugiriendo una influencia progresiva de mezcla entre agua dulce y agua de mar sobre la composición de la comunidad microbiana.
3. Por el contrario, en el pozo 33 las comunidades detectadas en cada profundidad del muestreo no están agrupadas, esta observación se corresponde con la presencia de la variación significativa de la hidroquímica en las aguas subterráneas con la profundidad.
4. Los análisis bacteriológicos (Coliformes totales y fecales) registrados en la base de datos de la Red Cal reportan un número más probable (NMP) que oscila en el rango

de valores permisibles por la norma, con excepción de los pozos de la comunidad rural Laguna Vieja y Laguna Grande que se ha visto afectado en numerosas ocasiones por la presencia de estos microorganismos.

IV.5 Clasificación y zonación de las aguas subterráneas

La hidroquímica en los estudios ambientales de acuíferos revela las características físico-químicas de las aguas, sus variaciones espaciales y temporales, la modificación que experimentan determinadas variables (tales como conductividad y temperatura) en profundidad, y el análisis de las dependencias de estos cambios, todas estas valoraciones en su conjunto explican el dinamismo de la química de las aguas en el sistema, y nos permite delimitar zonas salinizadas, zonas de riesgos futuros, sectores con salinidad de orígenes distintos y zonas en las que se superponen distintos tipos de salinidad.

IV.5.1. Clasificación de las aguas

Las aguas presentes en el sector de estudio fueron clasificadas según Shukarev, la cual emplea como índice de clasificación los iones que poseen un porcentaje superior al 25% miliequivalentes de aniones y cationes. Se determinó cuatro grupos de aguas: 1- Bicarbonatadas, 2-Bicarbonatadas-cloruradas, 3- Cloruradas bicarbonatadas y 4- Cloruradas. Estas aguas se distribuyen según se relaciona en la tabla IV.3.

Del total de muestras analizadas (36) en pozos de la red de monitoreo en el periodo de junio-septiembre del 2011, 11 son de tipo cloruradas (30,6%), 15 del tipo cloruradas bicarbonatadas (41,7%), hecho que pone de manifiesto la intensidad del fenómeno de salinización por intrusión marina en el acuífero en la zona central, sureste y suroeste. El 19,4% de las muestras analizadas corresponden a pozos (7) con aguas bicarbonatadas cloruradas, estos pozos pertenecen a la Red Cal excepto el pozo 29, (localizados hacia el noroeste del sector), y todos se encuentran en explotación (Figura III.1). Los restantes pozos (3) tienen aguas bicarbonatadas para un (8,3%).

Tabla IV.3. Clasificación de los tipos de aguas por muestras de pozos en el sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

Grupos de aguas	Tipos de aguas	Pozos (muestras)
Bicarbonatadas	Bicarbonatadas- cálcicas	RS-28, RGB-29, P-3P
Bicarbonatadas cloruradas	Bicarbonatadas-cloruradas- cálcicas	A-LC, RG-12
	Bicarbonatadas-cloruradas- cálcicas magnésicas-sódicas	LA-1
	Bicarbonatadas-cloruradas- cálcicas sódicas	RGD-1A, P-29P
	Bicarbonatadas-cloruradas- sódicas-cálcicas	A-PC, A-LV
Cloruradas bicarbonatadas	Cloruradas-bicarbonatadas- cálcicas-sódicas	RV-2, RGB-144A, P-31P
	Cloruradas-bicarbonatadas- sódico-cálcicas	RV-3A, RV-38, RGB-179, A-C, P-VP, RGB-30, CQ, P-60P, P- 63P, P-13P, P-8P
	Cloruradas-bicarbonatadas- sódicas	P-19P
Cloruradas	Cloruradas sódicas cálcicas	RGB-179, P-14P, P-11P, P-17P, P-28P
	Cloruradas sódicas	P-33P, P-66P, P-18P (-4m, -5m), P-20P (-2m), P-12P

En la figura IV.22 apreciamos 6 muestras representadas en el diagrama de Stiff, las cuales ilustran los tipos de aguas presentes en el sector. Las muestras relacionadas espacialmente con la zona de la cuenca del Cuyaguaje, su comportamiento es un tanto diferente al resto de las aguas próximas (ver mapas de las relaciones iónicas), particularmente el índice $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$, con valores anómalos en la zona donde se encuentran ubicados los pozos que abastecen a las comunidades Punto de Control, Las Catalinas y Laguna Vieja.

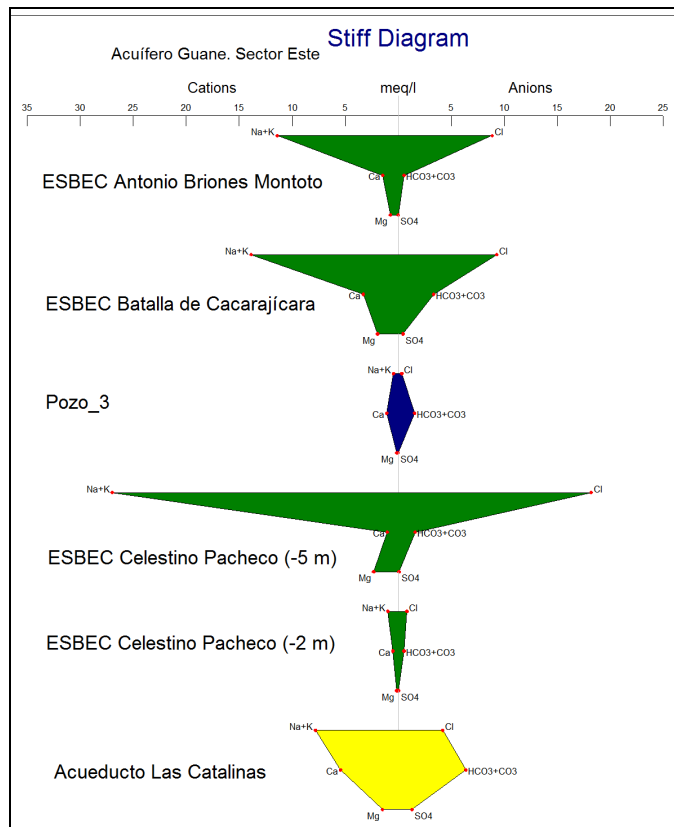


Figura IV.22. Diagrama de Stiff. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

IV.5.2. Zonación espacial

Para conformar la zonación espacial de las aguas presentes en el sector de estudio se tuvo en cuenta la clasificación de las aguas, conductividad, sales solubles totales, geomorfología, relaciones iónicas, litología y composición isotópica. Se distinguen 3 zonas que por sus características intrínsecas pueden ser fácilmente identificadas y mapeadas.

- Isótopos**

Los valores δD y $\delta^{18}O$ del agua de mar contemporánea, al adoptarse esta como patrón, son aproximadamente 0, (Lastra, 2009). Los valores medidos en este trabajo se corresponden con los obtenidos para aguas meteóricas en el continente americano (Friedman, 1964 en: Lastra, 2009). Los mapas representan la estimación de las mediciones δ Deuterio y Oxígeno 18 (vs. V-SMOW), expresados en partes por mil (Figuras IV.23 y 24). En ellos resulta

evidente la zonación de las aguas en todo el sector, diferenciándose tres zonas. Los valores altos en las isolíneas mayores que $-16 \delta D$ y $-2.5 \delta^{18}O$ representan la primera zona (valores anómalos), coincidente con áreas de recarga del acuífero. Hacia la línea de costa tanto por el E como el W el mar intercambia agua con el acuífero, por tal motivo ocurre un enriquecimiento de los valores δ . Los puntos de aguas superficiales Laguna el Pesquero y Ciénaga de Remates de Guane (1 y 2) posiblemente recarguen el acuífero, éstos últimos están conectados con la zona marina (Figuras IV 23 y 24). La segunda zona posee valores de isolíneas de -21 hasta $-26 \delta D$ y -3.25 hasta $-4 \delta^{18}O$, estas isolíneas mapean la zona de mezcla del acuífero donde se produce un enriquecimiento para ambos isótopos.

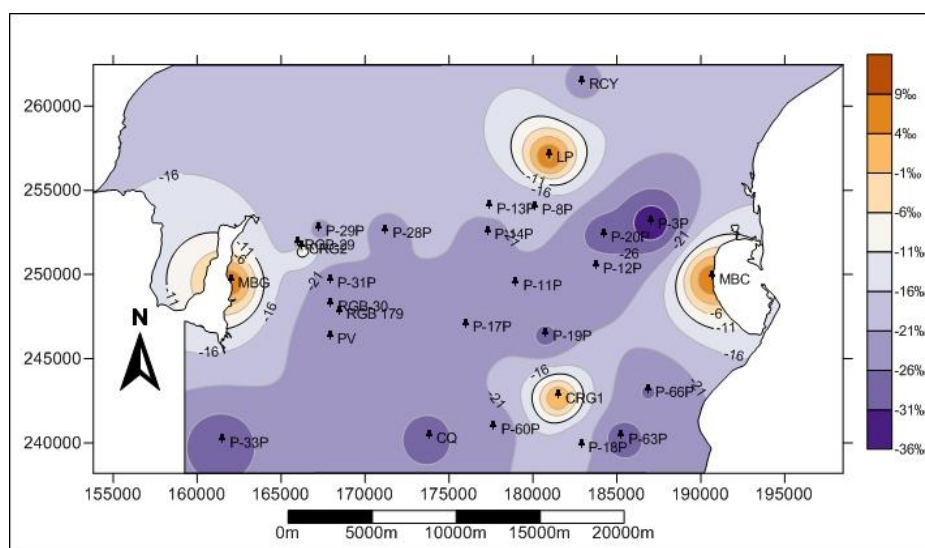


Figura IV.23. Mapa de δD ‰ (vs. V-SMOW) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011

Los valores menores para ambos mapas parecen estar relacionados con aguas de reciente infiltración porque se acercan a los valores teóricos de la lluvia meteórica y se desarrollan dentro de la segunda zona, lo que confirma la geometría de las aguas subterráneas en estos acuíferos costeros de la península; pequeños lentes de agua dulce en equilibrio con el agua marina, por medio de una interfaz agua dulce-agua de mar, planteada por Hernández (2001).

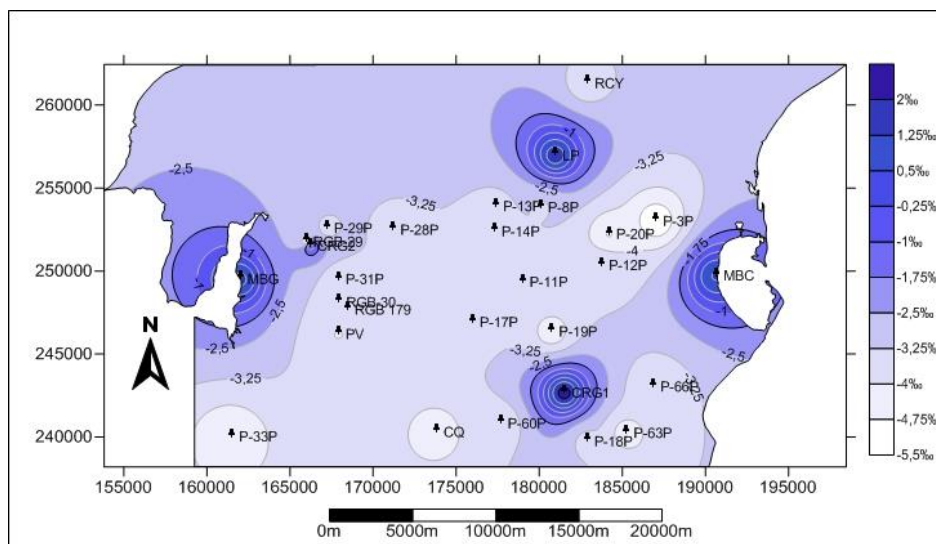


Figura IV.24. Mapa de $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (vs. V-SMOW) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011

• Isoconductividad y SST

Los mapas de la figura IV.25-26 representan la distribución espacial de la conductividad eléctrica y las sales solubles totales (SST) en el sector de estudio, como se aprecia en los mapas la morfología que adoptan las isolíneas es muy similar, indicando una alineación preferencial rumbo SE-NW de la intrusión salina. Los valores de conductividad anómalos se localizan a partir de la isolínea 1200.

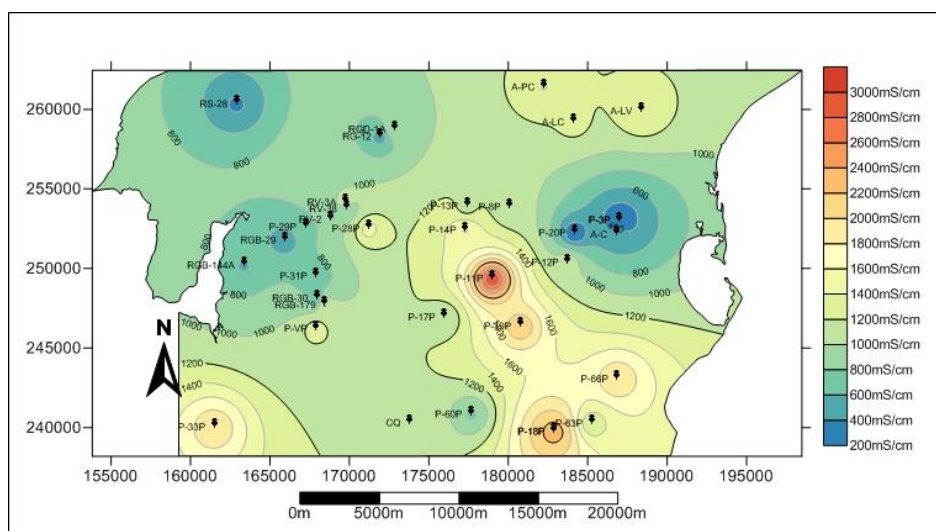


Figura IV.25. Mapa de conductividad eléctrica) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

Los pozos 11, 18, 19, 33, 66 superan lo establecido en la norma cubana para agua potable. Los valores de SST anómalos según norma son los superan 1 g/L, en esta situación se encuentran los siguientes pozos: 11, 18, 33 y 66. Algunos pozos están próximos a alcanzar esta cifra, tal es el caso de los pozos 14, 19, 63, A-PC y A-LV, que superan los 930 mg/L de sales solubles totales.

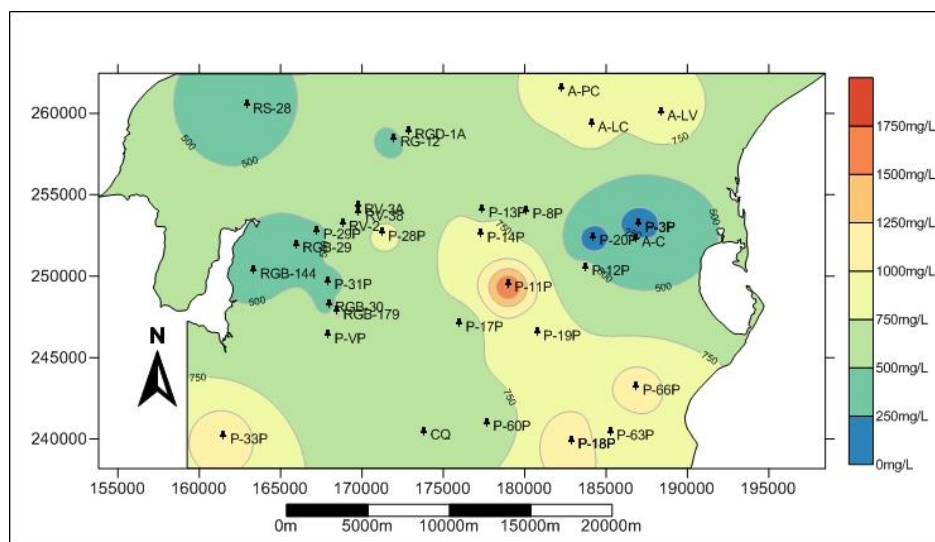


Figura IV.26. Mapas sales solubles totales (SST) a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

El mapa de la figura IV.26 muestra la distribución espacial de los cloruros en el sector, se observan anomalías en las zonas suroccidental, próximo a la Bahía de Guadiana y en las zonas centro- sureste. La geometría de estas anomalías es similar al comportamiento de las anomalías en los mapas de CE y SST. Los contenidos de cloruros en la mayor parte del sector de estudio son elevados, sobre todo en la zona centro-sur del acuífero, en la alineación noroeste-sureste; coincidente con los resultados obtenidos por Hernández (2001), la isolínea 250 mg/L marca el límite del valor máximo permisible, por lo que consideramos las anomalías muy significativas y confirman claramente la extensión espacial de la salinización en el área.

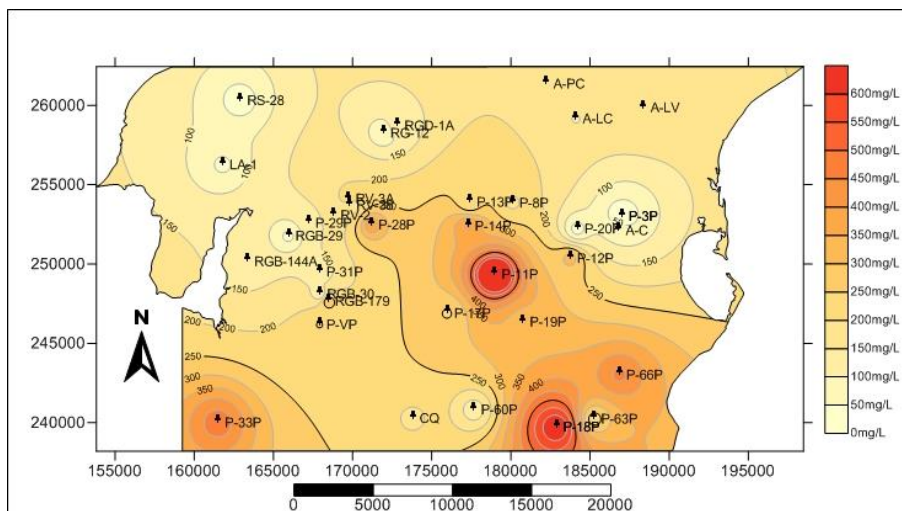


Figura IV.27. Mapa de cloruros” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio-septiembre 2011

Siete pozos se encuentran afectados por valores extremos de cloruros, 350-600 mg/L: los pozos P-11, P-18, P-33, P-66, P-14, P-19, P-28. Las isolíneas por debajo del umbral anómalo (250mg/L) se localizan en las zonas noreste, próximas a la Bahía de Cortés y al noroeste, en las proximidades de la Estación Hidrológica Laguna Grande y Ciudad Bolívar. Este comportamiento se debe posiblemente a la recarga del acuífero desde el sistema de lagunas, (hecho no comprobado aún), que indiscutiblemente mejora considerablemente la calidad del agua y contribuye de manera natural al control de la variabilidad de los cloruros.

IV.5.3. Zonación en profundidad

Las aguas analizadas en los perfiles de los pozos 18 y 33 (Anexo gráfico 2), son presumiblemente de la zona hidrogeológica de dispersión o de mezcla agua dulce-agua de mar del acuífero cársico libre desarrollado en el área. Teniendo en cuenta este comportamiento espacial resulta importante mantener un monitoreo sistemático de su composición, ya que ella puede variar durante el año como resultado de la acción del ciclo hidrológico y las mareas.

La figura IV.28 es muy ilustrativa de lo que acontece en el pozo 18, a medida que avanzamos en profundidad la temperatura disminuye progresivamente, mientras que la CE aumenta. Se producen 3 saltos en las profundidades de 15, 26 y 33 metros. Se tomaron

muestras a las profundidades de 5, 21, 33 y 40 metros para análisis químicos representadas en los diagramas de Stiff, siendo del tipo cloruradas-sódico potásicas según Shukarev. Este pozo se localiza en el patio de un residente del poblado de Pasada de Marín y lo usan para fines de abasto a la familia, pues sus primeros metros se encuentran dentro de los límites permisibles de la norma cubana.

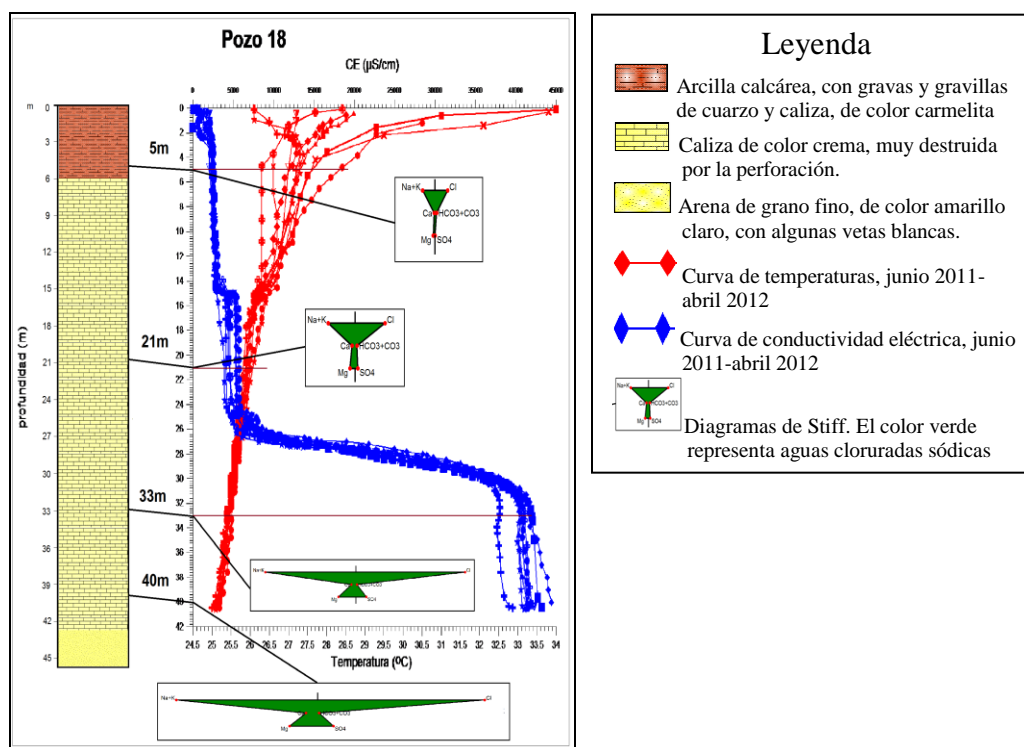


Figura IV.28. Relación litología, facies hidroquímica, temperatura y CE con la profundidad en el pozo 18. (Cortesía de la tutora)

En general, en el acuífero cársico costero se pudieron distinguir tres zonas geoquímicas con las características siguientes: 1. Zona marina: en que prevalecen las aguas del tipo $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$, las cuales se encuentran sobresaturadas en relación con la calcita, 2. Zona de mezcla o dispersión: donde las aguas son de los tipos $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$, $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ o de facies intermedias, y las cuales se suelen encontrar insaturadas respecto a la calcita y 3. Zona de agua dulce: en que prevalecen las aguas del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ en equilibrio con la calcita.

