Oat 1801

TESIS
IA2015
R76

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
DIRECCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

HIDROGEOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA USO HUMANO Y AGRÍCOLA AL SUR DE LOS ESTADOS ANZOÁTEGUI Y MONAGAS

Trabajo de Grado para Optar al Grado de Magíster en Ingeniería Ambiental.

Autor: Ing. Iriana Rodríguez

Tutor: Dr. Ramón Montero

Caracas, 25 de Noviembre de 2015

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
DIRECCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

ACEPTACION DEL TUTOR

En mi carácter de Tutor del Trabajo de Grado de Maestría de la Ing. Iriana Rodríguez Nava, para optar al grado de Magíster en Ingeniería Ambiental, cuyo título es **HIDROGEOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA USO HUMANO Y AGRÍCOLA AL SUR DE LOS ESTADOS ANZOÁTEGUI Y MONAGAS**, hago constar por medio de la presente que los objetivos planteados en dicho trabajo han sido cumplidos.

En la ciudad de Caracas, a los 25 días del mes de Noviembre de 2015.

Dr. Ramón Montero
C.I: 6.029.742

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
DIRECCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

HIDROGEOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA USO HUMANO Y AGRÍCOLA AL SUR DE LOS ESTADOS ANZOÁTEGUI Y MONAGAS.

Autor: Iriana Rodríguez Nava
Tutor: Dr. Ramón Montero
Fecha: Noviembre 2015

RESUMEN

Con el objetivo de conocer los procesos hidrogeoquímicos naturales y antrópicos que controlan la calidad de las aguas subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas; así como esta composición regula su posible uso humano y agrícola como base fundamental para planificar su aprovechamiento sostenible y prevenir su deterioro o contaminación, se realizó la caracterización de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos en muestras de aguas provenientes de treinta y cuatro (34) pozos. Para ello se tomaron muestras simples con la simultánea medida en sitio de los parámetros pH, conductividad y temperatura, usando una Sonda Multiparamétrica YSI y un Espectrofotómetro Hach que permitió conocer los valores de color, nitritos, nitratos, cianuro, ortofosfato; igualmente se usó un Titulador Hach para conocer la alcalinidad, el Turbidímetro Hach para la turbiedad y la enzima colilert para obtener la concentración de los organismos coliformes totales y fecales. Para la determinación de biocidas, fenoles, hidrocarburos, dureza total, sólidos disueltos totales, sílice, boro, cloruros, fluoruro, sulfatos, aluminio, arsénico, bario, cadmio, calcio, cobre, cromo, hierro, litio, magnesio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, potasio, plata, plomo, sodio, selenio, vanadio y zinc, las muestras fueron trasladadas al laboratorio, refrigeradas y conservadas con sus respectivos preservantes. Estas se analizaron en laboratorio según metodología establecida en el Método Estándar para análisis de agua y aguas residuales (1998).

Los resultados obtenidos indican aguas con bajo contenido iónico (SDT < 1.000 mg/L) que de acuerdo a la clasificación de Davis y Wiest (1971) son consideradas aguas dulces. El mecanismo principal que controla la composición química de las aguas, es la precipitación atmosférica y la interacción agua-roca y su mayor contenido iónico con alta dispersión de

acuerdo a su correlación, indican la presencia de variadas fuentes de soluto que podrían estar relacionado con la disolución de los minerales feldespato potásico y plagioclasa sódica con la intervención del dióxido de carbono atmosférico; así como también por el proceso de preconcentración de sales en las aguas de lluvia por efectos de la evaporación, debido a las elevadas temperaturas imperantes en la zona de estudio y la disolución del dióxido atmosférico.

Mediante la utilización de algunas herramientas hidrogeoquímicas como el diagrama de Piper, se lograron identificar la presencia de ocho (08) facies; a saber: sulfatada-sódica, bicarbonatada-sódica, clorurada-sódica, clorurada-cálcica, bicarbonatada-cálcica, clorurada-magnésica, sulfatada-cálcica y sulfatada-magnésica. Prevaleciendo la clorurada sódica, que de acuerdo a Sulin (1946) son consideradas aguas meteóricas, las cuales son características de ambientes continentales.

La comparación de los parámetros con criterios establecidos en el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), para aguas tipo 1 se encuentran dentro de los rangos y límites exigidos a excepción del aluminio, hierro, manganeso, color, organismos coliformes totales, fecales y pH recomendando aguas con potencial uso doméstico con sus respectivos tratamiento.

Para aguas tipo 2, veinte (20) pozos son aptos para uso agropecuario y los catorce (14) restantes debido a la presencia de los parámetros antes indicados restringen su uso. Por su parte de acuerdo a los valores de salinidad, sodicidad, bicarbonato y de la concentración de boro se recomienda que estas aguas en general, sean aptas para riego.

El Índice de Langelier indica tendencia disolvente en veintidós (22) pozos y precipitante en diez (10) pozos para tuberías, recomendando la consideración de esto para la elección del material de la tubería a usar.

En términos generales se podría inferir que la calidad de las aguas subterráneas al sur del estado Anzoátegui y Monagas, está definida por procesos naturales, de manera que las actividades humanas llevadas a cabo en la zona bajo estudio no han ejercido hasta el momento efectos sobre la misma.

Palabras clave: calidad, uso, hidrogeoquímica, agua subterránea

DEDICATORIA

A Dios y a la Santísima Virgen por estar conmigo en cada paso que doy, por iluminar mi mente y darme fortaleza para seguir adelante

Al Dr. Armando Ramírez, que en vida me impartió su conocimiento para enriquecerme tanto espiritual como académicamente.

A mi madre pilar fundamental, por todo su apoyo y amor.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar.

A mi sobrina y primos quienes han sido motivación inspiración y felicidad

A todas aquellas personas que de manera directa o indirecta han hecho posible la realización de esta meta.

AGRADECIMIENTO

Un especial agradecimiento en la realización del presente trabajo de grado:

- ✓ A la Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica.
- ✓ Al Dr. Ramón Montero, tutor de este trabajo de grado.
- ✓ A la ilustre Universidad Católica Andrés Bello.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN **1**
CAPÍTULO I **4**
EL PROBLEMA **4**
A. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4
B. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 7
1. General 7
2. Específicos 7
C. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 8
CAPÍTULO II **10**
MARCO TEÓRICO 10
A. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 10
1. Estudios Nacionales 10
2. Estudios Internacionales 13
B. ÁREA DE ESTUDIO 17
C. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 25
1. Calidad de agua y sus usos 25
2. Requerimientos de calidad de agua de acuerdo a su uso 33
a. Criterios para uso doméstico 34
b. Criterios para uso agrícola 35
3. Fuentes de abastecimiento de agua 37
a. Aguas superficiales 37
b. Aguas subterráneas 37
4. Hidrogeoquímica 40
a. Origen de la composición química del agua 41
b. Procesos modificadores de las aguas subterráneas 43
c. Clasificación de las aguas de acuerdo a su composición química 45
d. Índices hidrogeoquímicos 49
5. Sistemas de tratamiento de aguas 51
CAPÍTULO III **54**
METODOLOGÍA 54
A. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN 54
1. Parámetros a ser evaluados 54
2. Tipos de envases, requisitos de preservación, identificación y traslado de muestras 55
3. Calibración de equipos portátiles 55
4. Tipo de muestra 56
5. Metodología de captación de muestra 57
6. Laboratorios que realizarán el análisis de muestras 59
7. Procedimientos y técnicas a emplear 59
B. ANÁLISIS DE LOS DATOS 67

1. Revisión de los resultados 67
2. Caracterización fisicoquímica 68
3. Clasificación de las aguas 69
a. De acuerdo a los sólidos disueltos totales 69
b. Clasificación de las aguas según la composición química 69
c. Clasificación de las aguas de acuerdo al Decreto N° 883 70
4. Recomendaciones de uso 70
a. Aguas destinadas para abastecimiento humano 70
b. Aguas destinadas para uso agrícola 71
5. Cálculo del Índice de Langelier 73
CAPÍTULO IV 75
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 75
A. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS 75
B. ESTADO MONAGAS 76
1. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica, estado Monagas 76
a. Parámetros fisicoquímicos en el estado Monagas 77
b. Especies químicas inorgánicas en el estado Monagas 80
c. Parámetros orgánicos y biocidas en el estado Monagas 83
d. Parámetros metálicos y no metálicos en el estado Monagas. 83
e. Parámetros microbiológicos en el estado Monagas 86
2. Clasificación de las aguas en el estado Monagas 87
a. Clasificación de acuerdo a los sólidos disueltos totales (SDT), estado Monagas 87
b. Clasificación de acuerdo a la composición química, estado Monagas 88
c. Clasificación de acuerdo al artículo 3 y 4 del Decreto N° 883, estado Monagas 90
3. Hidrogeoquímica en el estado Monagas 91
a. Diagrama de Gibbs, estado Monagas 91
b. Relaciones interelementales, estado Monagas 92
c. Índices hidrogeoquímicos, estado Monagas 97
4. Recomendaciones de uso y tratamiento, estado Monagas 101
a. Aguas destinadas a abastecimiento humano 101
b. Aguas destinadas para uso agrícola, estado Monagas 105
c. De acuerdo al Índice de Langelier, estado Monagas 108
C. ESTADO ANZOÁTEGUI 109
1. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica, estado Anzoátegui 109
a. Parámetros fisicoquímicos en el estado Anzoátegui 110
b. Especies químicas inorgánicas en el estado Anzoátegui 113
c. Parámetros orgánicos y biocidas en el estado Anzoátegui .. 115
d. Parámetros metálicos y no metálicos en el estado Anzoátegui 116

e. Parámetros microbiológicos en el estado Anzoátegui..... 119
2. Clasificación de las aguas en el estado Anzoátegui 119
a. Clasificación de acuerdo a los sólidos disueltos totales (SDT), estado Anzoátegui 119
b. Clasificación de acuerdo a la composición química, estado Anzoátegui 120
c. Clasificación de acuerdo al artículo 3 y 4 del Decreto N° 883, estado Anzoátegui 121
3. Hidrogeoquímica en el estado Anzoátegui 123
a. Diagrama de Gibbs, estado Anzoátegui 123
b. Relaciones interelementales, estado Anzoátegui 124
c. Índices hidrogeoquímicos, estado Anzoátegui..... 129
4. Recomendaciones de uso y tratamiento, estado Anzoátegui.... 131
a. Aguas destinadas a abastecimiento humano, estado Anzoátegui 131
b. Aguas destinadas para uso agrícola, estado Anzoátegui 135
c. De acuerdo al Índice de Langelier, estado Anzoátegui 137
CAPÍTULO V 139
CONCLUSIONES 139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 143
ANEXO A. Articulo 3 y artículo 4 del Decreto N° 883..... 151
ANEXO B. Clasificación de las aguas de riego según su salinidad y sodicidad 156
ANEXO C. Tabla de resultados 158
ANEXO D. Diagramas de Stiff..... 171
ANEXO E. Decreto N° 883, abastecimiento humano 172

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de aguas superficiales y subterráneas 31
Tabla 2. Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea. 42
Tabla 3. Tipo de envase, lavado y preservación 55
Tabla 4. Procedimiento, técnicas, equipos y materiales 60
Tabla 5. Factores de conductividad para las especies iónicas comúnmente encontradas en el agua. 68
Tabla 6. Concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) 69
Tabla 7. Parámetros y concentraciones máximas permitidas en gaceta Nº 36.395 71
Tabla 8. Grado de ataque del agua de acuerdo al Índice de Langelier. 74
Tabla 9. Tipo hidroquímico de agua por estación en el estado Monagas 89
Tabla 10. Índices hidrogeoquímicos en el estado Monagas 97
Tabla 11. Índices hidrogeoquímicos en el estado Monagas, continuación ... 98
Tabla 12. Resultados de la relación magnesio y calcio en el estado Monagas 98
Tabla 13. Resultados de la relación potasio y sodio en el estado Monagas . 99
Tabla 13. Resultados de la relación cloruro y bicarbonato en el estado Monagas 100
Tabla 15. Parámetros que están sobre los límites estipulados en la Gaceta N° 36.395, estado Monagas 102
Tabla 16. Parámetros que están sobre los límites estipulados en la Gaceta N° 36.395, estado Monagas, continuación 103
Tabla 17. Clasificación de acuerdo a la salinidad, sodicidad, RAS, CSR, estado Monagas 107
Tabla 18. Valores del Índice de Langelier, estado Monagas 109
Tabla 19. Tipo hidroquímico de agua por estación, estado Anzoátegui 121
Tabla 20. Índices hidrogeoquímicos, estado Anzoátegui 130
Tabla 21. Resultados de la relación magnesio y calcio, estado Anzoátegui 130
Tabla 22. Resultados de la relación cloruro y bicarbonato, estado Anzoátegui 131
Tabla 23. Parámetros que están sobre los límites estipulados en la Gaceta N° 36.395, estado Anzoátegui 132
Tabla 24. Clasificación de acuerdo a la salinidad, sodicidad, RAS, CSR, estado Anzoátegui 137
Tabla 25. Valores del Índice de Langelier, estado Anzoátegui 138

Tabla 26. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 1A 152
Tabla 27. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 1B 153
Tabla 28. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 1A y 1B 153
Tabla 29. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 2A 154
Tabla 30. Clasificación de aguas de riego según su salinidad..... 156
Tabla 31. Clasificación de aguas de riego según su sodicidad..... 157
Tabla 32. Características estructurales de los pozos 158
Tabla 33. Características estructurales de los pozos, continuación..... 158
Tabla 34. Parámetros Fisicoquímicos 159
Tabla 35. Parámetros Fisicoquímicos, continuación..... 160
Tabla 36. Parámetros Fisicoquímicos, continuación..... 161
Tabla 37. Parámetros inorgánicos..... 162
Tabla 38. Parámetros inorgánicos, continuación..... 163
Tabla 39. Parámetros inorgánicos, continuación..... 163
Tabla 40. Parámetros orgánicos 164
Tabla 41. Parámetros orgánicos, continuación..... 164
Tabla 42. Parámetros orgánicos, continuación..... 164
Tabla 43. Parámetros orgánicos Biocidas 165
Tabla 44. Parámetros orgánicos Biocidas, continuación 165
Tabla 45. Parámetros orgánicos Biocidas, continuación 165
Tabla 46. Parámetros metálicos y no metálicos. 166
Tabla 47. Parámetros metálicos y no metálicos, continuación 168
Tabla 48. Parámetros metálicos y no metálicos, continuación..... 169
Tabla 49. Parámetros microbiológicos 170
Tabla 50. Parámetros microbiológicos, continuación..... 170
Tabla 51. Parámetros microbiológicos, continuación..... 170
Tabla 52. Pozos muestreados en el Municipio Sotillo..... 172

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio 18
Figura 2. Correlación realizada en el área de estudio 21
Figura 3. Corte esquemático 3D en la zona del estado Anzoátegui 22
Figura 4. Niveles piezométricos 24
Figura 5. El Ciclo del agua 26
Figura 6. Diagrama de Piper (Piper, 1944) 47
Figura 7. Diagrama de Stiff (Rodriguez, 2011) 48
Figura 8. Diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970) 49
Figura 9. Ubicación geográfica de pozos de agua 58
Figura 10. Muestreador de profundidad 59
Figura 11. Correlación de conductividad teórica frente conductividad de campo 76
Figura 12. Cajas gráficas para: a) Conductividad, b) Sólidos Disueltos Totales, c) Temperatura, d) pH, e) Dureza Total, f) Alcalinidad, g) Color y h) Turbiedad, estado Monagas. 80
Figura 13. Cajas gráficas para el: a) Cloruros, b) Sulfatos, c) Fluoruro, d) Ortofosfato, e) Nitratos, y f) Sílice, estado Monagas. 82
Figura 14. Cajas gráficas para el: a) Calcio, b) Magnesio, c) Potasio, d) Sodio, e) Hierro, f) Aluminio, y g) Bario, estado Monagas. 86
Figura 15. Correlación entre conductividad y SDT, estado Monagas 88
Figura 16. Diagrama de Piper 89
Figura 17. Variación de la relación $(Na^{+}+K^{+})/(Na^{+}+K^{+}+Ca^{+2})$ frente a SDT, estado Monagas 92
Figura 18. Variación de la relación $Cl^{-}/(Cl^{-}+HCO_3^{-})$ frente a SDT, estado Monagas 92
Figura 19. Cloruro frente Conductividad, estado Monagas 93
Figura 20. Bicarbonato frente Conductividad, estado Monagas 93
Figura 21. Sodio frente Conductividad 95
Figura 22. Potasio frente Conductividad 95
Figura 23. Calcio frente a bicarbonato 95
Figura 24. Magnesio frente a bicarbonato 96
Figura 25. Sodio frente a cloruro 97
Figura 26. Cajas gráficas para: a) Conductividad, b) Sólidos Disueltos Totales, c) Temperatura, d) pH, e) Dureza Total, f) Alcalinidad, g) Color y h) Turbiedad, estado Anzoátegui 113

Figura 27. Cajas gráficas para el: a) Cloruros, b) Sulfatos, c) Fluoruro, d) Ortofosfato, e) Nitratos, y f) Sílice, estado Anzoátegui. 115
Figura 28. Cajas gráficas para el: a) Calcio, b) Magnesio, c) Potasio, d) Sodio, e) Hierro, f) Aluminio, y g) Bario, estado Anzoátegui. 118
Figura 29. Correlación entre conductividad y SDT, estado Anzoátegui 120
Figura 30. Diagrama de Piper 121
Figura 31. Variación de la relación $(Na^{+}+K^{+})/(Na^{+}+K^{+}+Ca^{+2})$ frente a SDT, estado Anzoátegui 124
Figura 32. Variación de la relación $Cl^{-}/(Cl^{-}+HCO_3^{-})$ frente a SDT, estado Anzoátegui 124
Figura 33. Cloruro frente Conductividad, estado Anzoátegui..... 125
Figura 34. Bicarbonato frente Conductividad, estado Anzoátegui 125
Figura 35. Calcio frente Conductividad, estado Anzoátegui 127
Figura 36. Potasio frente Conductividad, estado Anzoátegui 127
Figura 37. Calcio frente a bicarbonato, estado Anzoátegui 128
Figura 38. Magnesio frente a bicarbonato, estado Anzoátegui..... 128
Figura 39. Sodio frente a cloruro, estado Anzoátegui..... 129

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas, son aquellas que existen bajo la superficie terrestre, formadas por la infiltración de las lluvias, creando así grandes depósitos llamados acuíferos, que son las formaciones geológicas donde el agua queda almacenada o acumulada. Constituyen una de las fuentes de agua dulce más importante para el hombre puesto que no son tan susceptibles a la contaminación como las aguas superficiales, no obstante que una vez contaminadas, su restauración aunque posible, es difícil y de largo plazo. La utilización de las aguas subterráneas se ha incrementado en los últimos años, debido al desarrollo y crecimiento poblacional, particularmente en las áreas rurales y de población dispersa sin acceso a redes urbanas de distribución; tal es el caso de los estados Anzoátegui y Monagas específicamente al sur de los mismos. Por ello se hace importante conocer, no solamente el volumen disponible de agua sino también su calidad, como base fundamental para planificar su aprovechamiento sostenible y prevenir su deterioro o contaminación.

En este sentido, en el presente estudio se identificaron los procesos hidrogeoquímicos naturales y antrópicos que controlan la calidad de las aguas subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas. Para esto se realizó un plan de muestreo de agua en treinta y cuatro (34) pozos en la zona, analizando sus características fisicoquímicas y bacteriológicas conociendo de esta manera su composición, con lo que se estableció su utilidad para el abastecimiento humano y agrícola con base a estándares y criterios específicos, definidos en el Decreto N° 883, "Normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos" (Gaceta Oficial 5.021, 1995), así como también con criterios del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y con la

elaboración de figuras de Stiff, diagrama de Piper, diagrama de Gibbs gráficos de dispersión y algunas relaciones inter-iónicas.

Los métodos, técnicas y procedimientos que se consideraron para este estudio, fueron los establecidos en los manuales y procedimientos específicos de la Norma COVENIN 2709:2002, el Método Estándar para Análisis de Aguas y Aguas Residuales y documentos del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, con lo que se estableció el tipo de muestra, envases y preservantes, metodologías para la captación de las muestras, etiquetado y preservación y su traslado integro al laboratorio. Así mismo, se consideraron factores como: tipos de equipos, calibración, reactivos para las determinaciones en campo, la disponibilidad de los laboratorios para la realización de los análisis requeridos y el tiempo en que debe ser analizada la muestra luego de tomada dependiendo del tipo de parámetro.

El manuscrito que se presenta a continuación, está estructurado en capítulos que muestran los aspectos más relevantes del proyecto: el problema, los objetivos y la justificación e importancia del estudio se detallan en el primer capítulo. En el segundo, el marco teórico que abarca los antecedentes de la investigación tanto a nivel nacional como internacional, descripción del área de estudio, los fundamentos teóricos que soportan la investigación en términos de calidad de agua, requerimientos para sus usos, tipos de fuentes de abastecimiento y los procesos hidrogeoquímicos y antrópicos que regulan su composición. El tercer capítulo describe la metodología a seguir en términos de parámetros a ser evaluados, preparación de salida de campo, toma de muestra, así como también el procedimiento, técnica a utilizar, equipos y materiales para el logro de los objetivos específicos y análisis de los datos.

En el cuarto capítulo, se presenta los resultados y su discusión para finalmente presentar en el capítulo cinco las conclusiones obtenidas en este estudio de investigación. Se incluye al final, una serie de anexos que complementan la información proporcionada en el texto principal del manuscrito.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

A. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un elemento clave de la naturaleza para la subsistencia de la vida sobre el planeta e indispensable para el desarrollo de toda actividad humana. En este sentido, cada destino o uso específico del agua va a requerir de un conjunto de características o propiedades fisicoquímicas que le impartirán a la misma un nivel de calidad adecuada o no para ese uso establecido

Vale acotar que el término calidad del agua se refiere al conjunto de características físicas, químicas, biológicas y estéticas que le confieren al agua una determinada condición para un uso específico (Ferrara, Najul y Sánchez, 2001), de allí la importancia de llenar los requisitos de calidad adecuados para cada uso, determinando mediante el análisis profesional si se requiere el tratamiento del agua y la aplicación de los procesos pertinentes que permitan alcanzar la calidad adecuada para el uso (Henry y Heinke, 1999).

Sobre la base de estas premisas se han establecidos estándares y criterios de calidad de agua específicos que definen los requisitos que debe reunir el agua para ser utilizada en un fin concreto, los mismos generalmente vienen expresados como intervalos cuantitativos de determinadas características fisicoquímicas y biológicas. En el caso específico de Venezuela, la normativa que establece estos criterios comprende disposiciones legales como el Decreto N° 883 "Normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos" (Gaceta Oficial N° 5021,

1995) y las "Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable", Gaceta Oficial N° 36.395.

Los estudios de calidad de agua son de vital importancia si se considera que las posibilidades de aprovechamiento no dependen únicamente del volumen disponible, magnitud y ubicación espacial del recurso sino también de sus características. De allí la necesidad de considerar estos estudios no como la caracterización de un recurso deteriorado o contaminado, sino como la base fundamental para planificar su aprovechamiento y evitar a través de un plan de monitoreo el deterioro a futuro de su calidad (Medina, 1984).

Las fuentes principales de suministro de agua son las subterráneas y las superficiales constituidas por ríos, lagos y embalses. Las aguas subterráneas constituye una de las fuentes de agua dulce más importante de abastecimiento para el hombre y su utilización se ha incrementado significativamente como consecuencia del desarrollo y del crecimiento de la población mundial que demanda cada vez más alimentos del sector productivo agrícola (Vivot y cols., 2010), particularmente en las áreas rurales y de población dispersa sin acceso a redes urbanas de distribución.

En este sentido, en el marco de evaluar la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas en la región de interés, nace el presente trabajo de investigación, en vista no sólo de la importancia, de conocer la calidad de las aguas, sino de la necesidad de evaluar cuáles son los factores y procesos que controlan dicha calidad, así como los tipos de aguas presente y de esta manera establecer las bases para su aprovechamiento sostenible y protección a través de planes de monitoreo que permitirían evitar su contaminación. .

Por lo antes expuesto se plantearon las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los procesos naturales y antrópicos que regulan la composición de las aguas subterráneas al sur de los estados Monagas y Anzoátegui? De esta manera, sustentar criterios de gestión del suministro de esa agua y su disponibilidad para aquellos asentamientos humanos, industriales o de servicios, aledaños al entorno del área de estudio, que contribuyan al desarrollo socioeconómico sustentable y la preservación del ambiente.

Cabe acotar que las poblaciones ubicadas en la zona de estudio carecen de la infraestructura de servicios de agua potable y servida, dado que en muchas regiones del país las aguas subterráneas son las únicas alternativas para el abastecimiento, particularmente en aquellos casos donde la disponibilidad de las aguas superficiales es deficitaria. De esta manera, el suministro del vital líquido se realiza mediante pozos, por lo que se hace imprescindible la determinación de los análisis de calidad de agua, fundamentalmente para el uso humano y agrícola de estos sectores del oriente del país.

B. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1. General

Estudiar los procesos hidrogeoquímicos naturales y antrópicos que controlan la calidad de las aguas subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas.

2. Específicos

a. Caracterizar la calidad fisicoquímica y bacteriológica de las aguas subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas.

b. Clasificar las aguas subterráneas al sur de los Estados Anzoátegui y Monagas para uso humano y agrícola.

c. Determinar los factores que controlan la composición química de las aguas subterráneas al sur de los Estados Anzoátegui y Monagas.

d. Recomendar uso y tratamiento de acuerdo a su clasificación.

C. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Muchas comunidades en todo el mundo utilizan las aguas subterráneas como fuente principal de suministro de agua, sobre todo aquellas que no tienen acceso a las redes de abastecimiento público. Este es el caso de las poblaciones ubicadas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas, las cuales se encuentran muy distantes entre sí y por ende la dotación de agua por acueductos es deficiente. En consecuencia, el abastecimiento más común para estas localidades proviene directamente de aguas subterráneas mediante el uso de pozos, sin el conocimiento de su calidad.

Los caracteres del agua que permiten designarla como de "buena calidad", dependen directamente del uso al cual se destina (AWWA, 1990). De tal manera que, el estudio de calidad del agua es de capital importancia para garantizar las adecuadas posibilidades de aprovechamiento, las cuales no solo dependen de variables tales como cantidad disponible, magnitud y ubicación espacial del recurso, sino también y muy especialmente, de su entorno geológico y por ende de sus características fisicoquímicas y bacteriológicas.

"Las nuevas políticas, investigaciones y lineamientos de los recursos hídricos, están orientadas a las perspectivas futuristas ambientales. Las aguas subterráneas como componentes de este sistema, no escapan a esta visión. En el ámbito institucional los recursos hídricos no pueden desarrollarse sin ser evaluada la cantidad y la calidad del agua disponible". (MPPpA, 2006)

De acuerdo al estudio hidrogeológico, realizado al sur de los estados Anzoátegui y Monagas por Lozano y cols. (2010), el área investigada hasta profundidades de 170 m, ofrece muy buenas condiciones para la

acumulación de aguas subterráneas, con alto rendimiento y gastos que está entre 46 y 114 l/s, lo que brinda la posibilidad de darle solución a la demanda de agua a los asentamientos humanos radicados en la región y con ello, apoyar el potencial desarrollo agrícola e industrial con que cuenta este territorio.

En este sentido, el presente trabajo busca, al realizar la caracterización de la calidad del agua de cada uno de los pozos, así como los factores y procesos que la controlan, aportar a las comunidades la certificación de la calidad, las recomendaciones de uso y posible tratamiento del agua, que permitan mejorar las condiciones sanitarias de dichas poblaciones y la adecuación a las normativas que dicta el Decreto N° 833 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995). Al realizar el estudio de calidad de agua de esta zona, se hizo un barrido del citado decreto, en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de manera de sentar la información base para el desarrollo.

Así mismo, el área de estudio está dentro de la franja territorial Orinoco-Apure, el cual tiene como objetivo el desarrollo agrícola, industrial y urbano por lo que el buen aprovechamiento de los recursos hídricos sería una herramienta esencial. De esta manera con este estudio de calidad de agua subterránea, se sentarían las bases para la toma de decisiones en la buena planificación del recurso agua para su abastecimiento racional, sustentable y monitoreo de estas aguas para prevenir su deterioro o contaminación en la zona.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo abarca la discusión de los estudios tanto nacionales como internacionales, usados como antecedentes para la presente investigación, la descripción del área de estudio, los fundamentos teóricos que soportan la investigación en términos de calidad de agua, requerimientos para sus usos, tipos de fuentes de abastecimiento y los procesos hidrogeoquímicos y antrópico que regulan su composición.

A. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1. Estudios Nacionales

Santos (1974) estudió hidrogeológica e hidroquímicamente en el área mayor de Oficina, estado Anzoátegui, los acuíferos presentes para asesorar técnicamente a la comunidad y a la industria agrícola local en las adyacencias de los ríos Tigre y Caris. Los resultados químicos obtenidos fueron: variación de pH de 6,2 a 7,2, conductividad por debajo de 300 µs/cm, alcalinidad entre 12 y 29 mg/L, sodio entre 12 a 21 mg/L , potasio no presente, calcio menor a 3,2 mg/L, magnesio 1,0 mg/L, cloruros 17 mg/L, sulfatos 14 mg/L, bicarbonatos de 12 a 30 mg/L, hierro entre 0,1 a 1,7 mg/L, ausencia de fosfatos y sólidos disueltos totales 140 mg/L. Todos estos valores indicaron que a nivel químico éstos acuíferos podían ser usados para consumo directo en las comunidades de San Tomé, El Tigre y San José de Guanipa de acuerdo a comparaciones con las tablas de criterios para el uso de agua potable de la U.S. Public Health Service. Es importante resaltar que para esa fecha la intervención humana en la región era muy baja y aun no se

regían por el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) para clasificación de las aguas, ni por la gaceta de agua potable que se usa actualmente.

Alvarado (1979) presenta una evaluación del potencial de acumulación de aguas subterráneas en el área de Cerro Negro, estado Monagas, la estimación de reservas renovables para mantener el equilibrio entre la mesa de agua y el caudal de los ríos Morichal Largo, Yabo, Cogollal y Uracoa que drenan el área; así como, una determinación de la calidad de las aguas acumuladas a través del análisis de treinta y dos (32) pozos ubicados en la región sur de la Mesa de Guanipa y de los ríos Yabo, Cogollal, Uracoa y Morichal Largo; esto a través de medición de la conductividad y de la cuantificación de los sólidos disueltos totales, cloruro, bicarbonato, sulfato, magnesio, sodio y potasio. Los resultados obtenidos indicaron aguas del tipo bicarbonatadas sódicas con sólidos disueltos totales que varían de 10 a 280 mg/l.

Ya desde los años 1980, al sur del estado Monagas se conoce de problemas en el agua subterránea con los parámetros: color (22 unidades de color), pH (6,16 a 7,67) y hierro (0,25 a 0,80 ppm) sobre los límites establecidos de acuerdo a lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (1971), Índice de Langelier con tendencia corrosiva en Los Barrancos, Los Pozos, Chaguaramas arriba y Uverito (García, 1981).

Estudios como los de Barrios y cols. (1982), determinaron en las aguas subterráneas de la cuenca de los ríos Pao y Caris los siguientes parámetros de calidad del agua medidos en campo: temperatura, pH, conductividad, color, olor y transparencia; mientras que en el laboratorio se determinaron las especies químicas: $cloruro^-$, bicarbonato, sulfato, magnesio, calcio, sodio, potasio, iodo, nitrato, $fluoruro^-$, sílice, hierro, manganeso, boro y calcularon el

RAS y el Índice de Langelier. Dentro de las conclusiones se propone la explotación del acuífero somero presumiblemente no confinado para aprovechamiento con fines agrícolas e industriales; así como también, el aprovechamiento de los acuíferos profundos presumiblemente confinados, al norte de la cuenca de los ríos Caris y Pao, para uso de las industrias petroleras.

De acuerdo a Fermín y cols. (1990), quienes midieron los parámetros pH, temperatura, conductividad, alcalinidad, dureza, SDT, RAS y las especies químicas cloruro, sulfato, nitrito, sílice, bicarbonato, hierro, manganeso, calcio, magnesio y sodio de la región de Anzoátegui central, los tipos de agua predominantes son: bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas magnésicas, cloruradas cálcicas, cloruradas magnésicas y clorurada sódica, así mismo estos autores señalan que los Índices de Langelier obtenidos son de tendencia corrosiva. En cuanto a la aptitud para riego, en algunos sectores expresaron que el contenido de sodio era un factor de alto riesgo para afectar la permeabilidad del suelo. Igualmente, detectaron contaminación por organismos coliformes fecales en las cabeceras del río Guanipa, en las de río Moquete, en la quebrada los Novillos y en el río Tigre; donde se destaca la presencia de cochineras y un sistema de lagunas de oxidación como posibles focos de contaminación.

Lozano y cols. (2010), realizaron un estudio hidrogeológico en una zona localizada al sur de los estados Anzoátegui y Monagas, específicamente al margen norte del río Orinoco, con el fin de caracterizar temporal y espacialmente las aguas subterráneas de esta área. Litológicamente, estos acuíferos están constituidos por arenas confinadas por sellos de arcillas, considerándose una reserva acuífera de gran importancia, en un medio de alta porosidad. Estos autores compilaron las bases de datos e inventarios de

puntos de observación de agua subterránea donde el 40 % de esta información fue actualizada en campo. Adicionalmente, se incorporaron nuevos pozos que no habían sido reportados anteriormente. Este inventario permitió la elaboración de mapas temáticos tales como: condiciones piezométricas, rendimiento de pozos y perfiles litológicos que permitieron la correlación litológica de pozos.

Los resultados obtenidos por Lozano y cols. (2010), indican que las condiciones naturales son favorables a la recarga directa de las aguas de lluvia, la percolación desde los ríos tributarios del Orinoco, tales como los ríos Caris, Pao y Morichal Largo y el flujo lateral, generándose de esa forma buenas condiciones para la recarga general de los acuíferos. El régimen natural de las descargas de los acuíferos se produce por manantiales y drenajes afluentes del río Orinoco. La profundidad máxima de los acuíferos investigados fue de 170 m, el rendimiento de los pozos fluctúa entre 46 a 114 l/seg. La profundidad del nivel estático en toda la región fluctúa entre 3 y 110 m, con un promedio de 15 m al sur del estado Monagas y 24 m al sur de Anzoátegui.

2. Estudios Internacionales

En la región de Gabes, las aguas subterráneas representan la principal fuente de abastecimiento de agua para beber, así como para actividades asociadas a la agricultura y la industria, esto como consecuencia de la escasez de agua superficial. Ketata y cols. (2010) por primera vez en esta región, realizaron un estudio de la evolución espacial y temporal de la hidroquímica con el fin de identificar los factores y fenómenos que rigen los parámetros de evaluación de la calidad de las aguas subterráneas de dicha región. Para este fin fueron recolectadas muestras de agua durante el período de 1995-2003 en nueve pozos de sondeos, para representar el

acuífero profundo Gabes-sur, midiendo la salinidad, pH y determinando la concentración de calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, sulfato, bicarbonato y flúor. Los análisis químicos muestran que durante el período considerado, la salinidad y las concentraciones de elementos mayoritarios varían muy poco con el tiempo, y disminuye en la dirección del flujo de agua subterránea. Igualmente, el análisis de la calidad del agua indica que las aguas subterráneas de la región de Gabes-sur se componen principalmente de sulfato, cloruro, sodio y calcio. Estos autores indican que la composición química de estas aguas está relacionada con la litología del acuífero, a su origen y las condiciones de explotación. Así mismo, las concentraciones de flúor son superiores a la Organización Mundial de la Salud (OMS) límite máximo permisible de 1,5 mg/l. Por lo tanto, el agua de estos pozos deben ser desfluorinados antes de usarla para beber.

Vivot y cols. (2010), caracterizaron hidroquímicamente el agua subterránea presente en el área rural del departamento Villaguay, Entre Ríos (Argentina), con el objetivo de determinar la calidad para los usos rurales. Los resultados mostraron que las aguas de los distritos al este del río Gualeguay se caracterizan como bicarbonatadas, diferenciándose de las del oeste que resultaron sulfatadas presumiblemente debido a las distintas formaciones geológicas de cada zona. La evaluación del agua para bebida animal indicó que poseen aptitud buena a regular. Por otro lado se encontraron moderadas restricciones de uso en la calidad del agua para riego en la zona este, debido a bajo RAS y alta salinidad. Las aguas para las aplicaciones de pesticidas muestran limitantes que requieren corrección del pH y la dureza.

Lopez-Gunn y cols. (2011), presentaron un trabajo sobre la gestión de las aguas subterráneas en España, tratando el valor de estas aguas como recurso estratégico, analizando los aspectos económicos de la gestión de las

aguas y proporcionando una visión general sobre el mosaico de leyes, códigos y reglamentos para hacer frente a la explotación del agua subterránea demostrando de esta manera que no hay un plan o una solución universal. Esta solución tiene que hacerse según las circunstancias hidrológicas, ecológicas, culturales, económicas y políticas de cada región. Se trata de las instituciones para la gestión de los acuíferos, lo que sin duda es un recurso de acervo común. También discute los diversos significados y/o las dimensiones del concepto de aguas subterráneas, la sostenibilidad y los retos futuros para la gestión de los recursos de aguas subterráneas. Por último, un número corto de las conclusiones resumen los puntos principales que contribuyen a una mejor integración de los recursos de aguas subterráneas en la política de aguas en general.

Purwaningsih y Notosiswoyo (2013) realizaron un estudio hidroquímico de aguas subterráneas en el área de Sidoarjo Mud Volcano al este de Indonesia, con el objetivo de evaluar la calidad de agua, conocer los sistemas de génesis y los acuíferos. Análisis hidroquímicos por diagramas de Piper, muestran que hay tres grupos de facies de aguas subterráneas a saber: facies de cloruro de bicarbonato y cloruro de bicarbonato; facies seminaturales y facies de cloruro. El análisis de isótopo deuterio y oxígeno-18 mostró que el agua procedente de la burbuja está relacionado con el ciclo hidrológico o agua meteórica y las aguas subterráneas alrededor del centro de la pulverización de agua se incluye en el agua de formación. El agua que sale con el barro de las explosiones del centro se cree que se originan de la piedra arenisca volcánica litología del acuífero confinado, el Kalibengformation superior, Plioceno.

Gordana y cols. (2013) presentan un trabajo sobre los factores naturales y antropogénicos que afectan a la calidad del agua subterránea en Serbia;

para ello determinaron diecisiete (17) parámetros de calidad del agua: los cationes sodio, potasio, calcio y magnesio, los aniones cloruro, sulfato, nitrato, bicarbonato y nueve oligoelementos plomo, arsénico, manganeso, níquel, cobre, cadmio, hierro, zinc y cromo en sesenta y seis (66) diferentes sitios clave (tierras bajas del Norte provincia autónoma de Serbia, Vojvodina y Serbia central) para el período de verano de 2009.

Los resultados mostraron una grave contaminación con Mn, As, NO3, Ni y Pb, mediante el cual se indicó el origen antropogénico de estos contaminantes. La contaminación proviene de dos fuentes puntuales dispersas (efluentes industriales y urbanos) y de la actividad agrícola como fuente difusa Estas muestras pueden no ser aptas para el consumo humano; la calidad de agua pertenece a la clase III / IV (contaminado). Las anomalías de hierro (7,1 mg/L) en el agua desde el sitio Vetrnica se pueden atribuir a las fuentes naturales, tales como la disolución de las masas de roca y fragmentos de roca. La contaminación de las aguas subterráneas con arsénico (25,7 a 137,8 mg/L) en el área de Banat (Provincia del Norte Autónoma de Serbia, Vojvodina) y una muestra Nº 9 en la Gran Morava.

B. ÁREA DE ESTUDIO

El área que se consideró para el estudio está comprendida entre los municipios Libertador, Sotillo y Uracoa, al sur del estado Monagas y entre el municipio Independencia al sur del estado Anzoátegui. Ambos estados colindan con el río Orinoco, como puede verse en las figuras 1.

La zona de estudio presenta una temperatura promedio anual de 27 y 28 °C con dos períodos bien marcados (lluvia y sequía) y precipitaciones entre 530, 1.000 y 1.440 mm promedio anual. Las unidades fisiográficas características de esta zona son paisaje de Mesa Llana, Planicie Deltáica y planicie Aluvial del Orinoco. La vegetación está enmarcada dentro del Bosque Seco Tropical, predomina la formación vegetal sabana abierta representada por gramíneas perenne y dispuesta en macollas. La continuidad de las sabanas se interrumpe por la presencia de morichales y bosques galerías (Burz, 2005).

La economía se basa esencialmente en la ganadería extensiva de doble propósito con áreas de uso forestal (plantaciones de pino caribe) o de cultivos como: sorgo, maíz, yuca y patilla, entre otros. Actividad pesquera ocurre principalmente en Barrancas del Orinoco por ser puerto natural que absorbe la materia prima de los Caños y del Delta. En los últimos años se ha incrementado la actividad petrolera y gasífera, abriendo nuevas perspectivas a la economía local (venciclopedia, 2010).

Figura 1. Ubicación del área de estudio

Geológicamente los llanos orientales de Anzoátegui y Monagas están cubiertos en su totalidad por la Formación Mesa del Cuaternario, cuya localidad tipo se extiende a las mesas de Oriente, tales como la Mesa de Guanipa en Anzoátegui y la Mesa de Tonoro en Monagas. La Mesa de Guanipa cubre aproximadamente la cuarta parte de la superficie del estado Monagas y más de la tercera parte del estado Anzoátegui (Sánchez y Gómez, 1978).

Pérez (1983), resalta que la unidad estratigráfica más reciente de la cuenca es la formación Mesa de origen continental, la cual se trata de una compleja asociación poligenética de sedimentos acumulados discordantemente o localmente en forma transicional.

En los límites de los estados Monagas y Anzoátegui, la estratigrafía sugiere una sección del subsuelo constituida por las formaciones Oficina, Freites y Las Piedras, cubierta por los sedimentos poco consolidados de la Formación Mesa (MARNR, 1982). Sin embargo, cabe destacar que las formaciones Mesa y Las Piedras abarcan predominantemente la zona central y sur de ambos estados.

Los principales acuíferos se encuentran en la Formación Mesa y en la parte superior de las Formaciones Las Piedras y Roblecito. Litológicamente, estos acuíferos están constituidos por arena confinadas dentro de arcillas más o menos duras, considerándose una reserva acuífera de gran importancia, en un medio de alta porosidad (González de Juana, 1946, Alvarado, 1981).

La Formación Las Piedras, está compuesta principalmente por sedimentos finos mal consolidados dentro de los cuales se tienen limolitas, lutitas arcillosas con lignitos. Las aguas contenidas en esta formación son de tipo salobre, ella contiene plantas fosilizadas y ocasionalmente moluscos foraminíferos de aguas dulce-salobres (Pérez, 1983), contiene espesores que varían de 150 m a 200 m en el sur,

mientras que en el norte las variaciones son entre 800 m y 1000 m (MARNR, 1982).

Finalmente, la Formación Mesa está constituida por paquetes de arenas poco consolidadas, conglomerados y arcillas; y su espesor varía aparentemente entre 0,5 m y 60 m. También presenta un casquete de gravas ferruginosas cementadas con óxido de hierro que llega hasta un metro de espesor. Este tipo de sedimentos tienen la propiedad de absorber el agua de lluvia y la infiltra hasta los acuíferos favoreciendo su recarga (Santos, 1974 y MARNR, 1982).

Estudio hidrogeológico realizado por Lozano y cols. (2010) en el área de estudio indicó que las condiciones naturales son favorables a la recarga directa de las aguas de lluvia en acuíferos libres, la percolación desde los tributarios del río Orinoco, tales como los ríos Caris, Pao y Morichal Largo y el flujo lateral, generándose de esa forma buenas condiciones para la recarga general de los acuíferos confinados y libres. El régimen natural de las descargas de los acuíferos se produce por manantiales y drenajes afluentes del río Orinoco.

En la correlación realizada (figura 2), a partir de los perfiles litológicos, se puedo apreciar la distribución vertical y lateral de los tipos litológicos con los posibles rendimientos de los horizontes, cuando están saturados. El modelo isópaco de arena neta de las formaciones Mesa y Las Piedras permite visualizar las zonas con mayor probabilidad para la identificación y ubicación de acuíferos productores.

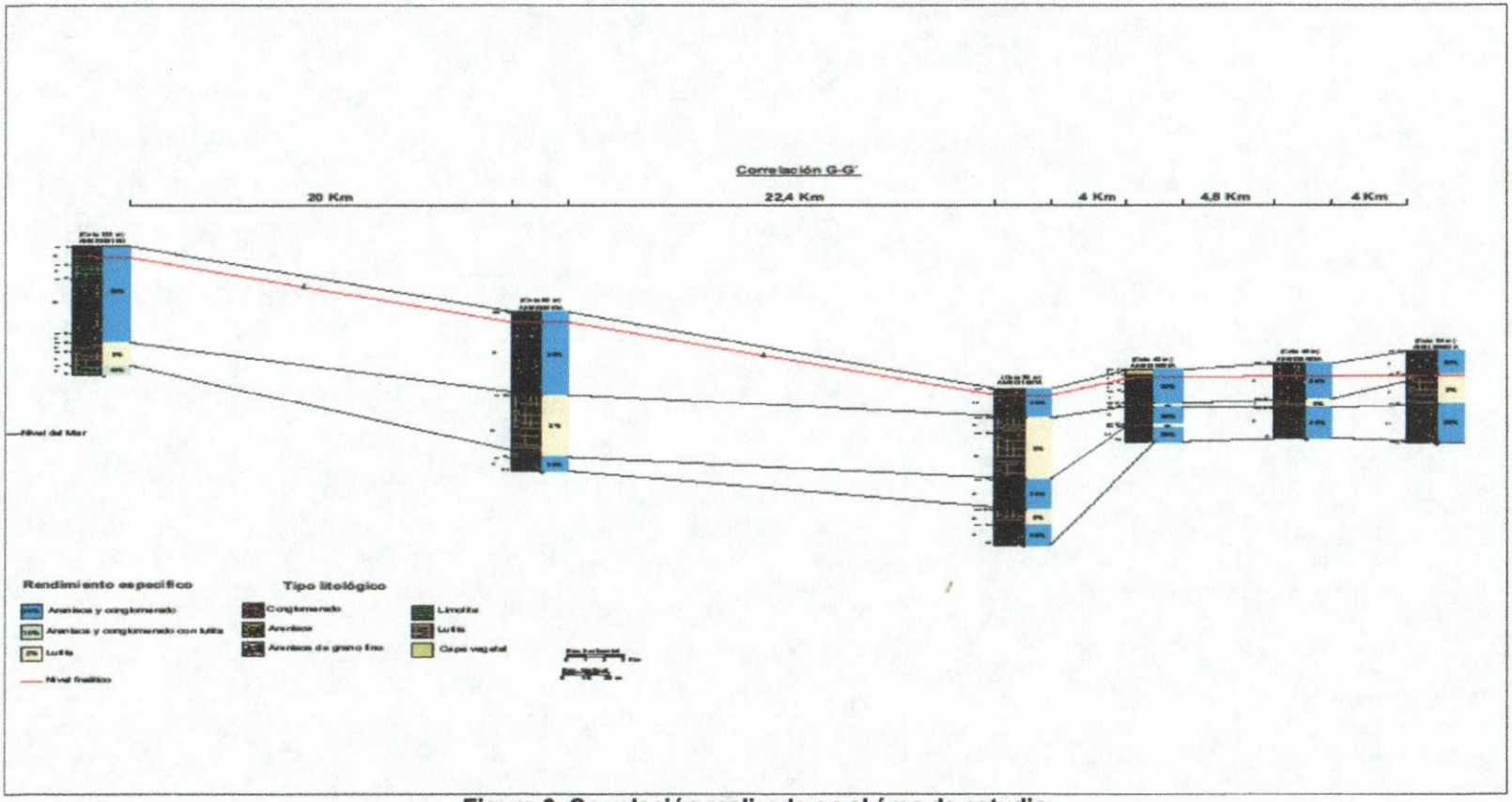


Figura 2. Correlación realizada en el área de estudio

En el corte esquemático y el bloque 3D realizado en la parte del estado Anzoátegui (figura 3) se observa que los acuíferos principales están formados por las formaciones Mesa y Las Piedras, esta última yace sobre las lutitas de la Formación Chaguaramas que sirve de sello inferior regional para éstos. El nivel freático varía de 2 a 24 m de la superficie, en el sentido norte-sur. La recarga principal de los acuíferos es directa y la evapotranspiración como salida al sistema de aguas subterráneas. Los acuíferos y los sedimentos aluvionales están dispuestos en forma de cuña hacia el sur, en contacto de falla inferido con el basamento ígneo-metamórfico perteneciente al Grupo Cuchivero.

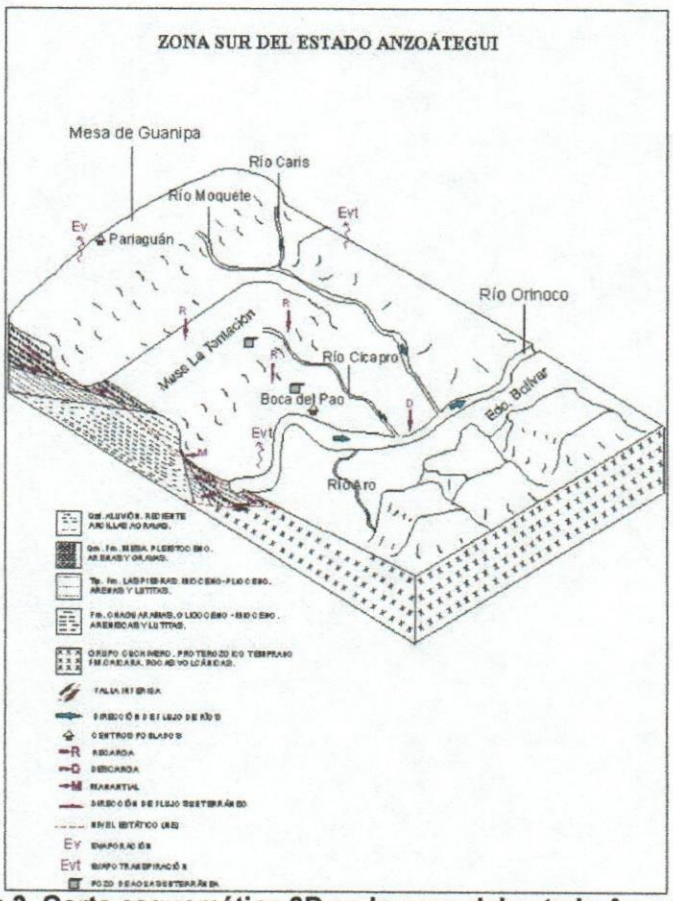


Figura 3. Corte esquemático 3D en la zona del estado Anzoátegui

El área, hasta las profundidades investigadas (170 m), ofrece muy buenas condiciones para la acumulación de aguas subterráneas, teniendo áreas con mayor rendimiento al sur de Anzoátegui y Monagas, con gastos entre 46 a 114 l/seg. La profundidad del nivel estático en toda la región fluctúa entre 3 y 110 m, con un promedio de 15 m al sur del estado Monagas y 24 m al sur de Anzoátegui.

Los sedimentos permeables que pueden servir de roca almacén de aguas subterráneas hasta profundidades de 170 m, pertenecen a las formaciones Mesa y Las Piedras. Estos sedimentos están constituidos por arenas, gravas y conglomerados con intercalaciones de capas delgadas de arcilla y arcilla arenosa.

En conjunto, se puede decir que estos sistemas hidrogeológicos se comportan como embalses reguladores que reciben los aportes o las recargas laterales y verticales de las formaciones presentes y la infiltración procedente de la lluvia, la escorrentía superficial directa que puede infiltrarse en encharcamientos y lagunas y la recarga de cauces superficiales. Además, el régimen natural de las descargas de los acuíferos se produce por manantiales y numerosos drenajes que van hacia el río Orinoco. Sin embargo, en la actualidad las extracciones realizadas por bombeo de pozos destinadas al consumo humano, ganadería, agricultura y otros usos, conforman otra descarga de relevancia.

Se observa que en el área de estudio, las superficies piezométricas (figura 4) poseen diferentes profundidades. La dirección del flujo subterráneo es hacia el Río Orinoco y/o sus afluentes, hecho que probablemente está asociado al declive hacia el sur que presentan el conjunto de Mesas. Se observaron que los gastos de los pozos varían entre 1 a 140 l/seg, donde los mayores rendimientos se ubican en el estado Anzoátegui.

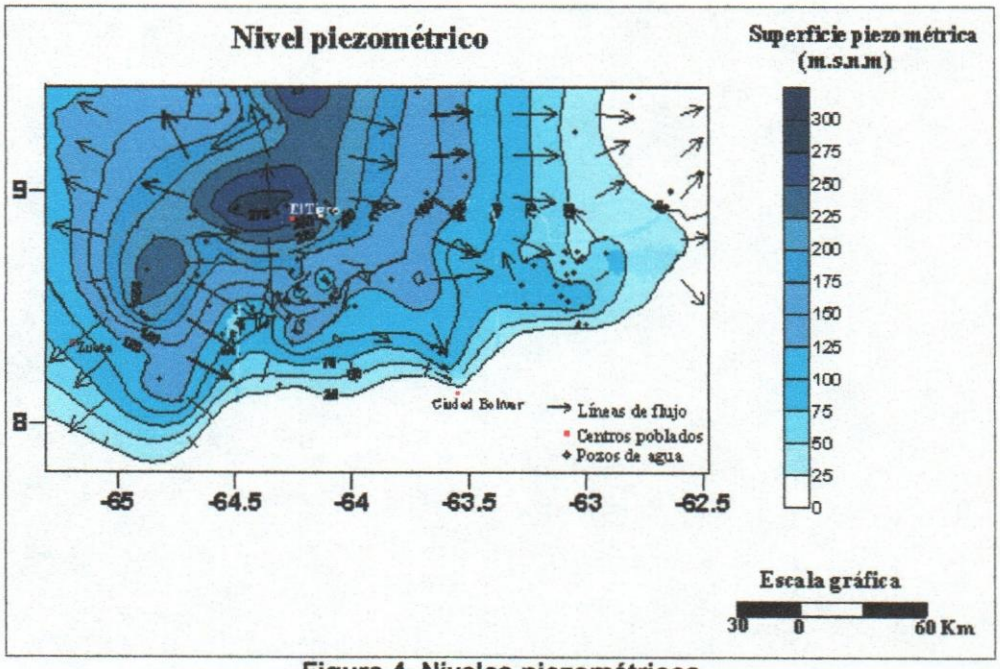


Figura 4. Niveles piezométricos

C. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1. Calidad de agua y sus usos

En general el término calidad del agua hace referencia al conjunto de características físicas, químicas, biológicas y estéticas que le confieren al agua una determinada condición para un uso específico (Ferrara y cols., 2001). Esta definición ha dado lugar a diversos criterios, que asegura la calidad suficiente para garantizar determinados usos humano, agropecuario, e industrial, entre otros.

Para identificar los factores que van a definir la calidad del agua, es necesario conocer la ubicación, distribución y movimiento del agua en la naturaleza, todo lo cual está gobernado por el ciclo hidrológico (Ferrara y cols., 2008) (Figura 5). Este ciclo consiste en un proceso complejo donde el vapor de agua atmosférico es condensado en las nubes precursoras de precipitaciones, en forma de lluvia, nieve o granizo. Al llegar al suelo, una parte de las precipitaciones circula en superficie hacia la red hidrográfica y a las extensiones de agua libre que incluye lagos, mares y océanos a las que alimenta. Otra porción atraviesa la superficie por infiltración, penetrando en el suelo y el subsuelo, alimentando a las aguas subterráneas que constituyen la reserva de agua del suelo y los depósitos de los mantos acuíferos. La transferencia de agua desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa, a la transpiración por las plantas y animales y por sublimación o paso directo del agua sólida a vapor de agua.

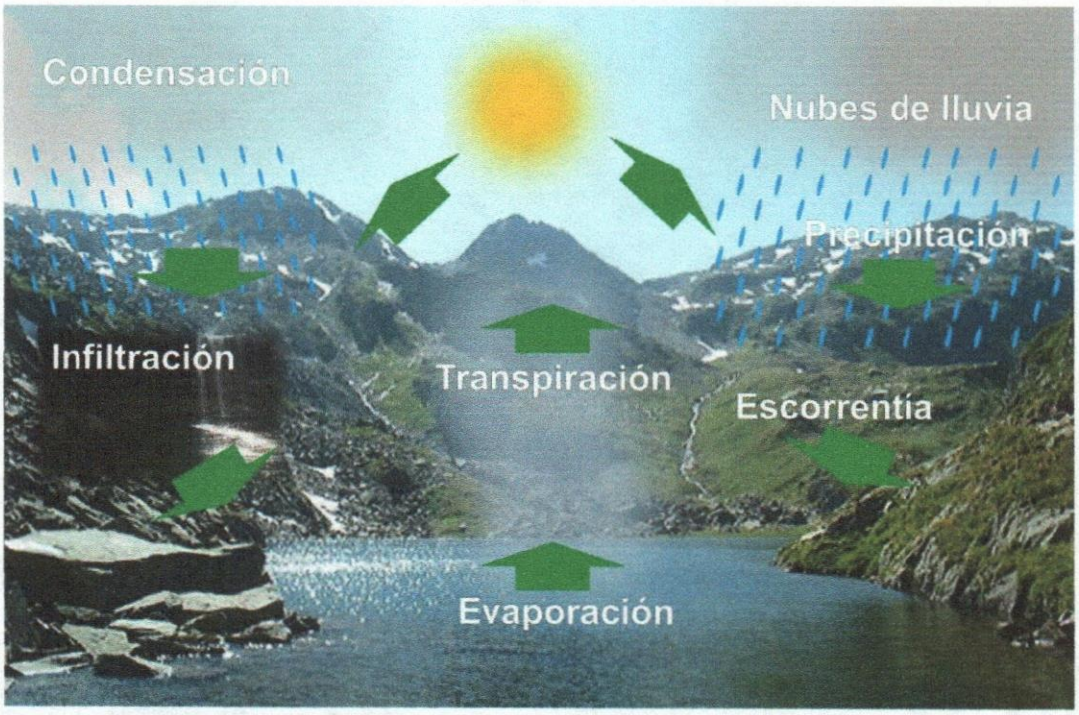


Figura 5. El Ciclo del agua

La cantidad de agua movida, dentro del ciclo hidrológico, por el paso directo del agua sólida a vapor de agua (sublimación) es insignificante en relación con las cantidades movidas por evaporación y por transpiración, cuyo proceso conjunto se denomina *evapotranspiración* (Marcano, 2004).

Las raíces de las plantas absorben una fracción del agua que percola, parte de la cuál retorna a la atmósfera por evapotranspiración, y las corrientes de agua sean superficiales o subterráneas, conducirán finalmente al agua a los océanos para completar el ciclo. El agua que participa en este sistema hidrológico está distribuida según Hamblin (1992), de la siguiente manera: océanos (97%), glaciares (2,15%), aguas subterráneas (0,62%), ríos y lagos (0,02%), y atmósfera (0,001%).

Como consecuencia del complejo movimiento del agua, esta contiene diversas sustancias químicas, físicas y biológicas disueltas o suspendidas en

ella. Desde el momento que se condensa en forma de lluvia, el agua disuelve los componentes químicos de sus alrededores a medida que cae a través de la atmósfera, corre sobre la superficie del suelo y se filtra a través del mismo. Además el agua contiene organismos vivos causante de enfermedades no existiendo en la naturaleza el agua químicamente pura, por lo que de manera general Franco, s.f, cap. 2, señala las siguientes premisas:

a) El agua que se evapora del océano lleva con ella una pequeña pero significativa cantidad de materia mineral disuelta, como la sal común.

b) Los compuestos de nitrógeno, las moléculas de oxígeno y de dióxido de carbono son disueltos en el agua que cae durante las precipitaciones pluviales.

c) El dióxido de carbono en el suelo, producto de la descomposición orgánica también se disuelve conforme el agua se infiltra a través de las capas superiores del suelo.

d) El ácido carbónico diluido capacita el agua para reaccionar químicamente con los fragmentos minerales, liberando bicarbonatos y carbonatos que también pueden ir en disolución.

e) Otros minerales solubles y sales presentes en el suelo y las rocas son disueltos por el agua.

La calidad del agua en cualquier punto del ciclo es una variable dinámica como consecuencia de las interacciones entre sus constituyentes y los componentes del medio y como las características químicas de la superficie terrestre varían de un lugar a otro, se puede esperar que exista una amplia gama de aguas naturales con diferentes composiciones resultantes de esas reacciones (Ferrara y cols., 2008). Las principales características y constituyentes en las aguas naturales pueden agruparse en sólidos

suspendidos o insolubles de origen mineral u orgánico, sólidos disueltos o solubles de origen mineral u orgánico, gases disueltos y microorganismos (Ferrara y cols., 2008).

1. Sólidos suspendidos

Analíticamente se define como el material retenido en un filtro de disco de fibra de vidrio después de la filtración de una muestra de agua de desecho bien mezclada (Covenin 2461, 1987).

En este grupo se encuentran los sólidos sedimentables, aquellos que puede decantar por su propio peso, en general se incluyen también las partículas coloidales que producen turbiedad, definida esta como una medida de dispersión de la luz, constituidos principalmente por arcillas, precipitados de hierro y manganeso, materia orgánica y microorganismos entre otros (Ferrara y cols., 2008).

2. Sólidos disueltos

Es el material no retenido por un filtro o membrana filtrante y que permanece después de evaporar el agua y secar a 180 °C (Covenin 2461-87). Están constituidos fundamentalmente por especies iónicas de sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua (Sawyer y cols., 2000).

Generalmente, la concentración de los sólidos disueltos se utilizan para diferenciar los tipos de agua a saber: las aguas frescas o dulces, procedente de ríos, lagos e incluso aguas subterráneas, tienen baja concentración de sólidos disueltos, inferiores a 500 mg/L; las aguas salobres presentan valores

en el orden de 5.000 mg/L y las aguas salinas o agua de mar cuyas concentraciones están entre 30.000 y 34.000 mg/L (Ferrara y cols., 2008).

Una medida indirecta de la concentración de sólidos disueltos en forma iónica, de gran utilidad por su fácil correlación y determinación, es la conductividad eléctrica. Esta variable es una medida de su capacidad para transportar una corriente eléctrica y varía con el tipo y número de iones que contiene la solución (Sawyer y cols., 2000).

La determinación de la conductividad permite evaluar rápidamente pero con bastante aproximación, la mineralización del agua; allí radica su aplicabilidad para detectar variaciones en la composición del agua. Se expresa en unidades de microsiemens por centímetro (µS/cm) o micromho por centímetro (µmho/cm), las cuales son numéricamente iguales. Además la conductividad específica es valiosa para verificar la validez de los resultados analíticos (Ferrara y cols., 2008).

Los iones que aparecen con mayor frecuencia en las aguas superficiales y subterráneas son: calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos (Ferrara y cols., 2008).

3. Gases disueltos

Los gases que se encuentran generalmente disueltos en las aguas naturales, producto del equilibrio con su atmósfera circundante son oxigeno, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano y amoniaco. La fuente primaria de algunos de estos gases es la atmósfera tal es el caso del nitrógeno el cuál es inerte y el oxígeno que es corrosivo. Además de la atmósfera pueden ser señaladas otras fuentes de origen para algunos de estos gases, tal es el caso de bióxido de carbono, un gas atmosférico que también es producido por procesos catabólicos que incluyen la respiración

aerobia, respiración anaerobia y en menor grado por fermentación. El oxígeno, a su vez, es uno de los productos del proceso de fotosíntesis en plantas, algas y cianobacterias (Ferrara y cols., 2008).

Hay otros gases que se producen y originan únicamente en el cuerpo acuático; tal es el caso de metano, sulfuro de hidrógeno y amoniaco. El metano se origina a partir de la descomposición anaeróbica de materia orgánica, (acetato y compuestos metilados tales como metanol) o de la reducción de CO_2 a expensas de hidrógeno molecular (H_2) (Ferrara y cols., 2008).

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) se origina de la actividad metabólica de bacterias y reacciones químicas abióticas. Aun cuando este gas es soluble en agua, rara vez se encuentra en la atmósfera, así que no entra a los ambientes acuáticos a través de la superficie del agua (Ferrara y cols., 2008).

Dependiendo de las condiciones de pH, también es posible encontrar gases de amonio, producto de la descomposición de materia orgánica nitrogenada (Ferrara y cols., 2008).

4. Microorganismos

Las aguas naturales contienen flora microbiana y microorganismos que provienen del suelo y de los animales e incluso de la cloaca. Las aguas superficiales de los arroyos, lagunas, lagos y ríos contienen diferentes tipos de microorganismos y concentraciones. También ocurre igual con las aguas subterráneas.

Entre las bacterias más comunes que se encuentran en las aguas naturales están: *Pseudomonas, Chromobacterium, Proteus, Achromobacter, Micrococcus, Bacillus, Streptococcus* (enterococos), *Aerobacter y*

Escherichia coli. Estos tres últimos géneros son posiblemente contaminantes y no forman parte de su flora natural (Ferrara y cols., 2008).

En tabla 1 se presentan algunos ejemplos de los constituyentes y sus concentraciones típicas en aguas superficiales y aguas subterráneas.

Tabla 1. Composición de aguas superficiales y subterráneas

Constituyente	A	B	C
SiO_2 (mg/L)	9,5	1,2	10,0
Fe^{3+} (mg/L)	0,07	0,02	0,09
Ca^{2+} (mg/L)	4,0	36	92
Mg^{2+} (mg/L)	1,1	8,1	34
Na^{+} (mg/L)	2,6	6,5	8,2
K^{+} (mg/L)	0,6	1,2	1,4
HCO_3^{-} (mg/L)	18,3	119	339
SO_4^{2-} (mg/L)	1,6	22	84
Cl^{-} (mg/L)	2,0	13	9,6
NO_3^{-} (mg/L)	0,41	0,1	13
Sólidos disueltos totales (mg/L)	34	165	434
Dureza total (mg/L $CaCO_3$)	14,6	123	369

Fuente: Ferrara y cols., 2008

A: Aguas superficiales (ríos, lagos) que pasan por rocas cuyo principal componente es granito.

B: Aguas superficiales que pasan por lechos rocosos con menos granito.

C: Aguas subterráneas.

Estos constituyentes presentes en el agua son los que definirán si es necesario un tratamiento previo a fin de hacerla adecuada, es decir la calidad de agua para el uso que se le vaya a dar. Por esta razón es importante conocer los requisitos de calidad para cada uso; es por ellos que esta se juzga como el grado en el cual el agua se ajusta a los estándares fisicoquímicos y biológicos que fija el usuario (Ferrara y cols., 2008).

El agua es un recurso de usos múltiples, esta puede clasificarse en dos grupos: consuntivos y no consuntivos. Los primeros son aquellos en los que su utilización produce pérdidas de la cantidad de agua (se extrae o consume de su lugar de origen) y los principales son el abastecimiento de agua

potable, el abastecimiento a la industria manufacturera y la agricultura bajo riego. Los segundos son los que no producen pérdidas cuantitativas (uso sin extracción o consumo del recurso), como la navegación y el transporte, la generación hidroeléctrica y las actividades recreativas. Todos los usos, sin embargo, son susceptibles de ocasionar efectos cualitativos en el agua, produciendo alteraciones físicas, químicas o ambientales (Del Castillo, 2007).

En términos globales se estima que aproximadamente el 70% del agua dulce es usada para agricultura (Baroni y cols., 2007). El agua en la industria absorbe una media del 20% del consumo mundial, empleándose en tareas de refrigeración, transporte y como disolvente de una gran variedad de sustancias químicas. El consumo doméstico absorbe el 10% restante, de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2003).