IV.6. Evaluación de la calidad ambiental del acuífero

La calidad ambiental en este sector del acuífero Guane, está sujeta a los procesos hidrogeoquímicos asociados con la intrusión marina que implica dos procesos fundamentales: el primero es la mezcla agua dulce-agua de mar, que se traduce en un incremento de la salinidad de las aguas, y el segundo, los fenómenos y procesos diagenéticos modificadores de la calidad del agua subterránea, derivados de la interacción mezcla-roca, dentro de los que se incluyen: precipitación y disolución de carbonatos, intercambio iónico y reducción de sulfatos, los que hacen más compleja la hidrogeoquímica del sistema. (Gonzalez, 2003).

La presencia de comunidades microbianas asociadas a las facies hidroquímicas, como resultado de los procesos naturales y/o antrópicos influyen de manera intensa en las variaciones de la calidad del agua, particularmente cuando éstas se emplean para el consumo humano y el riego agrícola.

IV.6.1. Disolución-precipitación de carbonatos

En el acuífero las aguas están fluyendo por conductos y cavernas los cuales han incrementado sus dimensiones a lo largo del tiempo, como resultado de procesos de disolución química, ya que los carbonatos son solubles en presencia de un determinado contenido de CO_2 . (Figura IV.29).

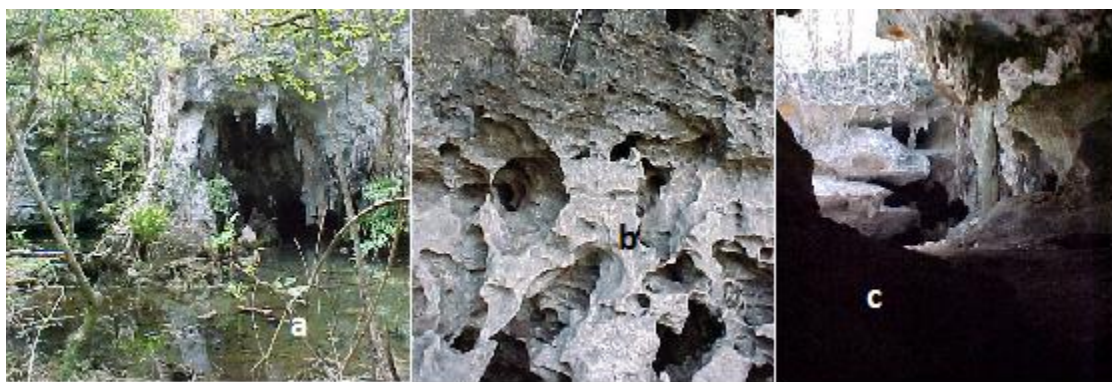


Figura IV.29 Conductos y cavernas como resultado de procesos de disolución química. Fotos tomadas en las cercanías de: a. La Bajada b. P-18P, c. P-33P (Cortesía de la tutora)

El acuífero es más vulnerable a la contaminación, especialmente cuando las cavernas adquieren relativamente grandes dimensiones (Figura IV.29). La acción autodepuradora del

mismo es menor, debido a que el contacto de las rocas con el flujo subterráneo se hace a través de las paredes rocosas de las cavidades.

En la zona de mezcla, agua dulce - agua de mar (Figura IV.29 a, b y c) se ponen en contacto dos fases físico-químicas muy diferentes, en cuanto a su composición química, mineralización, densidad, pH, temperatura y contenido de gases disueltos. En dependencia del grado de mezcla, la litología del acuífero y otras condiciones específicas, se producirán interacciones más o menos intensas y complejas, las cuales producen cambios en la permeabilidad de las rocas, así como en la geomorfología de la región. Como resultado de la mezcla de agua procedente del medio subterráneo y del mar, en ocasiones origina un agua de tipo agresiva que es capaz de disolver los carbonatos, ampliando los conductos cársicos.

IV.6.2. Reducción de sulfatos en los pozos 33 y 18

Otro de los fenómenos modificadores de la hidroquímica en el acuífero de la península de Guanahacabibes, es la reducción de sulfatos. La misma se realiza en una zona donde se produce estancamiento de agua o los movimientos son lentos y en presencia de abundante materia orgánica, que propicia un ambiente reductor y consiste en el paso del ion SO_4^{2-} a un estado inferior de oxidación, en general al S^{2-} y a veces a S o SO_3^{2-} (Custodio y Llamas, 1976).

En principio, la reducción de sulfatos está precedida de una oxidación de compuestos orgánicos, la cual aporta un contenido extra de CO_2 al agua, que genera un incremento en la concentración de iones HCO_3^- . Si la reacción ocurre a poca profundidad se puede observar el desprendimiento de CO_2 en el agua, tal como ocurre en los pozos 18 y 33 (Hernández, 2001). El contenido de sulfuro (H_2S) parece deberse a la reducción anaeróbica de los sulfatos marinos de la zona de mezcla, tomando en cuenta los valores de la relación en mg/L r SO_4/Cl . En las calas de investigación de mayor profundidad (con mayor contenido de cloruros) esta relación es del orden de 0,02, mientras que en las calas de menor contenido de cloruro (menor profundidad) la relación es mayor (0,09), lo cual indica que el proceso de reducción de sulfato se incrementa con la profundidad en el intervalo estudiado (Hernández R., 2001).

En las zonas centrales y este, donde existe abundante materia orgánica procedente de humedal u otro tipo de laguna marina, son comunes los procesos anaeróbicos de reducción

de sulfatos a profundidades donde el oxígeno disuelto en el agua es escaso y predominan las condiciones reductoras, con valores negativos relativamente altos del potencial redox, (Figura IV.30). Hernández (2001) plantea que el H_2S detectado en el pozo 18 y 33 se debe probablemente a la reducción de sulfato marino por las bacterias sulforreductoras y no a la contaminación asociada a los residuales vertidos en el área.

IV.6.3. Comportamiento del pH, Eh y Oxígeno disuelto “In Situ”

El pH medido “In situ” oscila entre valores 6.91- 8.18 (Anexo 11), no difiere significativamente del medido en el laboratorio. Tres rangos de pH resultan de la estimación espacial, con 3 zonas bien diferenciadas: la primera con $pH=7-7.4$, la segunda $pH=7.4-7.8$ y la tercera con valor superior a 7.8. Los valores superiores se concentran hacia el centro del sector de estudio. Los valores de pH medidos, tanto “In situ” como en el laboratorio son normales para aguas naturales dulces, pues no superan el valor 8, excepcionalmente los pozos 11, 12 y 17 superan esta cifra por milésimas.

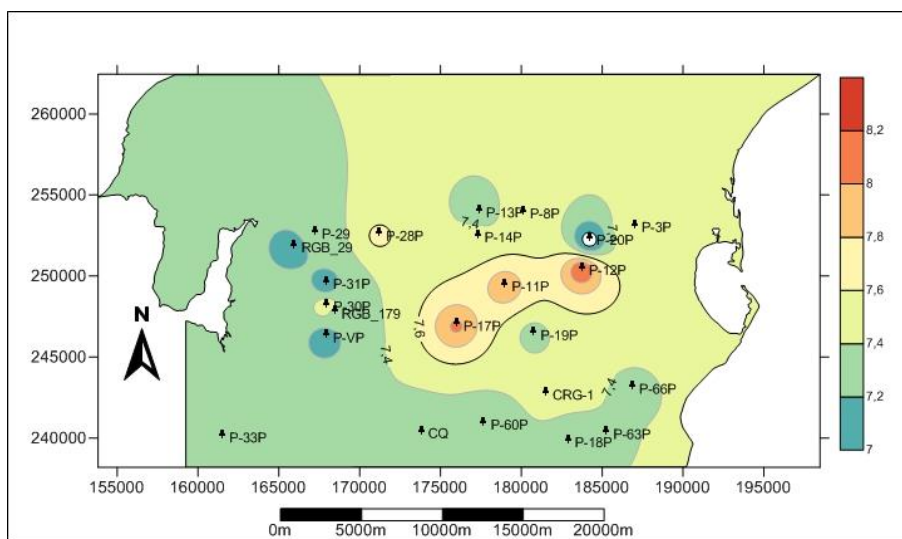


Figura IV.30. Mapa de pH “In situ” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011

Se puede representar el campo de estabilidad de las aguas naturales en términos de Eh-pH a 25°C. Los límites corresponden a las condiciones de disociación de la molécula de agua en sus componentes gaseosos. Los valores de pH (6-8) y Eh (3-3,5 V) cuando son representados gráficamente, corresponden según Lillo (2007) a aguas de transición. Las

zonas con Eh superiores a 3,5 V constituyen zonas de ambientes oxidantes, en el mapa se localizan en la zona centro occidental (Figura IV.30). Se incluyen los pozos Vivero, abasto al poblado de Manuel Lazo y a la ESBEC 30, el pozo 63 y la Ciénaga Remates de Guane, localizados hacia el SE del sector. Los valores bajos de Eh menores (2V) son indicadores de existencia de procesos de reducción, los pozos 18, 33, 12, 19 y 20 se incluyen en esta categoría.

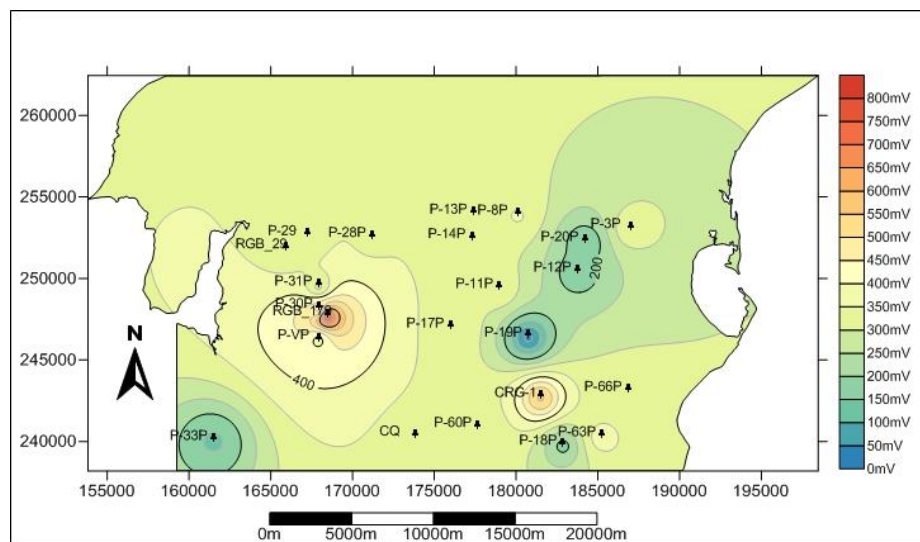


Figura IV.31. Mapas de Eh “In situ” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011

El oxígeno disuelto expresa la capacidad de un agua para oxidar materia orgánica en la parte superior de la zona saturada. La isolínea 4 mg/L marca el límite máximo permisible. Los pozos P-29, P-30P, P-11P, P-18P, P-63P, P-66P y el punto CRG-1 superan la norma permisible (Anexo 9). En las zonas aledañas a estos pozos se verifican procesos de oxidación, con un marcado desarrollo hacia la zona SE, en esta zona se localiza parte de la Ciénaga de Remates de Guane, cuanto más se acerca a la costa mayor es la intensidad de la anomalía.

La zona SE en el mapa (Figura IV.31) muestra una gran anomalía que incluye tres pozos muy cercanos a la línea de costa. En el lado opuesto, observamos dos pozos (P-29 y P-30P) con un comportamiento similar a los del SE, con valores superiores a 4 mg/L. Hacia el centro del área solo el pozo 11 supera el valor máximo permisible.

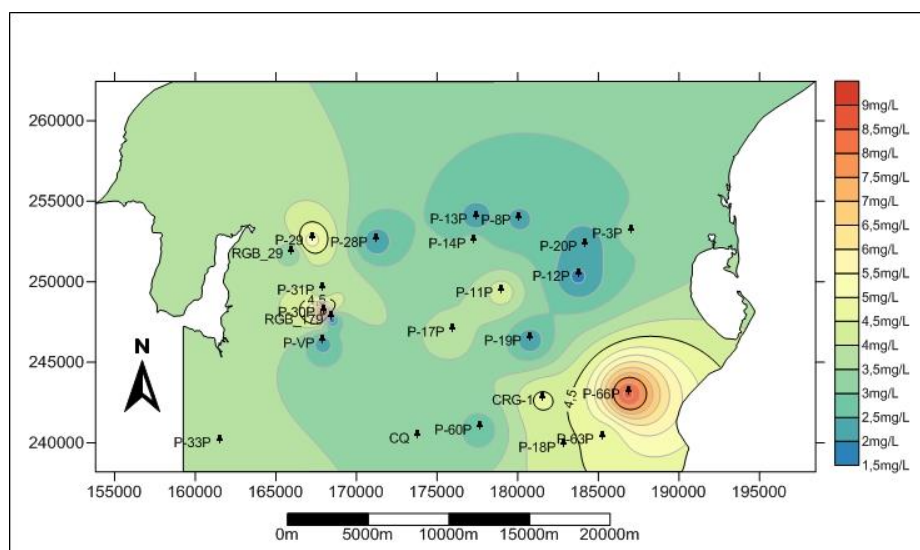


Figura IV.32. Mapa de oxígeno disuelto “In situ” a escala 1:25 000. Sector este del acuífero Guane, junio 2011

Por todo lo discutido en este capítulo se evidencia un franco deterioro de la calidad ambiental de las aguas subterráneas en el acuífero Neógeno-Cuaternario Guane provocado por procesos naturales asociados a la intrusión salina, por una parte y por otra a la actividad antrópica que se desarrolla en la región.

CONCLUSIONES

1. El estudio variográfico corrobora la variabilidad espacial de los componentes mayoritarios y sus relaciones iónicas. La aplicación de la técnica multivariada, análisis de factorial, demostró la existencia de tres factores: salinidad, litología y sulfatos, los cuales explican el 95.6% de la variabilidad espacial de los componentes mayoritarios de las aguas subterráneas en el sector. Las direcciones preferenciales de salinización en este sector del acuífero Guane, coincidente con las alineaciones SE- NW, y SW-NE, avanza tierra adentro a distancias de 22 y 6 km respectivamente.
2. El comportamiento de las precipitaciones es variable, estacional y espacial, las estaciones pluviométricas del N y NE registran relaciones de años secos contra años húmedos a razón de 1.3-1.58, las del NW y SE tienden al equilibrio con valores de 0.7 y 1.1, mientras que las estaciones del oeste muestran una tendencia al crecimiento discreto a razón de 1.1. Esto demuestra que la recarga del acuífero a partir de la esorrentía superficial es menor.
3. Las fluctuaciones en los valores de niveles piezométricos están relacionadas con la recarga de lluvia, posiblemente con las mareas y la evapotranspiración por plantas freatofitas del acuífero.
4. En general en el acuífero cársico costero se pudieron distinguir tres zonas geoquímicas con las características siguientes: 1. Zona marina: en que prevalecen las aguas del tipo $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$, sobresaturadas en relación con la calcita, 2. Zona de mezcla o dispersión: donde las aguas son de los tipos $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$, $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ o de facies intermedias, y suelen encontrarse insaturadas respecto a la calcita y 3. Zona de agua dulce: en que prevalecen las aguas del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ en equilibrio con la calcita.
5. Se encontró diferencias entre las comunidades bacterianas de las muestras de agua de mar, agua superficial y agua subterránea tanto en la dirección horizontal como en la vertical, debido a la variación significativa de la hidrogeoquímica en las aguas subterráneas del área de estudio. Los registros históricos de la Red Cal manifiestan controles temporales elevados de Coliformes Totales y Fecales en varios pozos, este hecho demuestra que ocasionalmente los pozos se han

contaminados por materia fecal proveniente fundamentalmente de la actividad antrópica.

6. La investigación ha demostrado que la calidad ambiental del acuífero Neógeno Cuaternario Guane, en el sector investigado, ha transitado por un periodo de deterioro progresivo en el orden físico-químico y microbiológico, que podemos explicar en términos de procesos naturales, como respuesta a la intensidad de la antropización del acuífero Guane.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar la red de monitoreo de calidad (Red Cal) hacia el sur y sureste del sector de investigación.
2. Activar los pluviómetros de la red hidrológica del INRH presentes en el sector, por cuanto pueden aportar valiosa información, acerca de las precipitaciones caídas en la zona central y sur occidental del sector de estudio y que actualmente no se registran con la calidad requerida para estas investigaciones.
3. Diseñar y activar una red de monitoreo de las aguas superficiales en el sector de investigación, que nos permita esclarecer la evolución de la calidad de estos cuerpos de aguas y su relación con las subterráneas, como posible fuente de recarga.
4. Aplicar un monitoreo con periodicidad mensual de los parámetros hidrodinámicos, hidroquímicos y microbiológicos, a todos los pozos de la red de investigación incluidas en este estudio, por cuanto la planificación de monitoreo del INRH no revela la situación actual y evolución futura de la calidad del agua en el acuífero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Acosta, J. I. (2006). "Empleo de los SIG en la ingeniería geológica", X Evento Nacional de Hidrogeología Zapata 2006, Matanzas, Cuba, 20 p.
- Álvarez, F., (2002). Léxico Estratigráfico de Cuba. Biblioteca del Instituto Nacional de Geología y Paleontología. Segunda Versión. La Habana, Cuba.
- Appelo C.A. J., Postma, D. (1993). Geochemistry, groundwater and pollution. Ed. A.A Balkema. Rotterdam. Brookfield. 536pp.
- Arias M., Vargas A. (2003). "Geofísica Aplicada al Problema de la Intrusión Marina en los Acuíferos Costeros de Costa Rica", Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos, Madrid, España.
- Blanco, M., Pereira, W.L. (2011). Comportamiento Hidrodinámico e Hidrogeoquímico de la intrusión marina en el acuífero costero de la Península de Guanahacabibes, Trabajo de diploma presentado en opción al título de Ingeniero Geólogo, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba, 100p.
- Calvache, D. (1997). "Aplicación de modelos numéricos a la simulación del contacto agua dulce-agua salada. Algunos ejemplos españoles". Curso avanzado sobre contaminación de aguas subterráneas. Monitoreo, evaluación y recuperación. La Habana, Cuba, 7 p.
- Castany, G. (1971). Tratado práctico de las aguas subterráneas, Editorial Omega, Barcelona, 672 p.
- Castillo, R.; López, J.A.; Monserrat, F.X. (1989): Impacto socio- económico producido por la intrusión marina por efecto de sobrebombeo en acuíferos del litoral peninsular. Tem. Geol. Min., X, 329-356, ITGE. Almería.
- Cedestrom, J. (1971). "Aguas subterráneas una introducción". Editorial Instituto Cubano del Libro, La Habana, 260 p.
- Celico, F., Capuano, P., Felice, V., Naclerio, G. (2008). Hypersaline groundwater genesis assessment through a multidisciplinary approach: the case of Pozzo Sale Spring (southern Italy), Hydrological processes, Italy, 1-11.
- Cofiño C. E.; Cáceres, D. G. (2009). Clase práctica y tarea, cartografía y geología estructural, perfil Yaguanabo. Curso de geología estructural, Maestría de Geología, Mención Ambiental. UPR Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río.

- Custodio E. y Llamas M.R. (1976). Hidrogeología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona, España
- Custodio, E. (1989). Consideraciones sobre la sobreexplotación de acuíferos en España. En: La Sobreexplotación de Acuíferos. Ed. Inst. Tecnológico Geo-Minero de España, Almería: 43-64.
- Denis, R., Díaz C. (1993). Caracterización Geológica y Geomorfológica de la Península de Guanahacabibes. Biblioteca Empresa de Geología de Occidente.
- Díaz D, González P, González W. (2001): Investigación hidrogeológica para la ampliación del C.I.B. "María La Gorda". Informe inédito. INRH. Pinar del Río.
- Echeverría, D. P.F. (2006). "Nuevo enfoque del tratamiento de la intrusión marina en los acuíferos costeros". Centro de Investigaciones Hidráulicas. I.S.P José Antonio Echeverría. Habana. 10 p.
- Eraso Romero A., Murillo Diaz J., y Grima Olmedo J. (1992). "Aplicación de métodos de predicción del drenaje subterráneo al Macizo del Garraf". Boletín Geológico y Minero, Vol. 103, No. 1, pp. 120 - 128.
- Fagundo, J.R, (1985). Caracterización de acuíferos mediante relaciones entre contenidos iónicos y parámetros químico físicos. Revista CENIC Ciencias Químicas, 16 (2): 221-236.
- Fagundo, J.R., Álvarez, E., Benítez, G., Ferrera, V., Vega, J., (1992): Simulación química y matemática de la disolución de rocas carbonatadas por las aguas naturales. Proc. del XXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, La Habana 1992, 152-157.
- Fagundo, J.R., Arellano, D.M., Benítez, G., Surí, A., Avilé, C., Ferrera, (1993 a). Cambios hidrogeoquímicos por sobreexplotación de acuíferos cársicos. Libro de Comunicaciones. I Taller sobre Cuencas Experimentales en el karst, Matanzas (Cuba). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España), 141-148.
- Fagundo, J.R., Rodríguez, J.E., Vega, J. (1995). Contribución al conocimiento hidrodinámico de los sistemas cársicos del Pan de Guajaibón y la Meseta Guaso a partir de datos hidroquímicos durante las crecidas. En: El Karst y los Acuíferos Kársticos. Ejemplos y Métodos de Estudio. Ed. Univ. Granada: 119-135.