En agricultura, el agua se emplea para el riego de los campos, mientras que en ganadería se usa como parte de la alimentación de los animales y en la limpieza de los establos y otras instalaciones dedicadas a la cría de ganado. Sin embargo, es la irrigación o aquella agua usada para la agricultura o el riego de cosechas, donde más agua se usa y probablemente a nivel mundial, al uso del agua al que más importancia se le da.

Lo que se denomina "uso doméstico" comprende el agua distribuida a través de redes municipales a hogares, comercios, industrias y a los servicios propios de los municipios, para ser utilizada en diferentes actividades cotidianas, tales como alimentación, limpieza, lavado de ropa, aseo personal entre otras.

En la industria el agua es uno de los recursos más importantes, ya que es usada como materia prima, enfriante, solvente, agente de transporte y como fuente de energía.

2. Requerimientos de calidad de agua de acuerdo a su uso

Como se señaló con anterioridad, los requisitos para la calidad de agua se establecen de acuerdo con el uso al que se destina la misma, por lo que es importante conocer estos requisitos a fin de determinar si se requiere un tratamiento del agua, y de ser así, qué procesos se deben aplicar para alcanzar la calidad deseada. Esto implica por lo tanto, del establecimiento de criterios de calidad para definir los lineamientos y normas o requisitos mínimos que debe satisfacer un agua para que sea apropiada a un uso determinado.

Los requisitos de calidad obligan a las autoridades y a los usuarios a comparar la calidad de agua de una fuente específica, con esos requisitos para determinar si satisfacen o no cierto nivel de calidad. Los criterios sobre la calidad de las aguas son establecidos por las autoridades responsables del manejo de la calidad de las aguas de una nación y son utilizados por diferentes instituciones nacionales o internacionales, públicas y privadas.

En Venezuela el Decreto N° 883 sobre "Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos" (Gaceta Oficial N° 5021, 1995 es la base legal para establecer si un cuerpo de agua es apto para el uso que se le está dando o para el cual se requiere. Esta norma en su Capítulo II "De la Clasificación de las Aguas" específicamente el artículo 3 clasifica las aguas de acuerdo en siete (7) tipos y en su artículo 4 muestra los criterios para la clasificación de las aguas y

niveles de calidad exigibles de acuerdo con los usos a que se destinen (Anexo A).

En lo que respecta al presente trabajo de investigación sólo se consideraran a las aguas tipo 1 y 2, es decir, aquellas de uso doméstico y agrícola respectivamente.

Es importante recalcar que el agua tipo 1, se refiere a agua en su estado natural o agua cruda a ser usadas como fuentes de abastecimiento domiciliario, incluyendo usos urbanos e industrial primario, esta a su vez se desagregan en los sub-tipos 1A, 1B y 1C (Anexo A).

El tratamiento a través de procesos no convencionales, a los que se refiere las sub-tipo 1C, puede incluir cualquier método no reconocido como usual, como por ejemplo, el uso de carbón activado en cualquier forma, el ablandamiento, los procesos de desalación como el intercambio iónico, ósmosis inversa y procesos de desferrización específicos, entre otros (COPLANARH, 1975).

a. Criterios para uso doméstico

El agua para consumo humano debe reunir dos características importantes; a saber:

Ser agradable a los sentidos, para lo cual debe estar exenta de olores, sabores desagradables, sólidos en suspensión y ser incolora; y estar libre de sustancias químicas y microorganismos que sean peligrosos para la salud de los consumidores.

El Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) establece las características para uso doméstico, así como los niveles de calidad. Los

parámetros, límites e intervalos para este uso son presentados en el Anexo A.

b. Criterios para uso agrícola

Los criterios de calidad de agua para riego no pueden ser muy rígidos, ya que los efectos que sobre los cultivos se derivan de la composición química y características físicas del agua, están asociados en una relación muy compleja con la clase de suelo, drenaje, tipo de cultivo y pluviosidad, entre otros, de manera que cada caso en particular podría requerir el dictamen de un especialista (COPLANARH, 1975).

La calidad de los constituyentes del agua de riego están relacionados al análisis y anticipo de cuatro problemas: salinidad, permeabilidad, toxicidad por absorción radicular y foliar y problemas misceláneos (Sánchez, 2007).

1. Salinidad

La reducción del crecimiento de los cultivos por la salinidad es causada por el potencial osmótico (PO) ya que reduce la capacidad de las raíces de las plantas a extraer agua del suelo. (Sánchez, 2007).

La salinidad además de los sólidos disueltos totales (SDT) se puede expresar también mediante la conductividad eléctrica. Una clasificación racional de aguas de riego basada en la salinidad, se presenta en la tabla 30 (Anexo B), tomado del Boletín de Información N° 197 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

2. Alto contenido de sodio

Altas concentraciones de iones de sodio en las aguas de regadío, afectan la permeabilidad del suelo y causan problemas de infiltración. Esto se debe a

que el sodio cuando está presente en el suelo, es intercambiable por otros iones. El calcio y el magnesio son cationes que forman parte de los complejos estructurales que forman el suelo generando una estructura granular apropiada para los cultivos. El exceso de iones de sodio desplaza el calcio y magnesio y provoca la dispersión y desagregación del suelo. El suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas, por lo que reduce la infiltración de agua y aire a través de los poros que conforman el suelo (Lenntech, 2009).

3. Bicarbonatos

Es importante en relación con las concentraciones de calcio y magnesio presentes en el agua. Existe una tendencia del calcio a reaccionar con los iones bicarbonáticos y precipitar como carbonato de calcio. Las sales de magnesio se disuelven más lentamente aun cuando son más solubles, razón por la cual tienen menor tendencia a precipitar; sin embargo, este elemento se ve afectado más que por el calcio por procesos de intercambio iónico. Una vez ausente el calcio y el magnesio soluble, la proporción relativa de sodio aumenta (COPLANARH, 1975). De ahí se ha sugerido considerar a los bicarbonatos como un criterio adicional en el agua de riego.

4. Toxicidad

Los problemas de toxicidad están referidos a los iones en el suelo o el agua que puedan ser tomados y acumulados por las plantas hasta concentraciones altas, causando daños a los cultivos. Los iones tóxicos más comunes son boro, cloro y sodio.

5. Otras sustancias

Existen otros elementos considerados perjudiciales, bien sea por su acción directa sobre las plantas o por su efecto acumulativo en ellas, que pueden ser tóxicos. Ejemplo de estos son el aluminio, arsénico, berilio, boro, cadmio, cromo, cobalto, cobre, estaño, flúor, litio, manganeso, molibdeno, níquel, plomo, selenio, vanadio y zinc.

De acuerdo a los criterios expuestos, el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) especifícame en su artículo 4, establece los niveles de calidad exigible (Anexo A) para aguas del sub-tipo 2A.

3. Fuentes de abastecimiento de agua

Las fuentes principales de abastecimiento de agua son las superficiales y subterráneas.

a. Aguas superficiales

Las aguas superficiales de los ríos y lagos son fuentes importantes de abastecimiento de aguas públicas en virtud de las altas tasa de extracción que soportan normalmente. Una desventaja de utilizar aguas superficiales es que están expuestas a la contaminación de todo tipo, proceso que se origina desde fuentes diversas e intermitentes como residuos municipales, industriales, drenaje de áreas urbanas, agrícolas y erosión de suelos. El agua de turbidez variable y una diversidad de sustancias que contribuyen al sabor, olor, y color del agua pueden hacer necesario un tratamiento extenso (Henry y cols., 1999).

b. Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son aquellas que se han filtrado desde la superficie de la tierra hacia niveles más profundos a través de los poros del suelo, cuya

agua es normalmente extraída de estos depósitos por medio de pozos. Estas aguas no son tan susceptibles a la contaminación como las superficiales, aunque una vez contaminadas, su restauración aunque posible, es difícil y de largo plazo.

Casi todos los organismos patógenos y muchas sustancias indeseables se eliminan por la acción filtrante de las partículas de suelo. Ésta es la razón por la cual los municipios, incluso los que están situados cerca de aguas superficiales, prefieren los pozos para el abastecimiento de agua. Se necesita mucho menos tratamiento y, por ende menos gastos, para llevar las aguas subterráneas al nivel del agua potable (Henry y cols., 1999).

La composición química de las aguas subterráneas está altamente influenciada por las posibles interacciones y reacciones ocurridas durante su contacto con el sustrato. Estas interacciones y reacciones a su vez pueden ser controladas por el tiempo de residencia de dichas aguas (Frape y cols., 1984).

La composición química natural de las aguas subterráneas es el resultado de los siguientes procesos: a) la evapo-concentración de las sales atmosféricas aportadas como aerosol marino, polvo y sales disueltas en el agua de lluvia; b) la interacción del agua con los minerales del suelo, ya sea hidrolizándolos o por cambio en el estado de oxidación-reducción; y c) la incorporación de aguas salinas residuales que aún no han sido lavadas.

La composición natural de las aguas subterráneas puede verse modificada por causas naturales o por factores antrópicos. Entre las primeras figuran el clima, la temperatura, el tipo de terreno a través del cual se desplaza el agua subterránea, el tiempo de residencia del agua en el acuífero, y el aporte de gases reactivos, principalmente dióxido de carbono y oxígeno.

Respecto a los factores antrópicos, la actividad humana puede afectar, a veces con cierta intensidad a la composición química del agua que se infiltra y a la recarga, modificando la temperatura, introduciendo solutos como sales, nitratos, entre otros y sustancias diversas que incluyen hidrocarburos, plaguicidas y disolventes halogenados, entre otros, tanto en el terreno como en el agua. Su presencia puede suponer una degradación importante de las características naturales.

La mayoría de las sustancias disueltas en el agua subterránea se encuentran en estado iónico, esta suelen dividir en mayoritarios, minoritarios y traza. Los iones mayoritarios son los cationes calcio, magnesio, sodio y potasio; y los aniones bicarbonato, sulfato y cloruro. Es frecuente que el anión nitrato se considere dentro del grupo de iones mayoritarios, aun cuando su concentración sea pequeña. La presencia del ión carbonato está condicionada a un pH > 8,3, lo cual es poco frecuente. A pH bajo, una parte importante del carbono inorgánico disuelto está como ácido carbónico o dióxido de carbono disuelto. Además, las aguas subterráneas suelen contener cantidades apreciables de ácido silícico no disociado, que frecuentemente se expresa como sílice disuelta. El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que las de los iones mayoritarios.

Se llaman iones menores a aquellos que habitualmente no superan el 1% de la concentración iónica total con valores que están entre 0,0001 y 10 mg/l. Los más importantes son: bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro y fluoruro. Los elementos traza son aquellos que, estando presentes, lo están en cantidades difícilmente medibles por medios analíticos usuales con concentraciones inferiores a 0,0001 mg/L, en este grupo se incluyen los metales pesados y

otros. El análisis de estos iones disueltos así como la interpretación de su presencia y origen en las aguas subterráneas es estudiado por la hidrogeoquímica, la cual es un área de las Ciencias de la Tierra que se describe a continuación.

4. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica estudia los aspectos geoquímicos del agua en sí y su relación con las rocas de la corteza terrestre. Frecuentemente es determinada por la medición de los constituyentes fisicoquímicos reportados en estudios de aguas subterráneas. Entre los elementos que la hidrogeoquímica considera importantes están los iones mayoritarios, minoritarios y traza como parámetros de campo, la conductividad eléctrica, la temperatura, el contenido de oxígeno disuelto y el pH. Tales análisis son suficientes para el estudio de los principales procesos geoquímicos en la mayoría de los acuíferos y sus relaciones con los sistemas hidrológicos (Custodio y Llamas, 1976; Deusth, 1997). Los recientes progresos en el campo de la geoquímica, así como los realizados en el campo de las técnicas analíticas, han creado un gran estímulo a favor de la investigación hidrogeoquímica, al punto de que constituye hoy en día, una de las Ciencias de la Tierra que han evolucionado con mayor rapidez (Deustch, 1997).

Los estudios hidrogeoquímicos son importantes para definir la calidad natural del agua subterránea, así como su evolución tanto en el tiempo como en el espacio; además, permite determinar si existe o no contaminación y cuál es la o las fuentes de contaminación y el grado de dicha contaminación. De esta manera, permite determinar la calidad del agua y los usos que esta pueda tener ya sea para consumo humano, uso doméstico, industrial, agropecuario y otros.

a. Origen de la composición química del agua

En general, el origen de las aguas subterráneas y la composición química primaria que tendrán, se encuentra en el agua de lluvia. Está al entrar en contacto con el suelo (que a su vez contiene abundante CO_2), genera la siguiente reacción:

$$CO_2 + H_2O = HCO_3^- + H^+ \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Generándose así primeramente bicarbonato, y acidificando el agua. Esta relación se favorece a medida que el suelo contenga más dióxido de carbono, como sucede en terrenos cultivados y con abundante vegetación (Custodio y Llamas, 1976).

Una vez infiltrada, la composición química de las aguas subterráneas dependerá directamente de los minerales con que entre en contacto en el acuífero, y del tiempo de interacción que tenga con ellos, que puede llegar a ser de miles de años (Custodio y Llamas, 1976). Así, a mayor tiempo de permanencia en el acuífero, mayor será la cantidad de sales presentes en el agua, debido a la mayor disolución de éstas. Se determina una secuencia entonces, la cual señala que las aguas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo serán generalmente bicarbonatadas, y con el paso del tiempo se vuelven sulfatadas y finalmente cloruradas.

Esta secuencia es correcta para un flujo lineal; sin embargo, las aguas al infiltrarse y circular por el terreno, pueden seguir un recorrido corto de circulación local, un camino de cientos de km de circulación regional, o algún camino intermedio entre éstos. Así, las aguas más profundas suelen ser más salinas que las más cercanas a la superficie debido a que las oportunidades para disolver sales son mayores (Custodio y Llamas, 1976). La tabla 2

muestra el origen de las principales sustancias disueltas en las aguas subterráneas.

Tabla 2. Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea.

Tipos	Ión	Orígenes
Aniones	Cloruro	Mezclas con agua marina, ataque de rocas y minerales (evaporizas, sodalita, apatito, etc.), de gases y líquidos de emanaciones volcánicas, vertidos urbanos e industriales, agua de lluvia y su concentración en el terreno.
	Sulfato	Lavado de terrenos marinos, oxidación de sulfuros de todo tipo de rocas, concentración en el suelo de aguas de lluvia, disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, actividades urbanas, industriales y agrícolas.
	Bicarbonato	Disolución de dióxido de carbono atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomitas (ayudado por dióxido de carbono o por ácidos naturales), hidrólisis de silicatos.
	Nitrato	Abonos agrícolas, procesos de nitrificación naturales, agua de lluvia, desarrollo de pozos explosivos, descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.
Cationes	Sodio	Ataque de feldespatos y otros silicatos, lavado de sedimentos marinos, mezcla con agua de mar, disolución de sales evaporitas, contaminación urbana e industrial, concentración en agua de lluvia.
	Potasio	Ataque de ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc), disolución de sales potásicas (sylvita, carnalita), agua de lluvia, contaminación minera, industrial y agrícola (abonos).
	Calcio	Disolución de calizas, dolomitas, yeso y anhidrita, ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos, disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, agua de lluvia
	Magnesio	Disolución de dolomitas y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, lavado de rocas evaporíticas magnésicas (carnalita), agua de mar, contaminación industrial y minera.
	Hierro	Ataque de silicatos ferríferos, sulfuros y óxido de hierro, rocas sedimentarias.

Fuente: Custodio y Llamas, 1976

b. Procesos modificadores de las aguas subterráneas

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, la calidad de las aguas está gobernada por los procesos de evaporación y evapotranspiración, captura selectiva de los iones por la vegetación, la generación de dióxido de carbono mediante los procesos de respiración y descomposición de la materia orgánica, la meteorización y disolución de los silicatos y minerales evaporíticos (rocas salinas, sulfatos y carbonatos), procesos de adsorción e intercambio iónico, procesos de oxidación-reducción, mezclas de agua y la contaminación (Appelo y Postma, 1993).

Seguidamente se describen alguno estos procesos modificadores de la composición química del agua.

1. Intercambio iónico

Este fenómeno que afecta principalmente a los cationes, ocurre principalmente en los minerales de arcillas que contienen un grado notable de capacidad de quimisorción. Su interés está relacionado con acuíferos con una fracción arcillosa, ya que las formaciones dominantemente arcillosas son prácticamente impermeables. El cambio de bases afecta principalmente a los cationes sodio, calcio, magnesio, así como también al hidrógeno, litio y estroncio, mientras que el potasio y amonio tienden a ser fijados irreversiblemente (Custodio y Llamas, 1976).

2. Fenómenos de oxidación-reducción

Los fenómenos de oxidación-reducción o redox, pueden modificar la composición del agua ya sea colocando en solución, o precipitando ciertos iones que pueden presentarse en varios estados de valencia.

Los fenómenos redox son especialmente importantes en relación con la solubilización del hierro y el manganeso, ya que éstos pueden ser disueltos en medios reductores, o precipitar cuando el medio pasa a ser oxidante. Las reacciones redox son productoras o consumidoras de hidrógeno (Custodio y Llamas, 1976), tal como es mostrado en algunas de las reacciones redox presentadas a continuación:

$$Fe(OH)_3 + 3H^+ + 1e^- \leftrightarrow Fe^{2+} + 3H_2O \quad \text{(Ec. 2)}$$

$$NO_3^- + 10H^+ + 8e^- \leftrightarrow NH_4^+ + 3H_2O \quad \text{(Ec. 3)}$$

$$NO_3^- + 6H^+ + 5e^- \leftrightarrow 1/2N_2 + 3H_2O \quad \text{(Ec. 4)}$$

$$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O \quad \text{(Ec. 5)}$$

3. Precipitaciones y disolución de minerales

Con el aumento del tiempo de contacto del agua con el terreno, pueden disolverse más sales, hasta llegar a alcanzar los respectivos productos de solubilidad pudiéndose llegar a producir precipitaciones. La velocidad de disolución puede verse afectada por la temperatura, por el grado de división y por la superficie de contacto con el agua, ya que a medida que es mayor el grado de división, la superficie de contacto, y aumento de temperatura, mayor será esta velocidad (Custodio y Llamas, 1976).

Las precipitaciones pueden producirse también debido a la mezcla de aguas de distintas composiciones, como es el caso de la mezcla de agua clorurada cálcica con agua bicarbonatada sódica o sulfatada sódica, que puede conllevar a una precipitación de carbonato de calcio o de sulfato de calcio (Custodio y Llamas, 1976).

4. Hidrólisis

La hidrólisis hace referencia a la reacción química del agua con una sustancia, que conlleva al desdoblamiento de las moléculas. Este proceso favorece la pérdida de minerales en las rocas.

5. Disolución y exolución de gases

Los gases están directamente involucrados en muchas reacciones geoquímicas. Uno de los gases más comunes es el dióxido de carbono, el cual puede provenir de la atmósfera o de la descomposición de la materia orgánica. En suelos la producción microbiana de dióxido de carbono incrementa la concentración de ácido carbónico, el cual a su vez es uno de los que ejerce un mayor control sobre la solubilidad de los materiales en el acuífero (Winter y cols., 1998).

c. Clasificación de las aguas de acuerdo a su composición química

Las aguas se clasifican con el objetivo de informar sobre su composición química y relacionarla con la geología, hidrología y actividades antrópicas. Las clasificaciones simples solamente proporcionan una información global y en general se establecen relacionadas con el uso doméstico, urbano, industrial o agrícola. Para esto son utilizadas representaciones gráficas, entre las cuales está el diagrama de Piper y las figuras de Stiff, así como también el diagrama de Gibbs para conocer el mecanismo que controla su composición.

1) Diagrama de Piper

Piper (1944) desarrolló un sistema de clasificación de las aguas superficiales y subterráneas en función de la composición química de las mismas, a partir de la concentración de las especies iónicas dominantes. Este sistema emplea una representación gráfica, que consiste de dos diagramas triangulares donde cada uno representa el porcentaje en miliequivalentes/l de los cationes sodio más potasio, calcio, y magnesio, y aniones cloruro, bicarbonato, y sulfato, respectivamente, y un romboedro central el cual está dividido en cuatro partes a saber: a) calcio-magnesio-bicarbonato; b) sodio-bicarbonato; c) sodio-cloruro-sulfato; y d) calcio-magnesio-cloruro-sulfato.

El diagrama de Piper es ampliamente utilizado en estudios hidrogeoquímicos, porque permite, además de clasificar las aguas subterráneas, identificar probables procesos como mezclas, evolución geoquímica e intercambio iónico, que puede sufrir el agua, a partir de la interpretación del comportamiento de la muestra en el diagrama (Hernández, 2007).

La Figura 6 muestra el diagrama desarrollado por Piper (1944), donde pueden observarse los distintos tipos de agua, dependiendo de donde estén ubicadas las muestras de agua en el romboedro.

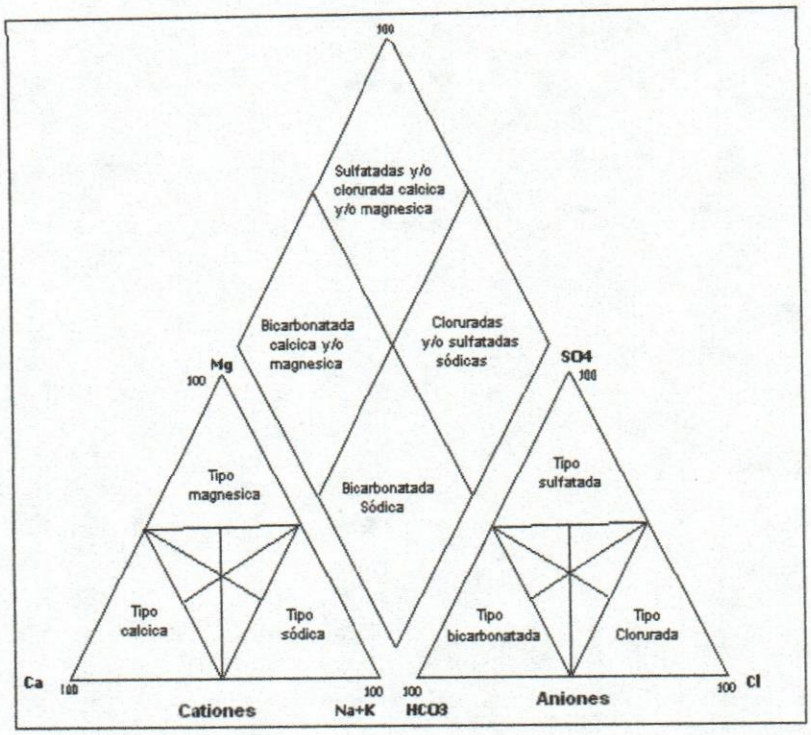


Figura 6. Diagrama de Piper (Piper, 1944)

2) Diagrama de Stiff

Otra herramienta para clasificar las aguas subterráneas según la cantidad de iones mayoritarios, es mediante los diagramas de Stiff (Stiff, 1951). Esta herramienta está basada en la construcción de cuatro rectas paralelas, igualmente espaciadas, cortadas por una normal, obteniendo cuatro semi-rectas en el lado izquierdo, para cationes, y cuatro semi-rectas en el lado derecho, para aniones.

Sobre cada semi-recta se toma un segmento proporcional a los meq/L del ión correspondiente, y se unen en sus extremos, originando un polígono representativo para cada tipo de agua específica, permitiendo diferenciarlas de acuerdo a su origen connato o meteórico (Custodio y Llamas, 1976).

Uno de los rasgos importantes de este método gráfico, es la tendencia a mantener su forma independientemente de si el cuerpo de agua ha sufrido un proceso de concentración o de dilución, además de la gran simplicidad en la construcción de dichas figuras (Zaporozec, 1972).

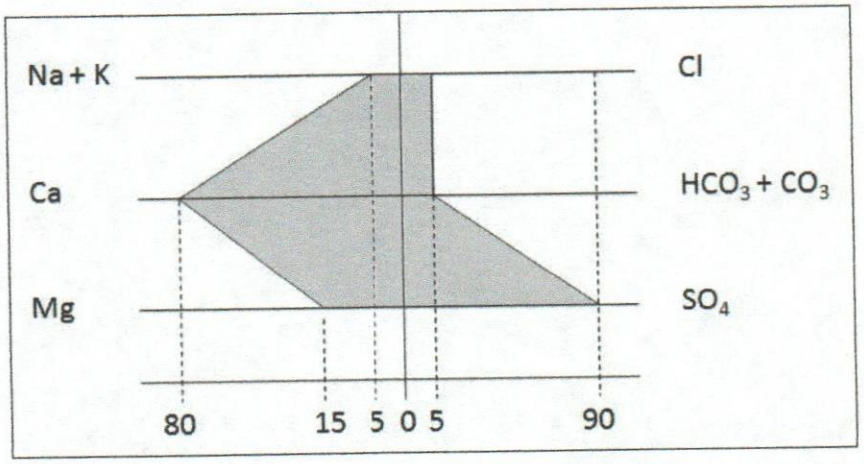


Figura 7. Diagrama de Stiff (Rodriguez, 2011)

3) Diagrama de Gibbs

Los principales mecanismos que controlan la composición química de las aguas son: la precipitación atmosférica, el dominio de la roca y los procesos de evaporación cristalización. De modo que es posible evaluar la importancia relativa de cada mecanismo, mediante la utilización del diagrama de Gibbs, el cual parte de la base de que los cationes mayoritarios que caracterizan las aguas son, el calcio para aguas dulces y el sodio para aguas con alta salinidad, mientras que los aniones característicos son el bicarbonato para aguas dulces y el cloruro para agua salada.

En este diagrama (figura 8) con forma de boomerang se puede representar tanto la relación de los cationes mayoritarios $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$, como la

relación de los aniones mayoritarios $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$, las cuales se grafican versus los sólidos disueltos totales (SDT) (Gibbs, 1970).

La parte superior derecha del diagrama se relaciona con procesos de evaporación precipitación, la parte central es la zona en donde el proceso dominante es la interacción agua-roca y zona inferior derecha prevalece la precipitación atmosférica.

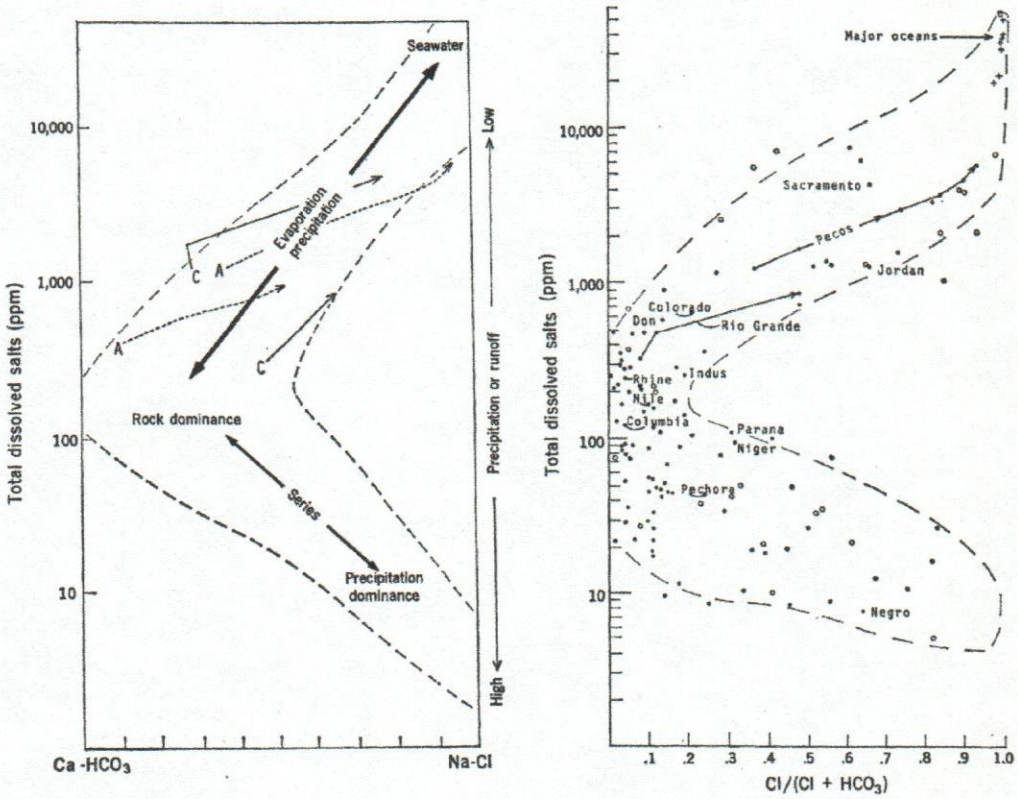


Figura 8. Diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970)

d. Índices hidrogeoquímicos

Las índices hidrogeoquímicos o relaciones entre los iones disueltos en un agua pueden guardar cierta relación con el terreno del que procede el agua o indicar la acción de fenómenos modificadores, así como indicar una

característica específica del agua considerada. Se pueden establecer muchos tipos de relaciones cuya utilidad es función del problema a estudiar. En ese sentido, Custodio y Llamas (1976) indica que las más utilizadas son las relaciones r Mg/r Ca, r K/r Na, r Cl/r CO_3H.

1) Relación r Mg/r Ca

Esta relación en las aguas continentales varía frecuentemente entre 0,3 y 1,5; los valores próximos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos y valores superiores a 1 suelen estar en general relacionados con terrenos ricos en silicatos magnésicos como los gabros y basaltos.

Las aguas de mar tiene una relación r Mg/r Ca alrededor de 5, por lo que las aguas que circulan por terrenos de formación marina o que han sufrido mezclas con el agua de mar tienen una relación elevada.

2) Relación r K/r Na

En aguas dulces puede variar entre 0,001 y 1, siendo lo más frecuente que varíe entre 0,004 y 0,3, mientras que, para el agua marina está de 0,02 a 0,025. Cuando la concentración de elementos alcalinos (Na^+ + K^+) es menor que 3 ppm, la relación r K/r Na, varía entre 0,5 y 1; para 50 ppm, está alrededor de 0,1 y para 100 ppm, es de 0,01 como valor medio.

En general, es una relación de utilidad limitada no sólo porque es fácilmente alterada por el terreno, sino porque muchos análisis no permiten calcularla con un mínimo de precisión. Si existen aportes artificiales de K^+, se puede seguir su disminución en el sentido del flujo y entonces esa relación puede ser interesante (Custodio y Llamas, 1966).

3) Relación r Cl/r CO_3H

Dado que la concentración de bicarbonato es un valor relativamente constante en las aguas subterráneas, es una relación de interés para seguir el proceso de concentración en sales en el sentido del flujo subterráneo. Aunque esa concentración hace crecer ligeramente el denominador, un aumento en la relación indica un avance en el proceso de concentración. Si existen fenómenos de reducción de sulfatos o aportes exteriores de dióxido de carbono, puede aumentar el valor de la concentración de bicarbonato y en este caso no conviene utilizar esta relación si no se toman precauciones. La precipitación del carbonato de calcio también puede influir.

La relaciones r Cl/r CO_3H es especialmente útil en la caracterización de la intrusión marina ya que en aguas continentales tiene normalmente un valor entre 0,1 y 5 y en el agua de mar varía entre 20 y 50. Si el incremento de cloruros es debido a concentración de sales en zonas de regadío, la relación crece mucho menos para igual incremento de cloruros que cuando se produce intrusión marina.

5. Sistemas de tratamiento de aguas

Los sistemas de tratamiento de agua se usan con la finalidad de transformar el agua natural procedente de fuentes superficiales o subterráneas, en agua apta para el consumo humano, de acuerdo a los parámetros estipulados en la legislación vigente, en el caso de Venezuela en la Gaceta N° 63.395, *Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable*". Dicha norma tiene como objetivo "establecer los valores máximos de aquellos componentes o características del agua que representan un riesgo para la salud de la comunidad". Estos componentes son removidos, a través de un conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico, fisicoquímico o biológico. Estas

operaciones dependerán de la calidad inicial de la fuente de agua. La secuencia más habitual, llamada "tratamiento convencional", incluye procesos como preoxidación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, neutralización y desinfección final (Canal de Isabel II Gestión, 2012):

1) Preoxidación

Introducción en el agua de un agente químico oxidante, capaz de eliminar cualquier materia que pueda oxidarse, tanto orgánica como inorgánica.

2) Coagulación y floculación

Mediante este proceso, se facilita la agrupación de las partículas responsables del color y la turbidez del agua.

3) Sedimentación

Con el agua casi en reposo y a través de la acción de la gravedad, se depositan en el fondo las partículas y agrupaciones formadas en el proceso anterior, formando un fango que se extrae posteriormente.

4) Filtración

Retención de las partículas que no pudieron ser extraídas en el proceso anterior haciendo pasar el agua por unos filtros.

5) Neutralización

Ajuste de la acidez del agua mediante reactivos químicos para evitar que corroa las tuberías.

6) Desinfección final

Con la adición de reactivos, normalmente cloro y amoniaco para formar cloraminas, se consigue eliminar los microorganismos que hayan podido sobrevivir a los procesos anteriores, garantizando la calidad del agua durante todo el recorrido por la red de distribución.

Las aguas subterráneas generalmente tienen una gran cantidad de minerales disueltos, como resultado del contacto con el suelo y las rocas, de esta manera para la remoción de estas sales, comúnmente es usado el tratamiento por ósmosis inversa o intercambio iónico y es un método bastante efectivo para reducir los sólidos disueltos totales (SDT).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Este capítulo describe en detalle los materiales, equipos, procedimientos y metodología de análisis que se empleó para determinar los procesos que controlan la calidad de las aguas subterráneas en los treinta y cuatro (34) pozos ubicados al sur de los estados Anzoátegui y Monagas.

Los métodos, técnicas y procedimiento que se consideraron para este estudio fueron los establecidos en los manuales y procedimiento específicos de la Norma COVENIN 2709:2002, el Método Estándar para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, documentos del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (Cepis) y técnicas aceptadas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Cabe destacar que los métodos Hach están aprobados por la USEPA.

A. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

1. Parámetros a ser evaluados

Los parámetros determinados para la caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua fueron los descritos en el artículo 4 del Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) específicamente los que clasifican las aguas para uso humano y agrícola (artículo 3) a excepción de la radiactividad, los dispersantes y las espumas (Anexo A). Adicionalmente, para el estudio hidrogeoquímico se determinaron los parámetros alcalinidad, calcio, conductividad específica, magnesio, ortofosfato, potasio, sílice y temperatura los cuales no aparecen en esta norma.

2. Tipos de envases, requisitos de preservación, identificación y traslado de muestras

La tabla 3 presenta los requisitos de preservación y tipo de envase que se utilizaron para cada parámetro analizado. Por otro lado, se colocó la etiqueta a cada envase para su posterior rotulación en campo. Para la selección y lavado de envases, preservación, identificación y traslado de muestras se siguió el procedimiento estipulado en la norma COVENIN 2709:2002.

El lavado de envases y su preparación para la preservación de muestras se realizó en el Laboratorio de Calidad Ambiental "Leopold Blumenkranz" del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente.

Tabla 3. Tipo de envase, lavado y preservación

Capacidad (ml)	Material	Análisis	Lavado	Preservación
1000	Plástico	Metales (Li, Na, K, Mg, Ca, Ba, V, Cr, Mo, Mn, Fe, Ni, Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, B, Al, SiO_2, Pb, As, Se)	HNO_3, H_2O destilada	HNO_3, refrigerar
1000	Plástico	Fisicoquímicos (Dureza, SDT, $S0_4^{-2}$, Cl^-, F^-)	HCl H_2O destilada	N.R, refrigerar
1000	Vidrio	Fenoles	HCl	H_2SO_4, refrigerar
1000	Vidrio	Aceites minerales	Hexano	H_2SO_4, refrigerar
1000	Ámbar	OrganoClorados		N.R
1000	Ámbar	Organofosforados		
1000	Plástico	Análisis en sitio (Alcalinidad, color, turbiedad, PO_4^{-2}, NO_2^-, NO_3^-, CN^{-2}, coliformes totales y fecales)	HCl, H_2O destilada	N.R

Fuente: Elaboración propia

3. Calibración de equipos portátiles

Calibración del sensor conductividad YSI 6560

Se prepararon soluciones patrones de cloruro de potasio a diferentes concentraciones, siguiendo la recomendación 56-1981, de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML).

Calibración del Turbidímetro Hach 2100P

La calibración del Turbidímetro 2100P se basa en el uso del patrón primario para la turbidez, por lo que se emplearon los patrones de Formazina estabilizados StablCAL TM de valores 20, 100 y 800 NTU y se siguió el procedimiento descrito en el manual del usuario.

Calibración del pHmetro Orion Star serie 910000

Se utilizaron soluciones buffer de pH = 4, pH = 7 y pH = 10 siguiendo las instrucciones del manual del usuario.

Calibración de espectrofotómetro Hach DR 2800

La calibración de este equipo se llevó a cabo para cada uno de los parámetros determinados por el mismo. En este caso se realizaron las curvas correspondientes para el color, ortofosfato, nitritos, nitratos, cianuro y bisulfuro de hidrogeno a través de la medición de la absorbancia y de esta manera se determinaron las concentraciones en mg/L.

4. Tipo de muestra

Las muestras tomadas fueron instantáneas. Estas son aquellas muestras captadas en un punto específico, en un sitio durante un período corto, representando por lo tanto las características del cuerpo de agua en el momento de su captación.

5. Metodología de captación de muestra

Esta fase consistió en la captación de las muestras de aguas subterráneas en los pozos de tipo aljibe y pozos de bombeo. En la figura 9 se presentan los puntos donde se tomaron las muestras.

Las muestras fueron captadas por personal entrenado en el manejo de los equipos y técnicas usadas en campo con el fin de garantizar su correcta manipulación y ejecución para obtener resultados más precisos, realizándose de la siguiente manera:

a. En los pozos tipo aljibe (sin bomba) se tomaron utilizando un muestreador de profundidad (Figura 10). Esta actividad consistió en introducir el muestreador por la columna del pozo hasta una determinada profundidad, liberando su sello y dejándolo llenar de agua para luego cerrarlo y extraerlo del pozo.

b. En los pozos que poseen bomba la captación se realizó posterior al inicio del bombeo, una vez que transcurrió un tiempo de cinco (05) minutos, de manera tal que el agua almacenada en la tubería fluyera asegurando de esta manera que la muestra sea representativa del reservorio de agua subterránea (COVENIN 2709:2002).

Una vez tomada la muestra se midieron y determinaron los parámetros en sitio; mientras que para los análisis en laboratorio, las muestras de agua se colocaron en los envases previamente preparados con los preservantes químicos, seguido de su refrigeración a aproximadamente 4 °C para su posterior traslado a los laboratorios previstos para la realización de los análisis.

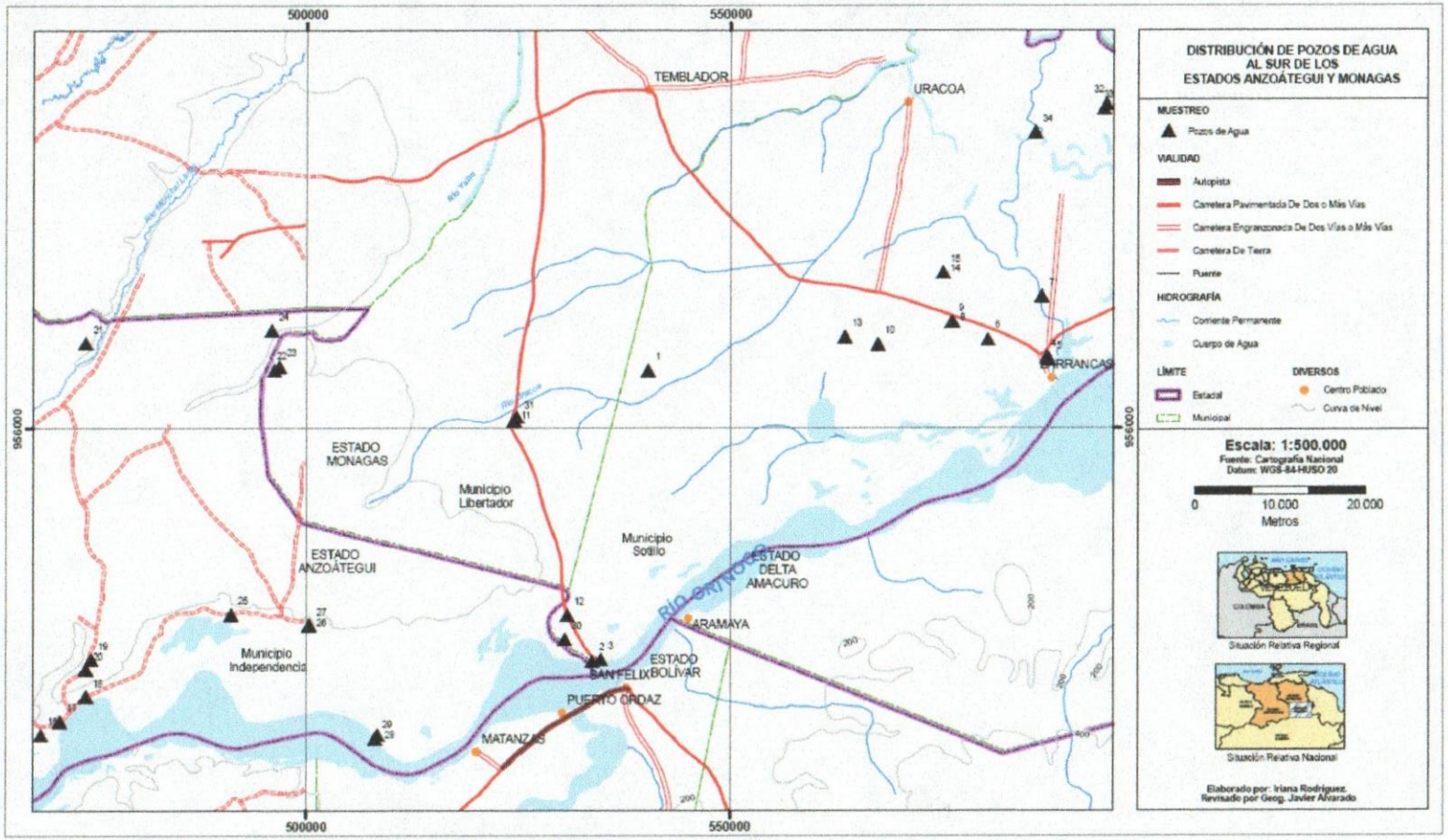


Figura 9. Ubicación geográfica de pozos de agua

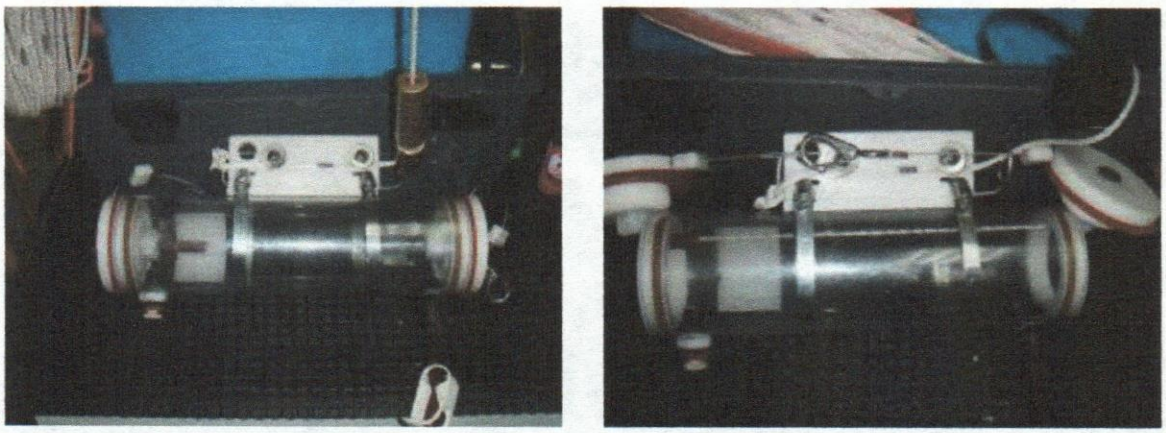


Figura 10. Muestreador de profundidad

6. Laboratorios que realizarán el análisis de muestras

Los laboratorios que realizaron el análisis de muestras fueron: El Laboratorio Ambiental de la Dirección Estadal Ambiental Monagas, el Laboratorio Ambiental Leopold Blumenkranz (MPPpA-Caracas), el Laboratorio del Instituto de Ingeniería y el Laboratorio Nacional de Hidráulica.

7. Procedimientos y técnicas a emplear

En tabla 4, se presentan los procedimientos y técnicas a empleadas para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos

Tabla 4. Procedimiento, técnicas, equipos y materiales

Objetivos Específicos	Técnica e Instrumentos	Procedimientos y Materiales
a. Caracterizar la calidad fisicoquímica y bacteriológica de las aguas subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas	Medición y determinación de parámetros en sitio (conductividad, temperatura, pH, turbiedad, alcalinidad, color, nitratos, nitritos, ortofosfato y cianuro): 1. Para medición de pH, temperatura y conductividad se utilizó la Sonda Multiparamétrica marca YSI modelo 6600 V2 con Datalogger 650 MDS y sensores para cada parámetro. 2. Para la determinación de turbiedad se realizó por el método nefelométrico usando el turbidímetro portátil marca Hach modelo 2100 P 3. Para determinación de alcalinidad se usó el titulador digital marca Hach modelo 16900 y pHmetro marca Orión modelo 3 Star. La metodología utilizada fue la titulación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) de acuerdo a procedimiento Hach.	1. **Conductividad, temperatura y pH:** Una vez tomada la muestra se introdujo la sonda en el tobo y se leyeron los valores en el Data Logger. 2. **Turbiedad:** Materiales: Celda de 15 mL, paño suave y sin pelusa, aceite de silicona. Procedimiento: Se llenó la celda con la muestra hasta la marca de 15 mL, se limpió la celda con paño suave y sin pelusa para eliminar las manchas de agua y las huellas de los dedos. Se aplicó una película delgada de aceite de silicona y se limpió con un paño suave para obtener una película delgada uniforme. Se introdujo la celda en el compartimiento del equipo y se presionó el botón leer para obtener el valor. 3. **Alcalinidad:** Materiales: Cilindro graduado de 500 mL, erlenmeyer de 250 mL, ácido sulfúrico, indicadores verde bromocresol y fenolftaldeina, pHmetro, piceta con agua desionizada. Procedimiento: Se selección el volumen de muestra y la concentración de ácido sulfúrico. Se insertó un tubo de alimentación limpio en el cartucho de titulación. Se giró la perilla de descarga para expulsar unas gotas del titulante. Se reinició el contador a cero y se limpió la punta. Se utilizó el cilindro graduado para medir el volumen de muestra. Se transfirió la muestra al erlenmeyer de 250 mL y se diluyó hasta 100 mL con agua desionizada en el momento que fue necesario. Se agregó una bolsa de indicador fenolftaleína, si la solución se tornaba rosa el punto final de titulación era incoloro. Se registrar el número de dígitos requeridos. Se agregó el indicador verde bromocresol y se continuo la titulación con H_2SO_4 hasta un color gris azulado verdoso claro (pH 5,1), un gris violáceo claro (pH

Objetivos Específicos	Técnica e Instrumentos	Procedimientos y Materiales
	4. Para la determinación de color real se siguió el método de estándar Platinum-Cobalt, para cianuro total por el método de Pyridine-Pyrazalone, para nitritos por el método de diazotación, para nitratos por el método de reducción de cadmnio y para ortofosfato por el método de ácido ascórbico, siguiendo el procedimiento establecido por Hach. El equipo a utilizado fué el espectrofotómetro marca Hach modelo DR-2800.	4,8) o rosa claro (pH 4,5) según lo requiera la composición de la muestra. Se registrar el número de dígitos requeridos 4. **Color, Nitrato, Nitrito, Ortofosfato y Cianuro:** Materiales: Equipo para filtrado (Kitazato, papel de filtro de 45 micron, bomba al vacio), piceta con agua desionizada, celdas cuadrada de 10 mL, papel tisuee, reactivos Nitriver 5 en polvo (nitrato), Nitriver 3 en polvo(nitrito), Phospher 3 (ortofosfato), para cianuro los reactivos Cyaniver 3, Cyaniver 4 y Cyaniver 5 Procedimiento: **Para Color:** Se filtró la muestra y se llenó la cubeta de 10 mL, se preparó el blanco con agua desionizada. Se limpió bien el exterior de ambas celdas, colocando posteriormente el blanco en el soporte portaceldas y se selecciona en la pantalla cero después se colocó la cubeta con la muestra y se seleccionó medición, obteniendo de esta manera el resultado. **Para Nitrato:** Se llenó las dos (02) celdas con muestra. Una para blanco y en la otra se agregó el reactivo Nitriver 5, tapando la cubeta y agitando por 1 min. Posteriormente se espera 5 min para que ocurra la reacción. Se limpió bien el exterior de ambas celdas, colocando el blanco en el soporte portaceldas y seleccionando en la pantalla cero después se colocó la cubeta con el reactivo, seleccionando medición y se leyó el resultado. **Para Nitritos**: Se llenó las dos (02) celdas con muestra. Una para blanco y en la otra se agregó el reactivo Nitriver 3, se agitó y se esperó 20 min para la reacción. Se limpió bien el exterior de ambas celdas, colocando el blanco en el soporte portaceldas y seleccionando en la pantalla cero después se colocó la cubeta con el reactivo, seleccionando medición y se leyó el resultado. **Para Ortofosfato**: Se llenó las dos (02) celdas con muestra. Una para blanco y en la otra se agregó el reactivo Phosver 3, se agitó y se esperó 2 min para la reacción. Se limpió bien el exterior de ambas celdas, colocando el blanco en el soporte portaceldas y se seleccionó en la pantalla cero después se

Objetivos Específicos	Técnica e Instrumentos	Procedimientos y Materiales
		colocó la cubeta con el reactivo, seleccionando medición y se leyó el resultado. **Para Cianuro:** Se llenó las dos (02) celdas con muestra. Una para blanco y en la otra se agregó el reactivo Cyaniver 3, agitando por 30 seg., se dejó reposar por 30 seg. más y se agregó el reactivo Cyaniver 4, agitando por 10 seg. y agregando inmediatamente el reactivo Cyaniver 5, se esperó 30 min para la reacción. Se limpió bien el exterior de ambas celdas, colocando el blanco en el soporte portaceldas y seleccionando en la pantalla cero, después se colocó la cubeta con el reactivo, seleccionando medición y se leyó el resultado.
	Determinación de parámetros en laboratorio: 1. Para análisis de metales (Aluminio, Bario total, Cadmio total, Calcio, Cobre total, Cromo total, Hierro, Litio, Magnesio, Manganeso total, Mercurio total, Molibdeno, Níquel, Plata total, Potasio, Plomo total, Selenio, Sodio, Vanadio, Zinc), arsénico, y sílice se realizó por el método de espectroscopia de absorción atómica de llama. El equipo utilizado fue un espectrofotómetro de absorción atómica. 2. El análisis de Sólidos Disueltos Totales (SDT) se realizó siguiendo el método gravimétrico y usando equipo de filtrado, estufa a 105 °C y 180 °C y balanza analítica 3. Para análisis de aceites minerales se siguió el método gravimétrico usando como equipo principal Embudos de Separación de 1 L, con tapa y llave de Teflón. 4. Para análisis de Fenoles se siguió el método colorimétrico de la 4-aminoantipirina usando un espectrofotómetro de longitud de onda de 460	1. **Análisis de metales:** Se utilizó una llama para atomizar la disolución de la muestra de modo que los elementos a analizados quedarán en forma de vapor de átomos. Existe una fuente independiente de la luz monocromática específicamente para cada elemento a analizar y se hace pasar a través del vapor de átomos, midiéndose posteriormente la radiación absorbida. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 3111. 2. **Sólidos Disueltos Totales**: La determinación de SDT se basó en la filtración de un volumen de agua conocido para luego evaporarlo a 108 °C, hasta que alcanzó un peso constante. A continuación, se procedió a pesar el residuo filtrable que quedó luego de la evaporación. Dicho valor representa la concentración de sólidos disueltos totales. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 2540 C. 3. **Aceites minerales:** La muestra acidificada a pH menor de 2, se extrajo varias veces con la mezcla de los solventes orgánicos (n-Hexano y Metil-tert-butil Eter en una relación 8:2.) Una vez terminada la extracción el solvente se evaporó y el residuo fué pesado. El límite de detección dependió de la precisión de la

Objetivos Específicos	Técnica e Instrumentos	Procedimientos y Materiales
	nm. 5. La determinación de la Dureza se hizo por el método de titulación EDTA, usando equipo de titulación, balanza analítica con precisión 0,1 mg. 6. Para el análisis de carbamatos y organofosforados se siguió la metodología de Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (HPLC) en conjunto con el sistema de derivación post-columna y un detector fluorescente. Equipo utilizado fue el de HPLC. 7. El análisis de organoclorados se realizaró por cromatografía de gases siguiendo el procedimiento de extracción líquido-líquido. Usando cromatógrafo de gases y embudo de separación de 2 L con tapa y llave de Teflón. 8. La determinación de los aniones Cl^-, F^- y SO_4^{2-} se realizó por el método de cromatografía iónica. Usando cromatógrafo iónico acompañado de una columna de separación aniónica y un supresor de fibra. 9. Para análisis de Boro se siguió la metodología de la curcumina usando equipo colorimétrico compuesto por un espectrofotómetro.	balanza usada. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 5520 B. 4. **Fenoles:** El método se basó en la destilación de los fenoles y la subsecuente reacción de estos con 4-aminoantipirina a un pH de 7,9 ± 0.1 en presencia de ferricianuro de potasio, formando compuestos de un color amarillo intenso a rojo, los cuales son extraídos de la disolución acuosa con cloroformo midiendo su absorbancia a una longitud de onda de 460 nm. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 5530 C. 5. **Dureza:** El método se basó en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético con los iones calcio y magnesio. El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final, el negro de eriocromo T, que es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes. El complejo del EDTA con el calcio y el magnesio es más fuerte que el que estos iones forman con el negro de eriocromo T, de manera que la competencia por los iones se desplaza hacia la formación de los complejos con EDTA desapareciendo el color rojo de la disolución y tornándose azul. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 2340 C. 6. **Carbamatos y organofosforados:** La muestra fue filtrada y inyectada en la columna HPLC de fase inversa. Los constituyentes fueron separados por cromatografía de elución de gradiente. Después de la elución los compuestos de N-metil son hidrolizados con hidróxido de sodio. El resultado se hizo reaccionar con o-phthalaldehyde (OPA) y 2-mercaptoethanol (MERC) para formar un producto de alta fluorescencia que es

Objetivos Específicos	Técnica e Instrumentos	Procedimientos y Materiales
		detectado con el detector fluorescente. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 6610 B. 7. **Organoclorados:** El procedimiento consistió en extraer los pesticidas con una mezcla de solvente (dietil éter/hexano o cloruro de metileno/hexano. El extracto se concentró por evaporación. Los pesticidas fueron determinados individualmente por cromatografía de gases. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 6630 B. 8. **Cl^-, F^-, SO_4^{-2}:** La muestra de agua fue inyectada en una corriente con diluyente carbonato-bicarbonato y pasada a través de una serie de intercambiadores iónicos. Los aniones de interés son separados sobre la base de su afinidad relativa. Los aniones separados son dirigidos a través de una membrana supresora hueca de intercambio catiónico bañada continuamente con una solución de ácido fuerte. En la supresión los aniones separados son convertidos a su forma ácida de alta conductividad y el diluyente a ácido carbónico de débil conductividad. Los aniones separados en su forma ácida son medidos por conductividad. Ellos son identificado con base a su tiempo de retención y comparado con estándares. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 4110 B. 9. **Boro:** La muestra de agua fue acidificada y evaporada en presencia de curcumina formándose un color rojo llamado rosocyanine, esta fue recogida en un solvente adecuado y el color rojo fue comparado con normas visuales o fotométricamente. El procedimiento y materiales en detalle son descritos en el método estándar para análisis de agua y aguas residuales apartado 4500-B.

Objetivos Específicos	Técnica e Instrumentos	Procedimientos y Materiales
	Determinación de organismos coliformes totales y fecales (NMP/100 ml): Equipo: Incubadora, selladora y lámpara UV. Metodología: siembra con enzima Colilert	Materiales: Enzimas, plantillas de incubación, envases estériles de 100 mL, comparador visual, planillas de conteo. Procedimiento: Se agregó la muestra en el envase de 100 mL hasta la marca, se agregó la enzima en polvo, se tapó y agitó hasta disolverse, después se agregó a la plantilla de incubación, sellándola y colocándola en la incubadora a 35 °C por 18 horas. Para coliformes totales se contó el número de celdas que cambiaron al color del indicador visual y para coliformes fecales se introdujo la plantilla en la lámpara UV y se contó las celdas que se observaron fluorescentes. El número más probable es determinado con la planilla de conteo.
b. Clasificar las aguas subterráneas al sur de los Estados Anzoátegui y Monagas para uso Humano y Agrícola	1. Clasificación de acuerdo a los criterios estipulados en el Decreto Nº 883 para uso humano y agrícola. 2. Adicionalmente para uso agrícola clasificación de acuerdo a su salinidad, alto contenido de sodio, bicarbonatos y toxicidad.	1. Se compararon los resultados de todos los parámetros determinados con los límites rangos máximos establecidos en el Decreto Nº 883 para aguas tipo 1 y tipo 2 (específicamente sub.-tipo 2A). 2. **Salinidad:** Se comparó los valores de conductividad obtenidos con los de la tabla 2 y se clasificó como agua de baja (C1), media (C2), alta (C3) o muy alta (C4) salinidad. **Alto contenido de Sodio:** Se calculó la relación de adsorción de sodio (RAS) y se comparó los resultados con la tabla 3 y se clasificó como agua de baja (S1), media (S2), alta (S3) o muy alta en sodio. **Bicarbonatos:** Se calculó el carbonato de sodio residual (CSR) y se comparó los resultados con los valores: <1,25 aptas, entre 1,25 y 2,5 regulares y mayores que 2,5 no aptas para riego. **Toxicidad:** Los resultados de los parámetros cloro, sodio, boro se compararon por los valores estipulados en el decreto N° 883 para aguas sub.-tipo 2A.
c. Determinar los factores que controlan la composición química de las aguas	Elaboración de diagramas de Stiff y diagramas de Piper utilizando el Software Aquachem.	Para la elaboración de estos diagramas se usaron los resultados obtenidos de los cationes $Na^+ + K^+$, Ca^{2+} y Mg^{2+} y los aniones Cl^-, HCO_3^- y SO_4^{2-}. Como los valores obtenidos están en mg/L estos

Objetivos Específicos	Técnica e Instrumentos	Procedimientos y Materiales
subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas		fueron convertidos a miliequivalentes/L ingresándolos al software Aquachem y de esta manera se obtuvieron los gráficos de Stiff y Piper que indicaron el tipo químico de las aguas.
d. Recomendar uso y tratamiento de acuerdo a su clasificación	Evaluar los parámetros que no están dentro de las características adecuadas para el uso a destinar y recomendar que tipo de tratamiento aplicar para remoción de estos parámetros no deseables.	1.- Se recomiendan tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración, si los parámetros que no cumplen con las características adecuadas para uso, pueden ser removidos bajo este sistema de tratamiento. 2.- Se recomiendan tratamiento no convencional de precipitación por oxidación para aguas con metales no deseados (Fe, Mn), ósmosis inversa ó intercambio iónico para aguas con alto contenido de sólidos disueltos (aguas saladas o salobres).

B. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Una vez obtenido los resultados de campo y laboratorio el análisis de datos se realizó con la generación de una base de datos en Excel, construcción de tablas, uso de ecuaciones y la elaboración de gráficos con el uso del Software Aquachem®.

1. Revisión de los resultados

La validez de los resultados de calidad de agua se verificó mediante la estimación de la conductividad a partir de la composición del agua, la cual debe ser comparable a la conductividad medida en campo (Ferrara y cols., 2001).

La conductividad específica calculada, al ser la resultante de las contribuciones aditivas de los compuestos iónicos, debe mantener una buena correlación lineal con la conductividad de campo. Para el cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$CE = \sum (Ci \times Fi) \quad \text{(Ec. 6)}$$

Donde:

CE = Conductividad específica calculada, µS/cm

Ci = Concentración de la especie iónica i, meq/l o mg/l

fi = Factor de conductividad para la especie iónica i µS/cm (ver tabla 5)

Tabla 5. Factores de conductividad para las especies iónicas comúnmente encontradas en el agua.

Ión	Factor de conductividad (fi) µS/cm
Cationes	
Calcio	2,60
Magnesio	3,82
Potasio	1,84
Sodio	2,13
Aniones	
Bicarbonato	0,715
Cloruro	2,14
Nitrato	1,15
Sulfato	1,54

Fuente: Tchobanoglous y Schroeder (1985).

El valor del coeficiente de correlación de acuerdo a Soto (2009), considera los siguientes límites de variación: Para r = 0 variables no correlacionadas, r menor a 0,3 débil, 0,3 < r <0,5 mediana, 0,5 < r < 0,8 apreciable, 0,8 < r < 1,0 fuerte, igual a 1 correlación perfecta.

2. Caracterización fisicoquímica

Los parámetros medidos en campo y los determinados en laboratorio fueron analizados estadísticamente empleando cajas gráficas con el uso de la herramienta Statistica.

Las cajas gráficas son empleadas por ser una herramienta que permite visualizar la información correspondiente a la base de datos obtenida de una forma ilustrativa y rápida al lector. Utilizan como tendencia central la mediana y no la media aritmética o promedio, lo que es lo más correcto en estos casos debido a que la tendencia de los resultados es frecuentemente asimétrica (Zambrano F., 1999). Estas cajas gráficas representan el 50% de la población entre cuartiles inferior (25%) y superior (75%), y un valor en el interior de la misma, que es la mediana. Adicionalmente están presentes los bigotes de la caja que conforman el

50% restante de la población de datos como umbrales mínimo y máximo, donde todos los valores que están por encima o debajo de estos límites son considerados valores anómalos.

3. Clasificación de las aguas

a. De acuerdo a los sólidos disueltos totales

La clasificación según sólidos disueltos totales se realizó utilizando el criterio de Davis y Wiest (1971), el cual se indica en tabla 6:

Tabla 6. Concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Tipo de Agua	Concentración de SDT en mg/l
Agua Dulce	0 – 1.000
Agua Salobre	1.000 – 10.000
Agua Salada	10.000 – 100.000
Salmuera	> 100.000

b. Clasificación de las aguas según la composición química

Para ello se recurre a la elaboración de las figuras de Stiff y diagramas de Piper, para definir químicamente el tipo de agua en cada estación permitiendo con ello, observar los resultados de los pozos en conjunto. La herramienta a utilizar para realizar estos diagramas es el Software AquaChem desarrollado específicamente para analizar y modelar numérica y gráficamente datos hidrogeoquímicos de aguas subterráneas. Los parámetros a ingresar en el software son los cationes sodio, potasio, calcio, magnesio y los aniones cloruros, bicarbonatos y sulfatos. Estos iones tienen que estar en miliequivalente la conversión será hecha con la ecuación 7.

$$\mathrm{m}Eq = \frac{mg}{pesoatómico} \times valencia \qquad \text{(Ec. 7)}$$

El resultado de la elaboración de estas gráficas indica si las aguas son del tipo cálcica, sódica, magnésica, bicarbonatada, sulfatada, clorurada, bicarbonatada sódica, bicarbonatada cálcicas y/o magnésicas, cloruradas y/o sulfatadas sódicas, sulfatadas y/o clorurada cálcica y/o magnésica.

c. Clasificación de las aguas de acuerdo al Decreto N° 883

Para la clasificación de los cuerpos de agua en tipo 1, 2 de acuerdo a los criterios estipulados en el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), los datos fueron ingresados en una base de datos en Excel junto con los intervalos y límites máximos establecidos, permitiendo con ello realizar la comparación entre las muestras de aguas captadas.

4. Recomendaciones de uso

De acuerdo con la clasificación de las aguas se hace las recomendaciones para uso de agua destinadas a abastecimiento humano y agrícola.

a. Aguas destinadas para abastecimiento humano

Para recomendar el uso destinada a abastecimiento humano se realizó la evaluación de estas características con base en las "Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable" Gaceta Oficial N° 36.395, debido a que si bien es cierto que el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) permite clasificar las aguas de acuerdo con el tipo de tratamiento general a aplicar, la aptitud para el consumo humano y el tratamiento específico requerido por el agua cruda va a estar determinado por los criterios de salud pública establecidos en las normas sanitarias para el agua potable.

En esta norma además se consideran los elementos molibdeno, níquel y boro, los cuales aunque no están incluidos en el decreto pueden encontrarse en los cuerpos de agua y representan un riesgo para la salud.

Debido a lo anterior, además de los parámetros establecidos en el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) se considerarán los siguientes parámetros complementarios que aparecen la Gaceta Oficial N° 36.395 (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros y concentraciones máximas permitidas en gaceta Nº 36.395

Parámetro	Gaceta N° 36.395
Organismos Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	0,0
Boro (B) (mg/l)	0,3
Molibdeno (Mo) (mg/l)	0,07
Níquel (Ni) (mg/l)	0,02

b. Aguas destinadas para uso agrícola

De manera complementaria la evaluación de la calidad de agua para recomendación de uso agrícola se realizó con la determinación de la salinidad, alto contenido de sodio, bicarbonatos y toxicidad de la siguiente manera:

1. Salinidad

Se elaboró una base de datos en Excel, con los valores medidos de conductividad, comparándolos con los intervalos establecidos, presentados en tabla 30 (Anexo B).

2. Alto contenido de sodio

Para evaluar la sodicidad se calculó la Razón de Adsorción de Sodio (RAS) usando la siguiente ecuación:

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}]+[Mg^{2+}]}{2}}} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

Dónde: (Na^+), (Ca^{2+}), (Mg^{2+}) corresponden a las concentraciones de sodio, calcio y magnesio expresadas en miliequivalentes por litro.

Los valores obtenidos fueron comparados con los intervalos que se presentan en la tabla 31 (Anexo B), tomada del Boletín de Información N° 197 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

3. Bicarbonatos

Fue calculado el carbonato de sodio residual (CSR) con la ecuación 10, definida por Eaton (1950).

$$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \qquad \text{(Ec. 9)}$$

Donde los constituyentes iónicos se expresan en miliequivalentes por litro (meq/l).

Se considera que, en relación con la concentración de bicarbonatos, las aguas con un CSR menor de 1,25 son aptas para riego, entre este valor y 2,5 se consideran regulares y para valores mayores de 2,5 como no aptas.

4. Toxicidad

Los parámetros que se consideran tóxicos para las plantas son el cloro, sodio y boro, los resultados obtenidos de estos compuestos fueron comparados con los valores estipulados en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), para aguas sub.-tipo 2A.

5. Cálculo del Índice de Langelier

De manera complementaria para este estudio se calculó el Índice de Langelier (IL) ya que dependiendo del uso que se le vaya a dar a las aguas es importante conocer la capacidad corrosiva y depositante del agua a utilizar de manera tal de realizar una selección adecuada del material y el mantenimiento de la red de tuberías. La ecuación para el cálculo del Índice de Langelier es la siguiente:

$$IL = pH\ actual - pH\ s \qquad (Ec.\ 10)$$

$$pHs = p\ (Ca^{2+}) + p(alcalin) + pK_2 - pK_{ps} \qquad (Ec.\ 11)$$

Dónde:

pHs = pH de saturación

pK_2 y Pk_{ps}: - logaritmo de la 2da constante de disociación del ácido carbónico y del producto de solubilidad del carbonato de calcio (C_aCO_3).

IL < 0 supone un agua disolvente, capaz de favorecer procesos de corrosión.

IL > 0 supone un agua precipitante, que favorece la formación de depósitos cálcicos y magnésicos.

IL = 0 representa un agua estable químicamente.

Por otro lado, Lamont (1981) ha establecido en sus investigaciones un grado de ataque del agua a las tuberías con el índice de Langelier, razón por la cual esta escala es utilizada como referencia para conocer si es necesario un tratamiento previo para el flujo del agua en tuberías a nivel de acueductos. La Tabla 8 presenta la escala establecida por Lamont.

Tabla 8. Grado de ataque del agua de acuerdo al Índice de Langelier.