- Fagundo, J.R (1996). Procesos hidrogeoquímicos y calidad de las aguas. Contribución a la Hidrología y Medio Ambiente en Cuba.
- Fagundo, J.R., González, P., Ferrera, V., Benítez, G., Furet, R. (1996 b). Intensificación de la corrosión química por la actividad humana en los acuíferos cársicos del occidente de Cuba. Contribución a la Hidrología y Medio Ambiente en Cuba.
- Fagundo, J.R., González, P., Benítez, G., Jiménez, S., Ferrera, V., González, A., Romero, E., Orihuela, D., Ramírez, J., Suárez, M. (1999). “Metodología para la caracterización geoquímica de los acuíferos cársicos costeros. II. Identificación de los procesos de mezcla y modificación de las facies hidroquímicas”. Contribución a la Educación y la protección Ambiental. V-0, pp 182-191. V Taller.
- Fagundo J. R. Cástillo, González P., Benítez G., Jiménez S., Ferrera V., González A., Romero E., Orihuela D. (1998). “Geoquímica del acuífero cársico costero Güira Quivicán (Cuenca sur de la Habana)”, Ingeniería Hidráulica, Vol. XX. No.3, 1999, Cuba, 7p.
- Facundo J.R. (2007). “CD Contribución al desarrollo de la hidrogeoquímica”.
- Farfán González H; Corvea Porras JL; Maqueira Y; Días Guanche C; Aldana Vilas C; Bustamante Gutiérrez I & Parise M (2009): Impact of the hurricanes Gustav e Ike in the karst areas of the Viñales National Park, Cuba. Geophysical Research Abstract, Vol. 11: 1186. ISSN: 1029-7006.
- Farfán González H; Días Guanche C; Corvea Porras JL; Bustamante Gutiérrez I (2009): Comparación estadística de diferentes metodologías para la cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos cársicos. 3ra. Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. GEOCIENCIAS 2009. 16-20 de marzo. La Habana, Cuba: ISSN: 978-959-7139-83-6.
- Fidelibus, M.D, (1991). Trazadores geoquímicos ambientales. I Curso de contaminación de las aguas subterráneas. Universidad Jaume I de Castellón. Inédito.
- Ghyben W. (1988). Tratado práctico de las aguas subterráneas, Editorial Omega, Barcelona, 672 p.
- Giménez, E. (1994). Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón (España).
- González P., Fagundo J., Benítez G., Suárez M., Ramírez J. (1998). “Influencia de la reducción de sulfatos en los procesos de disolución y precipitación de rocas

- carbonatadas en un acuífero cársico costero”, Ingeniería hidráulica, Vol. XX. No. 3, 1999, Centro de investigaciones científicas, La Habana, Cuba, 5p.
- González, P. (2003). “Contribución al conocimiento hidrogeoquímico de acuíferos cársicos costeros con intrusión marina. Sector Güira-Quivicán, Cuenca Sur de La Habana”, Tesis en Opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Vicedirección de Docencia e Investigación, Centro Nacional de Termalismo, La Habana, Cuba, 174 p.
- Guerra, O. (1986). Algoritmo booleano de interpretación de matrices. Conferencia Instituto Nacional de Recursos Hidráulico.
- Guerra, O. (1994). Mapa morfoestructural de la República de Cuba. INRH.
- Granada Sanz, A. S. (1988). “Aplicación de los Métodos Geofísicos al Estudio de la Intrusión en Acuíferos Costeros”, Experiencia Española, Barcelona: Compañía General de Sondeos, S.A. Madrid. 25 p.
- Heatchcote, J.A, (1985). Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction. Ed.: Clarendon Press. 296 pp. Oxford.
- Herman, J.S., Back W., Pomar, L. (1986). Speleogenesis in groundwater mixing zone. The coastal carbonate aquifers of Mallorca and Menorca, Spain. 9 th Congreso Internacional de Espeleología, Barcelona, 1: 13-15.
- Hernández, R., Guerra, O., (1997). Clasificación morfoestructural de Guanahacabibes. Inédito.
- Hernández, R. (2001). “Procesos de Salinización del Acuífero Neógeno Cuaternario de Guane”, Tesis de aspirante al grado de Doctor en Ciencias, Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba.
- Hernández A. (2002). “Reconocimiento de la posición de la interfaz por el grado de contaminación del agua subterránea”, Cursos internacional de agua subterránea y medio ambiente (CIASMA 2002), Cuba, 10p.
- Hernández R. (2009). “Estudio de impacto ambiental”. Curso de maestría en geología ambiental. UPR Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río.
- Hernández R. (2009). Estudios hidrogeológicos. Curso de maestría en geología ambiental. UPR Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río.
- Hernández, R. R. (2009). “Introducción a los SIG”. Curso de maestría en geología ambiental. UPR Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río.

- Iturralde-Vinent, M. (2009). "Origen y evolución del Caribe y sus biota marinas y terrestres. [CD ROM]", Centro Nacional de Información Geológica, ISBN 959-7117-14-2, La Habana, Cuba.
- Jiménez, R. (2009). "Métodos Geofísicos Integrados. Caso de Estudio Salinidad de los Acuíferos", Recopilación personal, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. 14p.
- Kaiser, H.F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23, 187-200. Berkeley. California.
- Lastra, J. F. (2009). "Geoquímica ambiental", Curso de maestría en geología ambiental. UPR Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río.
- Lloyd, J.W., Heatchcote, J.A. (1985): Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction. Ed.: Clarendon Press. 296 pp. Oxford.
- Lloyd J.W., Tellam J.H., (1988). Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas en áreas costeras, Universidad de Birmingham. Reino Unido, 3-19.
- López, Chicano, M., (1992). Análisis morfoestructural para acuíferos cársicos. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Mangin, A., (1975). Contribution á l'étude hydrodinamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat és Sciences Naturalles. Dijon. *Annales Spéléologie*, 29(3): 283-332; (4): 495-601; 30(1): 21-124.
- Martínez E. (1998). "Manual de ArcView, apuntes", Empresa de investigaciones y proyectos hidráulicos de Villa Clara, Santa Clara, Cuba, 16p.
- Martínez G. A. (1997 a). "Evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas en zonas costeras: sobre explotación /intrusión salinización", Curso avanzado sobre contaminación de aguas subterráneas. Monitoreo, evaluación y recuperación. Grupo de hidrogeología y medio ambiente. Universidad de Huelva. Habana. 4 p.
- Martínez G. A. (1997 b). "Aspectos medioambientales de la evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas. Grupo de hidrogeología y medio ambiente", Curso avanzado sobre contaminación de aguas subterráneas. Monitoreo, evaluación y recuperación. Universidad de Huelva. Habana. 20 p.
- Martínez, G. A. (1997 c). "La contaminación de las aguas subterráneas como caso particular de la contaminación ambiental", Curso avanzado sobre contaminación de

- aguas subterráneas, monitoreo, evaluación y recuperación. Universidad de Huelva. Habana. 23 p.
- Mcarthur, J.M.; Turner, J.; Lyons, W.B.; Thirlwall, M.F, (1989). Salt sources and water-rock interaction on the Yilgarn Block, Australia: isotopic and major element tracers. *Applied Geochemistry*, 4, pp.: 79-92.
- Mercado, A., (1988). Intrusión marina-Factor determinante en la gestión de los acuíferos costeros, *Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros*, Almuñécar, España, 7-36.
- Medina, J., Pulido-Bosch, A., Fernández, R., (1986). Caracterización de la intrusión marina en el acuífero costero de Oropesa-Torreblanca, provincia de Castellón, en base al estudio de relaciones iónicas. *Hidrogeología* 1:15-31.
- Miranda, W. R. (2008). “Monitoreo de la intrusión salina en acuíferos cársicos utilizando métodos geoeléctricos”. Habana, Cuba, 6p.
- Molerio, L. 2004: Proceso de cavernamiento (espeleogénesis) en sistemas hipogénicos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol XXV, No. 2.
- Morell, I., (1985). Caracterización hidroquímica de la intrusión Marinas en la plana de Castellon (Castellón). *Hidrogeología*, 12: 121-132.
- Morell, I., Gímenez, E., Esteller, M.V., (1988). Comportamiento iónico y proceso físico-químico en acuíferos costeros de las Planas de Oropesa, Castellón y Granada (Com. Valenciana). *Hidrogeología*, 3: 21-33.
- Morell I., Giménez E., Fagundo R., Pulido-Bosch A., López-Chicano M., Calvache M.L., Rodríguez-Rubio J.E., (1997). “Hydrogeochemistry and karstification in the Cienaga de Zapata aquifer (Matanzas, Cuba)”, *Karst Waters & Environmental Impacts*, Günay & Johnson (eds) 1997 Balkem, Rotterdam. ISBN 90-54-10-8584, 10p.
- NC 93-02. (1985). “Higiene Comunal Agua Potable. Requisitos Sanitarios y Muestreo”.
- Nieto, M. (1973). Estudio hidrogeológico de la rambla de Albuñol (Granada). Tes. Lic. Univ. Granada. 142 p. Granada.
- Núñez Jiménez A., Viña Bayes N., Acevedo González M. et al. (1984). *Cuevas y Carsos*. Editorial Científico-Técnica, Ciudad de la Habana, 431 p.
- Peifeng, L. (2009). “Curso de SIG. Introducción a los SIG, aplicación y uso del CadCoro SIS 6.2”, JICA, Camagüey, Cuba, 50p.

- Peñate, J. (2009). “Riesgos Geológicos”, Curso de Maestría en Geología Ambiental, UPR. Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río.
- Pérez-Franco, D. (2006). “Nuevo enfoque del tratamiento de la intrusión marina en los acuíferos costeros”. Centro de Investigaciones Hidráulicas. I.S.P. José Antonio Echeverría. Habana. 10 p.
- Quintín J. (2009). “ Geoestadística”. Curso de maestría en geología ambiental. UPR. Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río.
- Rangel M., Morales R., Morales M., Castillo J. (2003). “Caracterización geoquímica e isotópica del agua subterránea y determinación de la migración de la intrusión marina en el acuífero de la costa de Hermosillo, Son., México”, Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos, Madrid, España, 11p.
- Rodríguez E. (2009). “Estudio geofísico para abasto zona Oeste Trinidad”. Empresa de investigaciones y proyectos hidráulicos de Villa Clara, Villa Clara, Cuba, 22p.
- Rodríguez. J. M. (2008). “Planificación Ambiental”, La Habana: Universidad de la Habana, Facultad de Geografía, 56 p.
- Romero Macía, E (1998). Caracterización de las salinidades en la parte norte del Parque Nacional de Doñana. (Tesis doctoral) Universidad de Huelva.
- Sarduy, F. Q. (1998). “Predicción del drenaje subterráneo en la zona cársica San Juan del macizo montañoso Escambray”, Tesis de aspirante a Máster en Geología, Facultad de Geología y Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, 95 p.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Ed. 20th, 1998.
- Valdés, A. H. (2002). “Reconocimiento de la posición de la interfaz por el grado de contaminación del agua subterránea”, Curso Internacional de agua subterránea y medio ambiente, Cuba, 10 p.
- Vengrazhanovich, R, (1980). Informe Hidrogeológico de la Península de Guanahacabibes. Inédito. Archivo EIPH Pinar del Río.
- World Health Organization, (2006). Guidelines for Drinking Water Quality. Vol.1 y Vol. 3. Geneva.

Anexo textual 1. Puntos de observaciones de la red de investigación del INRH

<i>No</i>	<i>Descripción del punto</i>	<i>Código</i>	<i>Coord_X</i>	<i>Coord_Y</i>	<i>Cota</i>
1	ESBEC Isabel Rubio	P-8P	180090	253830	10,5
2	ESBEC Julio Antonio Mella	P-11P	178980	249330	28,5
3	ESBEC Antonio Briones Montoto	P-12P	183740	250340	15,0
4	ESBEC Carlos Marighela	P-13P	177390	253890	17,0
5	ESBEC Capitán San Luis	P-14P	177290	252380	10,0
6	ESBEC Esposos Rosemberg	P-15P	174560	253830	15,0
7	ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P	175980	246890	25,0
8	ESBEC Batalla de Cacarajícara	P-19P	180750	246340	22,5
9	ESBEC Celestino Pacheco	P-20P	184200	252210	10,0
10	ESBEC Gerardo Medina	P-26P	176980	257290	30,0
11	ESBEC Paquito Rosales	P-28P	171200	252460	8,0
12	IPA Marien Ngouabi	P-29P	167220	252570	22,5
13	IPUEC Gerardo Abreu Fontan	P-30P	167945	248099	25,0
14	ESBEC Pedro A Quintana	P-31P	167910	249490	25,0
15	Pozo 33	P-33P	161500	240000	3,5
16	Pozo 3	P-3P	187000	253000	17,5
17	Pozo 18	P-18P	182868	239716	8,0
18	Estación Limnigráfica	RGB-29	165950	251750	22,5
19	Pozo Vivero	P-VP	167908	246175	8,8
20	Pozo 60	P-60P	177665	240804	5,6
21	Pozo 66	P-66P	186850	243010	
22	Pozo-158	P-158P	187805	246825	6,6
23	Pozo 63	P-63P	185250	240225	

Anexo textual 2. Puntos de observaciones de la Red Cal utilizados en la investigación

<i>No</i>	<i>Descripción del punto</i>	<i>Código</i>	<i>Coord_X</i>	<i>Coord_Y</i>
1	ESBEC 21-27	RGD-1A	172850	258700
2	Acueducto Cortés	A-C	186800	252100
3	Acueducto Bolívar	RS-28	162900	260300
4	Pozo Laguna Grande	LA-1	161800	256250
5	Acueducto Sandino Sur	RV-38	169800	253700
6	Acueducto La Fe	RGB-144A	163350	250150
7	Comunidad Rural Limones	RG-12	171950	258250
8	Acueducto Sandino (Río Verde)	RV-2	168800	253050
9	Acueducto Sandino (Hospital)	RV-3A	169750	254100
10	Acueducto Manuel Lazo	RGB-179	168450	247650
11	Entronque Las Catalinas	RC-218	182850	260950
12	Acueducto Las Catalinas	RC-269	184100	259150
13	Acueducto Comunidad Rural Laguna Vieja	A-LV	188370	259850

Anexo textual 3. Puntos de observaciones de la red de monitoreo de niveles piezométricos

<i>No</i>	<i>Descripción del punto</i>	<i>Código</i>	<i>Coord_X</i>	<i>Coord_Y</i>
1	Estación Limnigráfica	RGB-29	165950	251750
2	Pozo 33	P-33P	161500	240000
3	Pozo Vivero	P-VP	167908	246175
4	ESBEC Gerardo Abreu Fontán	P-30P	167945	248099
5	Pozo 60	P-60P	177665	240804
6	Pozo 18 Pasada de Marín	P-18P	182868	239716
7	ESBEC Carlos Marighela	P-13P	177390	253890
8	ESBEC Capitán San Luis	P-14P	177290	252380
9	ESBEC Julio A. Mella	P-11P	178980	249330
10	ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P	175980	246890
11	ESBEC Paquito Rosales	P-28P	171200	252460
12	Pozo 3	P-3P	187000	253000
13	ESBEC Isabel Rubio	P-8P	180090	253830
14	IPA Marien Ngouabi	P-29P	167220	252570
15	IPUEC Pedro A. Quintana	P-31P	167910	249490
16	ESBEC Antonio Briones Montoto	P-12P	183740	250340
17	ESBEC Batalla de Cacarajícara	P-19P	180750	246340
18	ESBEC Celestino Pacheco	P-20P	184200	252210
19	ESBEC Esposos Rosemberg	P-15P	174530	253890
20	Acueducto Manuel Lazo	RGB-179	168450	247650
21	Pozo 158	P-158P	187805	246825

Anexo textual 4. Los puntos de observaciones de la red de monitoreo de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos

<i>No</i>	<i>Descripción del punto</i>	<i>Código</i>	<i>Coord_X</i>	<i>Coord_Y</i>
1	Estación Limnigráfica	RGB-29	165950	251750
2	Pozo 33 (- 10 m)	P-33P	161500	240000
3	Pozo Vivero	P-VP	167908	246175
4	RGB 30	RGB-30	167945	248099
5	Pozo 66	P-66P	186850	243010
6	Cueva Quintana	CQ	173800	240270
7	Pozo 60	P-60P	177665	240804
8	Pozo 63	P-63P	185250	240225
9	Pozo 18 (-4 m)	P-18P	182868	239716
10	ESBEC Carlos Marighela	P-13P	177390	253890
11	ESBEC Capitán San Luis	P-14P	177290	252380
12	ESBEC Julio Antonio Mella	P-11P	178980	249330
13	ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P	175980	246890
14	ESBEC Paquito Rosales	P-28P	171200	252460
15	Pozo 3	P-3P	187000	253000
16	ESBEC Isabel Rubio	P-8P	180090	253830
17	IPA Marien Ngouabi	P-29P	167220	252570
18	IPUEC Pedro A. Quintana	P-31P	167910	249490
19	ESBEC Antonio Briones Montoto	P-12P	183740	250340
20	ESBEC Batalla de Cacarajícara	P-19P	180750	246340
21	Pozo_3	P-3P	187000	253000
22	Pozo 18 (-5 m)	P-18P	182868	239716
23	ESBEC Celestino Pacheco (-2 m)	P-20P	184200	252210
24	Acueducto Las Catalinas	A-LC	184100	259150
25	Acueducto Punto de Control	A-PC	182240	261350
26	ESBEC 21-27	RGD-1A	172850	258700
27	Acueducto Sandino (próximo al Hospital)	RV-3A	169750	254100
28	Acueducto Comunidad Rural Limones	RG-12	171950	258250
29	Acueducto Sandino Sur	RV-38	169800	253700
30	Acueducto Bolívar	RS-28	162900	260300
31	Acueducto Sandino Rio Verde	RV-2	168800	253050
32	Acueducto La Fe	RGB-144A	163350	250150
33	Acueducto Manuel Lazo	RGB-179	168450	247650
34	Acueducto Comunidad Rural Laguna Vieja	A-LV	188370	259850
35	Acueducto Cortés	A-C	186800	252100
36	Pozo de abasto a Laguna Grande	LA-1	161800	256250

Anexo textual 5. Puntos de observaciones de la red de monitoreo de aguas superficiales

<i>No</i>	<i>Puntos de observación</i>	<i>Código</i>	<i>Coord_X</i>	<i>Coord_Y</i>
1	Río Cuyaguaje	RCY	182900	261300
2	Laguna el Pesquero	LP	180959	256960
3	Ciénaga Los Remates P1	CRG-1	181500	242650
4	Ciénaga Los Remates P2	CRG-2	166200	251500
5	Mar Bahía Guadiana	MBG	162000	249500
6	Mar Bahía Cortés	MBC	190645	249708
7	Presa Derivadora Cuyaguaje	PDC	183400	260100
8	Presa Laguna Grande	PLG	161300	255700

Anexo textual 6. Los puntos de mediciones de parámetros hidroquímicos “In situ”

<i>No</i>	<i>Muestra</i>	<i>Código</i>	<i>Coord_X</i>	<i>Coord_Y</i>
1	Estación Limnigráfica	RGB_29	165950	251750
2	Pozo 33	P-33P	161500	240000
3	Ciénaga de Remates 1	CRG-1	181500	242650
4	Pozo Vivero	P-VP	167945	248099
5	Mar Bahía de Guadiana	MBG	162000	249500
6	Piezométrico Manuel Lazo	RGB_179 PZ	168450	247650
7	Acueducto Manuel Lazo	RGB_179	168450	247650
8	IPUEC Gerardo Abreu Fontán	P-30P	167945	248099
9	Pozo 66	P-66P	186850	243010
10	Cueva Quintana	CQ	173800	240270
11	Pozo 60	P-60P	177665	240804
12	Pozo 63	P-63P	185250	240225
13	Pozo 18	P-18P	182868	239716
14	Laguna el Pesquero	LP	180959	256960
15	ESBEC Carlos Marighela	P-13P	177390	253890
16	ESBEC Capitán San Luis	P-14P	177290	252380
17	ESBEC Julio A. Mella	P-11P	178980	249330
18	ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P	175980	246890
19	ESBEC Paquito Rosales	P-28P	171200	252460
20	Pozo 3	P-3P	187000	253000
21	Bahía de Cortés	MBC	190645	249708
22	ESBEC Isabel Rubio	P-8P	180090	253830
23	IPA Marien Ngouabi	P-29	167220	252570
24	ESBEC Pedro A. Quintana	P-30P	167945	248099
25	ESBEC Celestino Pacheco	P-20P	184200	252210
26	ESBEC Batalla de Cacarajícara	P-19P	180750	246340

Anexo textual 7. Denominación de los ensayos y métodos empleados para los análisis de laboratorio químico

<i>Ensayo</i>	<i>Denominación</i>	<i>Método o Técnica de ensayo</i>
pH	Potencial de hidrógeno	SMWW 4500B Método electrométrico
CE	Conductividad Eléctrica	SMWW 2510B Método electrométrico
Ca ²⁺	Calcio	SMWW 3500B Método de valoración con EDTA
Mg ²⁺	Magnesio	SMWW 3500B Método de cálculo
Na ⁺	Sodio	SMWW 3500B Método fotométrico de emisión con llama
K ⁺	Potasio	SMWW 3500B Método fotométrico de emisión con llama
Cl ⁻	Cloruro	SMWW 4500B Método Argentométrico
NO ₃ ⁻	Nitrato	SMWW 4000 Método colorimétrico
HCO ₃ ⁻	bicarbonato	SMWW 2320B Método de valoración
CO ₃ ²⁻	Carbonato	SMWW 2320B Método de valoración
SO ₄ ²⁻	Sulfato	NC 93-01-118:87 Método turbidimétrico
NO ₂ ⁻	Nitrito	SMWW 4500 Método colorimétrico
DQO	Demanda Química de Oxígeno	Método Volumétrico, oxidación con permanganato
PO ₄ ³⁻	Fosfato	SMWW 4500 -P D- Método del Cloruro estañoso
Fe _T	Hierro Total	SMWW 3500- Fe B Método de la Fenantrolina
Mn	Manganeso	SMWW 3500- Método del Persulfato
Tu	Turbidez	Método Turbidimétrico
SST	Sales solubles totales	Método de cálculo
Alc	Alcalinidad	SMWW 2320B Método de valoración
D _T	Dureza Total	De cálculo
T	Temperatura	Método electrométrico