Grado de ataque del agua	Índice de Langelier
Ligero	0
Moderado	-1,3
Apreciable	-2,6
Severo	-3,9

Fuente: Lamont (1981).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo son presentados y discutidos los resultados obtenidos sobre las aguas subterráneas estudiadas, así como la caracterización fisicoquímica, la clasificación y los factores que controlan su composición química; así mismo son realizadas las recomendaciones de uso y tratamiento de acuerdo a la clasificación de las aguas subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas, atendiendo al Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

A. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La validación de los resultados obtenidos en este estudio, es realizada mediante la construcción de la relación de la conductividad teórica frente a la conductividad de campo. Dicha validación tiene la finalidad de verificar la confiabilidad de los resultados, esto permite realizar las interpretaciones de los mismos sobre un base cierta.

En este sentido, la figura 11 presenta la antes citada relación para las aguas subterráneas al sur de los estados Anzoátegui y Monagas. Nótese que dicha relación muestra un valor de r^2 de 0,884, obteniendo de esta manera un coeficiente de correlación (r) de 0,94 entre la conductividad teórica y la conductividad de campo. Esta correlación es considerada fuerte de acuerdo a Soto (2009), $0,8 < r < 1,0$. Es así como se verifica que los resultados obtenidos para el presente estudio son confiables en el contexto de las interpretaciones realizadas.

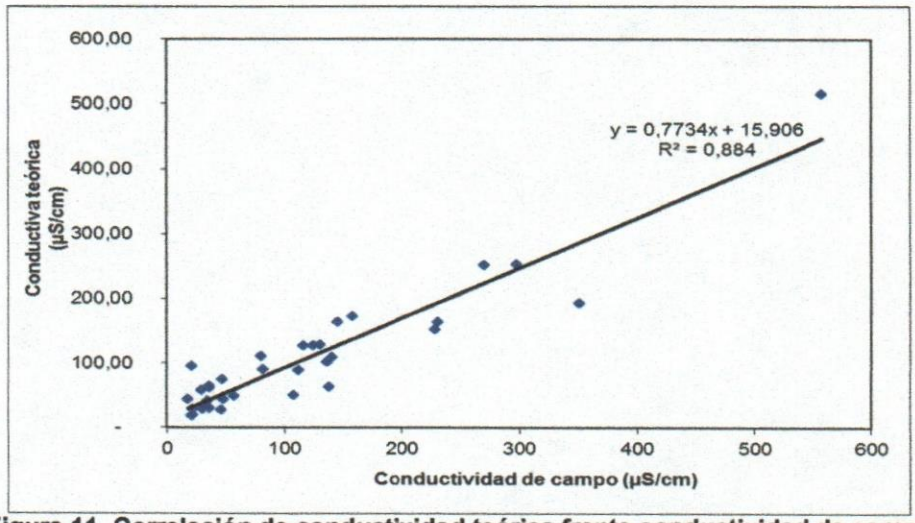


Figura 11. Correlación de conductividad teórica frente conductividad de campo

B. ESTADO MONAGAS

Se presenta en este punto la caracterización fisicoquímica y bacteriológica, clasificación de las aguas, hidrogeoquímica y recomendaciones de uso, correspondiente a los resultados obtenidos al sur del estado Monagas, específicamente en el Municipio Sotillo, Libertador y Uracoa.

1. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica, estado Monagas

Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y bacteriológica realizada en los veinte (20) pozos del estado Monagas, son presentados en el Anexo C. Es importante señalar que dicha caracterización es realizada mediante la construcción de cajas gráficas, esto a fin de visualizar el valor correspondiente a la mediana y a los datos considerados como anómalos. Este carácter descriptivo puede ser usado para entender la tendencia actual desde el punto de vista geográfico de los distintos parámetros medidos y determinados.

Por su parte, las características estructurales de los pozos en el estado Monagas indican una profundidad que oscila entre 8 y 100 metros, donde el 80% de los pozos son del tipo perforado y el 20% son aljibe con bomba.

a. Parámetros fisicoquímicos en el estado Monagas

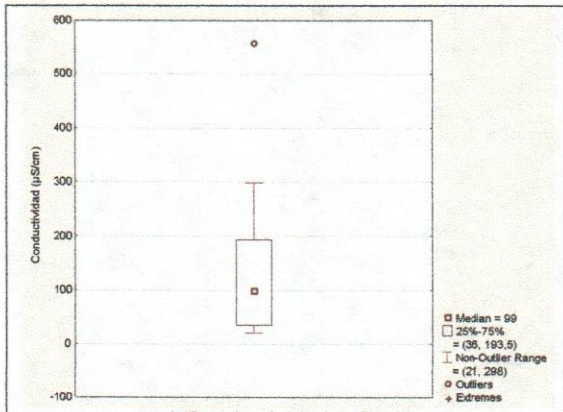
De acuerdo a las cajas gráficas, la mediana de la zona de estudio en el estado Monagas para la conductividad (figura 12a) es de 99 µS/cm con un mínimo de 21 µS/cm y un máximo de 298 µS/cm con un valor atípico de 558 µS/cm; dicho valor atípico corresponde a la muestra 10 captada en el Municipio Sotillo al Este del área de estudio. Por su parte los valores de sólidos disueltos totales (SDT) (figura 12b) indican un mínimo de 9,0 mg/L y un máximo de 135 mg/L con un valor atípicos de 255 mg/L y una mediana de 37 mg/L, este valores atípicos corresponden a las muestras 10, ubicado en el Municipio Sotillo. En general, estos valores indican bajo contenido iónico (SDT < 1.000 mg/L) y de acuerdo a la clasificación de Davis y Wiest (1971) son consideradas aguas dulces.

La temperatura como se observa en figura 12c, presentó un valor máximo de 31,11 °C, un mínimo de 28,5 °C, una mediana de 29,67 °C, correspondiendo este al valor de fondo para la zona de estudio y un valor atípico de 27,86 °C. Mientras que el pH (figura 12d) tiene un valor máximo de 7,47 unidades, un mínimo de 5,2 unidades y una mediana de 5,77 unidades; por lo que de acuerdo a la escala empleada por Yanes (1997), estos valores indican la existencia de aguas ligeramente ácidas (6,4 – 7,1) y el valor máximo indica la presencia de aguas ligeramente alcalina (7,1 – 8,2),. Estos valores podría ser consecuencia del equilibrio del agua de lluvia con el dióxido de carbono. Davis y Wiest (1971) señala que la mayor parte del agua subterránea tiene el pH comprendido entre 5,0 y 8,0; y el mismo está controlado en la mayoría de los casos, por el sistema dióxido de carbono-bicarbonato-carbonato.

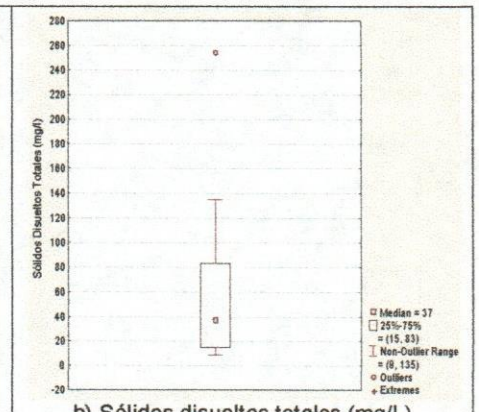
En lo que respecta a la dureza total (figura 12e) se obtuvo un valor mínimo de 2 mg/L, un máximo de 30 mg/L y una mediana de 11 mg/L, con dos valores extremo de 52 mg/L y 96 mg/L, valores que respectivamente corresponden a las muestras 4 y 10, captadas en el Municipio Sotillo. Estos resultados sugieren que son aguas suaves o blandas ya que la mayoría están en un intervalo de 0-75 mg $CaCO_3$/L (Ferrara y cols., 2001).

La alcalinidad (figura 12f) presentó un valor mínimo de 2,8 mg/L, un máximo de 36 mg/L y una mediana de 8 mg/L, con un valor extremo de 71,8 mg/L correspondientes a las muestras 34 captada en el Municipio Uracoa. Los valores obtenidos parecen estar asociados al aporte atmosférico a través del equilibrio dióxido de carbono-agua, no descartando la hidrólisis de silicatos, aluminosilicatos y carbonatos.

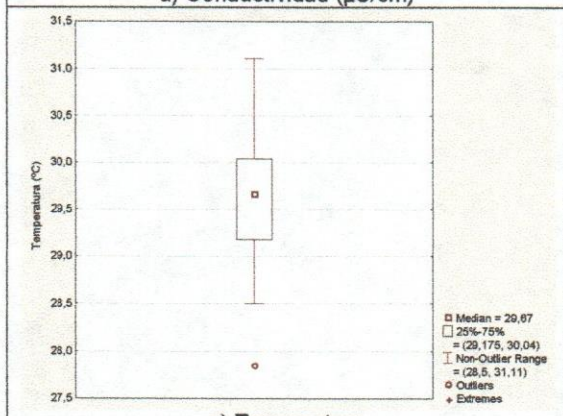
Para el color verdadero (figura 12g) se obtuvo un mínimo de 4 UCV y un máximo de 182 UCV, con una mediana de 35 UCV. Para la turbiedad (figura 9h) un mínimo de 0,11 NTU, un máximo de 9,2 NTU y una mediana de 1,43 NTU, con tres (03) valores extremos de 19,4 NTU, 22,8 NTU, 24,1 NTU, correspondientes a las muestras 32 y 15 ubicadas en el Municipio Uracoa, muestra 4 en el Municipio Sotillo. Los mayores valores están asociados a una mayor presencia de material articulado tamaño arcilla o coloidal.



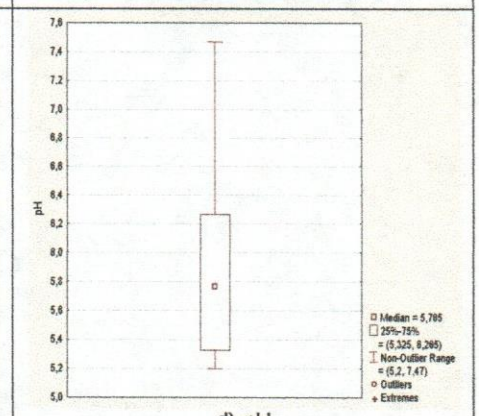
a) Conductividad (µS/cm)



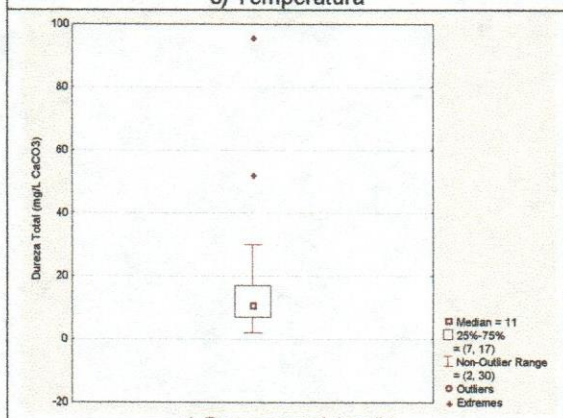
b) Sólidos disueltos totales (mg/L)



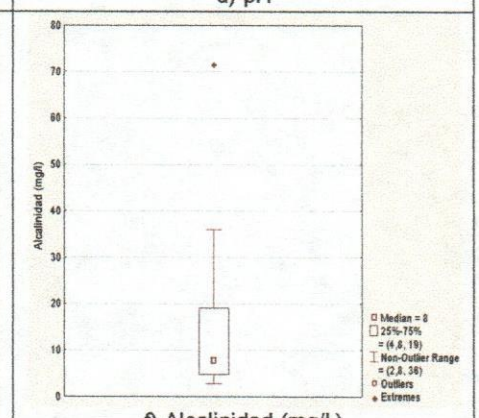
c) Temperatura



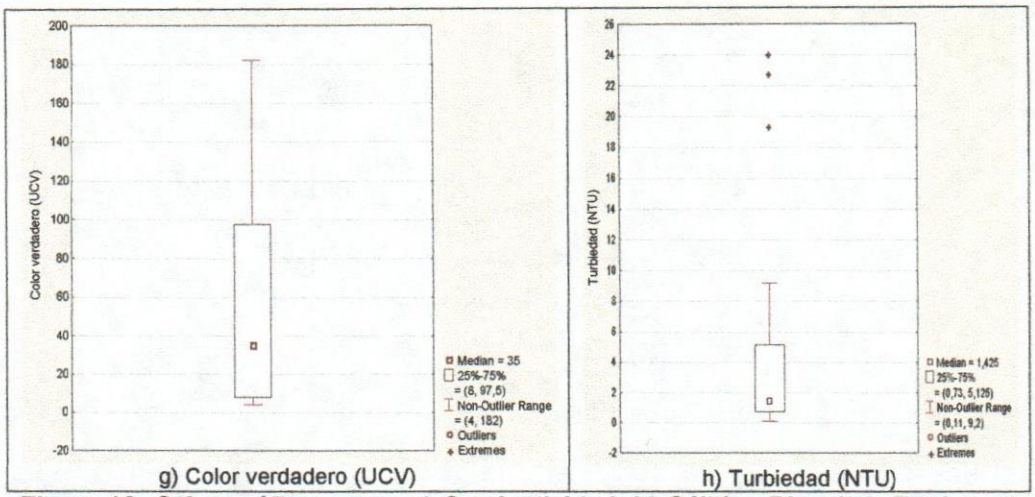
d) pH



e) Dureza total (mg/L)



f) Alcalinidad (mg/L)



g) Color verdadero (UCV) h) Turbiedad (NTU)

Figura 12. Cajas gráficas para: a) Conductividad, b) Sólidos Disueltos Totales, c) Temperatura, d) pH, e) Dureza Total, f) Alcalinidad, g) Color y h) Turbiedad, estado Monagas.

b. Especies químicas inorgánicas en el estado Monagas

Las cajas gráficas construidas para las especies químicas inorgánicas en el estado Monagas son mostradas en las figura 13. En este sentido, la concentración de cloruro (figura 13a) presenta un valor de fondo de 11 mg/L, con un intervalo en las concentraciones que van desde 3 mg/L a 55 mg/L y un valor atípico de 107 mg/L, correspondientes a las muestras 10, especialmente captada en el Municipio Sotillo. Mientras que el sulfato (figura 13b) se tiene un mínimo de 1,0 mg/L y un máximo de 5,0 mg/L, con dos valores extremos de 23 y 27 mg/L, respectivamente pertenecientes a las muestras 1 y 3, ambas tomadas en el Municipio Sotillo.

El fluoruro como se observa en figura 13c, presentó un valor mínimo de 0,02 mg/L, un máximo de 0,41 mg/L y una mediana de 0,19 mg/L; estos valores de acuerdo a Hem (1985) se consideran bajos ya que las concentraciones de fluoruro presentada comúnmente en las aguas naturales son menores que 1,0 mg/L. Por su parte, los ortofosfatos (figura 13d) arrojaron como resultado un mínimo de 0,06 mg/L y un máximo de 0,47 mg/L, con dos valores atípicos de 1,02 y 1,09 mg/L, asociados con

las muestras 9 tomada en el Municipio Sotillo y la muestra 34 ubicada en el Municipio Uracoa. Es de hacer notar que dichos valores, indican que no existe contaminación antrópica con respecto a este compuesto.

Para los nitratos (figura 13e), se obtuvo un valor mínimo de 0,1 mg/L, un máximo de 10 mg/L y una mediana de 0,6 mg/L, estos valores se asocian al proceso de decaimiento natural de la materia orgánica vegetal con posibles aportes pocos significativos de los desechos orgánicos asociados a actividades pecuarias. No se detectó la presencia de nitritos, cianuro y boro en las muestras de agua captadas en los treinta y cuatro (34) pozos estudiados.

En la figura 13f se puede observar que los valores de concentración de sílice disuelta arrojaron un máximo de 18,97 mg/L, un mínimo de 3,5 mg/L y una mediana de 5,5 mg/L, con un valor atípico de 20,36 y un valor extremo de 30,62 mg/L, correspondiente a las muestras 33 y 34 ubicadas en áreas donde litológicamente están presentes formaciones constituidas por arenas confinadas dentro de arcillas y por lutitas cuyo contenido mineralógico está representado por cuarzos feldespato y micas, cuyo proceso de hidrólisis favorece la puesta en solución de sílice.

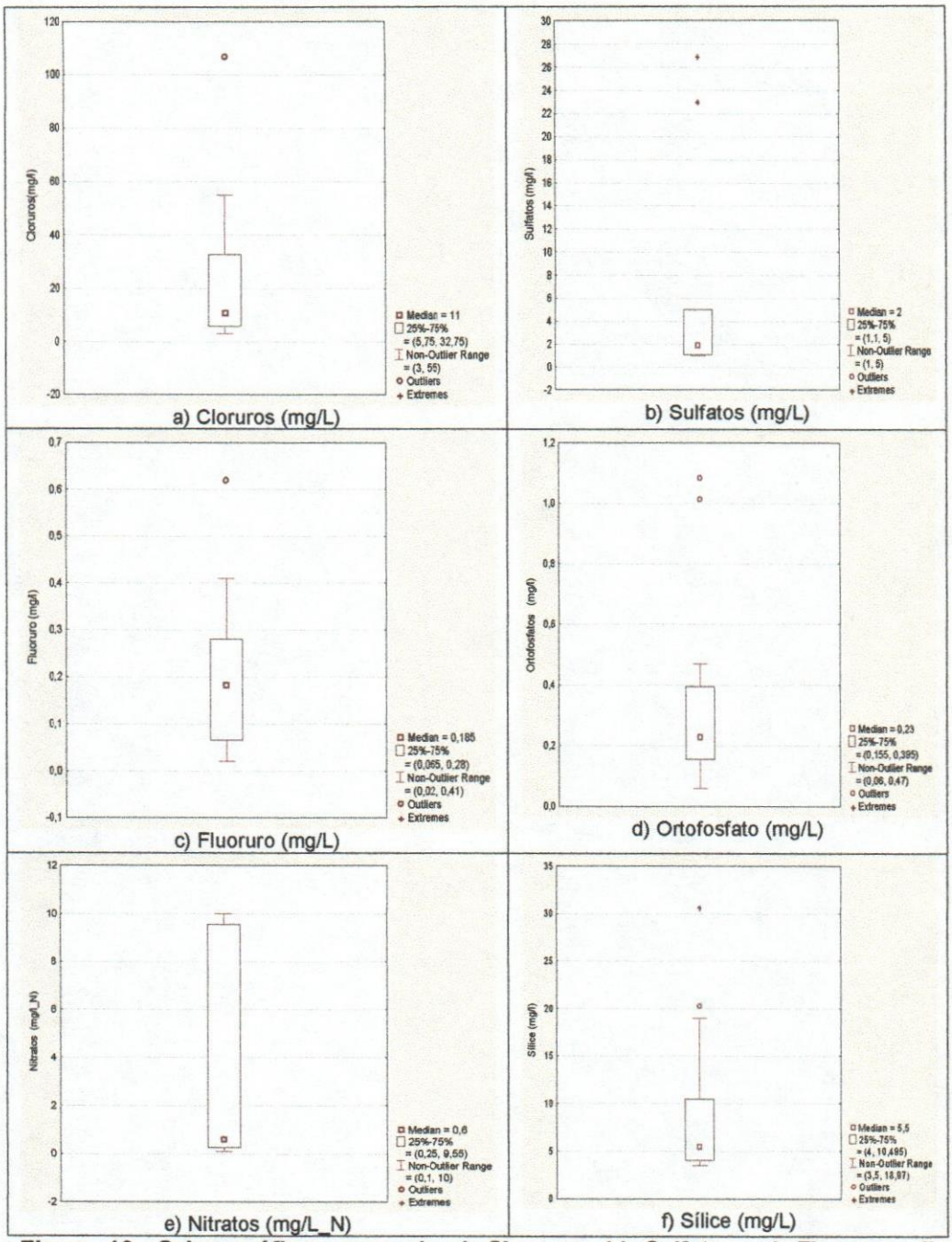


Figura 13. Cajas gráficas para el: a) Cloruros, b) Sulfatos, c) Fluoruro, d) Ortofosfato, e) Nitratos, y f) Sílice, estado Monagas.

c. Parámetros orgánicos y biocidas en el estado Monagas

En los veinte (20) pozos estudiados en el estado Monagas no se detectó presencia de los biocidas organoclorados, organofosforados y carbamatos; así como aceites, grasas e hidrocarburos, ni fenoles. Esto permite señalar que por lo menos para estos compuestos, no existe contaminación antrópica asociada a las actividades humanas desarrolladas en esta área de estudio.

d. Parámetros metálicos y no metálicos en el estado Monagas

Las cajas gráficas construidas para las especies químicas calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, aluminio, manganeso, zinc y bario en el estado Monagas son mostradas en la figura 14.

En este sentido, para el calcio (figura 14a) se obtuvo un valor mínimo de 0,8 mg/L, un máximo de 8,0 mg/L y una mediana de 3,2 mg/L con un valor atípico de 13 mg/L, en las muestra 10, captada en el Municipio Sotillo, mientras que para el magnesio (figura 14b) se tiene un mínimo de 0,48 mg/L, un máximo de 3,8 mg/L, y una mediana de 0,96 mg/L, con un valor atípico de 7,7 mg/L y un valor extremos de 15,3 mg/L, asociados a las muestras 4 y 10 tomada en los pozos ubicados en el Municipio Sotillo.

En lo que respecta al potasio (figura 14c), su caja gráfica arrojó un valor mínimo de 0,8 mg/L, un máximo de 4,7 mg/L y una mediana de 2,2 mg/L, valores de concentraciones considerados bajo ya que el contenido de potasio en las aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/L (Hem, 1985). En cuanto al sodio (figura 14d), se obtuvo un mínimo de 0,44 mg/L, un máximo de 41 mg/L, y una mediana de 14,5 mg/L, con un

valor extremo de 82 mg/L. Esto se corresponde a la muestra 10, captada en el pozo ubicado en el Municipio Sotillo.

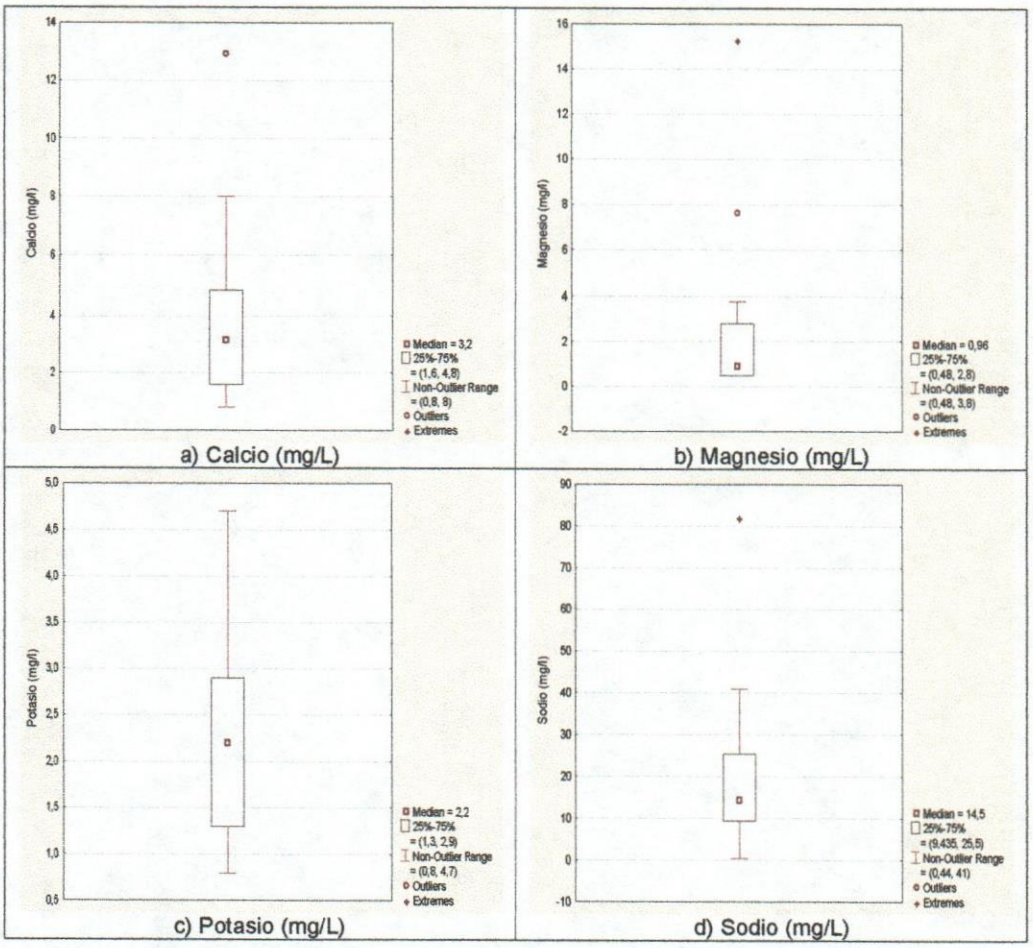
Para la concentración de hierro, la caja gráfica (figura 14e) permitió detectar una concentración de 0,1 mg/L como valor mínimo, un máximo de 2,65 mg/L y una mediana 0,5 mg/L, con un valor extremo de 9,0 mg/L, correspondiente a la muestra 1, ubicadas en el Municipio Sotillo. Es de resaltar que estos valores máximos y extremos, de acuerdo al Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), son considerados altos para uso humano. De acuerdo a Hem (1985) las aguas subterráneas con un pH entre 6 y 8 pueden tener hasta 50.000 µg/L de hierro.

Este aporte de hierro al agua subterránea puede correlacionarse con litologías Terciarias y Cuaternarias de rocas sedimentarias como las encontradas en el sector Los Barrancos de Fajardo, pertenecientes a la Formación Mesa, la cual se caracteriza por arenas de grano grueso y grava con cemento ferruginoso cementadas y muy duras, conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada, además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita gruesa y finas (González de Juana, 1980), lo que origina una contaminación del acuífero de origen natural.

La caja gráfica construida para el aluminio (figura 14f) presenta valores de 0,05 mg/L como valor mínimo y 0,6 mg/L como valor máximo, una mediana de 0,17 mg/L y un valor extremo de 2 mg/L. Este valor máximo y extremo fue detectado en las muestras 1 y 4, ubicada en el Municipio Sotillo y de acuerdo al Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) es considerado fuera de rango para consumo humano. El bario (figura 14g) indicó un valor mínimo de 0,01 mg/L, un máximo de 0,08 mg/L, una mediana de 0,03 mg/L, un valor atípico de 0,21 mg/L y un valor extremo de 0,23 mg/L.

En cuanto al manganeso, no se detectó presencia de este elemento en catorce (14) pozos y en los seis (06) restante se obtuvieron valores bajos que varían de 0,01 a 1,28 mg/L. De igual manera el zinc no fue detectado en los dieciséis (16) pozos y en los otros cuatro (04), se obtuvo una variación entre 0,12 a 0,57 mg/L.

En los veinte (20) pozos estudiados en el estado Monagas no se detectó la presencia de arsénico, cadmio, cobre, litio, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio y vanadio.



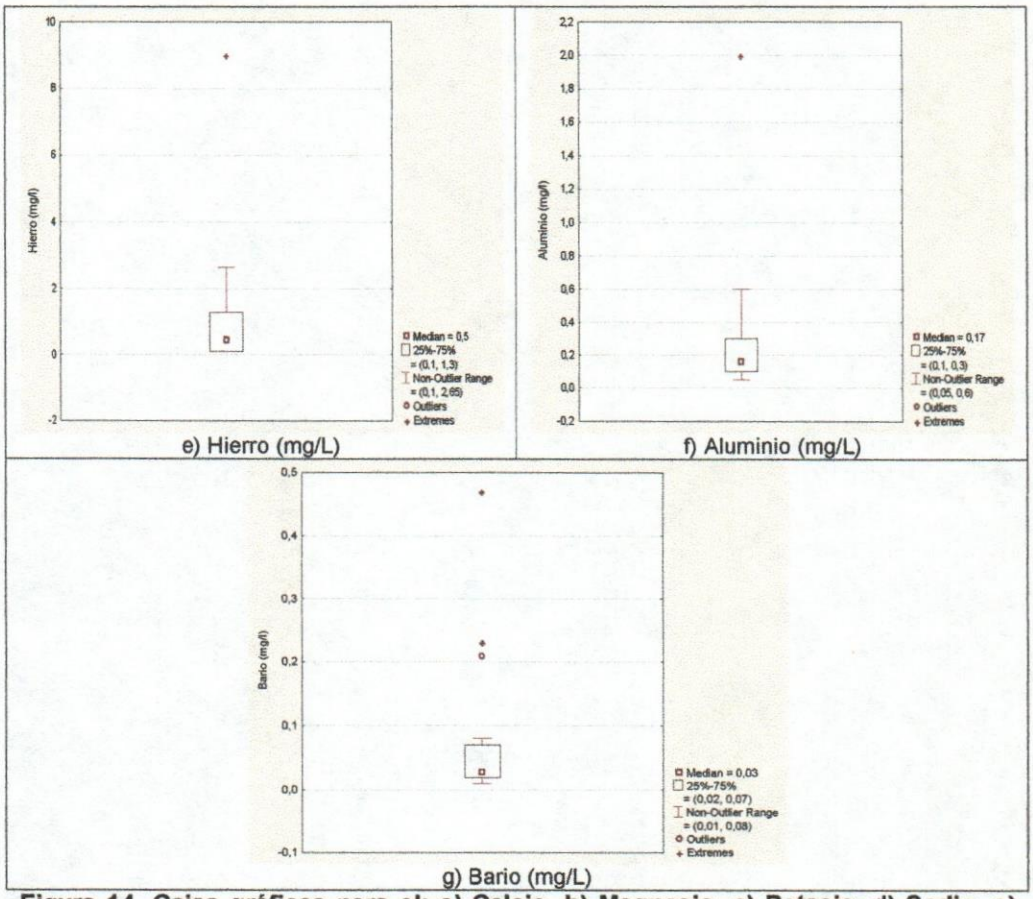


Figura 14. Cajas gráficas para el: a) Calcio, b) Magnesio, c) Potasio, d) Sodio, e) Hierro, f) Aluminio, y g) Bario, estado Monagas.

e. Parámetros microbiológicos en el estado Monagas

En lo que respecta a los resultados obtenidos a través del estudio microbiológico en seis (06) muestras de agua subterráneas captadas en aljibes del total de los pozos estudiados, se detectó presencia de coliformes totales y fecales. Esto podría estar asociado a que se trata de pozos someros y debido a que para el momento del muestreo no estaban protegidos en su parte superior; pueden ser alcanzados por la infiltración de las aguas servidas que provienen de las áreas rurales o por la lixiviación de los desechos orgánicos de los animales. Así mismo dieciocho (18) pozos perforados presentaron presencia de coliformes totales de los cuales tres (03) superan los valores mayores a 2000

NMP/100 mL, estos corresponden a la muestras 9, ubicada en el Municipio Sotillo y las muestras 14 y 33 perteneciente al Municipio Uracoa. Tres (03) pozos revelaron ausencia tanto de coliformes totales como de fecales, los cuales corresponden a las muestras 13 y 34 ubicadas en el Municipio Uracoa y la muestra 2 captada en el Municipio Sotillo.

2. Clasificación de las aguas en el estado Monagas

La clasificación de las aguas subterráneas estudiadas en el estado Monagas fue realizada atendiendo a los sólidos disueltos totales (SDT), composición química de las aguas y al Decreto N° 883 "Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos" (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

a. Clasificación de acuerdo a los sólidos disueltos totales (SDT), estado Monagas

Los valores de conductividad estuvieron entre 21 y 558 µS/cm y el intervalo de sólidos disueltos totales (SDT) oscilaron entre 17 y 255 mg/L, indicando aguas con bajo contenido iónico; es decir aguas ***Dulces*** de acuerdo al criterio de Davis y Wiest (1971). Estos autores señalan que para estas aguas la concentración de SDT es menor a 1.000 mg/L. En la figura 15, se presenta la correlación lineal de estos dos parámetros, indicando que los SDT controlan la conductividad eléctrica de las aguas estudiadas. Hem (1985), indica que la conductividad es función de la carga, tamaño y concentración de los iones en solución.

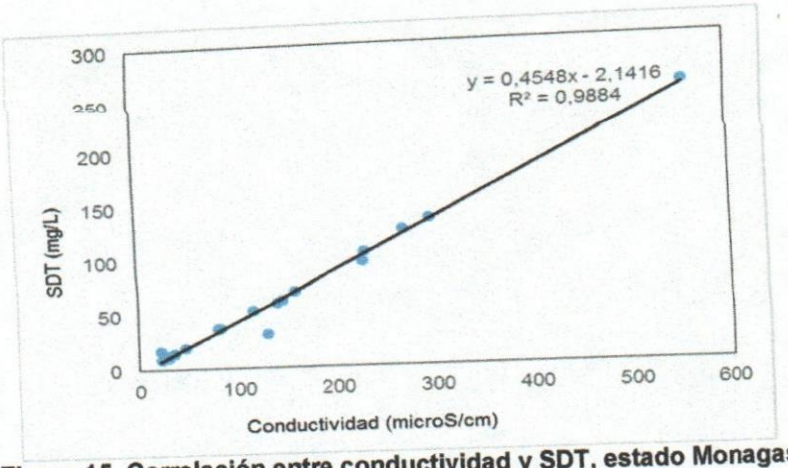


Figura 15. Correlación entre conductividad y SDT, estado Monagas

b. Clasificación de acuerdo a la composición química, estado Monagas

Con el propósito de identificar las facies hidrogeoquímicas presentes en la zona de estudio, se utilizaron el diagrama de Piper y las figuras de Stiff (Anexo D); en este sentido, fueron identificadas en el estado Monagas cinco (05) facies; a saber: sulfatada-sódica (Na^{+}-SO_4^{2-}), bicarbonatada-sódica (Na^{+}-HCO_3^{-}), clorurada-sódica (Na^{+}-Cl^{-}), clorurada-cálcica (Ca^{+2}-Cl^{-}), bicarbonatada-cálcica (Ca^{+2}-HCO_3^{-}).

En la tablas 9 se presenta por estación el tipo químico de agua; mientras que en la Figura 17 el diagrama de Piper para visualizar en conjunto los tipos hidroquímicos de aguas identificados. La facies que más está dominando esta zona de estudio es la clorurada sódica con un 55 %, seguidamente de la Bicarbonatada sódica con un 20 %, 10% para la sulfatada sódica, 10% clorurada cálcica y 5% bicarbonatada cálcica.

Flores (2006) indica que las aguas subterráneas en los acuíferos medios y profundos de las formaciones Mesa y las Piedras, presentan una relación molar Na^{+}/Cl^{-} mayor a la unidad; es decir, son del tipo clorurada sódica (Na^{+} – Cl^{-}), en su gran mayoría.

Tabla 9. Tipo hidroquímico de agua por estación en el estado Monagas

Tipo de Agua	Nro. Estación	Estación	Municipio
Sulfatada sódica	1	Barrancos de Barrancas	Sotillo
	11	Chaguaramas 1	Libertador
Bicarbonatada sódica	2	Sector Inavi	Sotillo
	9	El Gran Chaparral 2	Sotillo
	15	Hato Buena Brisa	Uracoa
	34	El Mango de Guara	
Clorurada sódica	3	Barrio Moscú	Sotillo
	4	El Triunfo 1	
	5	El Triunfo 2	
	6	San Francisco	
	7	Finca Lato	
	8	El Gran Chaparral 1	
	10	El Guayabo 1	
	13	Loma El Viento	Uracoa
	14	Hato Uracoa	
	32	La Loncera	
	33	Guara	
Clorurada cálcica	22	El Aceital 3	Libertador
	31	Bello amanecer	
Bicarbonatada cálcica	23	El Aceital 2	Libertador

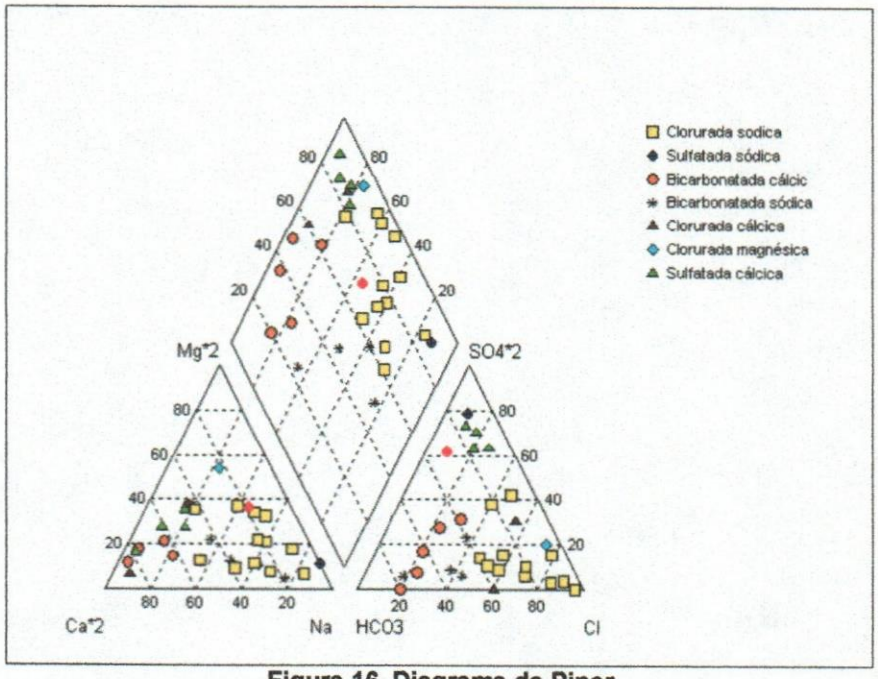


Figura 16. Diagrama de Piper

c. Clasificación de acuerdo al artículo 3 y 4 del Decreto N° 883, estado Monagas

La clasificación de acuerdo con el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) en los primeros catorce (14) pozos muestreados, se realizó sin considerar los parámetros cadmio, cromo, plata y plomo (Tabla 32, Anexo C), debido a que el límite de detección del equipo fue superior al límite normado por el Decreto. Esta clasificación podría ser acertada considerando que las actividades industriales de la zona no son fuentes importantes de estos elementos.

En este sentido, en los seis (06) pozos siguientes (Tabla 33, Anexo C), se tomaron las medidas necesarias para obtener los resultados acordes al Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

De esta manera las aguas de los veinte (20) pozos muestreados en el estado Monagas se clasificaron en:

a) Para abastecimiento humano

Diecisiete (17) pozos en la categoría sub-tipo 1C "Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional", dos pozos (02), en la categoría sub-tipo 1A, "Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes" y un pozo (01) que entra en la categoría 1B, "Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración".

b) Para uso agropecuario

La clasificación para uso agropecuario es la siguiente: trece (13) pozos en la categoría 2A "Aguas para riego de vegetales destinadas al consumo humano" y estos mismos trece (13) entran también en la categoría 2B "Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario".

Los siete (07) pozos restantes debido a que tienen concentraciones de aluminio, hierro, manganeso y organismos coliformes por encima de los límites establecidos para el tipo 2 quedarían fuera de esta clasificación.

En Anexo E se presenta unas tablas ejemplo con la comparación de todos los parámetros medidos con los límites o intervalos máximos establecidos en el Decreto N° 883.

3. Hidrogeoquímica en el estado Monagas

Con la finalidad de identificar los procesos y factores que controlan la composición química de las aguas subterráneas captadas en veinte (20) pozos al sur del estado Monagas, fueron aplicadas algunas herramientas de hidrogeoquímica tales como el diagrama de Gibbs, relaciones interelementales e índices hidrogeoquímicos.

a. Diagrama de Gibbs, estado Monagas

Basado en Gibbs (1979) y utilizando la concentración de los iones sodio, potasio, calcio, cloruro, bicarbonato y sólidos disueltos totales (SDT), determinados en las aguas subterráneas al sur del estado Monagas, se construyeron los diagramas de Gibbs, esto para identificar algunos de los factores que controlan la composición química de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

En este sentido, la proyección de las muestras de agua en las figuras 17 y 18 permite observar que los pozos se ubican dentro del brazo inferior del boomerang, lo que se corresponde con la baja salinidad de las aguas e indican que el mecanismo principal que controla la composición de las aguas al sur del estado Monagas es la precipitación atmosférica, así como el proceso interacción agua-roca.

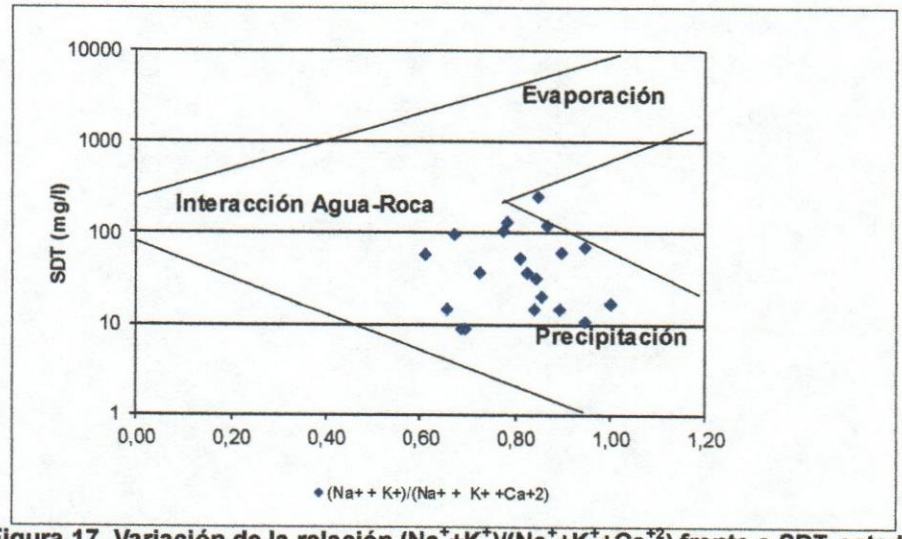


Figura 17. Variación de la relación $(Na^{+}+K^{+})/(Na^{+}+K^{+}+Ca^{+2})$ frente a SDT, estado Monagas

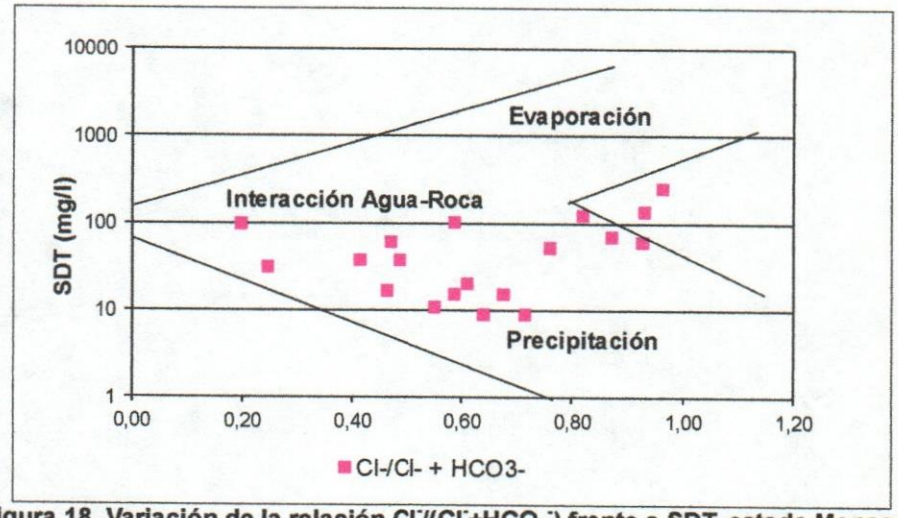


Figura 18. Variación de la relación $Cl^{-}/(Cl^{-}+HCO_3^{-})$ frente a SDT, estado Monagas

b. Relaciones interelementales, estado Monagas

Con el objetivo de conocer los procesos que controlan la composición química de las aguas en la zona de estudio del estado Monagas, se realizaron correlaciones entre diferentes pares de variables, con los valores de concentración de los iones mayoritarios obtenidos, las cuales son presentadas en las figuras de la 19 hasta la 25.

Las figuras 19 y 20 presentan la concentración de cloruro y bicarbonato frente a la conductividad. Nótese en la figura 19 que la conductividad varía a medida que aumenta la concentración de iones cloruros. En el caso del bicarbonato (figura 20) se observan la presencia de dos grupos de agua, un primer grupo menos disperso cuya conductividad varía en función de los iones bicarbonato y otro grupo cuyas variables se aprecian independientes; es decir, el ión bicarbonato se mantienen prácticamente invariable mientras que la conductividad varía. Este comportamiento parece reflejar la existencia de fuentes distintas de estos iones a las aguas subterráneas del sector bajo estudio.

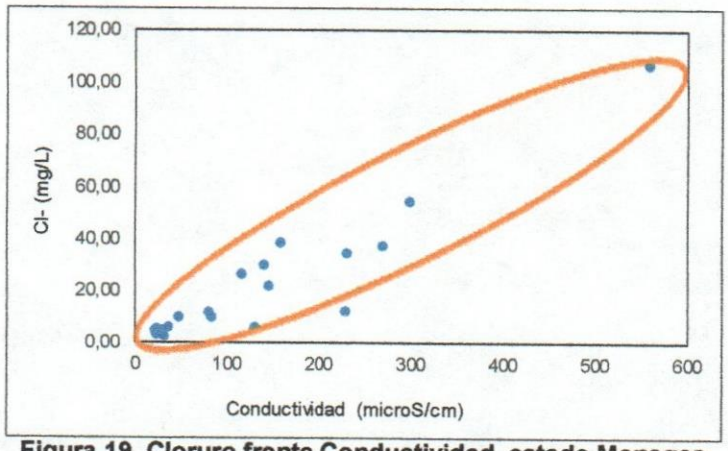


Figura 19. Cloruro frente Conductividad, estado Monagas

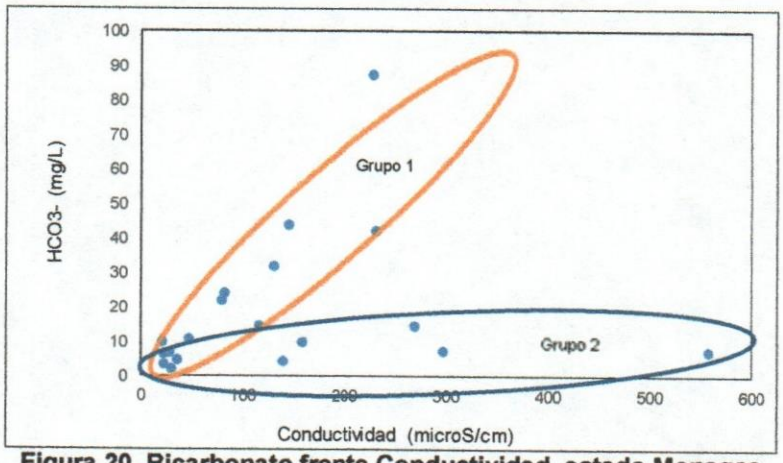


Figura 20. Bicarbonato frente Conductividad, estado Monagas

Cabe destacar que de acuerdo a la concentración de aniones, los de mayor dominio en el sector de estudio del estado Monagas, fueron los cloruros en diez (10) pozos y bicarbonatos en nueve (09) pozos el resto fue sulfato. La presencia del bicarbonato podría ser consecuencia de la disolución de dióxido de carbono atmosférico; la del cloruro y sulfato al agua de lluvia y su concentración en el suelo (Custodio y Llamas, 1976). Esto se corresponde con lo obtenido en el diagrama de Gibbs (figura 17 y 18), donde se indica que el mecanismo que controla la composición química es la precipitación atmosférica

En cuanto a los cationes mayoritarios en el estado Monagas, el sodio (17 pozos) y el potasio (03 pozos) son los de mayor dominio. En las figuras 21 y 22 se aprecia la concentración de sodio y potasio frente a la conductividad. Obsérvese que para el caso del sodio (figura 21) existe una tendencia aunque algo dispersa con la conductividad, lo que podría estar señalando de su contribución para con este parámetro. Así mismo apunta hacia la presencia de diversas fuentes de sodio hacia las aguas. Un patrón similar es notado en la figura 22, donde existe una alta dispersión, lo que permite señalar sobre la presencia de variada fuente de aporte de potasio hacia el sistema subterráneo.

Fuentes tales como los minerales feldespato potásico y plagioclasas sódica son las que podrían estar aportando las composiciones de estos cationes a estas aguas cuya dilución está siendo controlada por el dióxido de carbono atmosférico (Custodio y Llamas, 1976). Este proceso puede ser descrito a través de las siguientes reacciones.

$$2KAlSi_3O_8 + 11H_2O + 2CO_2 \longrightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+ + 2HCO_3^- + 4H_4SiO_4$$
(Ec.12)

$$2NaAlSi_3O_8 + 11H_2O + 2CO_2 \longrightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 4H_4SiO_4 + 2Na^+ + 2HCO_3^-$$
(Ec.13)

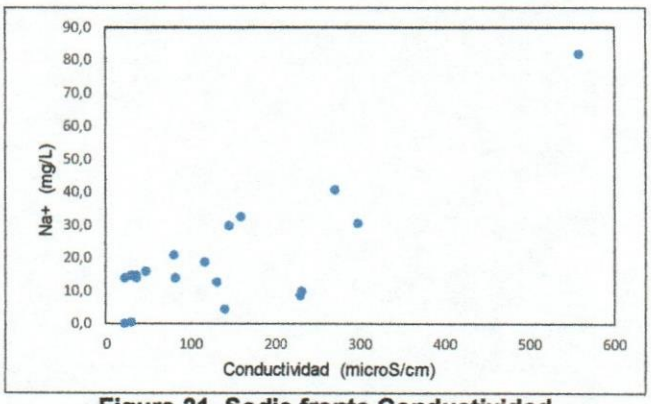


Figura 21. Sodio frente Conductividad

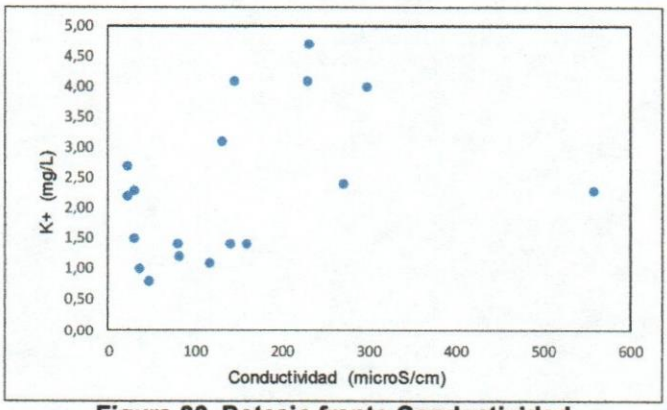


Figura 22. Potasio frente Conductividad

Por otro lado, se realizó la correlación de los iones calcio y magnesio frente al bicarbonato y de sodio en función del cloruro, respectivamente presentados en la figura 23, 24 y 25.

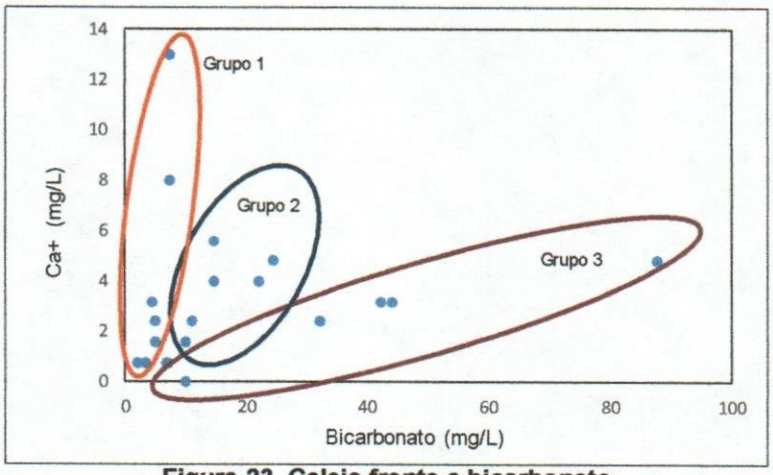


Figura 23. Calcio frente a bicarbonato

Se observa en la figura 23, tres grupos de fuentes distintas de calcio y bicarbonato a las aguas; que podrían asociarse a la disolución o hidrólisis de yeso, silicatos y aluminosilicatos presentes en formaciones geológicas tales como la Formación Mesa y Las Piedras (González de Juana y cols. (1980), PDVSA-Intevep, 2011).

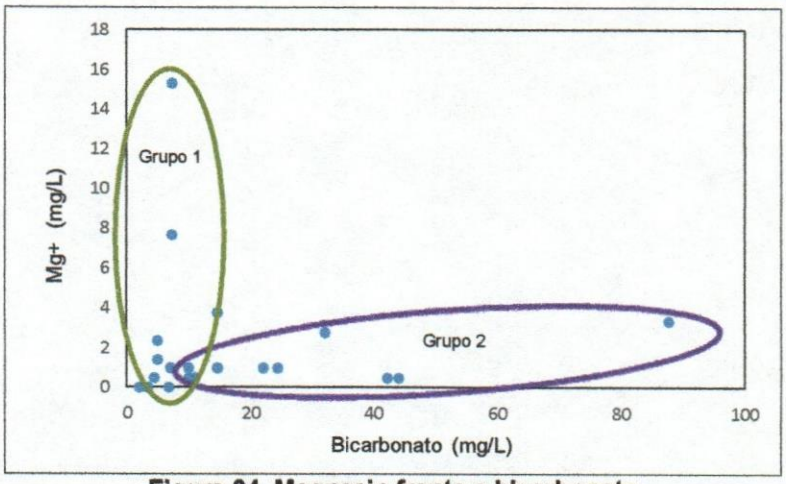


Figura 24. Magnesio frente a bicarbonato

Por su parte en la figura 24 se distinguen dos grupos a saber: grupo 1, donde varía el magnesio y el bicarbonato se mantiene invariable considerando el aporte a silicatos ferro-magnésicos y un grupo 2 con variación de bicarbonato y el magnesio se mantiene invariable, indicando que la fuente de bicarbonato está controlado por el equilibrio dióxido de carbono-agua.

Por otro lado, el hidrólogo ruso Sulin (1946) propuso una clasificación de las aguas de acuerdo a la relación Na^+/Cl^-, en este sentido las aguas meteóricas poseen una relación Na^+/Cl^- mayor a 1, mientras que para las aguas connatas una relación Na^+/Cl^- menor que 1. Se considera que los ambientes de tipo continental son característicos de aguas meteóricas y los ambiente marinos y subterráneos profundos de aguas connatas.

En este sentido, la figura 25 presenta la relación Na^+/Cl^- de las muestras estudiadas en el estado Monagas, donde se observa una pendiente

mayor que 1 señalando en términos generales que las aguas presentes en el área de estudio del estado Monagas son meteóricas.

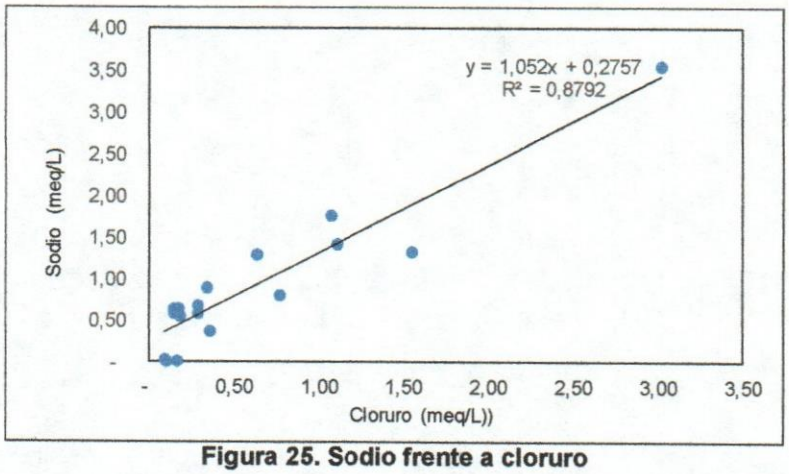


Figura 25. Sodio frente a cloruro

c. Índices hidrogeoquímicos, estado Monagas

En la tabla 10, 11 y 12 se presentan los índices de mayor interés para conocer las relaciones con el terreno del que procede el agua o la acción de fenómenos modificadores, o algunas características específicas del agua en estudio.

Tabla 10. Índices hidrogeoquímicos en el estado Monagas

Nro	Estación	r Mg/r Ca	r K/r Na	r Cl/r CO_3H
1	Barrancos de Barrancas	1,9	0,14	0,32
2	Sector Inavi	0,3	0,08	0,87
3	Barrio Moscú	1,1	0,03	4,41
4	El Triunfo 1	1,6	0,08	12,77
5	El Triunfo 2	0,4	0,03	3,13
6	San Francisco	1	0,04	2,03
7	Finca Lato	2,5	0,04	2,03
8	El Gran Chaparral 1	0,3	0,03	1,54
9	El Gran Chaparral 2	0,3	0,05	0,69
10	El Guayabo 1	2	0,02	24,77
11	Chaguaramas 1	-	0,09	0,85
13	Loma El Viento	2	0,06	1,21
14	Hato Uracoa	1	0,03	6,61

Tabla 11. Índices hidrogeoquímicos en el estado Monagas, continuación

Nro	Estación	r Mg/r Ca	r K/r Na	r Cl/r CO_3H
15	Hato Buena Brisa	0,4	0,04	0,92
22	El Aceital 3	-	3,79	1,74
23	El Aceital 2	-	2,82	1,39
31	Bello Amanecer	-	1,83	2,45
32	La Loncera	0,3	0,28	1,4
33	Guara	0,3	0,17	12,1
34	El Mango de Guara	1,2	0,27	0,24

De acuerdo a los valores obtenidos para la relación r Mg/r Ca (tabla 12), se tiene que siete (07) muestras de agua son de tipo continental, de las cuales tres (03) están ubicadas en el Municipio Sotillo, y cuatro (04) en el Municipio Uracoa; así mismo dichos valores señalan que dos (02) muestras indican la posible influencia de terrenos dolomítico en los Municipios Sotillo y Uracoa. Finalmente siete (07) muestras están relacionadas con terrenos ricos en silicato magnésico, de estas, cinco (05) se ubican en el Municipio Sotillo y dos (02) en el Municipio Uracoa.

Tabla 12. Resultados de la relación magnesio y calcio en el estado Monagas

r Mg/r Ca	Tipo	Valores de r Mg/r Ca	Estación N°	Municipio
Entre 0,3 y 1,5	Continental	0,3	2	Sotillo
		0,3	8	
		0,3	9	
		0,4	15	Uracoa
		0,3	32	
		0,3	33	
		1,2	34	
Próximos a 1	Dolomíticos	1	6	Sotillo
		1	14	Uracoa
>1	Silicatos magnésicos	1,9	1	Sotillo
		1,1	3	
		1,6	4	
		2,5	7	
		2	10	
		2	13	Uracoa
		1,2	34	

En cuanto a la relación de los iones potasio y sodio (tabla 13) se obtuvieron aguas dulces para trece (13) pozos, ocho (08) están ubicados en el Municipio Sotillo, dos (02) en el Municipio Libertador y tres (03) en el Municipio Uracoa; también se identificó la presencia de agua de origen marino en una estación ubicada en el Municipio Sotillo.

Tabla 13. Resultados de la relación potasio y sodio en el estado Monagas

r K/r Na	Tipo	Estación N°	Valores de r K/r Na	Municipio
entre 0,001 y 1 entre 0,004 y 0,3	Aguas dulces	2	0,08	Sotillo
		3	0,03	
		4	0,08	
		5	0,03	
		6	0,04	
		7	0,04	
		8	0,03	
		9	0,05	
		11	0,09	Libertador
		12	0,12	
		13	0,06	Uracoa
		14	0,03	
		15	0,04	
0,02 a 0,025	Agua marina	10	0,02	Sotillo

Finalmente, la relación de los iones cloruro-bicarbonato (tabla 14) permitió identificar la presencia de aguas del tipo continental en dieciséis (16) pozos, de estos ocho (08) están en el Municipio Sotillo, cuatro (04) en el Municipio Libertador y cuatro (04) en el Municipio Uracoa; también se detectó una muestra de agua de origen marino captada en el Municipio Sotillo.

Tabla 14. Resultados de la relación cloruro y bicarbonato en el estado Monagas

r Cl/r CO_3H	Tipo	Estación N°	Valores de r Cl/r CO3H	Municipio
entre 0,1 y 5	Agua continental	1	0,33	Sotillo
		2	0,88	
		3	4,47	
		5	3,18	
		6	2,06	
		7	2,06	
		8	1,56	
		9	0,7	
		11	0,86	Libertador
		22	1,76	
		23	1,41	
		31	2,49	
		13	1,23	Uracoa
		15	0,94	
		32	1,42	
		34	0,25	
entre 20 y 50	Agua de mar	10	25,12	Sotillo

En general, se puede concluir que las aguas subterráneas estudiadas en el área del estado Monagas son del tipo continental, correspondiendo esto a la unidad estratigráfica del área de estudio, que es la Formación Mesa de origen continental (Pérez, 1983).

Por otro lado, existe una muestra de agua de origen marino ubicada en el Municipio Sotillo, entendiendo de esta manera el alto valor de la conductividad (558 µS/cm) con respecto a las otras muestras, siendo esto propio de la Formación Las Piedras ya que las aguas contenidas en esta Formación son de tipo salobre (Pérez, 1983).

4. Recomendaciones de uso y tratamiento, estado Monagas

Seguidamente son presentados las recomendaciones de uso y posible tratamiento del agua, destinada a abastecimiento humano y agrícola al sur del estado Monagas.

a. Aguas destinadas a abastecimiento humano

De acuerdo a lo establecido en la Gaceta N° 36.395 "Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable", para alcanzar la calidad sanitaria de agua tipo potable, será necesario tratamiento para la remoción de aluminio, organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales, color, hierro, turbiedad, manganeso y ajuste del pH. En tabla 15 y 16 se muestra por estación los parámetros que no cumple con lo establecido en esta norma. El hierro está presente en concentraciones que varían entre 1,1 mg/L y 9 mg/L y lo establecido en la Norma es de 1,0 mg/L.

La concentración de aluminio se detectó en un intervalo de 0,22 a 2,0 mg/L y lo establecido en la Norma es de 0,2 mg/L. Para los organismos coliformes totales y fecales, su variación está entre 1,0 NMP/100 ml a valores mayores de 2.419,6 NMP/100 ml, no siendo aptas para consumo ya que de acuerdo a la Norma estos organismos deben estar ausentes.

En cuanto al pH se obtuvieron valores en un rango entre 5,2 a 7,2 unidades y para el cumplimiento con lo establecido en la Norma se debe tener un pH de 9,0 unidades. Se detectó color en un intervalo de 43 a 182 U Pt-Co y para la turbiedad una estación con un valor de 24, 1 UNT, de acuerdo a lo establecido en la Norma deben cumplir con un valor de 15 U Pt-Co y 5 UNT respectivamente.

Tabla 15. Parámetros que están sobre los límites estipulados en la Gaceta N° 36.395, estado Monagas

Pozo	Estación	Parámetros fuera de norma	Gaceta N° 36.395*
1	Barrancos de Barrancas	Aluminio = 0,6 mg/l	0,2
		Hierro = 9,0 mg/l	1,0
		pH = 6,1	9,0
2	Sector INAVI	Hierro = 1,7 mg/l	1,0
		pH = 7,2	9,0
3	Barrio Moscú	Aluminio = 0,3 mg/l	0,2
		Hierro = 1,3 mg/l	1,0
		Organismos coliformes totales = 1 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 7,1	9,0
4	El Triunfo 1	Aluminio = 2,0 mg/l	0,2
		Color = 182 U Pt-Co	15,0
		Hierro = 1,1 mg/l	1,0
		pH = 5,6	9,0
		Turbiedad = 24,1 UNT	5,0
5	El Triunfo 2	Aluminio = 0,3 mg/l	0,2
		Organismos coliformes totales = 172 NMP/100 ml	Ausente
		Organismos coliformes fecales = 2 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 5,85	9,0
6	San Francisco	pH = 5,2	9,0
		Color = 43 U Pt-Co	15,0
		Organismos coliformes totales = 13,4 NMP/100 ml	Ausente
7	Finca Lato	Organismos coliformes totales = 5,2 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 5,3	9,0
8	El Gran Chaparral 1	Organismos coliformes totales = 52 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 5,25	9,0
9	El Gran Chaparral 2	Organismos coliformes totales >2.419,6 NMP/100 ml	Ausente
		Organismos coliformes fecales = 7,5 NMP/100 ml	Ausente
		Color = 30 U Pt-Co	15,0
		pH = 6,0	9,0
		Turbiedad = 5,36 UNT	5,0
10	El Guayabo 1	Organismos coliformes totales = 160,7 NMP/100 ml	Ausente
		Organismos coliformes fecales= 9,7 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 5,4	9,0
11	Chaguaramas 1	Organismos coliformes totales = 2,0 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 6,58	9,0

Tabla 16. Parámetros que están sobre los límites estipulados en la Gaceta N° 36.395, estado Monagas, continuación

Pozo	Estación	Parámetros fuera de norma	Gaceta N° 36.395*
13	Loma El Viento	Aluminio = 0,22 mg/l	0,2
		pH = 6,07	9,0
14	Hato Uracoa	Organismos coliformes totales >2.419,6 NMP/100 ml	Ausente
		Organismos coliformes fecales >2.419,6 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 5,35	9,0
15	Hato Buena Brisa	Organismos coliformes totales = 1,0 NMP/100 ml	Ausente
		Color = 160 U Pt-Co	15
		Hierro = 1,3 mg/l	1,0
		pH = 5,71	9,0
23	El Aceital 2	pH = 5,22	9,0
31	Bello Amanecer	pH = 5,57	9,0
32	La Loncera	Aluminio = 0,4 mg/l	0,2
		Color = 145 U Pt-Co	15
33	Guara	Organismos coliformes totales >2.419,6 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 5,26	9,0
34	El Mango de Guara	Aluminio = 0,3 mg/l	0,2
		Hierro = 2,65 mg/l	1,0
		Manganeso = 1,28 mg/l	0,5

Para el caso de aquellas aguas que contienen concentración de hierro y manganeso fuera del límite establecido, existe el método de oxidación-filtración para su remoción, el mismo se puede realizar a través de dos alternativas; Oxidación-filtración sin reactivos químicos y Oxidación-filtración con reactivos químicos. Hasta donde se sabe, los humanos no son afectados por beber aguas con hierro y manganeso (Sawyer, 2000), sin embargo su remoción es importante por sus inconveniencias de carácter organoléptico.

1. Oxidación-filtración sin reactivos químico

Esto se realiza a través del proceso de aireación-filtración el cual se recomienda para aguas con alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L) con el fin de disminuir los costos en reactivos. El equipo usado en

este proceso incluye comúnmente un aireador, un tanque de retención y filtros. El oxígeno de la atmósfera reacciona con la forma soluble de hierro y manganeso del agua cruda para producir óxidos insolubles, el cual es separado mediante la sedimentación o filtración (Sommerrfeld, 2000).

2. Oxidación-filtración con reactivos químico

Según Sommerrfeld (2000) el proceso de oxidación-filtración consiste normalmente de un sistema de dosificación de productos químicos y filtros. Algunas veces se requiere un tanque de retención y un sistema de ajuste de pH con hidróxido de sodio, hidróxido de calcio o cal hidratada o carbonato de sodio. Como agentes oxidantes pueden usarse gas cloro o hipoclorito.

De acuerdo a lo expuesto, para el caso en estudio se recomendaría como tratamiento de las aguas para la remoción de hierro y manganeso el proceso aireación y filtración por su bajo costo, para las muestras captadas en los pozos 1, 2, 3, 4, ubicados en el Municipio Sotillo y estación 15 y 34, en el Municipio Uracoa

Para el caso donde las aguas presentan aluminio, se observan valores no muy altos con respecto a los estipulados en la norma. La Organización Mundial de la Salud no clasifica el aluminio como una sustancia química de influencia significativa para la salud. Por otra parte, la cantidad de aluminio que el hombre puede tomar con el agua de bebida representa tan solo un 1-3 % del aporte total diario, que procede en su mayor proporción de los alimentos ingeridos.