Anexo textual 8. Mediciones de niveles piezométricos (m) en pozos de la red de investigación del INRH

<i>Muestras</i>	<i>Código</i>	<i>jun-11</i>	<i>jul-11</i>	<i>ago-11</i>	<i>sep-11</i>	<i>oct-11</i>	<i>Lluvioso NPm</i>	<i>nov-11</i>	<i>dic-11</i>	<i>ene-12</i>	<i>feb-12</i>	<i>Seco NPm</i>
Estación Limnigráfica	RGB-29	1,95	1,48	0,88	1,28	1,38	1,39	1,25	1,23	1,19	1,2	1,22
Pozo 33	P-33P	2,30	2,3	1,99	2,00	2,05	2,13	1,93	1,91	1,88	1,89	1,90
Pozo Vivero	P-VP		0,95	1,37	1,70	1,84	1,47	1,67	1,63	1,60	1,60	1,63
ESBEC Gerardo Abreu Fontán	P-30P		2,08	2,13	2,09	2,23	2,13	2,07	2,06	2,01	2,02	2,04
Pozo 60	P-60P			0,83	0,80	1,19	0,94	0,80	0,75			0,78
Pozo 18 Pasada de Marín	P-18P	1,00	1	1,21	1,25	1,33	1,16	1,20	1,16	1,16	1,18	1,18
ESBEC Carlos Marighela	P-13P		1,57	1,87	1,88	1,99	1,83	1,85	1,82	0,76	0,77	1,30
ESBEC Capitán San Luis	P-14P		5,89	5,03	5,06	5,08	5,27	5,01	4,99	4,94	4,95	4,97
ESBEC Julio A. Mella	P-11P		2,76	2,76	2,78	2,86	2,80	2,56	2,46	2,68	2,70	2,60
ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P		1,23	1,29	1,30	1,39	1,30	1,27	1,25	1,20	1,22	1,24
ESBEC Paquito Rosales	P-28P			2,56	2,55	2,69	2,60	2,52	2,51	2,45	2,46	2,49
Pozo 3	P-3P	1,07	1,16	1,13	1,16	1,19	1,16	1,06	1,01	0,96		1,01
ESBEC Isabel Rubio	P-8P		1,96	1,31	1,37	1,45	1,52	1,32	1,32	1,23	1,24	1,28
IPA Marien Ngouabi	P-29P		2,75	2,04	2,10	2,14	2,26	1,99	1,98	1,94	1,95	1,97
IPUEC Pedro A. Quintana	P-31P		1,84	1,95	1,92	2,05	1,94	1,91	1,89	1,84	1,85	1,87
ESBEC Antonio Briones Montoto	P-12P		3,04	2,53	2,58	2,59	2,69	2,54	2,54	2,47	2,49	2,51
ESBEC Batalla de Cacarajícara	P-19P		1,35	1,47	1,55	1,55	1,48	1,55	1,48	1,42	1,45	1,48
ESBEC Celestino Pacheco	P-20P	1,18	1,38	1,11	1,16	1,18	1,21	1,07	1,05	0,98	1	1,03
ESBEC Esposos Rosenberg	P-15P			2,30	2,30	2,41	1,75	2,27	2,24	2,28	2,24	2,26
Acueducto Manuel Lazo	RGB-179				1,37	1,40	1,39	1,26	1,23	1,18		1,22
Pozo 158	P-158P			-0,19	-0,16	-0,17	-0,17	-0,24	-0,28	-0,26		-
												0,26

Anexo textual 9. Mediciones “In situ” de parámetros hidroquímicos en pozos de investigación del INRH

<i>Código</i>	<i>Fecha</i>	<i>T°C</i>	<i>CE</i> <i>mS/cm</i>	<i>pH</i>	<i>O2</i> <i>(mg/L)</i>	<i>Redox</i>	<i>Eh</i> <i>(mV)</i>	<i>CO₂</i>	<i>HCO₃⁻</i> <i>(meq/L)</i>	<i>HCO₃⁻</i> <i>(mg/L)</i>	<i>CO₃²⁻</i> <i>(meq/L)</i>	<i>CO₃²⁻</i> <i>(mg/L)</i>
RGB_29	22/06/2011	27,5	438	7,07	3,2	122	307	44	3,5	213,5	0	0
P-33P	24/06/2011	26,1	1940	7,39	3,6	-42	143	N/R	4,5	274,5	0	0
CRG-1	24/06/2011	25,8	369	7,42	4,6	369	554	N/R	1,2	13,2	0	0
P-VP	24/06/2011	26,1	1310	7,07	2,2	205	390	N/R	3	183	0	0
MBG	24/06/2011	25,2	40338	8,39	4,9	148	333	0	1,4	85,4	1	60
RGB179 PZ	25/06/2011	26	834	7,01	5,6	151	336	N/R	2,45	149,45	0	0
RGB_179	25/06/2011	27	1153	7,32	1,6	577	762	N/R	2,45	149,45	0	0
P-30P	25/06/2011	26,6	620	7,56	7,9	252	437	N/R	2,35	143,5	0	0
P-66P	25/06/2011	28,1	1980	7,37	8,6	137	322	N/R	3,95	240,95	0	0
CQ	25/06/2011	31	1073	7,23	3,3	148	333	N/R	4,35	265,35	0	0
P-60P	25/06/2011	28,4	780	7,23	2,7	133	318	N/R	3,45	210,45	0	0
P-63P	25/06/2011	33	1246	7,39	4,7	183	368	N/R	4,55	277,55	0	0
P-18P	26/06/2011	27,1	5100	7,36	4,4	5	190	N/R	2,85	173,85	0	0
LP	30/06/2011	28,4	293	7,78	4,1	159,7	344,7	N/R	2,45	149,5	0	0
P-13P	30/06/2011	26,5	1138	7,21	2,2	140	325	N/R	4,45	271,45	0	0
P-14P	30/06/2011	27,7	1605	7,53	3,2	152,5	337,5	N/R	2,95	179,95	0	0
P-11P	30/06/2011	28,1	3000	7,96	4,3	148,3	333,3	N/R	2,95	179,95	0	0
P-17P	30/06/2011	28	1030	8,03	3,6	156,4	341,4	N/R	1,85	112,85	0	0
P-28P	30/06/2011	29,2	1498	7,64	2,2	151,2	336,2	N/R	2,45	149,45	0	0
P-3P	30/06/2011	28,2	186	7,54	3,1	145,4	330,4	N/R	155	94,55	0	0
MBC	30/06/2011	28,4		8,53	4,1	145,1	330,1	N/R	1,85	112,85	1,1	66
P-8P	30/06/2011	28,4	1011	7,52	2,4	168,5	353,5	N/R	2,95	179,95	0	0
P-29	01/07/2011	27,6	659	7,36	5,2	140,9	325,9	N/R	3,35	204,35	0	0
P-31	01/07/2011	26,3	610	7,07	3,5	107,8	292,8	N/R	2,75	167,75	0	0
P-20P	01/07/2011	28,7	120	6,91	2,2	-25,5	159,5	N/R	0,65	39,65	0	0
P-12P	01/07/2011	28,1	1104	8,18	1,9	-25,9	159,1	N/R	0,55	33,55	0	0
P-19P	01/07/2011	27,6	2159	7,33	2,2	-140,9	44,1	N/R	3,35	204,35	0	0

Anexo textual 10. Resultados de los análisis químicos de componentes mayoritarios en pozos de la red de investigación del INRH

<i>Código</i>	<i>Fecha</i>	<i>T</i> (°C)	<i>pH</i> (20°C)	<i>CE</i> 25°C (μS/cm)	<i>Na⁺</i> (mg/L)	<i>K⁺</i> (mg/L)	<i>Mg²⁺</i> (mg/L)	<i>Ca²⁺</i> (mg/L)	<i>Cl⁻</i> (mg/L)	<i>SO₄²⁻</i> (mg/L)	<i>HCO₃⁻</i> (mg/L)
RGB-29	22/6/2011	27,5	7,07	438	23,7	4,8	3,8	36,0	37,51	0,51	213,5
P-33P	24/6/2011	26,1	7,39	1940	268,4	11,9	40,0	79,9	472,5	32,4	274,5
P-VP	24/6/2011	26,1	7,07	1310	129,8	8,1	18,3	69,4	251,7	23,4	183,0
RGB-30	25/6/2011	26,6	7,56	620	59,7	4,7	10,5	41,5	111,8	23,5	143,5
P-66P	25/6/2011	28,1	7,37	1980	254,8	11,9	38,3	87,6	457,7	74,9	241,0
CQ	25/6/2011	31	7,23	1073	110,0	5,3	21,4	85,6	191,7	38,5	265,4
P-60P	25/6/2011	28,4	7,23	780	68,8	7,8	8,8	71,6	124,9	21,4	210,5
P-63P	25/6/2011	33	7,39	1246	133,4	6,8	20,3	88,3	228,7	38,2	277,6
P-18P	26/6/2011	28,1	7,36	2280	357,8	19,2	25,7	18,8	635,9	3,8	96,6
P-13P	30/6/2011	26,5	7,21	1138	118,0	3,8	15,7	64,1	207,6	13,6	271,5
P-14P	30/6/2011	27,7	7,53	1605	222,3	9,5	23,9	70,4	403,2	32,7	180,0
P-11P	30/6/2011	28,1	7,96	3000	454,5	17,8	50,4	78,5	869,4	114,1	180,0
P-17P	30/6/2011	28	8,03	1030	137,0	4,6	17,6	36,2	247,0	17,4	112,9
P-28P	30/6/2011	29,2	7,64	1498	217,2	8,4	22,0	52,4	387,3	24,3	149,5
P-3P	30/6/2011	28,2	7,5	230	6,4	2,3	1,8	21,7	12,23	0,07	94,6
P-8P	30/6/2011	28,4	7,52	1011	118,1	5,1	9,9	65,7	193,7	28,2	180,0
P-29P	1/7/2011	27,6	7,36	659	53,2	3,6	6,9	72,6	109,4	8,8	204,4
P-31P	1/7/2011	26,3	7,07	610	48,3	3,2	8,6	66,0	108,8	11,2	167,8
P-12P	1/7/2011	28,1	8,18	1104	165,3	5,4	8,9	29,2	314,4	0,3	33,6
P-19P	1/7/2011	27,6	7,33	2159	201,0	6,4	23,6	66,0	329,8	22,0	204,4
P-3P	27/8/2011	28,2	7,54	230	6,4	2,3	1,8	21,7	12,23	0,07	94,6
P-18P	27/8/2011	28,1	7,36	2260	390,7	18,6	28,2	20,7	645,9	3,9	97,6
P-20P	27/8/2011	28,5	7,31	208	14,1	1,7	1,7	9,9	29,06	1,41	33,6

Anexo textual 11. Relaciones iónicas y SST de componentes mayoritarios en pozos de la red de investigación del INRH

<i>Muestras</i>	<i>Código</i>	<i>rCl/rHCO₃⁻</i>	<i>rSO₄²⁻/rCl⁻</i>	<i>rMg²⁺/Ca²⁺</i>	<i>Br⁻/Cl⁻</i>	<i>SST (mg/L)</i>
Estación Limnigráfica	RGB-29	0,30	0,01	0,18	0,0018	319,8
Pozo 33 (- 10 m)	P-33P	2,96	0,05	0,82	0,0016	1179,5
Pozo Vivero	P-VP	2,37	0,07	0,43	0,0016	683,7
RGB 30	RGB-30	1,34	0,15	0,42	0,0015	395,3
Pozo 66	P-66P	3,27	0,12	0,72	0,0015	1166,1
Cueva Quintana	CQ	1,24	0,15	0,41	0,0015	717,9
Pozo 60	P-60P	1,02	0,13	0,20	0,0016	513,7
Pozo 63	P-63P	1,42	0,12	0,38	0,0015	793,2
Pozo 18 (-4 m)	P-18P	11,32	0,00	2,25		1157,8
ESBEC Carlos Marighela	P-13P	1,31	0,05	0,40	0,0015	694,2
ESBEC Capitán San Luis	P-14P	3,85	0,06	0,56	0,0016	941,9
ESBEC Julio A. Mella	P-11P	8,31	0,10	1,06	0,0016	1764,6
ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P	3,76	0,05	0,80	0,0015	572,7
ESBEC Paquito Rosales	P-28P	4,46	0,05	0,69	0,0015	860,9
Pozo 3	P-3P	0,22	0,00	0,14	0,0028	139,1
ESBEC Isabel Rubio	P-8P	1,85	0,11	0,25	0,0014	600,7
IPA Marien Ngouabi	P-29P	0,92	0,06	0,16	0,0016	458,7
IPUEC Pedro A. Quintana	P-31P	1,12	0,08	0,21	0,0017	413,9
ESBEC Antonio Briones Montoto	P-12P	16,11	0,00	0,50	0,0017	557,0
ESBEC Batalla de Cacarajícara	P-19P	2,78	0,05	0,59	0,0018	853,2
Pozo_3	P-3P	0,22	0,00	0,14	0,0015	139,1
Pozo 18 (-5 m)	P-18P	11,38	0,00	2,25	0,0015	1205,6
ESBEC Celestino Pacheco (-2 m)	P-20P	1,49	0,04	0,28	0,0017	91,4
Mar Bahía de Guadiana	MBG	172,14	0,1	4,91	0,0016	38156,1
Mar Bahía de Cortés	MBC	146,95	0,1	4,81	0,0015	38610,9

Nota: los valores resaltados en rojo representan anomalías como resultado del fenómeno salinización por intrusión marina.

Anexo textual 12. Balance iónico de los componentes mayoritarios en pozos la red de investigación del INRH

<i>Código</i>	<i>Na⁺</i> (meq/L)	<i>K⁺</i> (meq/L)	<i>Mg²⁺</i> (meq/L)	<i>Ca²⁺</i> (meq/L)	<i>Cl⁻</i> (meq/L)	<i>SO₄²⁻</i> (meq/L)	<i>HCO₃⁻</i> (meq/L)	<i>Σ</i> <i>cationes</i>	<i>Σ</i> <i>aniones</i>	<i>Σ cationes</i> <i>- Σ</i> <i>aniones</i>	<i>Σ cationes</i> <i>+ Σ</i> <i>aniones</i>	<i>Error</i>
RGB_29	1,03	0,12	0,32	1,80	1,06	0,01	3,50	4,13	4,58	-0,45	8,71	-5,2
P33P(-10 m)	11,67	0,30	3,29	3,99	13,33	0,67	4,50	19,35	18,52	0,82	37,87	2,2
P-VP	5,65	0,21	1,50	3,46	7,10	0,49	3,00	10,88	10,68	0,21	21,56	1,0
RGB 179	6,34	0,14	1,53	2,76	7,61	0,51	2,45	10,84	10,68	0,16	21,52	0,8
RGB 30	2,60	0,12	0,87	2,07	3,15	0,49	2,35	5,73	6,01	-0,28	11,75	-2,4
P-66P	11,08	0,30	3,15	4,37	12,91	1,56	3,95	19,00	18,86	0,14	37,87	0,4
CQ	4,78	0,14	1,76	4,27	5,41	0,80	4,35	11,02	10,71	0,31	21,72	1,4
P-60P	2,99	0,20	0,72	3,57	3,52	0,44	3,45	7,53	7,54	-0,01	15,08	-0,1
P-63P	5,80	0,17	1,67	4,41	6,45	0,80	4,55	12,10	11,93	0,17	24,04	0,7
P-18 (-4m)	26,80	0,60	4,87	4,44	29,57	1,84	2,85	36,70	34,31	2,39	71,00	3,4
P-13P	5,13	0,10	1,29	3,20	5,85	0,28	4,45	9,77	10,60	-0,82	20,37	-4,0
P-14P	9,67	0,24	1,96	3,51	11,37	0,68	2,95	15,51	15,02	0,49	30,52	1,6
P-11P	19,76	0,45	4,14	3,92	24,52	2,38	2,95	28,52	29,98	-1,46	58,49	-2,5
P-17P	5,96	0,12	1,45	1,81	6,97	0,36	1,85	9,38	9,19	0,20	18,57	1,1
P-28P	9,44	0,22	1,81	2,61	10,92	0,50	2,45	14,21	13,89	0,32	28,10	1,1
Pozo 3	0,28	0,06	0,15	1,08	0,34	0,00	1,55	1,70	1,91	-0,20	3,61	-5,7
P-8P	5,14	0,13	0,82	3,28	5,46	0,59	2,95	9,44	9,16	0,28	18,60	1,5
P-29P	2,31	0,09	0,57	3,62	3,08	0,18	3,35	6,63	6,79	-0,16	13,41	-1,2
P-31P	2,10	0,08	0,70	3,29	3,07	0,23	2,75	6,22	6,25	-0,03	12,47	-0,2
P-12P	7,19	0,14	0,73	1,46	8,87	0,01	0,55	9,78	9,44	0,34	19,22	1,8
P-19P	8,74	0,16	1,94	3,29	9,30	0,46	3,35	14,14	13,12	1,01	27,26	3,7
P-18P (-5 m)	16,99	0,48	2,32	1,03	18,21	0,08	1,60	20,99	19,96	1,03	40,96	2,5
P-20P (-2 m)	6,60	0,12	0,98	1,02	6,86	0,25	1,65	8,79	8,77	0,02	17,55	0,1

Anexo textual 13. Resultados de los análisis químicos de componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal del INRH

<i>Muestra</i>	<i>Código</i>	<i>Fecha</i>	<i>Ce 25°C</i> (mS/cm)	<i>pH</i>	<i>HCO₃⁻</i> (mg/L)	<i>Cl⁻</i> (mg/L)	<i>SO₄²⁻</i> (mg/L)	<i>Ca²⁺</i> (mg/L)	<i>Mg²⁺</i> (mg/L)	<i>Na⁺</i> (mg/L)	<i>K⁺</i> (mg/L)
Las Catalinas	PLC	27/9/2011	1247	7,01	390	149	63	109	18	113	4
Ac. Pto Control	A-PC	27/9/2011	1402	7,06	384	184	61	113	20	140	3
Laguna Grande	LA-1	27/9/2011	297	8,04	92	43	13	25	10	18	3
RGD-1A	RGD-1A	27/9/2011	986	7,19	366	121	15	113	18	57	2
AC. Hospital Sandino	RV-3A	27/9/2011	1106	7,52	244	230	21	88	20	107	3
Ac. CR. Limones	RG-12	27/9/2011	523	7,52	195	60	12	63	8	27	4
AC. Sandino Sur	RV-38	27/9/2011	818	7,58	195	163	14	63	15	83	2
RS-28 A. Bolívar	RS-28	27/9/2011	379	7,45	171	28	2	50	5	15	1
Ac. Sandino Rio Verde	RV-2	27/9/2011	969	7,4	256	167	22	84	18	85	2
AC. La Fe	RGB-144	27/9/2011	587	7,6	159	106	8	55	8	53	3
AC. Manuel Lazo	RGB-179	27/9/2011	1201	7,77	207	280	31	63	31	140	5
Ac. CR. Laguna Vieja	A-LV	27/9/2011	1390	7,09	348	191	116	105	26	140	4
Ac. Cortes	A-C		559	7,99	140	99	17	38	13	56	4

Fuente: Base de datos INRH

Anexo textual 14. Balance iónico de los componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal del INRH

<i>Código</i>	<i>HCO₃⁻</i> <i>(meq/L)</i>	<i>Cl⁻</i> <i>(meq/L)</i>	<i>SO₄²⁻</i> <i>(meq/L)</i>	<i>Ca²⁺</i> <i>(meq/L)</i>	<i>Mg²⁺</i> <i>(meq/L)</i>	<i>Na⁺</i> <i>(meq/L)</i>	<i>K⁺</i> <i>(meq/L)</i>	<i>Σ</i> <i>cationes</i>	<i>Σ</i> <i>aniones</i>	<i>Σ</i> <i>cationes -</i> <i>Σ aniones</i>	<i>Σ</i> <i>cationes</i> <i>+ Σ</i> <i>aniones</i>	<i>error</i>
A-LC	6,396	4,2018	1,3104	5,4391	1,4814	4,9155	0,102	11,938	11,9082	0,0298	23,8462	0,12
A-PC	6,2976	5,1888	1,2688	5,6387	1,646	6,09	0,0765	13,4512	12,7552	0,696	26,2064	2,66
LA-1	1,5088	1,2126	0,2704	1,2475	0,823	0,783	0,0765	2,93	2,9918	-0,0618	5,9218	-1,04
RGD-1A	6,0024	3,4122	0,312	5,6387	1,4814	2,4795	0,051	9,6506	9,7266	-0,076	19,3772	-0,39
RV-3A	4,0016	6,486	0,4368	4,3912	1,646	4,6545	0,0765	10,7682	10,9244	-0,1562	21,6926	-0,72
RG-12	3,198	1,692	0,2496	3,1437	0,6584	1,1745	0,102	5,0786	5,1396	-0,061	10,2182	-0,60
RV-38	3,198	4,5966	0,2912	3,1437	1,2345	3,6105	0,051	8,0397	8,0858	-0,0461	16,1255	-0,29
RS-28	2,8044	0,7896	0,0416	2,495	0,4115	0,6525	0,0255	3,5845	3,6356	-0,0511	7,2201	-0,71
RV-2	4,1984	4,7094	0,4576	4,1916	1,4814	3,6975	0,051	9,4215	9,3654	0,0561	18,7869	0,30
RGB-144	2,6076	2,9892	0,1664	2,7445	0,6584	2,3055	0,0765	5,7849	5,7632	0,0217	11,5481	0,19
RGB-179	3,3948	7,896	0,6448	3,1437	2,5513	6,09	0,1275	11,9125	11,9356	-0,0231	23,8481	-0,10
A-LV	5,7072	5,3862	2,4128	5,2395	2,1398	6,09	0,102	13,5713	13,5062	0,0651	27,0775	0,24
A-C	2,296	2,7918	0,3536	1,8962	1,0699	2,436	0,102	5,5041	5,4414	0,0627	10,9455	0,57

Fuente: Base de datos INRH

Anexo textual 15. Relaciones iónicas y SST de componentes mayoritarios en la Red Cal del INRH