En este sentido, es posible que no sea necesaria la remoción de aluminio en estos pozos de agua ya que sus valores no son tan altos, sin embargo se recomienda llevar un control y realizar un estudio con mayor precisión.

los pozos 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 22, 23, son recomendadas para ser usadas directamente para riego ya que el valor de los parámetros se encuentran por debajo de los límites establecidos en el Decreto, mientras que el agua de los pozos 1, 2, 3, 4, 9, 14, 15, no se recomiendan dentro de las sub-tipo 2A ya que los parámetros hierro, aluminio, manganeso, organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales están fuera de los límites establecidos en el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

De manera complementaria, para evaluar la aptitud del agua para riego en general y recomendar su uso, se consideraron también los valores de salinidad, sodicidad, bicarbonatos y contenido de boro.

a) Salinidad

La salinidad se expresó con la conductividad eléctrica medida y de acuerdo al Tabla 30 (Anexo B), se realizó la clasificación del agua según su salinidad (tabla 17); en este sentido, las aguas de diecisiete (17) de los pozos estudiados en el estado Monagas presentan salinidad baja (C1) (conductividad entre 0 a 250 µmhos/ cm) lo que indica que pueden usarse para riego en la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Los tres (03) pozos restantes presentan salinidad media (C2) (conductividad entre 250 a 750 µmhos/cm) indicando que esta agua puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado.

b) Sodicidad

Con el cálculo de la relación de adsorción de sodio (RAS), se clasificó el agua de acuerdo a su sodicidad (tabla 17), obteniendo como resultado que el agua de los veinte (20) pozos estudiados en el estado Monagas son baja en sodio (S1) (RAS de 0 a 10), por lo que puede usarse en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles,

los pozos 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 22, 23, son recomendadas para ser usadas directamente para riego ya que el valor de los parámetros se encuentran por debajo de los límites establecidos en el Decreto, mientras que el agua de los pozos 1, 2, 3, 4, 9, 14, 15, no se recomiendan dentro de las sub-tipo 2A ya que los parámetros hierro, aluminio, manganeso, organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales están fuera de los límites establecidos en el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

De manera complementaria, para evaluar la aptitud del agua para riego en general y recomendar su uso, se consideraron también los valores de salinidad, sodicidad, bicarbonatos y contenido de boro.

a) Salinidad

La salinidad se expresó con la conductividad eléctrica medida y de acuerdo al Tabla 30 (Anexo B), se realizó la clasificación del agua según su salinidad (tabla 17); en este sentido, las aguas de diecisiete (17) de los pozos estudiados en el estado Monagas presentan salinidad baja (C1) (conductividad entre 0 a 250 µmhos/ cm) lo que indica que pueden usarse para riego en la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Los tres (03) pozos restantes presentan salinidad media (C2) (conductividad entre 250 a 750 µmhos/cm) indicando que esta agua puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado.

b) Sodicidad

Con el cálculo de la relación de adsorción de sodio (RAS), se clasificó el agua de acuerdo a su sodicidad (tabla 17), obteniendo como resultado que el agua de los veinte (20) pozos estudiados en el estado Monagas son baja en sodio (S1) (RAS de 0 a 10), por lo que puede usarse en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles,

como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

c) Bicarbonato

El cálculo del carbonato de sodio residual (CSR) arrojó como resultado valores menores a 1,25 lo que indica que en relación a la concentración de bicarbonatos, estas aguas se consideran aptas para riego.

d) Toxicidad

El valor del boro, cloro y sodio se determinaron en laboratorio y las concentraciones obtenidas fueron menores a los valores estipulados en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), para aguas sub.-tipo 2A, razón por la cual se consideran aguas no tóxicas para los cultivos.

Tabla 17. Clasificación de acuerdo a la salinidad, sodicidad, RAS, CSR, estado Monagas

Pozo	RAS	Sodicidad	Conductividad	Salinidad	CSR
1	1,34	Baja (S1)	130,00	Baja (C1)	0,17
2	4,12	Baja (S1)	145,00	Baja (C1)	0,52
3	3,26	Baja (S1)	270,00	Media (C2)	-0,36
4	1,87	Baja (S1)	298,00	Media (C2)	-0,92
5	2,21	Baja (S1)	116,00	Baja (C1)	-0,04
6	1,76	Baja (S1)	36,00	Baja (C1)	-0,16
7	1,74	Baja (S1)	36,00	Baja (C1)	-0,2
8	2,46	Baja (S1)	47,00	Baja (C1)	0,02
9	1,52	Baja (S1)	82,00	Baja (C1)	0,08
10	3,63	Baja (S1)	558,00	Media (C2)	-1,81
11	4,3	Baja (S1)	21,00	Baja (C1)	0,12
13	2,66	Baja (S1)	29,00	Baja (C1)	-0,01
14	5,07	Baja (S1)	158,00	Baja (C1)	0
15	2,44	Baja (S1)	80,00	Baja (C1)	0,08
22	0,129	Baja (S1)	21,00	Baja (C1)	0,016
23	0,141	Baja (S1)	36,00	Baja (C1)	0,07
31	0,228	Baja (S1)	22,00	Baja (C1)	-0,006
32	1,382	Baja (S1)	231,00	Baja (C1)	0,492
33	0,681	Baja (S1)	140,00	Baja (C1)	-0,13
34	0,752	Baja (S1)	229,00	Baja (C1)	0,916

De acuerdo con lo antes expuesto, con respecto a estos cuatro (04) parámetros, las aguas de los veinte (20) pozos estudiados en el estado Monagas en general son aptas para riego.

c. De acuerdo al Índice de Langelier, estado Monagas

Para conocer la capacidad depositante y corrosiva del agua, se calculó el Índice de Langelier. Con este propósito se determinó la alcalinidad y el contenido de calcio; es importante señalar que la alcalinidad en estos pozos se debe sólo a bicarbonatos dado que su pH siempre fue menor a 8,3 unidades.

En tabla 18 son mostrados los valores del Índice de Langelier (IL) calculados, nótese que diecisiete (17) de los pozos tienen valores IL menores a cero, lo que indica que son aguas con tendencias disolventes o corrosivas; dos (02) pozos cuyos valores mayores de cero indican un agua precipitante; es decir, que favorece la formación de depósitos cálcicos y magnésicos y uno (01) que no le fue posible su determinación.

De acuerdo con la relación de Lamont (Tabla 8) cuatro (04) pozos estudiados se caracterizan por un grado de ataque ligero, correspondiente a las muestras 22, 23 y 31, tomadas en el Municipio Libertador y la muestra 33 del Municipio Uracoa; dos pozos (02) con grado moderado, perteneciente a las muestras 2 y 3 captadas en el Municipio Sotillo, cuatro (04) con un grado apreciable de ataque concerniente a las estaciones 1, 5, 9 ubicadas en Municipio Sotillo y la número 15 del Municipio Uracoa. Por último, siete (07) pozos cuyas aguas provocarían un grado severo de ataque disolvente, referidas a las muestras 4, 6, 7, 8, 10 correspondientes al Municipio Sotillo y las muestras 13 y 14 ubicadas en el Municipio Uracoa.

Tabla 18. Valores del Índice de Langelier, estado Monagas

Pozo	Estación	Alcalinidad (mg $CaCO_3$/l)	Calcio (mg/l)	pH	IL
1	Barrancos de Barrancas	26	2,4	6,1	-3,41
2	Sector Inavi	36	3,2	7,2	-2,04
3	Barrio Moscú	12	5,6	7,1	-2,37
4	El Triunfo 1	6	8	5,6	-4,02
5	El Triunfo 2	12	4	5,85	-3,77
6	San Francisco	4	2,4	5,2	-5,12
7	Finca Lato	4	1,6	5,3	-5,19
8	El Gran Chaparral 1	8	2,4	5,25	-4,77
9	El Gran Chaparral 2	20	4,8	6,06	-3,26
10	El Guayabo 1	6	13	5,4	-4,01
11	Chaguaramas 1	8	0	6,58	-
13	Loma El Viento	6	0,8	6,07	-4,55
14	Hato Uracoa	8	1,6	5,35	-4,84
15	Hato Buena Brisa	18	4	5,71	-3,73
22	El Aceital 3	2,8	0,8	5,82	-0,432
23	El Aceital 2	5,5	0,8	5,22	-0,739
31	Bello Amanecer	1,7	0,8	5,57	-0,899
32	La Loncera	34,6	3,2	6,43	1,872
33	Guara	3,5	3,2	5,26	-0,293
34	El Mango de Guara	71,8	4,8	7,47	3,405

C. ESTADO ANZOÁTEGUI

A continuación se presenta la caracterización fisicoquímica y bacteriológica, clasificación de las aguas, hidrogeoquímica y recomendaciones de uso, correspondiente al estado Anzoátegui específicamente en el Municipio Independencia.

1. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica, estado Anzoátegui

Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y bacteriológica realizada en los catorce (14) pozos del estado Anzoátegui, son presentados en el Anexo C. Es importante señalar que dicha

caracterización es realizada mediante la construcción de cajas gráficas, esto a fin de visualizar el valor correspondiente a la mediana y a los datos considerados como anómalos. Este carácter descriptivo puede ser usado para entender la tendencia actual desde el punto de vista geográfico de los distintos parámetros medidos y determinados.

Por su parte, las características estructurales de los pozos en el estado Anzoátegui indican una profundidad que oscila entre 13 y 108 metros, donde el 86% de los pozos son del tipo perforado y el 14% son aljibe con bomba.

a. Parámetros fisicoquímicos en el estado Anzoátegui

De acuerdo a las cajas gráficas, la mediana de la zona de estudio en el estado Anzoátegui para la conductividad (figura 26a) es de 52,5 µS/cm con un mínimo de 18 µS/cm y un máximo de 138 µS/cm con un valor atípico de 351 µS/cm; dicho valor atípico corresponde a la muestra 18 captada en el Municipio Independencia. Por su parte los valores de sólidos disueltos totales (SDT) (figura 26b) indican un mínimo de 9,0 mg/L y un máximo de 58 mg/L con un valor atípicos de 149 mg/L y una mediana de 22,5 mg/L, este valores atípicos corresponden a las muestras 18, ubicado en el Municipio Independencia. En general, estos valores indican bajo contenido iónico (SDT < 1.000 mg/L) y de acuerdo a la clasificación de Davis y Wiest (1971) son consideradas aguas dulces.

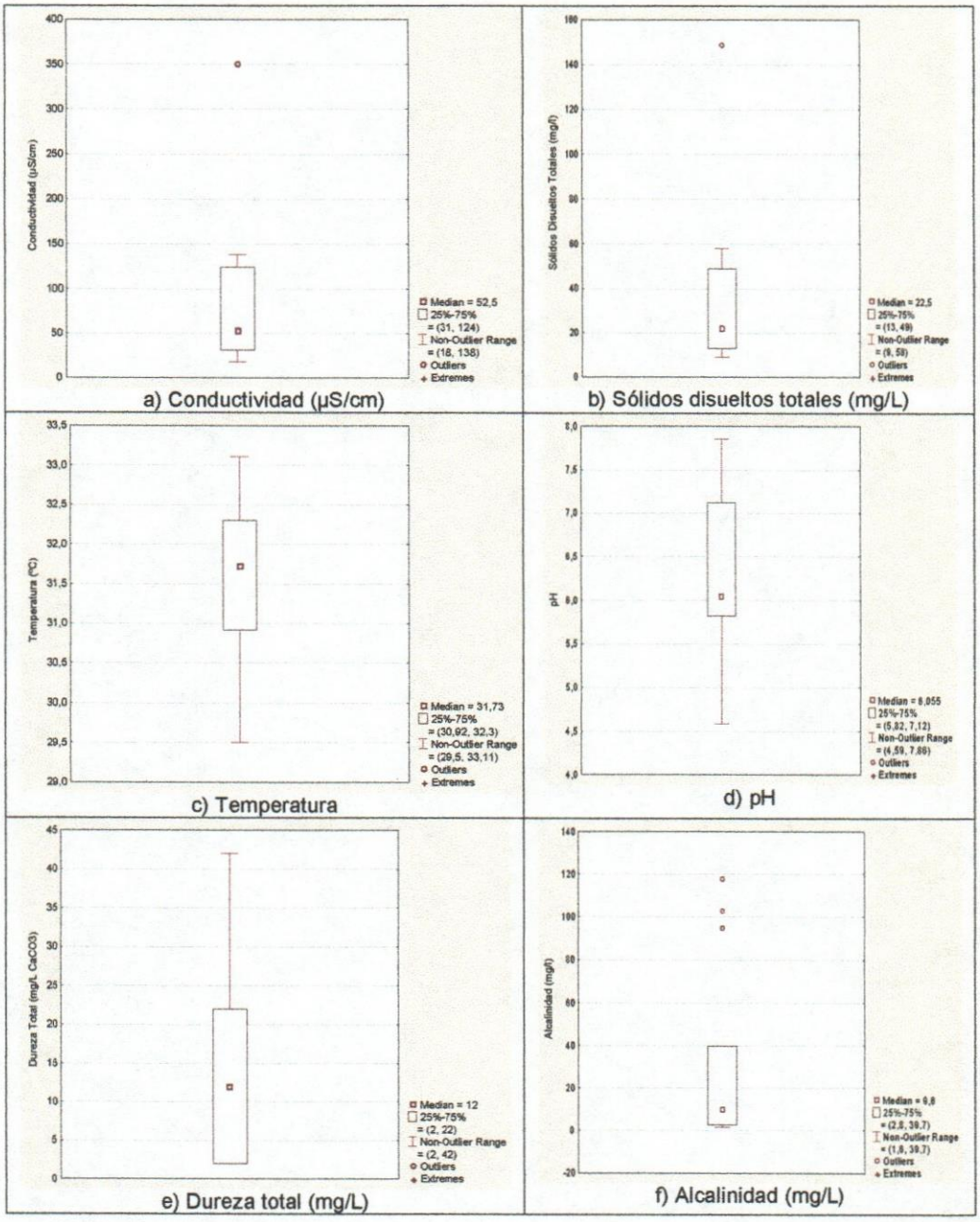
La temperatura como se observa en figura 26c, presentó un valor máximo de 33,11 °C, un mínimo de 29,5 °C, una mediana de 31,73 °C, correspondiendo este al valor de fondo para esta área de estudio. Mientras que el pH (figura 15d) tiene un valor máximo de 7,86 unidades, un mínimo de 4,59 unidades y una mediana de 6,5 unidades, por lo que de acuerdo a la escala empleada por Yanes (1997), estos valores indican la existencia de aguas ligeramente ácidas (6,4 – 7,1) y el valor máximo indica la presencia de aguas ligeramente alcalina (7,1 – 8,2), Estos

valores podría ser consecuencia del equilibrio del agua de lluvia con el dióxido de carbono. Davis y Wiest (1971) señala que la mayor parte del agua subterránea tiene el pH comprendido entre 5,0 y 8,0; y el mismo está controlado en la mayoría de los casos, por el sistema dióxido de carbono-bicarbonato-carbonato.

En lo que respecta a la dureza total (figura 26e) se obtuvo un valor mínimo de 2 mg/L, un máximo de 42 mg/L y una mediana de 12 mg/L. Estos resultados sugieren que son aguas suaves o blandas ya que la mayoría están en un intervalo de 0-75 mg $CaCO_3$/L (Ferrara y cols., 2001).

La alcalinidad (figura 26f) presentó un valor mínimo de 1,6 mg/L, un máximo de 39,7 mg/L y una mediana de 9,6 mg/L, con un valor atípico de 95,2 mg/L correspondientes a las muestras 18 captada en el Municipio Independencia. Los valores obtenidos parecen estar asociados al aporte atmosférico a través del equilibrio dióxido de carbono-agua, no descartando la hidrólisis de silicatos, aluminosilicatos y carbonatos.

Para el color verdadero (figura 26g) se obtuvo un mínimo de 1 UCV y un máximo de 98 UCV, con una mediana de 25 UCV. Para la turbiedad (figura 26h) un mínimo de 0,6 NTU, un máximo de 5,2 NTU y una mediana de 1,85 NTU, con dos (02) valores extremos de 30,2 NTU y 32,98 NTU, correspondientes a las muestras 26 y 19 ubicadas en el Municipio Independencia. Los mayores valores están asociados a una mayor presencia de material articulado tamaño arcilla o coloidal.



a) Conductividad (µS/cm)

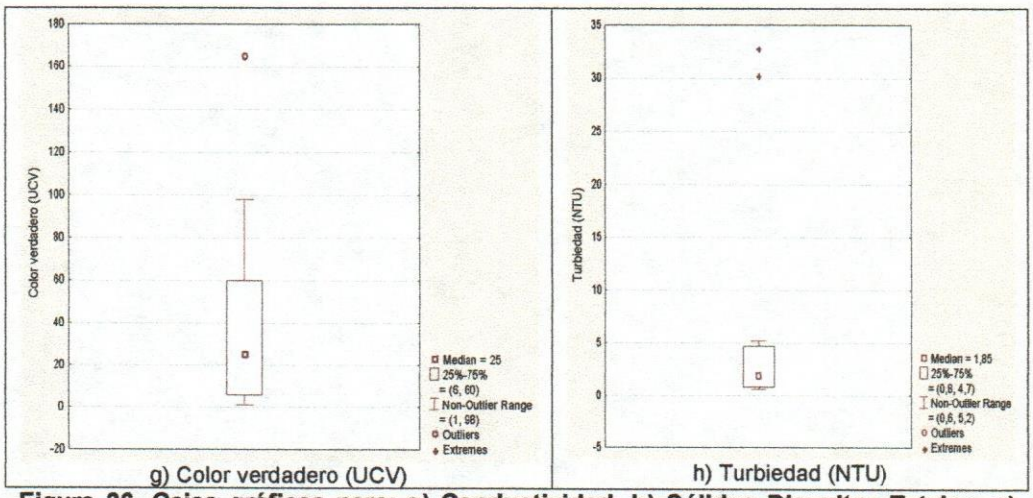
b) Sólidos disueltos totales (mg/L)

c) Temperatura

d) pH

e) Dureza total (mg/L)

f) Alcalinidad (mg/L)



g) Color verdadero (UCV) h) Turbiedad (NTU)

Figura 26. Cajas gráficas para: a) Conductividad, b) Sólidos Disueltos Totales, c) Temperatura, d) pH, e) Dureza Total, f) Alcalinidad, g) Color y h) Turbiedad, estado Anzoátegui.

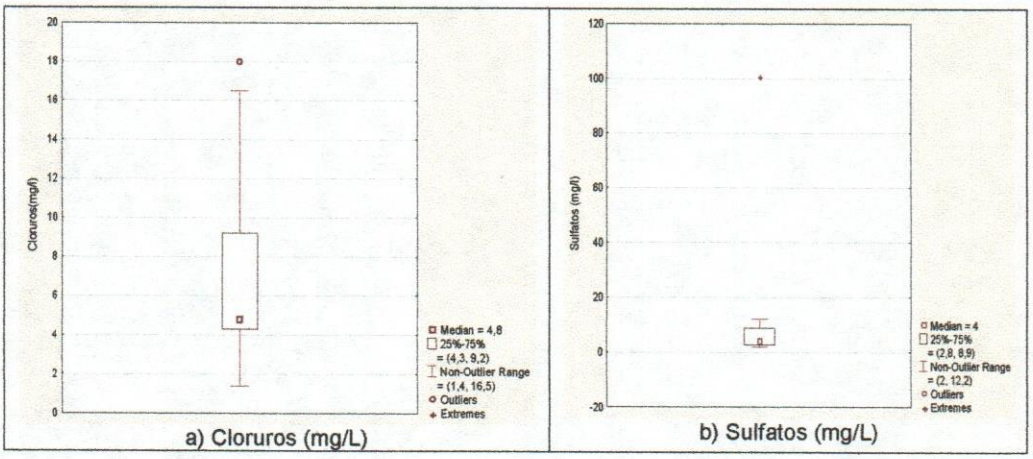
b. Especies químicas inorgánicas en el estado Anzoátegui

Las cajas gráficas construidas para las especies químicas inorgánicas en el estado Anzoátegui son mostradas en las figura 27. En este sentido, la concentración de cloruro (figura 27a) presenta una mediana de 4,8 mg/L, con un mínimo de 1,4 mg/L y un máximo de 16,5 mg/L, con valor atípico de 18 mg/L, correspondientes a la muestra 27. Mientras que el sulfato (figura 27b) se tiene un mínimo de 2,0 mg/L y un máximo de 12,2 mg/L.

El fluoruro como se observa en figura 27c, presentó un valor mínimo de 0,1 mg/L, un máximo de 0,41 mg/L y una mediana de 0,29 mg/L; estos valores de acuerdo a Hem (1985) se consideran bajos ya que las concentraciones de fluoruro presentada comúnmente en las aguas naturales son menores que 1,0 mg/L. Por su parte, los ortofosfatos (figura 27d) arrojaron como resultado un mínimo de 0,06 mg/L, un máximo de 0,4 mg/L y un valor extremo de 1,8 mg/L, asociados a la muestra 21. Es de hacer notar que dichos valores, indican que no existe contaminación antrópica con respecto a este compuesto.

Para los nitratos (figura 27e), se obtuvo un valor mínimo de 0,1 mg/L, un máximo de 1,3 mg/L y una mediana de 0,9 mg/L, estos valores se asocian al proceso de decaimiento natural de la materia orgánica vegetal con posibles aportes pocos significativos de los desechos orgánicos asociados a actividades pecuarias. No se detectó la presencia de nitritos, cianuro y boro en las muestras de agua captadas en los catorce (14) pozos estudiados en el estado Anzoátegui.

En la figura 27f se puede observar que los valores de concentración de sílice disuelta arrojaron un máximo de 14,96 mg/L, un mínimo de 7,4 mg/L y una mediana de 10,07 mg/L, con un valor atípico de 27,49 valor correspondiente a la muestras 21 ubicadas en áreas donde litológicamente están presentes formaciones constituidas por arenas confinadas dentro de arcillas y por lutitas cuyo contenido mineralógico son los cuarzos feldespato y micas, cuyo proceso de hidrólisis favorece la puesta en solución de sílice.



a) Cloruros (mg/L) b) Sulfatos (mg/L)

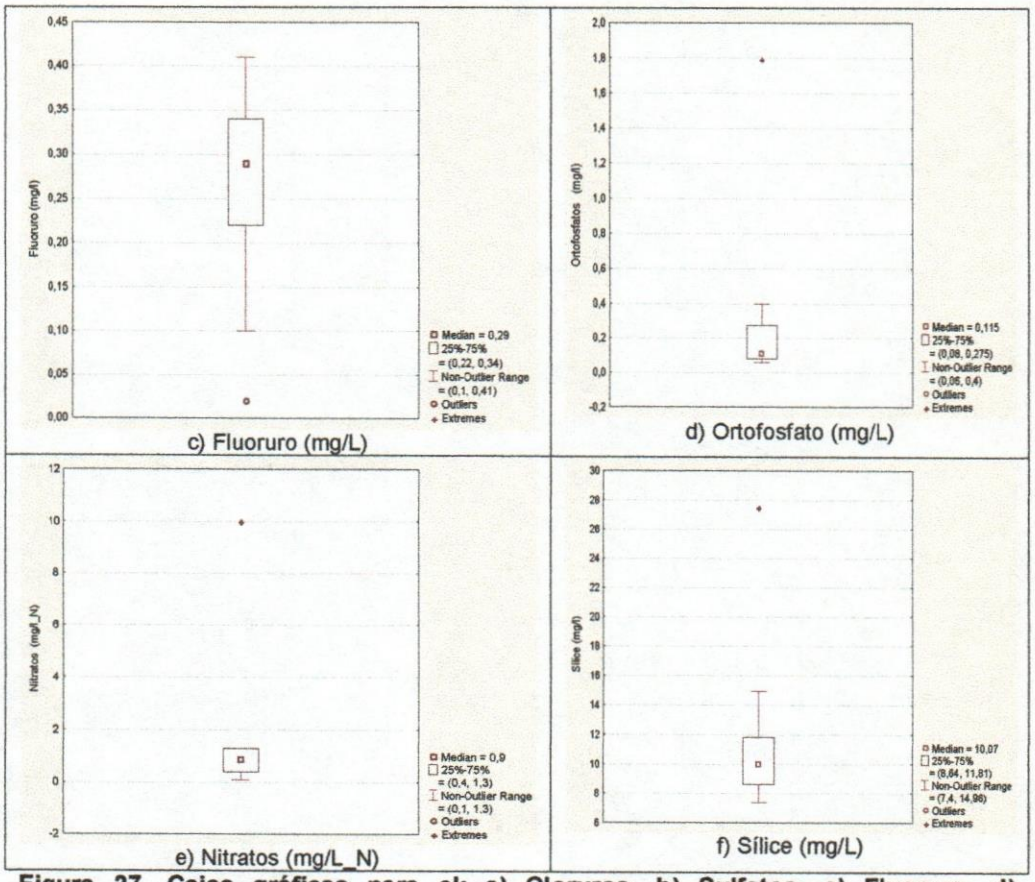


Figura 27. Cajas gráficas para el: a) Cloruros, b) Sulfatos, c) Fluoruro, d) Ortofosfato, e) Nitratos, y f) Sílice, estado Anzoátegui.

c. Parámetros orgánicos y biocidas en el estado Anzoátegui

En los catorce (14) pozos estudiados en el estado Monagas no se detectó presencia de los biocidas organoclorados, organofosforados y carbamatos; así como aceites, grasas e hidrocarburos, ni fenoles. Esto permite señalar que por lo menos para estos compuestos, no existe contaminación antrópica asociada a las actividades humanas desarrolladas en esta área de estudio.

d. Parámetros metálicos y no metálicos en el estado Anzoátegui

Las cajas gráficas construidas para las especies químicas calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, aluminio, manganeso, zinc y bario en el estado Anzoátegui son mostradas en la figura 28. En este sentido, para el calcio (figura 28a) se obtuvo un valor mínimo de 0,8 mg/L, un máximo de 13,6 mg/L y una mediana de 2,4 mg/L, mientras que para el magnesio (figura 28b) se tiene un mínimo de 0,0 mg/L, un máximo de 1,92 mg/L, y una mediana de 0,72 mg/L, con un valor atípico de 4,32 mg/L, asociado a las muestra 17.

En lo que respecta al potasio (figura 28c), su caja gráfica arrojó un valor mínimo de 2,2 mg/L, un máximo de 5,1 mg/L y una mediana de 2,95 mg/L, valores de concentraciones considerados bajo ya que el contenido de potasio en las aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/L (Hem, 1985). En cuanto al sodio (figura 28d), se obtuvo un mínimo de 0,44 mg/L, un máximo de 4,7 mg/L, y una mediana de 1,14 mg/L, con dos valores extremos de 11 mg/L y 15,12 mg/L. Esto se corresponde a las muestras 12 y 18.

Para la concentración de hierro, la caja gráfica (figura 28e) permitió detectar una concentración de 0,1 mg/L como valor mínimo, un máximo de 1,2 mg/L y una mediana 0,3 mg/L, con un valor extremo de 3,6 mg/L, correspondiente a la muestra 26. Es de resaltar que estos valores máximos y extremos, de acuerdo al Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), son considerados altos para uso humano. De acuerdo a Hem (1985) las aguas subterráneas con un pH entre 6 y 8 pueden tener hasta 50.000 µg/L de hierro.

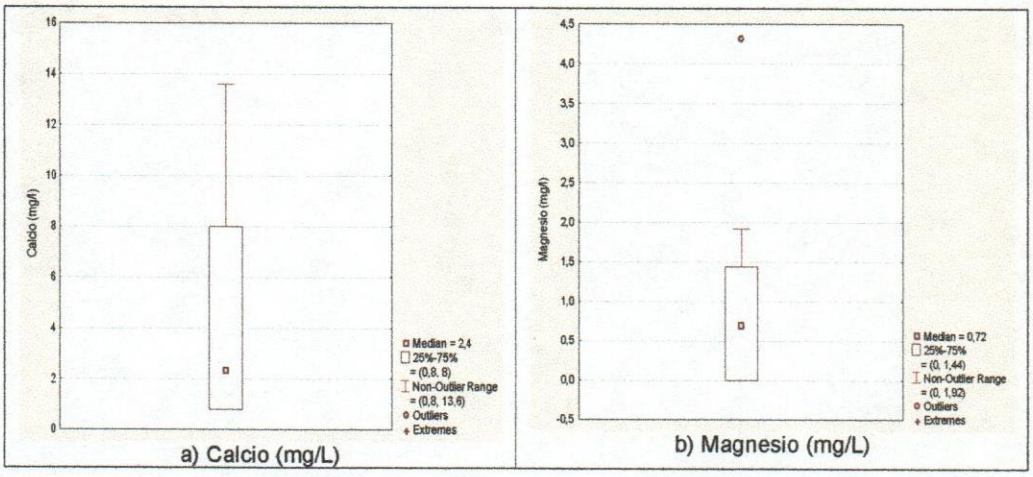
Este aporte de hierro al agua subterránea puede correlacionarse con litologías Terciarias y Cuaternarias de rocas sedimentarias,

pertenecientes a la Formación Mesa, la cual se caracteriza por arenas de grano grueso y grava con cemento ferruginoso cementadas y muy duras (González de Juana, 1980), lo que origina una contaminación del acuífero de origen natural.

El aluminio (figura 28f) presenta valores de 0,0 mg/L como valor mínimo y 0,6 mg/L como valor máximo, una mediana de 0,1 mg/L. El bario (figura 28g) indicó un valor mínimo de 0,02 mg/L, un máximo de 0,12 mg/L, una mediana de 0,03 mg/L y un valor atípico de 0,25 mg/L correspondiente a la muestra 17.

En cuanto al manganeso, se obtuvieron valores bajos que varían de 0,01 a 0,04 mg/L. De igual manera para el zinc, se obtuvo una variación entre 0,1 a 5,8 mg/L.

En los catorce (14) pozos estudiados no se detectó la presencia de arsénico, cadmio, cobre, litio, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio y vanadio.



a) Calcio (mg/L) b) Magnesio (mg/L)

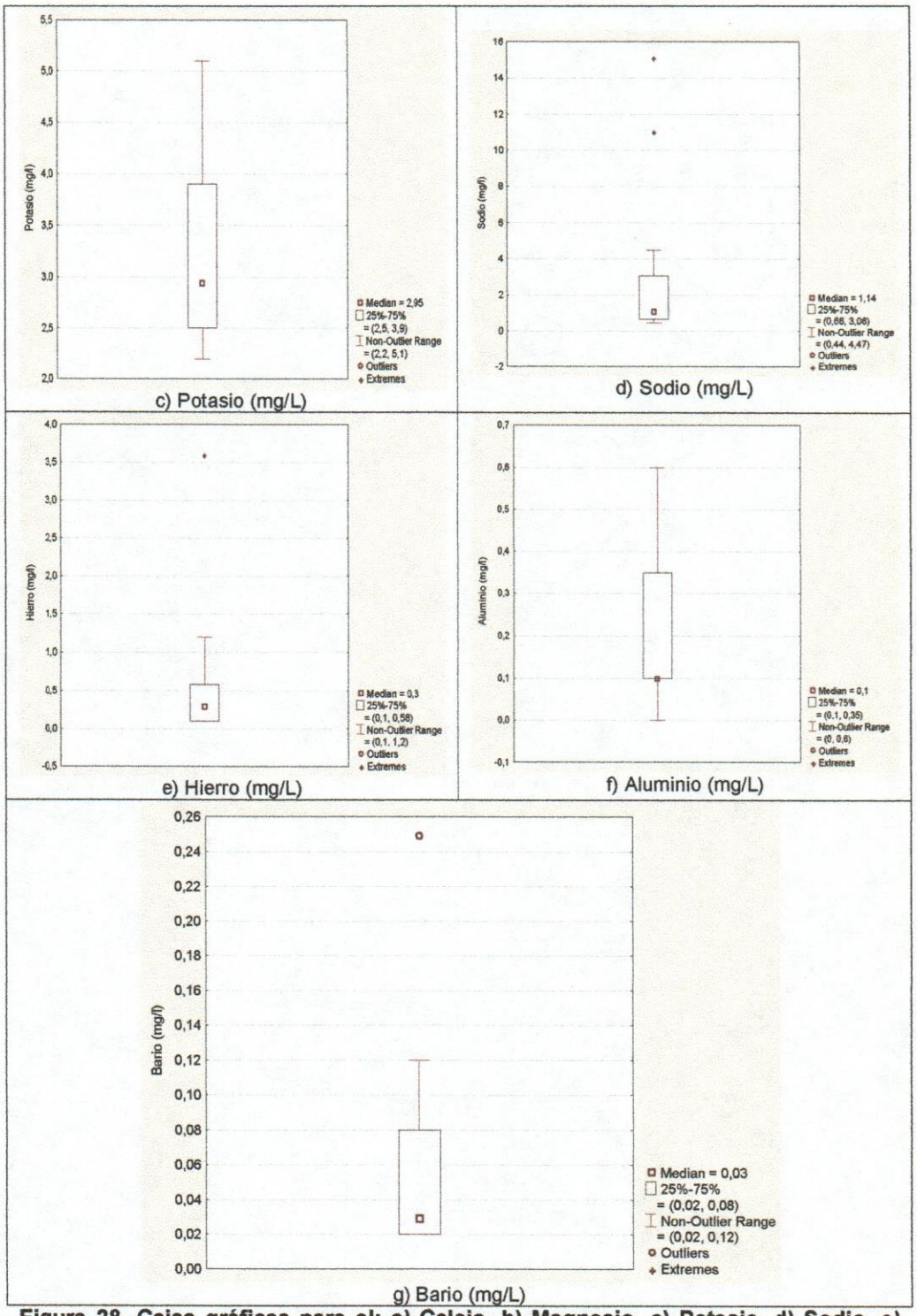


Figura 28. Cajas gráficas para el: a) Calcio, b) Magnesio, c) Potasio, d) Sodio, e) Hierro, f) Aluminio, y g) Bario, estado Anzoátegui.

e. Parámetros microbiológicos en el estado Anzoátegui

En lo que respecta a los resultados obtenidos a través del estudio microbiológico en seis (06) muestras de agua subterráneas captadas, se detectó presencia de coliformes totales y fecales, Esto podría estar asociado a que se trata de pozos someros y debido a que para el momento del muestreo no estaban protegidos en su parte superior; pueden ser alcanzados por la infiltración de las aguas servidas que provienen de las áreas rurales o por la lixiviación de los desechos orgánicos de los animales. Así mismo trece (13) pozos perforados presentaron presencia de coliformes totales de los cuales uno (01) supera los valores mayores a 2000 NMP/100 mL, estos corresponden a la muestras 12.