<i>Código</i>	<i>rCl/rHCO₃⁻</i>	<i>rSO₄²⁻/rCl⁻</i>	<i>rMg²⁺/rCa²⁺</i>	<i>SST mg/L</i>
A-LC	0,66	0,31	0,27	846
A-PC	0,82	0,24	0,29	945
LA-1	0,80	0,22	0,66	204
RGD-1A	0,57	0,09	0,26	692
RV-3A	1,62	0,07	0,37	713
RG-12	0,53	0,15	0,21	369
RV-38	1,44	0,06	0,39	535
RS-28	0,28	0,05	0,16	272
RV-2	1,12	0,10	0,35	624
RGB-144	1,15	0,06	0,24	392
RGB-179	2,33	0,08	0,81	757
A-LV	0,94	0,45	0,41	930
A-C	1,22	0,13	0,56	367

Fuente: Base de datos INRH. En rojo se señalan los valores anómalos

Anexo textual 16. Registro histórico de análisis químicos en pozos de la Red Cal del INRH (1a). Pozo RG-12, Comunidad Rural Limones

<i>Fecha</i>	<i>CE @ 25°C (mS/cm)</i>	<i>pH</i>	<i>HCO₃⁻ (mg/L)</i>	<i>Cl⁻ (mg/L)</i>	<i>SO₄²⁻ (mg/L)</i>	<i>Ca²⁺ (mg/L)</i>	<i>Mg²⁺ (mg/L)</i>	<i>Na⁺ (mg/L)</i>	<i>K⁻ (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>DQO</i>	<i>ColiT</i>	<i>ColiF</i>
14-oct-2003	409	7,8	165	43	1	54	4	27	1	295	1,4	14	-3
05-feb-2004	451	7,9	171	53	3	55	2	31	1	316	1,6	23	-3
13-abr-2005	446	8	171	42	3	56	8	28	1	331	2,3	430	9
30-may-2005	479	7,6	183	57	4	69	3	36	1	353	0,9	2400	-3
29-mar-2006	445	7,8	183	46	4	58	5	25	1	332	1,76	-3	-3
20-sep-2006	449	7,5	183	46	2	45	12	27	1	316	1,6	-	-
11-abr-2007	449	7,6	183	46	3	46	13	23	1	315	1,68	93	-3
10-oct-2007	446	7,7	183	46	2	47	12	25	1	316	1,68	4	-3
14-abr-2008	423	7,6	171	42	2	52	7	28	2	304	2,24	150	28
24-sep-2008	450	7,6	183	46	2	46	13	23	1	314	1,76		
03-jun-2009	522	7,92	238	35	13	67	13	18	1	385	0,8		
18-mar-2011	497	7,53	207	46	8	67	6	26	1	361	1,36	<3	<3
27-sep-2011	523	7,52	195	60	12	63	8	27	4	369	1,84	<3	<3
07-mar-2012	345	7,68	110	53	2	25	10	25	4	229	0,48	<3	<3

Fuente: Base de datos INRH

Anexo textual 17. Balance iónico de los componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal del INRH (1b). Pozo RG-12, Comunidad Rural Limones

HCO_3^- (meq/L)	Cl^- (meq/L)	SO_4^{2-} (meq/L)	Ca^{2+} (meq/L)	Mg^{2+} (meq/L)	Na^+ (meq/L)	K^+ (meq/L)	Σ cationes	Σ aniones	Σ cationes - Σ aniones	Σ cationes + Σ aniones	error
2,706	1,2126	0,0208	2,6946	0,3292	1,1745	0,026	4,2238	3,9394	0,2844	8,1632	3,48
2,8044	1,4946	0,0624	2,7445	0,1646	1,3485	0,026	4,2831	4,3614	-0,0783	8,6445	-0,91
2,8044	1,1844	0,0624	2,7944	0,6584	1,218	0,026	4,6963	4,0512	0,6451	8,7475	7,37
3,0012	1,6074	0,0832	3,4431	0,2469	1,566	0,026	5,2815	4,6918	0,5897	9,9733	5,91
3,0012	1,2972	0,0832	2,8942	0,4115	1,0875	0,026	4,4187	4,3816	0,0371	8,8003	0,42
3,0012	1,2972	0,0416	2,2455	0,9876	1,1745	0,026	4,4331	4,34	0,0931	8,7731	1,06
3,0012	1,2972	0,0624	2,2954	1,0699	1,0005	0,026	4,3913	4,3608	0,0305	8,7521	0,35
3,0012	1,2972	0,0416	2,3453	0,9876	1,0875	0,026	4,4459	4,34	0,1059	8,7859	1,21
2,8044	1,1844	0,0416	2,5948	0,5761	1,218	0,051	4,4399	4,0304	0,4095	8,4703	4,83
3,0012	1,2972	0,0416	2,2954	1,0699	1,0005	0,026	4,3913	4,34	0,0513	8,7313	0,59
3,9032	0,987	0,2704	3,3433	1,0699	0,783	0,026	5,2217	5,1606	0,0611	10,3823	0,59
3,3948	1,2972	0,1664	3,3433	0,4938	1,131	0,026	4,9936	4,8584	0,1352	9,852	1,37
3,198	1,692	0,2496	3,1437	0,6584	1,1745	0,102	5,0786	5,1396	-0,061	10,2182	-0,60
1,804	1,4946	0,0416	1,2475	0,823	1,0875	0,102	3,26	3,3402	-0,0802	6,6002	-1,22

Fuente: Base de datos INRH

Anexo textual 18. Fragmentos del registro histórico de componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal. Abasto poblado de la Fe (RGB-144A)

<i>Fecha</i>	<i>CE 25• (mS/cm)</i>	<i>pH</i>	<i>HCO₃⁻ (mg/L)</i>	<i>Cl⁻ (mg/L)</i>	<i>SO₄²⁻ (mg/L)</i>	<i>Ca²⁺ (mg/L)</i>	<i>Mg²⁺ (mg/L)</i>	<i>Na⁺ (mg/L)</i>	<i>K⁻ (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>COLIT</i>	<i>COLIF</i>
22-may-03	572	7,8	146	112	5	51	10	53	2	379	-3	-3
14-oct-03	495	7,9	140	96	5	50	10	51	1	353	4	-3
20-dic-03	533	7,9	134	104	5	51	10	52	1	357	-3	-3
05-feb-04	529	7,9	137	103	4	50	6	50	1	351	-3	-3
24-jun-04	494	8	128	96	4	47	8	51	2	336	460	-3
05-oct-04	570	7,9	152	103	4	40	15	49	1	364	-3	-3
19-dic-04	494	7,9	140	96	7	49	12	38		342	-3	-3
14-abr-05	531	7,9	140	103	5	50	8	65	1	372	-3	-3
30-may-05	544	7,5	140	103	3	46	8	51	1	352	-3	-3
20-sep-05	527	7,4	140	99	3	50	10	51	1	354	9	-3
29-nov-05	514	7,6	140	99	2	50	8	45	1	345	9	-3
29-mar-06	520	8	140	96	2	50	8	46	1	343	23	-3
18-jul-06	531	7,5	140	99	4	55	2	51	1	352	1100	23
20-sep-06	531	8	146	92	3	50	8	64	1	364	-	-
29-dic-06	525	7,7	146	92	4	50	7	46	1	346	4	-3
28-feb-07	523	7,8	140	99	3	50	10	41	1	344	-3	-3
10-oct-07	554	7,7	146	106	2	53	10	46	1	364	23	-3
16-abr-08	505	7,6	128	99	4	62	5	55	1	354	23	9
24-sep-08	549	7,72	140	106	3	50	10	46	1	356	<3	<3
18-mar-11	568	7,71	177	85	8	59	8	45	2	384	<3	<3
27-sep-11	587	7,6	159	106	8	55	8	53	3	392	210	23

Fuente: Base de datos INRH

Anexo textual 19. Fragmentos del registro histórico de componentes mayoritarios en pozos de la Red Cal. Pozo RGD-1^a

<i>Fecha</i>	<i>CE 25°C (mS/cm)</i>	<i>pH</i>	<i>HCO₃⁻ (mg/L)</i>	<i>Cl⁻ (mg/L)</i>	<i>SO₄²⁻ (mg/L)</i>	<i>Ca²⁺ (mg/L)</i>	<i>Mg²⁺ (mg/L)</i>	<i>Na⁺ (mg/L)</i>	<i>K⁺ (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>COLIT</i>	<i>COLIF</i>
08-feb-00	1075	7,1	344	155	17	131	8	73		728	-3	-3
02-ago-00	975	7,5	232	177	22	75	7	112		625	-3	-3
05-feb-01	1085	7,2	348	175	15	131	5	91		765	75	-3
08-may-01	1150	7,3	359	183	4	134	8	93		781	-3	-3
10-sep-01	1035	7,3	348	163	12	133	8	75		739	310	-3
02-dic-01	1142	7,3	354	187	12	133	15	79		780	-3	-3
26-mar-02	1012	7	329	149	16	134	5	65		698	-3	-3
24-may-02	1235	7,4	335	220	19	131	11	143		862	9	-3
20-dic-02	953	7,1	335	138	10	116	7	69	3	678	-3	-3
04-abr-03	939	7,4	323	135	17	119	5	67	5	671	-3	-3
22-may-03	970	7,3	324	138	16	108	25	70	3	683	430	-3
14-oct-03	930	6,9	329	120	14	105	10	64	3	645	-3	-3
20-dic-03	917	7,2	323	127	15	119	5	60	2	651	23	-3
05-feb-04	895	7,3	342	106	16	113	9	58	2	646	-3	-3
05-oct-04	974	7,3	342	128	16	121	5	39	8	659	-3	-3
14-abr-05	957	7,1	335	128	18	121	5	75	2	684	4	-3
30-may-05	915	7,2	348	117	13	113	8	63	3	665	-3	-3
20-sep-05	924	7,04	348	113	10	92	23	51	2	639	23	-3
29-mar-06	860	7,2	342	99	10	112	7	60	2	632	-3	-3
20-sep-06	906	7,6	335	110	19	122	10	73	2	671	-	-
11-abr-07	936	6,97	317	131	15	104	10	73	1	651	-3	-3
10-oct-07	948	7,6	329	131	12	106	10	74	3	665	-3	-3
22-abr-08	1174	7,5	353	177	15	126	8	103	2	784	<3	<3
24-sep-08	1158	7,83	354	174	15	126	8	97	2	776	<3	<3
18-mar-11	793	6,97	305	89	16	97	10	46	3	566	<3	<3
27-sep-11	986	7,19	366	121	15	113	18	57	2	692	<3	<3
07-mar-12	889	7,07	336	113	6	109	10	55	4	633	<3	<3

Fuente: Base de datos INRH

Anexo textual 20. Componentes minoritarios en los pozos de la red de investigación

<i>Muestras</i>	<i>Código</i>	<i>Fecha</i>	<i>NH₄⁺</i> (mg/L)	<i>Ft⁻</i> (mg/L)	<i>Br⁻</i> (mg/L)	<i>NO₃⁻</i> (mg/L)
Estación Limnigráfica	RGB-29	22/6/2011	15,6	0,03	0,2	0,8
Pozo 33 (- 10 m)	P-33P	24/6/2011	1,9	0,1	1,7	
Pozo Vivero	P-VP	24/6/2011	1,2		0,9	5,1
Ac. Manuel Lazo	Pz RGB 179	25/6/2011	1,0	0,04	0,6	0,3
RGB 179	RGB-179	25/6/2011	1,4	0,03	0,7	6,5
RGB 30	RGB-30	25/6/2011	1,4	0,02	0,4	0,8
Pozo 66	P-66P	25/6/2011	1,7	0,1	1,6	26,3
Cueva Quintana	CQ	25/6/2011	1,2	0,1	0,7	8,4
Pozo 60	P-60P	25/6/2011	0,8	0,03	0,5	7,5
Pozo 63	P-63P	25/6/2011	1,0	0,1	0,8	7,9
ESBEC Carlos Marighela	P-13P	30/6/2011	1,0		0,7	
ESBEC Capitán San Luis	P-14P	30/6/2011	2,2		1,4	
ESBEC Julio A. Mella	P-11P	30/6/2011	4,4		3,1	5,9
ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P	30/6/2011	1,0		0,8	
ESBEC Paquito Rosales	P-28P	30/6/2011	2,4		1,3	
Pozo 3	P-3P	30/6/2011	2,4	0,03	0,04	0,46
ESBEC Isabel Rubio	P-8P	30/6/2011	1,4		0,6	9,3
IPA Marien Ngouabi	P-29P	1/7/2011	0,6		0,4	10,2
ESBEC Pedro A. Quintana	P-31P	1/7/2011	0,8	0,04	0,4	11,8
ESBEC Antonio Briones Montoto	P-12P	1/7/2011	4,8	0,1	1,2	
ESBEC Batalla de Cacarajícara	P-19P	1/7/2011			1,3	
RGB_29	RGB-29	25/8/2011	17,7	0,04	0,12	0,94
Pozo 33 (-15 m)	P-33P	25/8/2011	2,0		1,6	
Pozo 18 (-5 m)	P-18P	27/8/2011	3,2	0,7	2,2	0,4
Pacheco (-15 m)	P-20P	27/8/2011	1,2		0,8	

Fuente: Base de datos INRH

Anexo textual 21. Resultados de los análisis isotópicos

<i>Muestras</i>	<i>Código</i>	<i>Fecha</i>	<i>Coord_X</i>	<i>Coord_Y</i>	$\delta^{18}O$ ‰(vs. VSMOW)	δD ‰(vs. V-SMOW)
Pozo 18 (-16 m)	P-18P	26/06/2011	182868	239716	-3,44	-20,6
Pozo 33 (- 10 m)	P-33P	24/06/2011	161500	240000	-4,63	-29,3
Pozo 3	P-3P	30/06/2011	187000	253000	-5,37	-35,5
Pozo 60	P-60P	25/06/2011	177665	240804	-3,80	-23,9
Pozo 63	P-63P	25/06/2011	185250	240225	-4,35	-29,1
Pozo 66	P-66P	25/06/2011	186850	243010	-3,90	-26,3
ESBEC Celestino Pacheco (-3 m)	P-20P	01/07/2011	184200	252210	-4,77	-30,8
ESBEC Batalla de Cacarajicara (-10m)	P-19P	01/07/2011	180750	246340	-4,46	-27,3
Pozo Vivero	PV	24/06/2011	167908	246175	-4,02	-25,4
IPA Marien Ngouabi	P-29P	01/07/2011	167220	252570	-3,56	-22,7
ESBEC Antonio Briones Montoto	P-12P	01/07/2011	183740	250340	-3,57	-22,6
ESBEC Pedro A. Quintana	P-31P	01/07/2011	167910	249490	-3,90	-24,3
ESBEC Celso Maragoto Lara	P-17P	30/06/2011	175980	246890	-3,70	-23,8
ESBEC Capitán San Luis	P-14P	30/06/2011	177290	252380	-3,64	-22,4
ESBEC Isabel Rubio	P-8P	30/06/2011	180090	253830	-3,32	-20,4
ESBEC Paquito Rosales	P-28P	30/06/2011	171200	252460	-3,47	-21,7
Cueva Quintana	CQ	25/06/2011	173800	240270	-4,50	-28,8
Estación Limnigráfica	RGB-29	22/06/2011	165950	251750	-3,75	-22,9
IPUEC Gerardo A. Fontán	RGB-30	25/06/2011	167945	248099	-3,62	-22,2
Acueducto Manuel Lazo	RGB 179	25/06/2011	168450	247650	-3,86	-25,1
ESBEC Julio A. Mella	P-11P	30/06/2011	178980	249330	-3,42	-21,4
ESBEC Carlos Marighela	P-13P	30/06/2011	177390	253890	-3,49	-20,8
Mar Bahía Guadiana	MBG	24/06/2011	162000	249500	1,44	7,9
Mar Bahía Cortés	MBC	30/06/2011	190645	249708	1,32	8,5
Río Cuyaguateje	RCY	26/06/2011	182900	261300	-3,62	-22,3
Laguna el Pesquero	LP	30/06/2011	180959	256960	1,73	9,3
Ciénaga Los Remates P1	CRG1	24/06/2011	181500	242650	2,31	3,8
Ciénaga Los Remates P2	CRG2	30/06/2011	166200	251500	-0,47	-4,7

Anexo textual 22a. Análisis químico de agua de lluvia

<i>No</i>	<i>Punto</i>	<i>T °C</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i> ($\mu\text{S/cm}$)	<i>HCO₃⁻</i> (mg/L)	<i>CO₃²⁻</i> (mg/L)	<i>Cl⁻</i> (mg/L)	<i>SO₄²⁻</i> (mg/L)	<i>Ca²⁺</i> (mg/L)	<i>Mg²⁺</i> (mg/L)	<i>Na⁺</i> (mg/L)	<i>K⁺</i> (mg/L)	<i>CaCO₃⁻</i> (mg/L)
1	La Bajada (septiembre 2011)	27	7.74	145	60	0	7	0	17	8	1	1	0
2	La Bajada (octubre 2011)	27.4	8.05	110	40	0	11	0	17	3	1	1	0

Anexo textual 22b. Muestras de análisis químicos de aguas superficiales

<i>Código</i>	<i>T (°C)</i>	<i>pH</i> (20°C)	<i>CE</i> 25°C ($\mu\text{S/cm}$)	<i>Na⁺</i> (mg/L)	<i>K⁺</i> (mg/L)	<i>Mg²⁺</i> (mg/L)	<i>Ca²⁺</i> (mg/L)	<i>Cl⁻</i> (mg/L)	<i>SO₄²⁻</i> (mg/L)	<i>HCO₃⁻</i> (mg/L)	<i>CO₃⁻</i> (mg/L)
RCY			283,0	16,3	2,2	5,2	34,1	10,45	16,04	122,0	
LP	28,4	7,78	293,0	13,9	2,2	7,3	40,1	16,7	22,8	149,5	
CRG-1	25,8	7,42	369,0	33,1	3,4	6,1	25,8	68,0	4,1	73,2	
CRG-2				3276,0	52,0	321,0	548,0	5897,0	704,7		
MBG	25,2	8,39	40338,0	12070,0	451,0	1355,0	454,0	20755,0	2851,0	85,4	60,0
MBC	28,4	8,53	72400,0	11986,0	487,0	1353,0	463,0	21105,0	2880,0	112,9	66,0
PDC		7,18	164,0	7,0	2,0	8,0	13,0	28,0	23,0	24,0	
PLG		8,04	297,0	18,0	3,0	10,0	25,0	43,0	13,0	92,0	

Anexo textual 23. Clasificación de las aguas según Shukarev. Red de investigación del INRH

<i>Código</i>	<i>Na+</i> (%meq/L)	<i>K+</i> (%meq/L)	<i>Mg2+</i> (%meq/L)	<i>Ca2+</i> (%meq/L)	<i>Cl-</i> (%meq/L)	<i>SO4 2-</i> (%meq/L)	<i>HCO₃⁻</i> (%meq/L)	<i>Tipos de aguas Shukarev</i>
RGB_29	24,94	2,91	7,75	43,58	23,14	0,22	76,42	Bicarbonatadas cálcicas
P33P(-10 m)	60,31	1,55	17,00	20,62	71,98	3,62	24,30	Cloruradas sódicas
P-VP	51,93	1,93	13,79	31,80	66,48	4,59	28,09	Cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas
RGB 179	58,49	1,29	14,11	25,46	71,25	4,78	22,94	Cloruradas sódicas cálcicas
RGB 30	45,38	2,09	15,18	36,13	52,41	8,15	39,10	Cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas
P-66P	58,32	1,58	16,58	23,00	68,45	8,27	20,94	Cloruradas sódicas
CQ	43,38	1,27	15,97	38,75	50,51	7,47	40,62	Cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas
P-60P	39,71	2,66	9,56	47,41	46,68	5,84	45,76	Cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas
P-63P	47,93	1,40	13,80	36,45	54,07	6,71	38,14	Cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas
P-18 (-4m)	73,02	1,63	13,27	12,10	86,18	5,36	8,31	Cloruradas sódicas
P-13P	52,51	1,02	13,20	32,75	55,19	2,64	41,98	Cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas
P-14P	62,35	1,55	12,64	22,63	75,70	4,53	19,64	Cloruradas sódicas cálcicas
P-11P	69,28	1,58	14,52	13,74	81,79	7,94	9,84	Cloruradas sódicas cálcicas
P-17P	63,54	1,28	15,46	19,30	75,84	3,92	20,13	Cloruradas sódicas cálcicas
P-28P	66,43	1,55	12,74	18,37	78,62	3,60	17,64	Cloruradas sódicas cálcicas
Pozo 3	16,47	3,53	8,82	63,53	17,80	0,00	81,15	Bicarbonatadas cálcicas
P-8P	54,45	1,38	8,69	34,75	59,61	6,44	32,21	Cloruradas bicarbonatadas sódicas cálcicas
P-29P	34,84	1,36	8,60	54,60	45,36	2,65	49,34	Bicarbonatadas cloruradas calco-sódicas
P-31P	33,76	1,29	11,25	52,89	49,12	3,68	44,00	Cloruradas bicarbonatadas calco-sódicas
P-12P	73,52	1,43	7,46	14,93	93,96	0,11	5,83	Cloruradas sódicas
P-19P	61,81	1,13	13,72	23,27	70,88	3,51	25,53	Cloruradas bicarbonatadas sódicas
P-18P (-5 m)	80,94	2,29	11,05	4,91	91,23	0,40	8,02	Cloruradas sódicas
P-20P (-2 m)	75,09	1,37	11,15	11,60	78,22	2,85	18,81	Cloruradas sódicas

Nota: en color rojo los iones que superan 25% meq/L

Anexo textual 24. Clasificación de las aguas según Shukarev. Red Cal

<i>Código</i>	<i>HCO₃⁻</i> (%meq/L)	<i>Cl⁻</i> (%meq/L)	<i>SO₄²⁻</i> (%meq/L)	<i>Ca²⁺</i> (%meq/L)	<i>Mg²⁺</i> (%meq/L)	<i>Na⁺</i> (%meq/L)	<i>K⁺</i> (%meq/L)	<i>Tipos de aguas Shukarev</i>
A-LC	53,71	35,28	11,00	45,56	12,41	41,18	0,85	Bicarbonatadas cloruradas cálcicas
A-PC	49,37	40,68	9,95	41,92	12,24	45,27	0,57	Bicarbonatadas cloruradas sódico-cálcicas
LA-1	50,43	40,53	9,04	42,58	28,09	26,72	2,61	Bicarbonatadas cloruradas cálcicas magnésicas sódicas
RGD-1A	61,71	35,08	3,21	58,43	15,35	25,69	0,53	Bicarbonatadas cloruradas calco-sódicas
RV-3A	36,63	59,37	4,00	40,78	15,29	43,22	0,71	Cloruradas bicarbonatadas sódico-cálcicas
RG-12	62,22	32,92	4,86	61,90	12,96	23,13	2,01	Bicarbonatadas cloruradas cálcicas
RV-38	39,55	56,85	3,60	39,10	15,36	44,91	0,63	Cloruradas bicarbonatadas sódico-cálcicas
RS-28	77,14	21,72	1,14	69,61	11,48	18,20	0,71	Bicarbonatadas cálcicas
RV-2	44,83	50,29	4,89	44,49	15,72	39,25	0,54	Cloruradas bicarbonatadas calco-sódicas
RGB-144	45,25	51,87	2,89	47,44	11,38	39,85	1,32	Cloruradas bicarbonatadas calco-sódicas
RGB-179	28,44	66,16	5,40	26,39	21,42	51,12	1,07	Cloruradas bicarbonatadas sódico-cálcicas
A-LV	42,26	39,88	17,86	38,61	15,77	44,87	0,75	Bicarbonatadas cloruradas sódico-cálcicas
A-C	42,20	51,31	6,50	34,45	19,44	44,26	1,85	Cloruradas bicarbonatadas sódico-cálcicas

Nota: en color rojo los iones que superan 25% meq/L

Anexo textual 25. Ubicación de las estaciones pluviométricas en el sector de investigación

NC	Coord_X	Coord_Y	Fecha	Nombre de la estación	Altitud	Inicio	Instalado en:	Calidad de la Observación
2	170800	243100	1961	Las Tumbas	15	1961-95	Terreno	B
3	183600	259300	1969	Catalinas	8	1961	Terreno	B
118	91800	232100	1949	Estación Meteorológica Cabo San Antonio	10	1949	Terreno	B
121	183000	239800	1962	Pasada de Marín	10	1962	Terreno	B
240	167800	243400	1997	TC Cayuco	15	1963	Techo	B
241	175600	241300	1963	TC Las Martinas	15	1963	Terreno	B
242	170800	240800	1964	Correo La Güira	20	1963-97	Terreno	B
243	186700	241600	1963	Babineyes	14	1963-93	Terreno	R
244	190700	249800	1981	TC Cortés	5	1963	Techo	B
245	187800	246200	1963	Correo La Grifa	10	1963--99	Terreno	B
319	163300	250200	1971	Plantación La Fe	3	1965-77	Terreno	R
320	169800	260700	1965	Granja Bolívar	30	1965-80	Terreno	B
321	161700	242400	1965	La Jarreta	10	1964-94	Terreno	R
336	169000	253700	1982	TC Ciudad Sandino	9	1965	Techo	R
367	161600	256300	1971	Est. Hid. Laguna Grande	7	1971	Terreno	B
389	162600	249700	1973	TC La Fe	3	1973-95	Terreno	B
390	140200	237100	1973	Radar La Bajada	5	1973	Terreno	B
394	182200	255600	1976	Est. Hid. Cuyaguateje	12	1976	Terreno	B
396	170900	254900	1978	Plan Cítrico Sandino	10	1978	Terreno	R
401	153900	238200	1979	El Valle	10	1979-94	Terreno	B
438	178800	261200	1973	Est. Met. Isabel Rubio	35	1973	Terreno	B
477	183400	260100		Derivadora Cuyaguateje			Terreno	B

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Las señales en color rojo fueron usadas en la investigación.

Anexo textual 26. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 477

<i>Año</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>P. Húm</i>	<i>P. Seco</i>	<i>Año Hid.</i>
2001	50,2	27,7	28,3	45,8	57	32,6	103,5	265, 6	249, 2	92,2	29,4	0	800	79	879
2002		36,1	8,2	4,8	132	181, 7							314	0	314
2003													0	0	0
2004													0	383	383
2005	20,2	212, 2	134, 8	15,3	61,9	337, 5	89,8	368, 9	285, 6	466, 8		42,9	1611	43	1653
2006												99,4	0	311	311
2007	21,4	74,6	0,7	115, 1	75,7	435, 2	193,7	325, 8	182, 7	107, 9	0	32,5	1321	262	1583
2008	86,7	67,3	37,2	37,9	38,4	119, 4	137,7	145, 9	505, 3	216, 7	3,7	11,7	1163	122	1286
2009	20,8	42,1	34,5	9,5	30	301, 9	64,1	239, 5	161, 2	101, 8	351, 1	132, 4	899	738	1637
2010	34,9	92	29,2	98,6	165	109, 2	102,4	253, 7	165, 1	28,3	27,7	28	824	149	973
2011	19,6	6,8	25	41,8	89,6	156, 5	175,2	271	145, 1	240, 7	7	0	1078	125	1203
2012	13,1	70,7	11,3	22,8	154	359, 2	126,8	150, 2	123, 3	250, 5	13,9	13,8	1164	281	1446
2013	4,2	34,8	94,6	120	14,9	705	301,9	118, 5	224, 6	257, 9	36,4	107, 1	1623	374	1997
2014	69,5	56,9	30,5	74									0	0	0

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Anexo textual 27. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 3

<i>Año</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>P. Húmedo</i>	<i>P. Seco</i>	<i>Año Hidrol.</i>
1963			16,0	0,0	47,0	134,0	146,0	170,0	130,0	0,0	70,0	6,0	627	203	830
1964	19,0	42,0	30,0	36,0	129,0	239,0	48,0	29,0	405,0	314,0	0,0	192,0	1164	244	1408
1965	10,0	0,0	0,0	42,0	37,0	144,0	155,0	67,0	174,0	312,0	22,0	44,0	889	258	1147
1966	69,0	19,0	66,0	38,0	154,0	157,0	168,0	149,7	68,8	206,0	0,0	31,0	904	128	1031
1967	25,0	39,0	31,5	1,0	38,0	343,5	15,0	221,0	258,5	154,5	32,0	161,0	1031	293	1324
1968	0,0	80,0	14,0	6,0	347,7	253,7	168,0	54,0	128,5	167,0	156,0	46,0	1119	483	1602
1969	108,0	28,0	28,0	117,0	287,6	392,8	79,0	406,0	147,2	280,2	34,0	16,0	1593	325	1918
1970	123,3	37,0	90,0	25,0	152,0	171,8	271,6	451,0	118,3	109,0	51,0	10,0	1274	148	1421
1971	21,0	12,5	28,0	25,0	109,0	62,0	80,5	103,0	81,0	329,5	262,0	48,0	765	626	1391
1972	81,5	83,0	41,0	110,5	265,0	830,0	75,0	62,0	80,0	141,0	77,0	31,0	1453	285	1738
1973	37,0	25,0	57,0	58,0	15,0	130,0	107,5	285,2	408,0	75,0	35,0	59,0	1021	207	1228
1974	38,2	47,0	21,0	7,0	129,5	209,2	107,8	119,6	150,0	21,0	0,0	0,0	737	83	820
1975	0,0	34,0	49,0	0,0	204,0	34,0	125,0	190,0	203,0	150,0	252,0	44,0	906	366	1272
1976	22,0	14,0	0,0	34,0	164,5	255,0	43,0	90,0	110,0	80,0	80,0	18,0	743	298	1040
1977	31,0	69,1	49,4	50,4	329,0	280,0	115,0	194,5	228,0	35,0	80,0	89,9	1182	465	1646
1978	97,0	64,0	78,0	56,0	200,0	195,0	116,0	101,0	215,0	297,2	36,0	44,0	1124	780	1904
1979	78,0	0,0	81,0	541,0	210,0	173,8	291,0	104,9	329,0	482,0	70,1	94,0	1591	506	2097
1980	75,0	83,0	124,1	60,0	34,0	170,0	82,0	263,5	170,0	99,0	506,0	18,0	819	632	1450
1981	46,0	14,0	14,0	33,5	57,0	119,5	168,0	164,0	184,0	43,0	22,0	42,0	736	340	1076
1982	25,0	51,0	105,0	95,0	350,0	938,0	75,0	39,0	145,0	185,0	87,0	12,0	1732	917	2649
1983	240,0	288,0	189,9	100,0	40,0	200,0	79,0	19,0	157,8	251,8	46,6	85,2	748	297	1044
1984	12,3	54,1	74,2	24,2	130,1	7,4	154,9	129,2	229,6	91,0	89,5	1,2	742	390	1132
1985	18,9	20,4	37,1	222,9	117,5	52,7	55,0	156,8	177,9	52,8	64,6	0,0	613	307	920
1986	41,3	70,0	117,3	13,8	227,0	44,5	29,3	106,6	106,4	99,9	9,3	183,3	614	442	1056
1987	36,8	46,3	160,0	6,3	45,4	54,8	56,7	56,6	152,6	192,0	32,7	54,0	558	152	710
1988	35,1	0,0	28,7	1,4	225,6	161,4	83,5	107,8	254,9	70,1	135,0	0,0	903	388	1291
1989	91,2	22,6	27,8	111,1	29,7	115,6	69,7	144,0	353,2	114,2	98,8	36,7	826	288	1114
1990	7,8	52,0	43,2	49,4	82,4	79,7	69,4	135,2	148,1	8,0	22,4	34,0	523	192	715
1991	48,2	15,8	25,9	45,7	320,1	99,1	55,2	103,5	256,6	117,2	82,8	1,4	952	234	1186
1992	18,4	105,6	13,6	12,0	146,7	657,9	77,1	99,9	179,3	171,3	24,0	0,0	1332	378	1710
1993	92,1	7,9	98,3	155,9	200,2	231,2	29,5	87,4	80,4	411,8	8,4	20,5	1041	32	1072
2012			0,0	3,0	133,0	237,0	70,0	227,7	111,0	173,0	14,0	20,0	952	287	1239
2013	0,0	28,0	124,0	101,0	24,0	740,0	305,5	66,0	204,0	205,0	19,0	94,0	1545	384	1929
2014	79,0	55,0	67,0	70,0	51,0	75,0	50,0	110,0	188,0	176,0	21,0		650	21	671

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Anexo textual 28. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 367

<i>Año</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>P. Húmedo</i>	<i>P. Seco</i>	<i>Año Hidrol.</i>
1971	5,5	15,2	12,7	7,0	76,8	171,7	89,8	185,7	39,8	207,1	23,4	20,5	771	515	1286
1972	51,0	111,1	46,9	262,5	233,6	757,5	117,4	113,8	148,4	60,5	25,2	33,5	1431	221	1652
1973	22,0	34,3	37,5	68,2	16,3	221,5	167,8	337,6	400,1	74,3	38,1	69,5	1218	148	1365
1974	2,1	22,2	10,7	5,2	146,0	173,9	60,1	86,7	184,0	55,0	7,6	4,8	706	107	813
1975	8,7	45,6	38,2	1,9	167,6	191,1	189,6	152,6	342,6	95,8	289,8	7,6	1139	533	1672
1976	81,6	27,0	57,5	69,1	379,0	196,8	186,1	158,6	188,3	141,2	6,8	74,4	1250	284	1534
1977	18,9	37,8	51,2	94,8	194,0	342,9	30,7	210,2	213,0	96,9	11,0	36,4	1088	442	1530
1978	87,2	102,8	99,6	105,4	221,2	181,1	168,2	323,2	264,3	182,5	57,6	25,0	1341	683	2024
1979	116,6	3,2	32,2	448,7	381,5	96,5	261,0	77,9	485,3	189,4	108,7	74,6	1492	458	1950
1980	64,3	113,4	36,8	60,4	45,2	106,5	178,2	205,4	165,1	125,5	594,7	37,8	826	728	1554
1981	64,3	9,5	12,8	8,8	66,2	199,0	110,9	127,4	214,1	54,4	11,2	79,4	772	367	1139
1982	18,2	28,0	85,9	144,0	187,1	881,9	160,2	116,6	179,2	95,8	44,3	13,7	1621	617	2238
1983	162,6	177,5	114,1	104,6	14,6	353,9	68,8	140,0	173,9	224,1	79,2	25,4	975	297	1273
1984	67,7	49,5	41,0	34,5	91,4	79,2	172,4	138,8	202,1	58,3	76,9	0,0	742	320	1062
1985	24,2	36,1	33,7	149,3	96,5	104,6	123,2	158,8	210,7	31,2	27,1	50,8	725	242	967
1986	20,7	85,3	57,1	0,7	239,1	145,8	161,6	189,4	55,4	79,1	9,6	166,8	870	419	1290
1987	61,9	46,3	121,8	12,8	13,9	85,4	114,1	150,4	234,6	204,7	50,4	21,8	803	148	951
1988	13,5	27,1	25,1	9,8	196,7	131,0	150,9	292,1	424,6	56,7	120,1	12,2	1252	265	1517
1989	17,6	27,7	20,6	67,2	67,0	35,4	181,7	134,8	435,2	131,9	42,0	65,4	986	278	1264
1990	7,4	32,9	41,0	89,1	326,8	193,4	225,3	180,4	95,9	29,1	8,8	60,1	1051	242	1293
1991	73,0	0,2	20,0	79,7	276,0	135,1	143,4	138,2	163,9	148,7	85,2	0,6	1005	225	1231
1992	22,8	27,0	12,6	77,2	141,8	483,7	101,0	177,8	211,2	253,8	120,0	1,1	1369	346	1715
1993	83,2	13,8	69,8	58,1	72,1	111,2	54,1	92,5	21,6	244,5	10,0	22,4	596	129	725
1994	0,0	30,6	9,2	57,1	220,6	74,9	147,0	191,0	590,7	111,6	17,7	54,8	1336	497	1833
1995	160,5	57,0	131,8	75,0	25,2	338,3	37,4	332,7	532,7	308,1	17,3	146,1	1574	300	1875
1996	55,5	6,8	15,6	58,9	191,6	343,6	87,3	191,0	198,8	265,7	1,0	18,6	1278	311	1589
1997	124,6	43,5	35,2	88,2	154,1	125,9	268,7	68,1	363,3	49,4	13,6	71,1	1030	371	1401
1998	154,8	51,2	80,5	0,0	176,5	75,7	90,6	315,5	399,6	177,7	96,0	16,0	1236	219	1455
1999	37,2	12,8	20,3	36,9	205,4	215,9	208,7	158,5	216,7	199,4	24,7	18,1	1205	280	1485
2000	67,1	50,4	22,0	98,1	76,3	152,3	106,8	193,2	256,9	57,9	26,9	48,0	843	209	1052
2001	29,0	55,6	20,6	28,8	202,3	98,0	133,5	127,6	462,4	158,0	83,1	54,8	1182	341	1523
2002	11,8	123,0	26,0	42,7	147,1	233,6	247,4	198,6	831,0	106,9	93,3	129,0	1765	374	2138
2003	10,0	67,7	49,5	24,3	146,7	156,5	134,1	75,5	272,7	23,0	67,9	54,8	809	281	1090
2004	49,0	54,9	49,3	5,4	45,1	48,3	222,6	135,0	503,1	70,0	5,0	19,0	1024	461	1485
2005	26,5	172,0	159,3	79,0	30,2	320,7	156,0	355,2	343,2	538,7	161,1	62,3	1744	396	2140
2006	19,0	29,1	14,3	109,9	54,1	419,7	166,0	124,4	205,1	126,1	83,0	183,4	1095	366	1462
2007	7,8	35,0	0,0	57,0	148,1	468,6	139,1	325,3	183,8	180,7	0,0	31,2	1446	251	1697
2008	32,5	80,3	18,4	88,8	31,4	128,9	292,7	130,6	630,4	185,1	7,6	18,2	1399	92	1492
2009	12,2	35,3	17,6	1,5	38,4	370,3	124,7	196,8	88,7	73,0	428,4	84,7	892	751	1643
2010	39,6	70,3	45,8	81,9	61,1	224,8	136,4	196,5	226,6	91,7	63,1	26,2	937	223	1160
2011	24,0	35,2	67,3	7,2	156,1	194,1	130,5	195,4	215,0	352,3	20,8	6,7	1243	243	1487
2012	63,5	70,4	21,8	60,1	248,5	550,0	106,6	242,5	188,4	151,8	46,0	73,4	1488	298	1786
2013	5,2	3,2	86,2	84,0	99,8	804,4	371,4	165,2	157,5	125,8	67,8	57,5	1724	295	2019
2014	73,0	40,6	28	28,4									0	0	0

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Anexo textual 29. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 390

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P. Húmedo	P. Seco	Año Hidrol.
1974	21,8	54,5	0,0	25,3	120,7	141,2	160,2	279,6	114,4	15,3	7,1	0,3	831	127	959
1976	32,0	4,0	18,9	78,0	146,0	204,0	90,2	194,3	174,9	136,4	15,8	92,8	946	385	1331
1977	23,6	68,2	54,2	130,8	247,5	276,1	184,0	169,1	192,3	86,0	37,5	80,3	1155	513	1668
1978	117,6	121,1	89,4	67,3	149,2	170,5	93,6	229,7	195,5	180,6	80,4	12,6	1019	747	1766
1979	89,1	20,9	42,1	501,6	178,1	184,0	281,5	124,7	293,2	299,1	104,0	84,4	1361	522	1883
1980	55,3	106,4	57,3	115,0	78,1	155,8	244,2	195,1	248,0	160,4	438,9	10,7	1082	518	1599
1981	9,0	0,0	36,8	22,3	126,5	142,4	111,2	98,0	172,2	34,7	21,0	58,2	685	180	865
1982	17,0	0,0	53,1	31,0	234,9	449,1	39,8	108,5	132,3	91,1	43,7	64,3	1056	876	1932
1983	236,1	307,0	90,7	134,6	56,4	178,8	82,4	41,6	197,3	200,5	58,3	13,7	757	282	1039
1984	53,1	62,0	60,8	33,6	123,0	100,9	229,3	153,5	123,2	100,4	110,2	0,0	830	346	1176
1985	48,9	27,7	40,1	118,6	103,9	35,8	73,4	309,4	338,4	102,2	40,5	32,6	963	320	1284
1986	72,2	52,1	84,1	38,9	157,8	199,0	79,7	143,0	121,8	85,3	15,4	155,0	787	489	1275
1987	16,2	115,5	159,6	27,0	55,1	77,7	166,4	126,4	138,0	201,9	9,2	38,8	766	101	866
1988	4,5	12,5	35,8	0,0	157,7	188,7	188,0	254,2	207,3	111,7	106,2	3,9	1108	325	1433
1989	0,0	43,3	63,7	108,1	51,9	67,9	33,7	214,2	351,4	55,5	47,3	37,8	775	241	1016
1990	4,9	55,1	44,2	51,6	129,4	120,7	132,0	275,8	107,1	11,1	9,1	56,9	776	201	977
1991	93,0	8,0	21,0	12,8	298,0	111,2			80,7	170,0	55,2	4,8	660	135	795
1992	17,9	30,3	4,6	22,3	69,7	211,5	113,4	220,2	135,7	163,5		6,3	914	469	1383
1993	105,1	30,5	90,6	236,7	223,9	106,9	15,4	137,9	82,1	568,8	0,0	23,8	1135	236	1371
1994	60,4	75,6	36,6	39,5	174,2	115,2			574,9	222,9	17,3	101,9	1087	336	1423
1998	130,6	42,2	43,7	0,0	102,4	212,5	80,6	261,2	272,8	103,6	33,1	28,6	1033	229	1262
1999	38,6	69,5	43,0	15,7	182,8	277,5	95,2	338,2	316,1	271,8	22,5	24,5	1482	238	1720
2000	25,8	67,6	4,2	93,7	48,4	62,7	186,2	239,4	377,5	83,7	8,5	13,1	998	93	1090
2001	45,5	5,3	8,1	12,0	238,2	52,7	164,3	180,9	401,2	143,4	14,8	41,7	1181	196	1377
2002	11,4	68,1	11,0	49,0	119,5	291,2	180,3	98,4	739,7	129,4	65,5	37,8	1559	300	1858
2003	4,0	9,9	112,9	69,6	126,7	124,6	88,3	270,9	251,4	101,2	78,8		963	220	1183
2004	24,4	88,3	19,7	8,8	122,0	51,5	180,3	123,5	270,7	131,8	1,0	20,5	880	281	1160
2005	15,1	66,7	109,2	68,0	83,4	537,6	175,4	266,1	317,1	601,5	119,2	97,0	1981	310	2291
2006	4,2	19,5	24,3	45,8	58,5	296,8	292,8	176,3	175,6	201,2	88,8	116,3	1201	337	1538
2007	13,7	93,8	0,0	24,2	141,1	114,5	95,2	351,5	173,3	176,1	0,5	16,5	1052	165	1217
2008	2,0	55,0	17,2	73,6	17,2	80,2	163,0	141,9		182,2	0,0	7,5	585	162	746
2009	28,9	12,0	113,4	0,0	59,0	284,1	49,0	121,6	122,1	23,0	455,4	79,9	659	770	1429
2010	56,9	96,9	10,3	70,5	142,0	138,3	159,8	171,5	224,8	100,7	68,5	35,6	937	250	1188
2011	35,5	0,0	102,0	8,8	42,5	200,8	242,4	226,5	124,2	398,8	47,3	3,6	1235	174	1410
2012	6,0	59,5	1,0	57,0	264,5	404,1	79,9	95,1	22,1	55,3	26,8	1,2	921	135	1056
2013	27,5	31,0	38,5	9,5	95,1	544,6	162,5	115,5	286,3	166,6	114,3	50,6	1371	374	1745
2014	91,3	46,6	54,5	16,7									0	0	0

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Anexo textual 30. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 396

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P. Húmedo	P. Seco	Año Hidrol
1978	184,7	129,3	50,0	57,1	206,1	125,0	77,8		102,5	277,6	75,2	21,4	789	891	1680
1979	98,8	6,6	68,8	620,0	319,0	86,5	151,5	108,7	423,7	219,9	79,9	118,5	1309	484	1794
1980	49,3	135,6	54,4	46,6	6,0	112,5	99,7	219,1	157,7	96,1	616,2	35,2	691	756	1447
1981	37,8	36,0	17,0	13,9	62,4	107,2	111,5	52,3	254,2	5,3	0,0	54,7	593	263	856
1982	19,1	17,5	91,4	80,3	261,2	728,8	91,1	40,5	84,9	60,1	77,7	0,0	1267	771	2038
1983	251,4	179,3	176,4	86,2	6,3	221,2	88,9	122,7	297,9	349,1	38,6	94,9	1086	303	1389
1984	40,4	51,7	43,0	34,0	109,1	64,3	162,8	90,9	138,2	120,3	55,5	0,0	686	244	930
1985	29,4	13,2	45,7	100,5	104,2	57,4	195,8	210,9	116,1	79,2	27,5	24,2	764	247	1010
1986	44,6	49,5	64,5	36,5	183,7	180,8	91,7	67,7	58,2	81,5	6,4	174,8	664	352	1015
1987	23,6	33,3	113,7	0,0	134,5	37,7	11,2	45,8	123,0	156,8	9,3	27,8	509	77	586
1988	29,6	0,0	0,0	10,1	266,0	150,0	80,7	231,2	259,8	29,9	131,3	0,0	1018	300	1318
1989	0,0	35,5	15,3	117,8	97,2	11,4	58,8	101,4	242,2	146,7	82,5	39,6	658	264	922
1990	0,0	32,2	42,9	67,1	176,3	210,8	149,5	155,6	161,6	33,7	0,0	32,8	888	191	1078
1991	65,1	20,2	20,0	52,7	166,9	128,7	160,9	158,5	100,2	82,3	56,1	0,0	798	266	1063
1992	10,3	16,0	18,7	164,6	144,7	795,0	67,7	221,4	78,1	209,8	26,0	0,0	1517	241	1758
1993	39,8	0,0	127,0	48,1	110,0	125,9	0,0	230,4	15,8	492,8	0,0	0,0	975	81	1056
1995	34,7	0,0	27,3	19,1		238,9	22,0	448,3	518,2	206,7			1434	106	1540
2013	0,0	0,0	56,0	50,0	68,6	759,0	0,0	133,0	8,0	72,0		33,0	1041	33	1074
2014													0	0	0

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Anexo textual 31. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 401

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P. Húmedo	P. Seco	Año Hidrol
1979	150,8	21,2	47,5	762,4	252,7	183,4	258,6	135,2	409,5	262,9	101,1	94,2	1502	507	2009
1980	89,9	122,6	59,5	39,6	112,6	229,3	213,8	346,2	334,9	250,4	468,1	19,7	1487	640	2127
1981	80,2	0,0	46,1	25,5	61,8	159,5	120,4	144,8	209,9	49,2	0,0	74,2	746	380	1126
1982	33,7	19,6	94,8	157,8	278,5	671,6	46,4	117,0	130,9	105,5	71,7	49,6	1350	780	2129
1983	207,0	230,4	128,8	92,0	8,6	306,5	97,7	85,3	279,0	299,8	41,5	18,8	1077	244	1321
1984	34,3	69,0	49,8	31,0	175,2	52,4	180,0	159,8	201,5	182,3	130,6	0,4	951	352	1303
1985	41,8	22,9	55,4	101,1	91,4	21,9	123,6	306,6	188,2	161,2	49,4	61,4	893	279	1172
1986	64,0	37,6	64,2	2,3	141,1	123,7	57,2	121,3	107,9	121,6	34,2	134,0	673	523	1196
1987	50,0	98,8	156,0	49,7	10,6	56,8	85,6	161,3	179,0	186,4	48,6	66,0	680	177	857
1988	27,2	17,4	16,8	1,4	220,4	114,8	96,2	161,2	222,4	133,3	89,6	2,4	948	305	1253
1989	4,6	22,2	54,0	131,8	77,4	54,4	113,6	120,6	241,0	50,4	18,8	37,8	657	252	910
1990	17,4	68,2	26,4	83,6	83,2	189,6	183,6	237,2			36,3	69,7	694	233	927
1991	67,7	1,6	38,9	19,1	315,9	79,8	139,0	57,0	205,0	282,1	88,0	8,4	1079	361	1440
1992	9,0	38,0	33,4	184,1	124,2	237,3	119,1	120,6	121,6	134,8	81,7	1,0	858	433	1290
1993	92,7	6,5	72,1	178,8	170,5	84,6	46,7	137,7	68,5	457,4	2,0	24,6	965	124	1089
2012			54,7	42,3	255,1	323,3	72,3	147,9	95,0	199,9	32,1	31,0	1094	170	1264
2013	25,2	17,8	22,0	42,1	55,1	721,1	246,6	192,3	286,3	225,3	57,8	84,9	1727	308	2034
2014	144,6	20,2											0	0	0

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Anexo textual 32. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 438

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P. Húm	P. Seco	Año Hidrol
1968	7,6				310,4	189,1	71,9	121,4	118,7	90,2	78,6	4,2	902	291	1193
1969	111,3	13,4	9,7	73,9	339,5	355,6	2,8	373,7	179,6	263,2	4,9	5,8	1514	223	1738
1970	109,8	26,4	44,0	32,3	175,9	72,1	291,9	150,7	110,2	21,1	150,8	4,8	822	226	1048
1971	3,5	6,0	45,0	15,5	67,0	21,5	42,3	61,2	103,8	306,3	121,8	19,1	602	412	1014
1972	57,4	65,9	15,5	132,3	253,7	771,5	52,3	40,4	152,9	75,0	42,6	27,4	1346	249	1595
1973	54,3	31,1	37,9	55,9	16,0	102,3	82,9	276,7	404,3	91,4	22,7	32,1	974	144	1118
1974	17,2	32,5	20,3	19,3	170,2	174,4	69,8	95,4	112,0	71,6	23,2	1,5	693	145	839
1975	6,0	49,8	63,8	1,0	128,8	32,2	67,0	84,3	280,0	199,9	231,7	31,5	792	381	1173
1976	36,1	18,1	4,3	59,5	148,5	168,6	79,0	101,4	107,2	118,8	30,5	28,4	724	241	965
1977	35,9	33,9	56,6	56,1	233,2	268,5	110,9	178,2	180,0	60,6	38,3	58,8	1031	476	1508
1978	137,7	81,2	109,4	51,0	215,9	212,6	122,1	119,9	218,2	207,4	29,7	30,0	1096	713	1809
1979	77,1	14,4	51,2	510,2	181,0	157,3	231,1	71,6	300,2	334,5	30,6	106,3	1276	426	1702
1980	57,8	77,0	71,3	83,3	54,8	132,0	81,3	180,0	172,0	150,5	497,8	22,2	771	648	1418
1981	44,0	32,5	21,4	29,6	92,8	189,2	136,6	114,2	179,4	43,3	0,6	60,4	756	327	1083
1982	39,0	45,9	69,8	111,5	228,5	867,5	39,3	108,5	74,0	156,9	83,1	15,6	1475	777	2252
1983	256,4	216,2	122,4	83,4	7,9	199,1	107,3	209,2	202,4	318,9	60,0	94,9	1045	316	1360
1984	35,3	44,8	56,1	24,5	114,2	23,1	186,2	127,0	184,0	79,5	68,3	0,7	714	285	999
1985	25,1	20,3	73,9	96,4	98,1	52,9	58,0	173,4	341,0	59,5	72,4	21,6	783	269	1052
1986	40,0	50,7	65,5	18,5	156,2	80,8	120,6	96,6	75,9	132,4	6,4	153,6	663	393	1055
1987	41,1	40,9	141,8	8,9	80,2	38,7	49,8	97,2	229,3	258,3	21,4	22,3	754	123	876
1988	38,8	13,7	21,5	4,9	252,0	132,9	66,3	127,0	279,6	56,9	162,0	0,6	915	304	1219
1989	21,8	15,5	26,5	78,0	58,9	87,6	98,4	164,9	321,6	130,8	56,3	37,6	862	251	1113
1990	6,1	47,5	30,9	72,7	62,3	135,2	112,6	128,7	194,9	40,3	17,7	23,7	674	191	865
1991	63,3	38,3	22,6	25,8		47,4	107,9	138,2	136,0	81,1	47,9	5,2	511	297	808
1992	31,4	50,7	21,8	140,3	91,8	714,5	88,0	190,5	143,2	192,8	43,0	2,8	1421	346	1767
1993	101,9	5,8	133,0	59,7	66,0	193,8	35,1	131,3	43,8	396,1	27,1	29,3	866	293	1159
1994	71,6	83,2	27,6	53,7	217,9	45,4	177,9	95,9	562,0	67,5	22,4	19,8	1167	320	1487
1995	129,2	69,9	61,8	16,9	32,7	334,3	90,3	389,6	465,2	286,0	20,6	166,2	1598	396	1994
1996	68,5	0,1	19,4	121,2	216,9	165,8	150,1	146,0	148,4	191,6	6,2	17,5	1019	393	1411
1997	102,8	68,0	109,5	88,6	80,6	320,9	155,3	202,1	340,7	36,9	38,1	33,4	1137	316	1453
1998	125,1	58,5	60,1	0,9	241,7	75,5	89,2	130,4	421,6	94,1	106,7	25,2	1053	235	1288
1999	41,6	27,0	26,1	8,5	91,8	148,7	81,2	199,2	222,3	234,1	43,9	19,5	977	290	1267
2000	61,4	29,9	32,8	102,3	45,0	42,1	84,9	153,3	249,0	78,1	34,3	56,1	652	236	888
2001	18,8	15,1	31,8	79,8	288,9	30,6	161,2	52,6	268,2	185,7	10,2	22,5	987	136	1123
2002	11,3	51,0	23,5	17,7	108,7	177,1	18,3	161,0	793,1	110,0	66,9	91,7	1368	355	1724
2003	29,6	28,3	68,5	70,3	95,0	212,9	57,7	149,4	238,1	63,5	59,9	58,5	817	275	1092
2004	44,6	54,2	17,8	40,3	13,4	64,2	231,2	111,3	474,7	53,2	1,1	22,9	948	469	1417
2005	29,5	226,3	136,1	53,4	89,7	311,5	141,0	353,7	234,4	604,4	349,3	35,4	1735	578	2312
2006	0,9	58,3	15,8	117,8	53,1	546,9	78,9	197,7	109,4	115,4	33,6	95,3	1101	258	1359
2007	15,7	37,3	1,5	74,3	137,3	416,3	84,7	236,4	207,7	79,1	5,4	17,5	1162	195	1357
2008	15,3	43,7	74,4	39,0	49,9	70,0	171,9	175,1	462,7	201,0	7,7	3,7	1131	143	1274
2009	7,9	32,3	82,8	8,5	29,8	238,9	32,5	218,3	148,3	116,4	310,8	98,8	784	551	1335
2010	20,4	39,1	2,9	78,5	103,7	81,9	134,6	170,7	176	52,9	22,3	23,1	719	139	858
2011	22,6	5,8	40,0	25,1	82,3	95,7	116,5	300,6	77,2	275,9	2,8	3,7	948	106	1054
2012	13,9	47,7	8,6	29,3	140,4	333,7	124,0	107,1	115,9	247,4	25,2	28,9	1069	293	1361
2013	3,8	60,1	79,6	95,2	24,9	833,3	132,7	189,2	255,7	274,9	32,1	129,9	1711	319	2030
2014	77,7	47,4	31,8										0	0	0

Anexo textual 33. Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 394

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P. Húmedo	P. Seco	Año Hidrol
1976	26,4	15,7	7,0	49,2	149,0	217,4	51,5	130,0	112,0	118,0	40,0	25,7	778	218	996
1977	28,7	64,8	18,1	40,9	235,8	237,0	66,6	192,1	111,2	51,8	61,1	67,4	895	400	1294
1978	111,8	54,7	68,8	36,1	106,8	204,0	96,7	95,8	211,4	268,7	21,8	33,6	983	775	1759
1979	77,2	13,9	159,0	469,7	199,0	113,7	246,1	81,7	330,6	342,9	48,7	87,3	1314	459	1773
1980	60,4	88,8	115,5	57,8	64,1	93,8	56,2	197,6	166,9	117,6	456,8	17,6	696	570	1266
1981	34,4	27,9	16,2	17,0	51,2	90,3	171,9	128,0	180,0	17,9	19,5	44,6	639	252	891
1982	35,6	30,1	68,9	53,0	301,1	901,5	41,2	39,8	129,2	185,4	93,8	18,6	1598	773	2371
1983	240,2	202,5	146,3	71,7	9,1	223,8	24,4	40,6	189,0	253,3	68,6	52,3	740	253	993
1984	25,7	32,7	49,1	24,7	104,4	5,5	159,2	61,1	183,5	126,1	97,4	0,6	640	323	963
1985	17,4	12,8	37,8	157,4	95,5	108,9	77,6	120,8	223,6	37,9	64,6	18,3	664	271	935
1986	50,7	42,0	89,8	5,4	146,3	47,4	55,0	109,1	129,3	106,4	6,5	164,9	594	412	1006
1987	40,4	41,0	152,9	6,4	60,8	54,8	45,5	60,4	72,9	175,2	19,2	63,4	470	167	637
1988	51,1	13,9	17,6	2,0	299,5	210,9	38,6	116,4	179,0	30,2	141,4	2,6	875	316	1191
1989	52,6	18,0	22,7	79,0	65,8	124,6	78,4	109,8	251,2	88,0	89,3	53,7	718	323	1041
1990	0,0	50,0	69,3	60,5	119,3	97,9	86,8	175,7	94,8	12,8	28,7	38,5	587	228	815
1991	45,9	43,0	29,6	42,0	281,5	74,2	92,8	67,7	112,5	98,7	54,6	0,0	727	241	969
1992	16,6	59,2	26,0	84,9	91,4	615,7	90,3	106,6	75,8	148,1	28,8	2,0	1128	242	1369
1993	107,5	2,8	76,0	24,4	130,3	134,4	38,6	87,6	43,2	282,2	8,6	15,4	716	308	1024
1994		158,8	54,9	70,0									0	0	0
1995													0	46	46
1996				45,5	272,8								273	0	273
1997													0	0	0
1998													0	0	0
1999													0	0	0
2000													0	24	24
2001		7,2		16,8	171,6	24,3	58,7	76,9		108,8		49,6	440	205	645
2002	89,7	43,8	15,1	6,6	146,3	227,2	45,4	96,9	670,4	133,8	62,6	72,9	1320	350	1670
2003	44,1	41,7	46,6	82,0	92,8	184,7	20,4	240,0	269,4	37,7	82,6	63,8	845	271	1116
2004	46,2	47,0	6,6	25,0	7,9	27,0	182,9	101,9	452,4			23,8	772	397	1169
2005	14,4	212,2	83,6	63,0	19,5	367,5	87,2	162,4	203,3	602,0	362,0	44,2	1442	523	1965
2006	3,0	49,1	20,7	44,2	63,5	467,3	75,4	139,9	133,9	54,5	37,0	83,7	935	232	1167
2007	11,3	43,1	15,9	41,3	91,9	454,0	92,3	326,0	150,6	114,1	0,0	23,3	1229	175	1404
2008	24,6	41,5	51,5	34,2	35,0	125,4	111,9	111,7	463,7	154,8	0,0	0,0	1003	62	1064
2009	30,0	0,0	16,7	15,2	11,4	169,0	75,8	128,7	100,8	88,3	313,3	136,2	574	707	1281
2010	60,7	52,5	39,3	105	116,3	86,1	114,6	133,3	86,9	84,0	30,6	24,2	621	107	728
2011	19,4	0,0	9,3	23,2	84,7	208,9	206,2	249,6	117,3	197,4	5,4	16,5	1064	146	1210
2012	14,2	80,7	10,3	18,9	163,0	202,1	64,2	136,6	151,5	147,5	22,1	0,6	865	215	1079
2013	0,6	3,5	83,4	104	3,5	565,7	135,2	77,4	250,8	227,4	27,8	95,4	1260	370	1630
2014	105,0	60,7	51,9	29,4									0	0	0

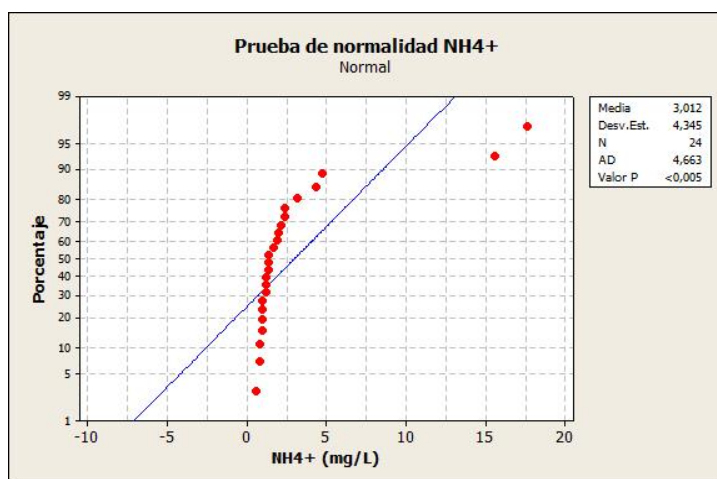
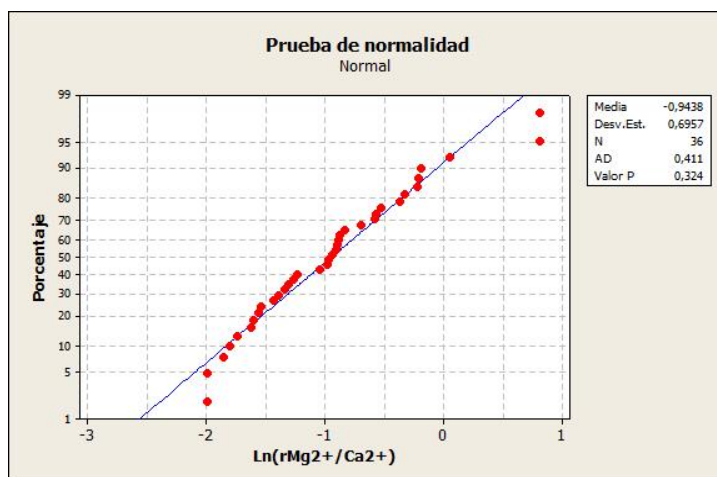
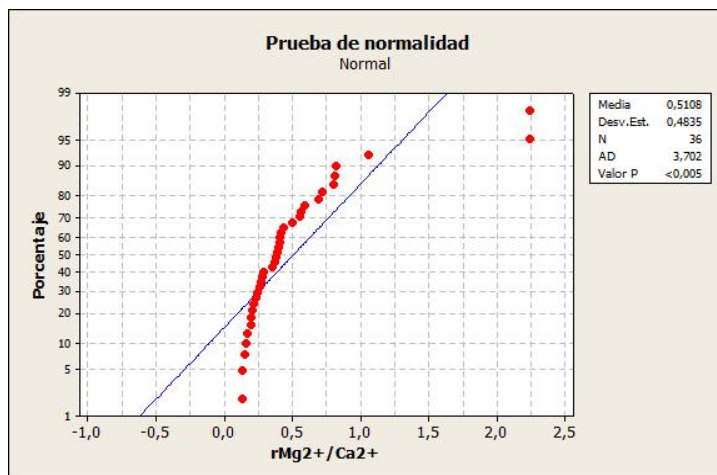
Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Anexo textual 34 Datos de lluvias registradas en milímetros (mm) pluviómetro 390

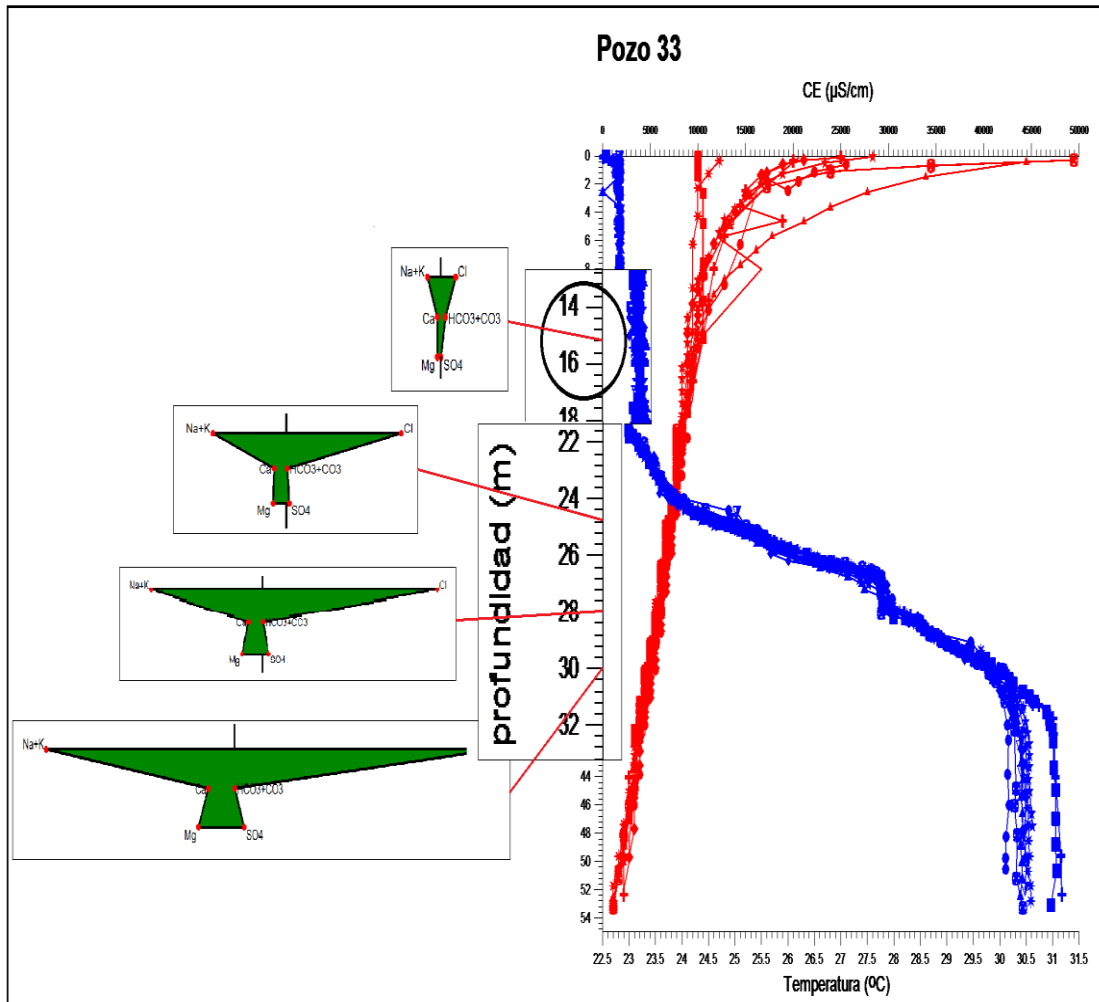
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P. Húm	P. Seco	A. Hidrol.
1974	21,8	54,5	0,0	25,3	120,7	141,2	160,2	279,6	114,4	15,3	7,1	0,3	831	127	959
1976	32,0	4,0	18,9	78,0	146,0	204,0	90,2	194,3	174,9	136,4	15,8	92,8	946	385	1331
1977	23,6	68,2	54,2	130,8	247,5	276,1	184,0	169,1	192,3	86,0	37,5	80,3	1155	513	1668
1978	117,6	121,1	89,4	67,3	149,2	170,5	93,6	229,7	195,5	180,6	80,4	12,6	1019	747	1766
1979	89,1	20,9	42,1	501,6	178,1	184,0	281,5	124,7	293,2	299,1	104,0	84,4	1361	522	1883
1980	55,3	106,4	57,3	115,0	78,1	155,8	244,2	195,1	248,0	160,4	438,9	10,7	1082	518	1599
1981	9,0	0,0	36,8	22,3	126,5	142,4	111,2	98,0	172,2	34,7	21,0	58,2	685	180	865
1982	17,0	0,0	53,1	31,0	234,9	449,1	39,8	108,5	132,3	91,1	43,7	64,3	1056	876	1932
1983	236,1	307,0	90,7	134,6	56,4	178,8	82,4	41,6	197,3	200,5	58,3	13,7	757	282	1039
1984	53,1	62,0	60,8	33,6	123,0	100,9	229,3	153,5	123,2	100,4	110,2	0,0	830	346	1176
1985	48,9	27,7	40,1	118,6	103,9	35,8	73,4	309,4	338,4	102,2	40,5	32,6	963	320	1284
1986	72,2	52,1	84,1	38,9	157,8	199,0	79,7	143,0	121,8	85,3	15,4	155,0	787	489	1275
1987	16,2	115,5	159,6	27,0	55,1	77,7	166,4	126,4	138,0	201,9	9,2	38,8	766	101	866
1988	4,5	12,5	35,8	0,0	157,7	188,7	188,0	254,2	207,3	111,7	106,2	3,9	1108	325	1433
1989	0,0	43,3	63,7	108,1	51,9	67,9	33,7	214,2	351,4	55,5	47,3	37,8	775	241	1016
1990	4,9	55,1	44,2	51,6	129,4	120,7	132,0	275,8	107,1	11,1	9,1	56,9	776	201	977
1991	93,0	8,0	21,0	12,8	298,0	111,2			80,7	170,0	55,2	4,8	660	135	795
1992	17,9	30,3	4,6	22,3	69,7	211,5	113,4	220,2	135,7	163,5		6,3	914	469	1383
1993	105,1	30,5	90,6	236,7	223,9	106,9	15,4	137,9	82,1	568,8	0,0	23,8	1135	236	1371
1994	60,4	75,6	36,6	39,5	174,2	115,2			574,9	222,9	17,3	101,9	1087	336	1423
1998	130,6	42,2	43,7	0,0	102,4	212,5	80,6	261,2	272,8	103,6	33,1	28,6	1033	229	1262
1999	38,6	69,5	43,0	15,7	182,8	277,5	95,2	338,2	316,1	271,8	22,5	24,5	1482	238	1720
2000	25,8	67,6	4,2	93,7	48,4	62,7	186,2	239,4	377,5	83,7	8,5	13,1	998	93	1090
2001	45,5	5,3	8,1	12,0	238,2	52,7	164,3	180,9	401,2	143,4	14,8	41,7	1181	196	1377
2002	11,4	68,1	11,0	49,0	119,5	291,2	180,3	98,4	739,7	129,4	65,5	37,8	1559	300	1858
2003	4,0	9,9	112,9	69,6	126,7	124,6	88,3	270,9	251,4	101,2	78,8		963	220	1183
2004	24,4	88,3	19,7	8,8	122,0	51,5	180,3	123,5	270,7	131,8	1,0	20,5	880	281	1160
2005	15,1	66,7	109,2	68,0	83,4	537,6	175,4	266,1	317,1	601,5	119,2	97,0	1981	310	2291
2006	4,2	19,5	24,3	45,8	58,5	296,8	292,8	176,3	175,6	201,2	88,8	116,3	1201	337	1538
2007	13,7	93,8	0,0	24,2	141,1	114,5	95,2	351,5	173,3	176,1	0,5	16,5	1052	165	1217
2008	2,0	55,0	17,2	73,6	17,2	80,2	163,0	141,9		182,2	0,0	7,5	585	162	746
2009	28,9	12,0	113,4	0,0	59,0	284,1	49,0	121,6	122,1	23,0	455,4	79,9	659	770	1429
2010	56,9	96,9	10,3	70,5	142,0	138,3	159,8	171,5	224,8	100,7	68,5	35,6	937	250	1188
2011	35,5	0,0	102,0	8,8	42,5	200,8	242,4	226,5	124,2	398,8	47,3	3,6	1235	174	1410
2012	6,0	59,5	1,0	57,0	264,5	404,1	79,9	95,1	22,1	55,3	26,8	1,2	921	135	1056
2013	27,5	31,0	38,5	9,5	95,1	544,6	162,5	115,5	286,3	166,6	114,3	50,6	1371	374	1745
2014	91,3	46,6	54,5	16,7									0	0	0

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

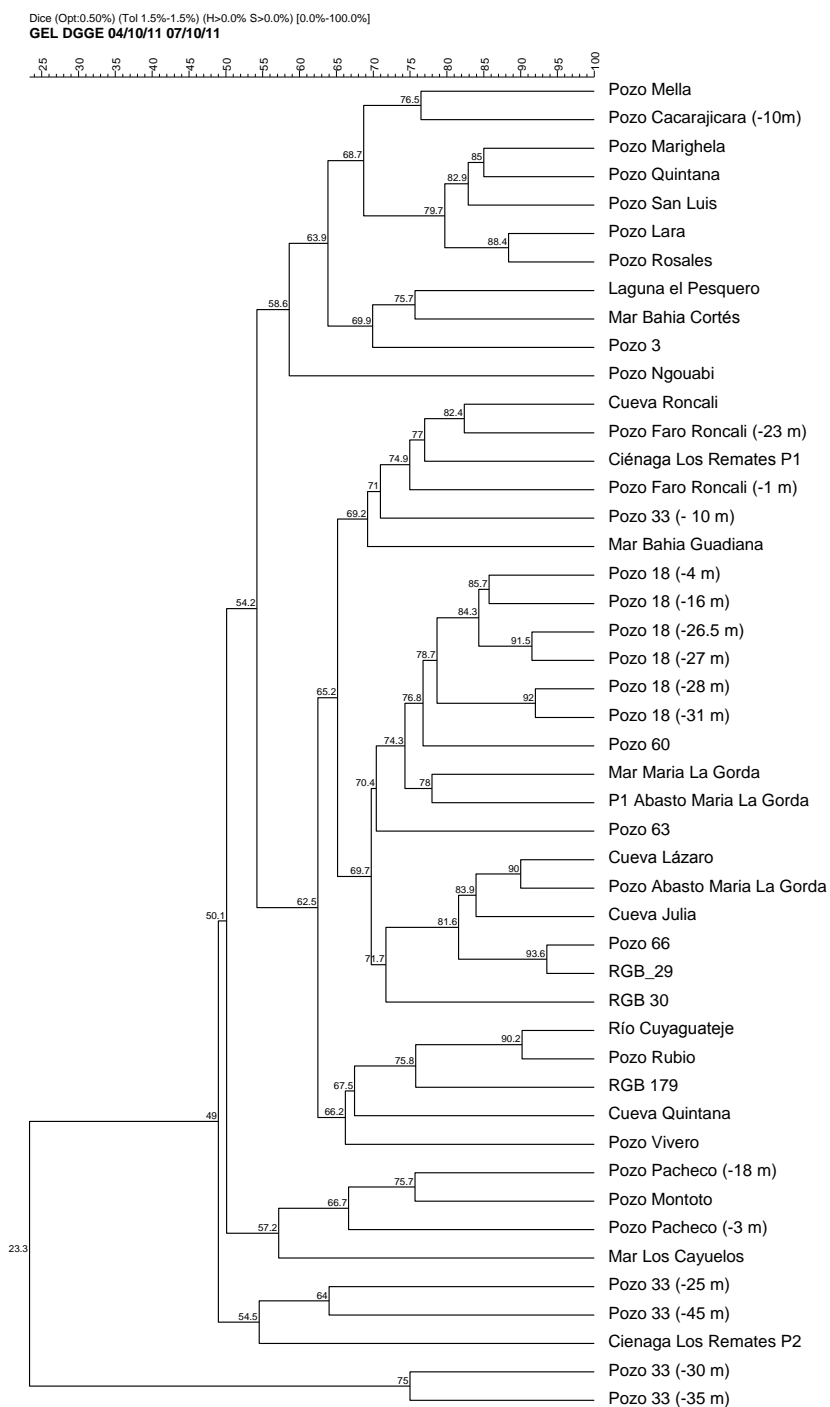
Anexo gráfico 1. Prueba de normalidad Anderson-Darling para la relación Magnesio-Calcio



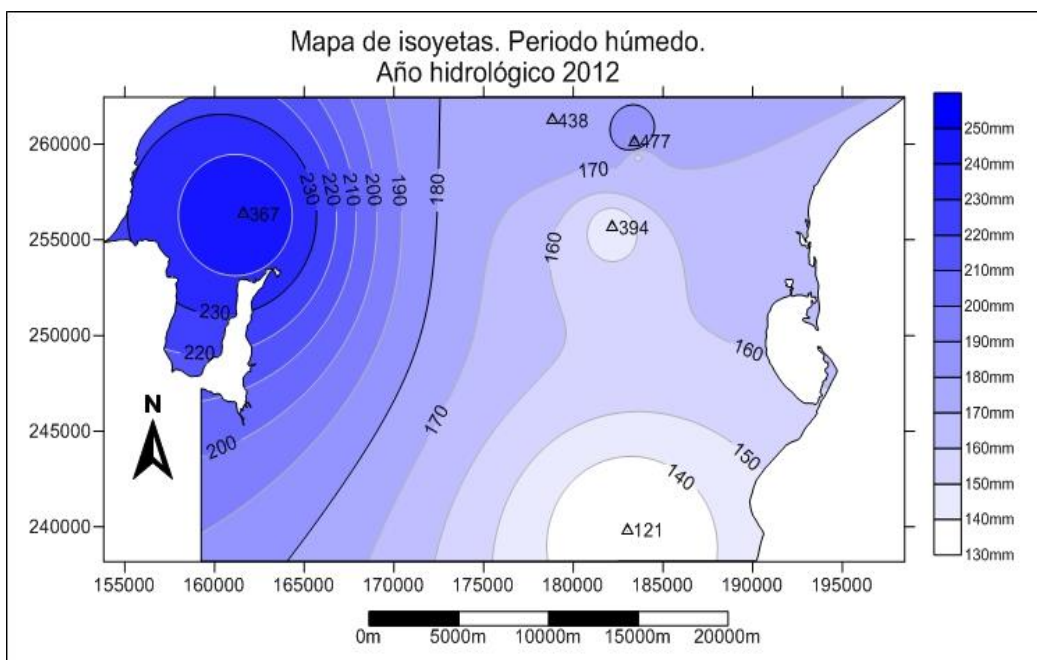
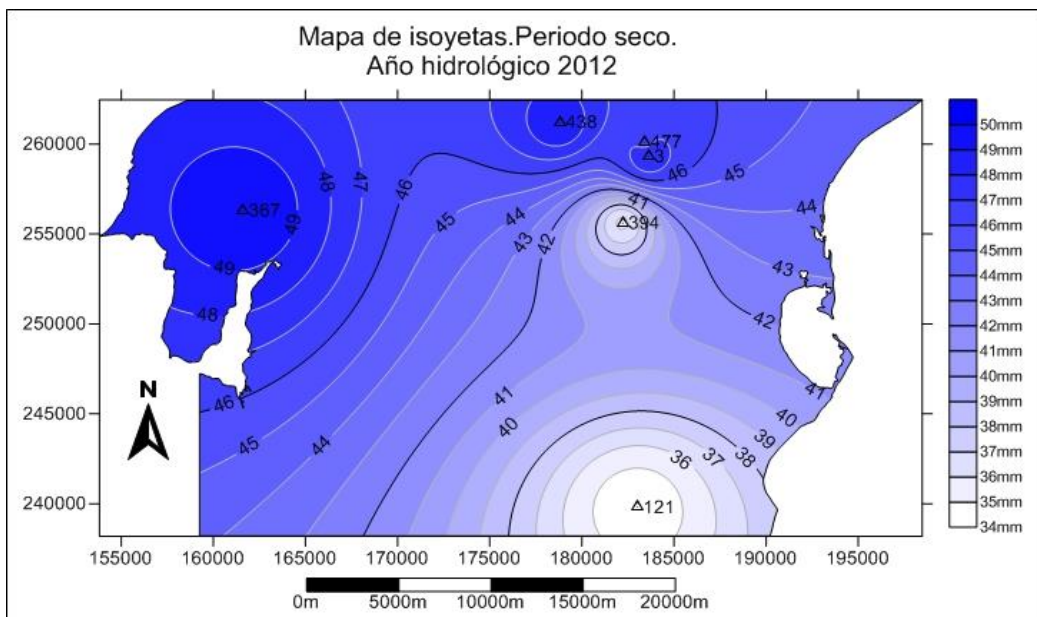
Anexo Gráfico 2. Variaciones de las diferentes facies hidroquímicas y el comportamiento de CE y temperatura con la profundidad en el pozo 33, (agosto 2011)



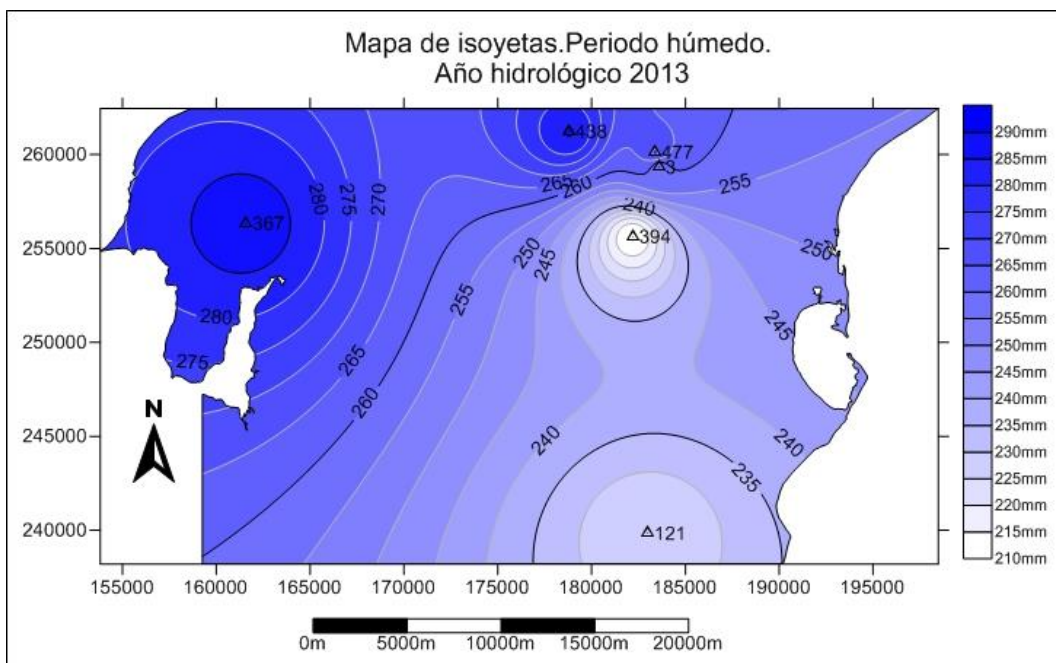
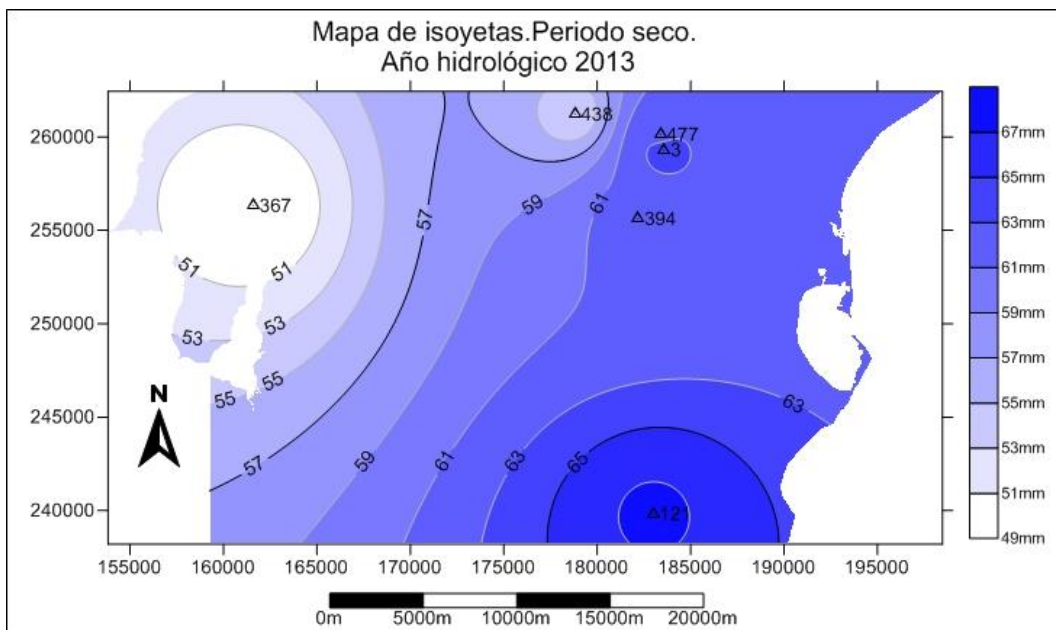
Anexo gráfico 3. Análisis de clúster de los perfiles DGGE hecho a través del software FPQuest. (Cortesía de Celico, F)



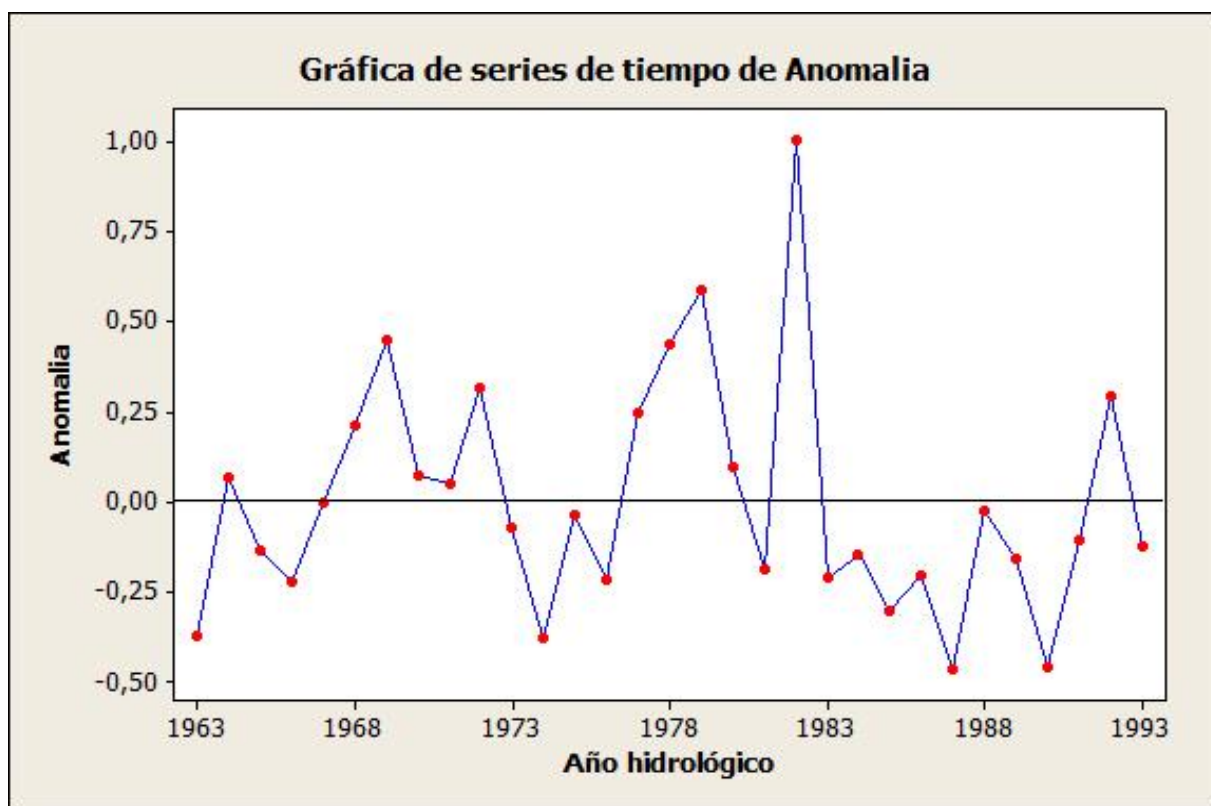
Anexo gráfico 4. Mapa de isoyetas del sector de estudio, año hidrológico 2012



Anexo gráfico 5. Mapa de isoyetas del sector de estudio, año hidrológico 2013



Anexo gráfico 6. Anomalía del pluviómetro de Las Catalinas



Anexo gráfico 7. Variogramas experimentales de los factores y de las relaciones iónicas