2. Clasificación de las aguas en el estado Anzoátegui

La clasificación de las aguas subterráneas estudiadas en el estado Anzoátegui fue realizada atendiendo a los sólidos disueltos totales (SDT), composición química de las aguas y al Decreto N° 883 "Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos" (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

a. Clasificación de acuerdo a los sólidos disueltos totales (SDT), estado Anzoátegui

Los valores de conductividad estuvieron entre 18 y 351 µS/cm y el intervalo de sólidos disueltos totales (SDT) oscilaron entre 9 y 149 mg/L, indicando aguas con bajo contenido iónico; es decir aguas ***Dulces*** de acuerdo al criterio de Davis y Wiest (1971) quiénes señalan que para estas aguas la concentración de SDT es menor a 1.000 mg/L. En la figura 29, se presenta la correlación lineal de estos dos parámetros, indicando que los SDT controlan la conductividad eléctrica de las aguas estudiadas.

Hem (1985), indica que la conductividad es función de la carga, tamaño y concentración de los iones en solución.

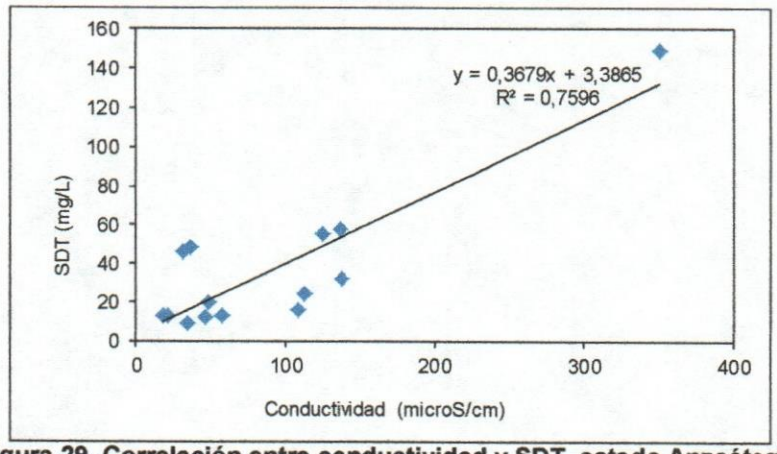


Figura 29. Correlación entre conductividad y SDT, estado Anzoátegui

b. Clasificación de acuerdo a la composición química, estado Anzoátegui

Con el propósito de identificar las facies hidrogeoquímicas presentes en la zona de estudio del estado Anzoátegui, se utilizaron el diagrama de Piper y las figuras de Stiff (Anexo D); en este sentido, en el área de estudio del estado Anzoátegui fueron identificadas seis (06) facies; a saber: bicarbonatada-sódica, clorurada-cálcica, bicarbonatada-cálcica, clorurada-magnésica, sulfatada-cálcica y sulfatada-magnésica.

En la tablas 19 se presenta por estación el tipo químico de agua y en la Figura 30 el diagrama de Piper para visualizar en conjunto los tipos hidroquímicos de aguas identificados. La facies que más está dominando el área de estudio es la clorurada cálcica con un 28,6 %, de igual manera la bicarbonatada cálcica con un 28,6%, seguidamente la sulfatada cálcica con 21,4 %, 7,1% bicarbonatada sódica, 7,1% clorurada magnésica y 7,1% sulfatada magnésica.

Tabla 19. Tipo hidroquímico de agua por estación, estado Anzoátegui

Tipo de Agua	Nro. Estación	Estación	Municipio
Bicarbonatada sódica	18	Los Algodones	Independencia
Clorurada cálcica	16	Carapa	
	24	El Aceital 1	
	25	El Merey	
	27	Nuevo mamo	
Bicarbonatada cálcica	12	Granja Integral	
	20	Los Guaraunos	
	21	Cogollal	
	26	El Amparo	
Clorurada magnésica	17	Botalón	
Sulfatada cálcica	19	El Torreño	
	28	Palital 3	
	29	Palital 2	
Sulfatada magnésica	30	Los Pozos de Sotillo	

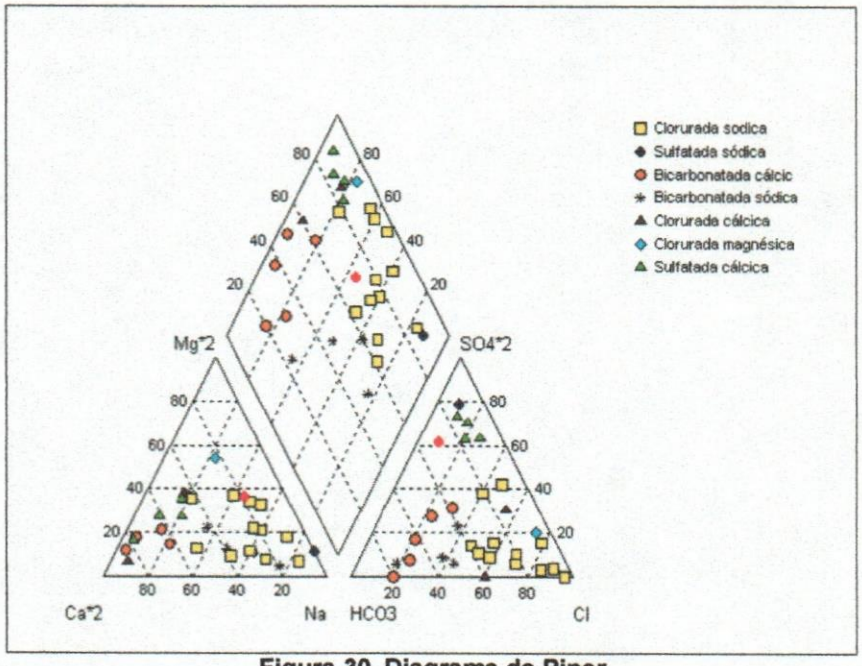


Figura 30. Diagrama de Piper

c. Clasificación de acuerdo al artículo 3 y 4 del Decreto N° 883, estado Anzoátegui

La clasificación de acuerdo con el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) en el primer pozo muestreado, se realizó sin considerar los

parámetros cadmio, cromo, plata y plomo (Tabla 32, Anexo C), debido a que el límite de detección del equipo fue superior al límite normado por el Decreto. Esta clasificación podría ser acertada considerando que las actividades industriales de la zona no son fuentes importantes de estos elementos.

En este sentido, en los trece (13) pozos siguientes (Tabla 33, Anexo C), se tomaron las medidas necesarias para obtener los resultados acordes al Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

De esta manera las aguas de los catorce (14) pozos muestreados en el área estudiada en el estado Anzoátegui, se clasificaron en:

c) Para abastecimiento humano

Trece (13) pozos en la categoría sub-tipo 1C "Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional" y un pozo (01), en la categoría sub-tipo 1A, "Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes".

d) Para uso agropecuario

La clasificación para uso agropecuario es la siguiente: Cinco (05) pozos en la categoría 2A "Aguas para riego de vegetales destinadas al consumo humano" y estos mismos cinco (05) entran también en la categoría 2B "Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario", también se tiene dos (02) pozos sólo en la categoría 2B. Los siete (07) pozos restantes debido a que tienen concentraciones de aluminio, hierro, manganeso y organismos coliformes por encima de los límites establecidos para el tipo 2 quedarían fuera de esta clasificación.

En Anexo E se presenta unas tablas ejemplo con la comparación de todos los parámetros medidos con los límites o intervalos máximos establecidos en el Decreto N° 883.

3. Hidrogeoquímica en el estado Anzoátegui

Con la finalidad de identificar los procesos y factores que controlan la composición química de las aguas subterráneas captadas en veinte (20) pozos al sur del estado Anzoátegui, fueron aplicadas algunas herramientas de hidrogeoquímica tales como el diagrama de Gibbs, relaciones interelementales e índices hidrogeoquímicos.

a. Diagrama de Gibbs, estado Anzoátegui

Basado en Gibbs (1979) y utilizando la concentración de los iones sodio, potasio, calcio, cloruro, bicarbonato y sólidos disueltos totales (SDT), determinados en las aguas subterráneas al sur del estado Anzoátegui, se construyeron los diagramas de Gibbs, esto para identificar algunos de los factores que controlan la composición química de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

Es así como en las figuras 31 y 32 se observa que los pozos se ubican dentro del brazo inferior del boomerang, lo que se corresponde con la baja salinidad de las aguas e indican que el mecanismo principal que controla la composición de las aguas al sur del estado Anzoátegui es la precipitación atmosférica, así como la interacción agua roca.

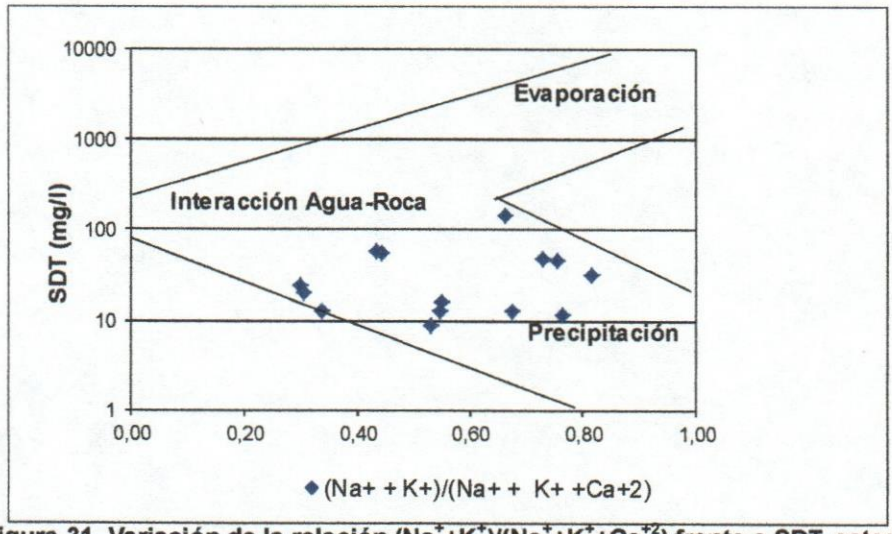


Figura 31. Variación de la relación $(Na^{+}+K^{+})/(Na^{+}+K^{+}+Ca^{+2})$ frente a SDT, estado Anzoátegui

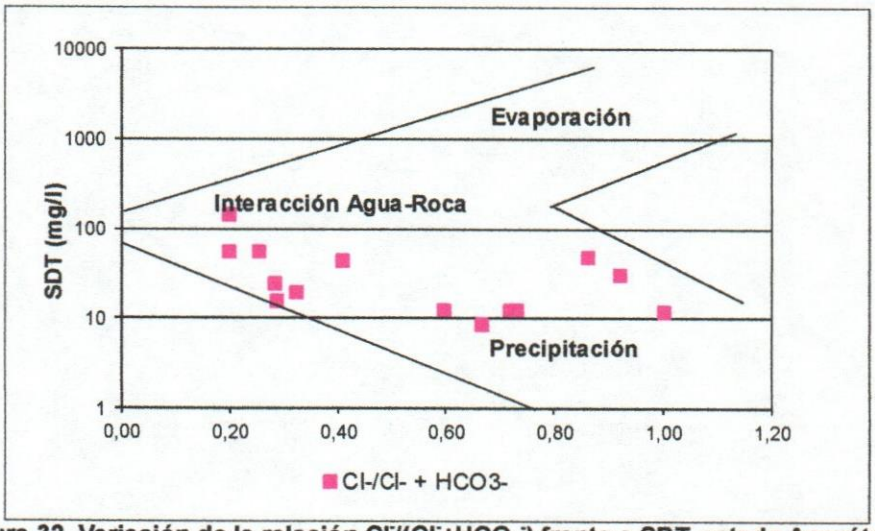


Figura 32. Variación de la relación $Cl^{-}/(Cl^{-}+HCO_3^{-})$ frente a SDT, estado Anzoátegui

b. Relaciones interelementales, estado Anzoátegui

Con el objetivo de conocer los procesos que controlan la composición química de las aguas en la zona de estudio del estado Anzoátegui, se realizaron correlaciones entre diferentes pares de variables, con los valores de concentración de los iones mayoritarios obtenidos, las cuales son presentadas en las figuras de la 33 hasta la 39.

Las figuras 33 y 34 presentan la concentración de cloruro y bicarbonato frente a la conductividad. Nótese en la figura 33 que la conductividad se mantiene casi invariable mientras que el ión cloruro varía. En el caso del bicarbonato (figura 34) se observan la presencia de dos (02) grupos de agua, un primer grupo menos disperso cuya conductividad varía en función de los iones bicarbonato y otro grupo que se mantiene independiente; es decir, el ión bicarbonato se mantienen prácticamente invariable mientras que la conductividad varía. Para ambos casos se puede señalar que existe más de una fuente de estos iones a las aguas subterráneas del sector bajo estudio.

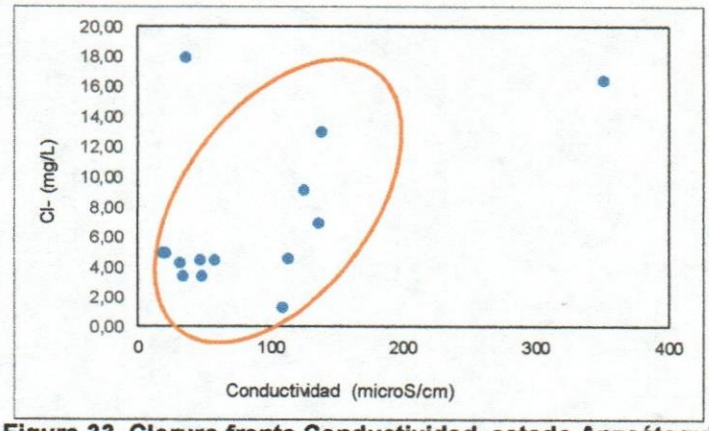


Figura 33. Cloruro frente Conductividad, estado Anzoátegui

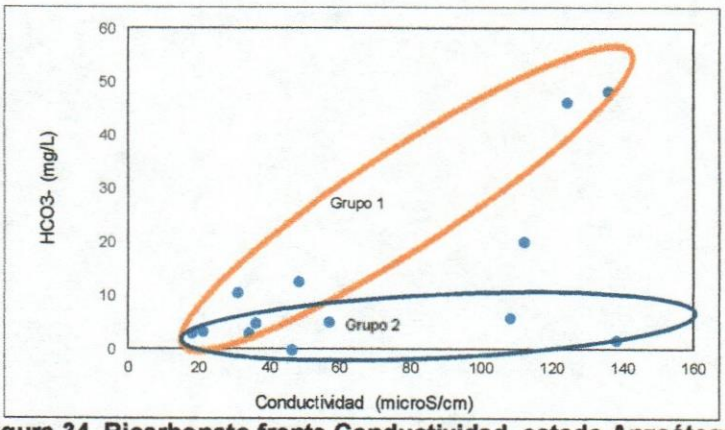


Figura 34. Bicarbonato frente Conductividad, estado Anzoátegui

Cabe destacar que de acuerdo a la concentración de aniones, los de mayor dominio en el sector de estudio del estado Anzoátegui, fueron los

bicarbonatos en ocho (08) pozos y cloruros en cinco (05) pozos el resto fue sulfato. La composición del bicarbonato podría considerarse a la disolución de dióxido de carbono atmosférico; la del cloruro y sulfato al agua de lluvia y su concentración en el suelo (Custodio y Llamas, 1976), correspondiendo esto a lo obtenido en el diagrama de Gibbs (figura 31 y 32), donde indica que el mecanismo que controla la composición química es la precipitación atmosférica

En cuanto a los cationes mayoritarios, el potasio (06 pozos) y el calcio (05 pozos) son los de mayor dominio. Sin embargo, también se obtuvo sodio (2 pozos) y Magnesio (1 pozo). En las figuras 35 y 36 se aprecia la concentración de calcio y potasio frente a la conductividad. Obsérvese que para el caso del calcio (figura 35) existe una tendencia aunque algo dispersa con la conductividad, lo que podría estar señalando de su contribución para con este parámetro. Así mismo apunta hacia la presencia de diversas fuentes de calcio hacia las aguas. Un patrón similar es notado en la figura 36, donde existe una alta dispersión, lo que permite señalar sobre la presencia de variada fuente de aporte de potasio hacia el sistema subterráneo.

Fuentes tales como los minerales feldespato potásico y disolución de silicatos o hidrólisis de yeso son las que podrían estar aportando las composiciones de estos cationes a estas aguas y su dilución está siendo controlada por el dióxido de carbono atmosférico (Custodio y Llamas, 1976) como puede observarse en las siguiente reacción.

$$2KAlSi_3O_8 + 11H_2O + 2CO_2 \longrightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+ + 2HCO_3^- + 4H_4SiO_4$$

(Ec.14)

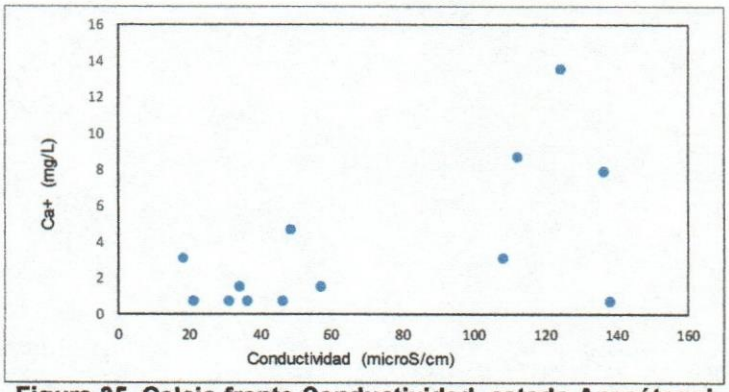


Figura 35. Calcio frente Conductividad, estado Anzoátegui

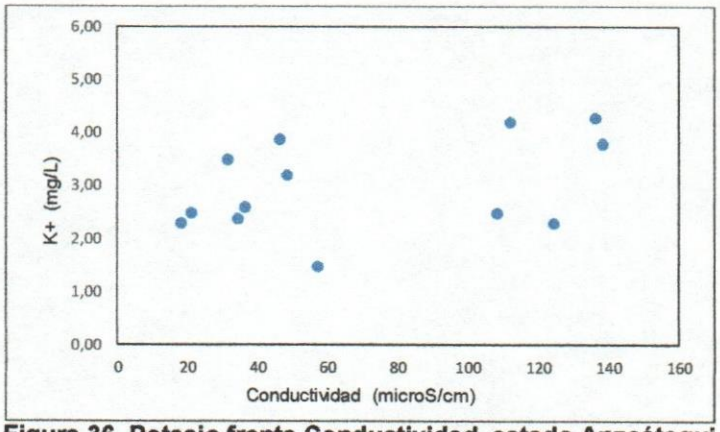


Figura 36. Potasio frente Conductividad, estado Anzoátegui

Por otro lado, se realizó la correlación de los iones calcio y magnesio frente al bicarbonato y de sodio en función del cloruro, respectivamente presentados en la figura 37, 38 y 39.

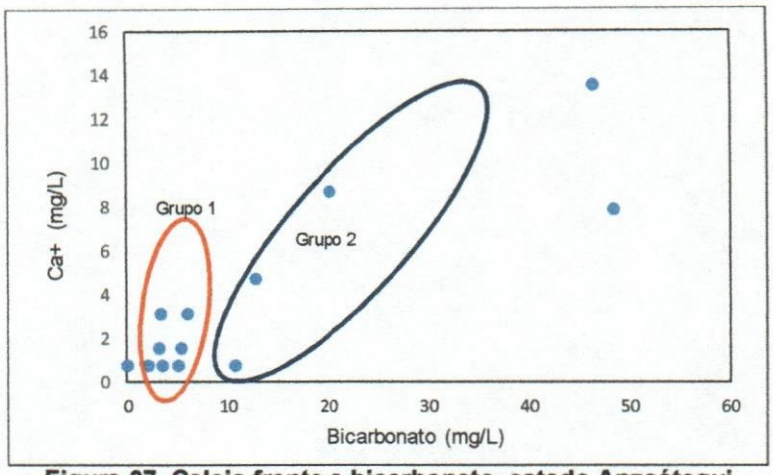


Figura 37. Calcio frente a bicarbonato, estado Anzoátegui

Se observa en la figura 37, dos grupos de fuentes distintas de calcio y bicarbonato a las aguas, que podría asociarse a la disolución o hidrólisis de yeso, silicatos y aluminosilicatos presentes en formaciones geológicas tales como la Formación Mesa y Las Piedras (González de Juana y cols. (1980), PDVSA-Intevep, 2011).

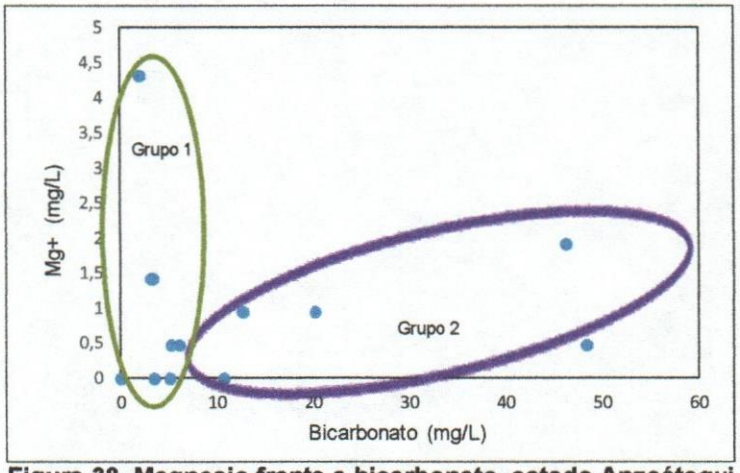


Figura 38. Magnesio frente a bicarbonato, estado Anzoátegui

En la figura 38 se distinguen dos grupos a saber; grupo 1, donde varía el magnesio y el bicarbonato se mantiene invariable considerando el aporte a silicatos ferro-magnésicos y un grupo 2 con variación de bicarbonato y el magnesio se mantiene invariable, indicando que la fuente de bicarbonato está controlado por el equilibrio dióxido de carbono-agua.

Por otro lado, el hidrólogo ruso Sulin (1946) propuso una clasificación de las aguas de acuerdo a la relación Na^+/Cl^-, donde indica aguas meteóricas para una relación Na^+/Cl^- mayor a 1 y aguas connatas para una relación Na^+/Cl^- menor que 1. Se considera que los ambientes de tipo continental son característicos de aguas meteóricas y los ambiente marinos y subterráneos profundos caracterizan a aguas connatas.

En este sentido, la figura 26 presenta la relación Na^+/Cl^- de las muestras estudiadas en el estado Anzoátegui, donde se observa una pendiente menor que 1 señalando en términos generales que las aguas presentes en esta zona de estudio son connatas.

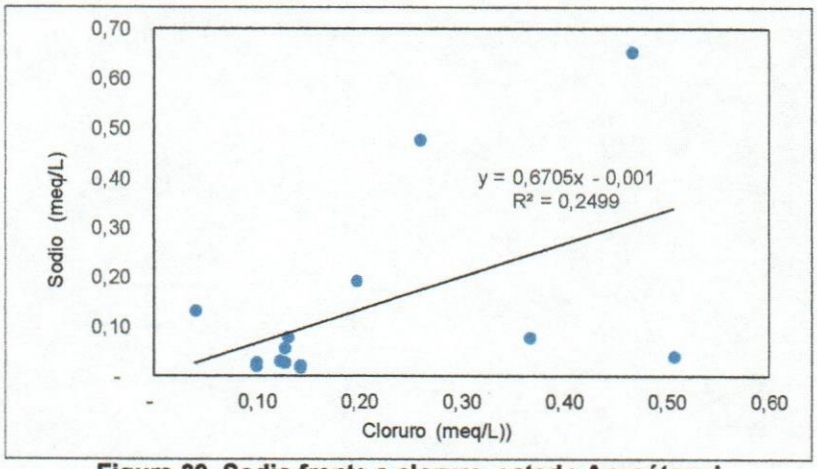


Figura 39. Sodio frente a cloruro, estado Anzoátegui

c. Índices hidrogeoquímicos, estado Anzoátegui

En la tabla 20 y 21 se presentan los índices de mayor interés para conocer las relaciones con el terreno del que procede el agua o la acción de fenómenos modificadores, o algunas características específicas del agua en estudio.

Tabla 20. Índices hidrogeoquímicos, estado Anzoátegui

Nro	Estación	r Mg/r Ca	r K/r Na	r Cl/r CO3H
12	Granja Integral	0,2	0,12	0,34
16	Carapa	0	3,48	-
17	Botalón	9	1,23	11,28
18	Los Algodones	0,4	0,2	0,24
19	Torreño	0,8	2,61	2,67
20	Los Guaraunos	0,3	3,63	0,47
21	Cogollal	0,1	0,57	0,24
24	El Aceital 1	-	3,35	2,48
25	Merey	-	1,65	6,1
26	El Amparo	-	2,79	0,68
27	Nuevo Mamo	0,2	1,35	0,39
28	Palital 3	0,3	0,48	0,4
29	Palital 2	0,5	0,66	1,45
30	Los Pozos de Sotillo	1,5	2,14	1,94

De acuerdo a los valores obtenidos para la relación r Mg/r Ca (tabla 21), se tiene que seis (06) muestras de agua son de tipo continental, de las cuales tres (03); así mismo dichos valores señalan que una (01) muestras indican la posible influencia de terrenos dolomítico.

Tabla 21. Resultados de la relación magnesio y calcio, estado Anzoátegui

r Mg/r Ca	Tipo	Valores de r Mg/r Ca	Estación N°	Municipio
Entre 0,3 y 1,5	Continental	0,4	18	Independencia
		0,8	19	
		0,3	20	
		0,3	28	
		0,5	29	
		1,5	30	
Próximos a 1	Dolomíticos	0,8	19	

Finalmente, la relación de los iones cloruro-bicarbonato (tabla 22) permitió identificar la presencia de aguas del tipo continental en once (11) pozos, al sur del estado Anzoátegui.

Tabla 22. Resultados de la relación cloruro y bicarbonato, estado Anzoátegui

r Cl/r CO_3H	Tipo	Estación N°	Valores de r Cl/r CO3H	Municipio
entre 0,1 y 5	Agua continental	12	0,34	Independencia
		18	0,24	
		19	2,71	
		20	0,47	
		21	0,25	
		24	2,52	
		26	0,69	
		27	0,39	
		28	0,4	
		29	1,47	
		30	1,97	

En general, se puede concluir que las aguas subterráneas estudiadas en la zona de estudio del estado Anzoátegui son del tipo continental, correspondiendo esto a la unidad estratigráfica del área de estudio, que es la Formación Mesa de origen continental (Pérez, 1983).

4. Recomendaciones de uso y tratamiento, estado Anzoátegui

Seguidamente son presentados las recomendaciones de uso y posible tratamiento del agua, destinada a abastecimiento humano y agrícola al sur del estado Anzoátegui.

a. Aguas destinadas a abastecimiento humano, estado Anzoátegui

De acuerdo a lo establecido en la Gaceta N° 36.395 "Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable", para alcanzar la calidad sanitaria de agua tipo potable, será necesario tratamiento para la remoción de aluminio, organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales, color, hierro, turbiedad, manganeso y ajuste del pH. En tabla 23 se muestra por estación los parámetros que no cumple con lo establecido en esta norma.

El hierro está presente en concentraciones que varían entre 1,2 mg/L y 3,6 mg/L y lo establecido en la Norma es de 1,0 mg/L.

La concentración de aluminio se detectó en un intervalo de 0,35 a 0,6 mg/L y lo establecido en la Norma es de 0,2 mg/L. Para los organismos coliformes totales y fecales, su variación está entre 579,4 NMP/100 ml a valores mayores de 2.419,6 NMP/100 ml, no siendo aptas para consumo ya que de acuerdo a la Norma estos organismos deben estar ausentes.

En cuanto al pH se obtuvieron valores en un rango entre 4,59 a 7,85 unidades y para el cumplimiento con lo establecido en la Norma se debe tener un pH de 9,0 unidades. Se detectó color en un intervalo de 60 a 165 U Pt-Co.

Tabla 23. Parámetros que están sobre los límites estipulados en la Gaceta N° 36.395, estado Anzoátegui

Pozo	Estación	Parámetros fuera de norma	Gaceta N° 36.395*
12	Granja Integral	Aluminio = 0,6 mg/l	0,2
		Organismos coliformes totales >2.419,6 NMP/100 ml	Ausente
		Organismos coliformes fecales = 579,4 NMP/100 ml	Ausente
		pH = 7,85	9,0
		Color = 160 U Pt-Co	15
		Hierro = 1,3 mg/l	1,0
		pH = 5,71	9,0
16	Carapa	pH = 4,59	9,0
17	Botalón	Aluminio = 0,4 mg/l	0,2
18	Los Algodones	Color = 60 U Pt-Co	15,0
		Hierro = 1,2	1,0
19	Torreño	Color = 165 U Pt-Co	15,0
20	Los Guaraunos	Aluminio = 0,35 mg/l	0,2
		Zinc = 5,8 mg/l	5,0
21	Cogollal	Aluminio = 0,57 mg/l	0,2
24	El Aceital 1	pH = 5,78	10,0
25	Merey	pH = 5,47	9,0
26	El Amparo	Color = 98 U Pt-Co	15,0
		Hierro = 3,6	1,0
29	Palital 2	pH = 5,77	9,0
30	Los Pozos de Sotillo	pH = 5,85	9,0

Para el caso de aquellas aguas que contienen concentración de hierro y manganeso fuera del límite establecido, existe el método de oxidación-filtración para su remoción, el mismo se puede realizar a través de dos alternativas; Oxidación-filtración sin reactivos químicos y Oxidación-filtración con reactivos químicos. Hasta donde se sabe, los humanos no son afectados por beber aguas con hierro y manganeso (Sawyer, 2000), sin embargo su remoción es importante por sus inconveniencias de carácter organoléptico.

3. Oxidación-filtración sin reactivos químico

Esto se realiza a través del proceso de aireación-filtración el cual se recomienda para aguas con alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L) con el fin de disminuir los costos en reactivos. El equipo usado en este proceso incluye comúnmente un aireador, un tanque de retención y filtros. El oxígeno de la atmósfera reacciona con la forma soluble de hierro y manganeso del agua cruda para producir óxidos insolubles, el cual es separado mediante la sedimentación o filtración (Sommerrfeld, 2000).

4. Oxidación-filtración con reactivos químico

Según Sommerrfeld (2000) el proceso de oxidación-filtración consiste normalmente de un sistema de dosificación de productos químicos y filtros. Algunas veces se requiere un tanque de retención y un sistema de ajuste de pH con hidróxido de sodio, hidróxido de calcio o cal hidratada o carbonato de sodio. Como agentes oxidantes pueden usarse gas cloro o hipoclorito.

De acuerdo a lo expuesto, para el caso en estudio se recomendaría como tratamiento de las aguas para la remoción de hierro y manganeso el proceso aireación y filtración por su bajo costo, para las muestras captadas en los pozos 18 y 26 perteneciente a las muestras captadas en el Municipio Independencia.

Para el caso donde las aguas presentan aluminio, se observan valores no muy altos con respecto a los estipulados en la norma. La Organización Mundial de la Salud no clasifica el aluminio como una sustancia química de influencia significativa para la salud. Por otra parte, la cantidad de aluminio que el hombre puede tomar con el agua de bebida representa tan solo un 1-3 % del aporte total diario, que procede en su mayor proporción de los alimentos ingeridos.

En este sentido, es posible que no sea necesaria la remoción de aluminio en estos pozos de agua ya que sus valores no son tan altos, sin embargo se recomienda llevar un control y realizar un estudio con mayor precisión.

El parámetro de calidad del agua más importante que se debe vigilar y eliminar es el microbiológico, por su efecto agudo en la salud humana, por lo que las aguas de los pozos estudiados que presentan Organismos Coliformes Totales y Fecales, deben ser sometidas a un proceso de desinfección por cloración a través de la dosificación de hipoclorito de sodio o calcio que son los desinfectantes más económicos y de uso más frecuente en localidades rurales.

El color se puede tratar por el método de floculación, sedimentación y filtración, el cual dependerá de los valores obtenidos, puede ser en dos etapas: una filtración gruesa en gravas como pretratamiento y la filtración lenta en arena fina como tratamiento principal. Esta tecnología es de bajo costo, muy eficiente sencilla y fácil de operar, adecuada para pequeñas comunidades.

En términos generales, el posible sistema de tratamiento estaría compuesto de la siguiente manera: 1) Aireación, 2) Floculación 3) Sedimentación, 4) Filtración, 5) Desinfección y 6) Ajuste de pH.

Finalmente es importante mencionar que las tecnologías de tratamiento para localidades rurales del país, deben tener requerimientos técnicos y

económicos acordes a la capacidad de la comunidad y al nivel de apoyo de instituciones regionales responsables del agua y la salud. Además, se debe involucrar a la comunidad en la planeación, selección, diseño, construcción, administración, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento para que éstos sean apropiados y sustentables.

b. Aguas destinadas para uso agrícola, estado Anzoátegui

Para uso agrícola de acuerdo con el criterio establecido por el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), aguas sub-tipo 2A "Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano" se tiene que: las aguas de los pozos 16, 17, 19, 21, 24, 25, 27, 29 son recomendadas para ser usadas directamente para riego ya que el valor de los parámetros se encuentran por debajo de los límites establecidos en el Decreto, mientras que el agua del pozo 12, no se recomiendan dentro de las sub-tipo 2A ya que los parámetros hierro, aluminio, manganeso, organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales están fuera de los límites establecidos en el Decreto N° 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).

De manera complementaria, para evaluar la aptitud del agua para riego en general y recomendar su uso, se consideraron también los valores de salinidad, sodicidad, bicarbonatos y contenido de boro.

e) Salinidad

La salinidad se expresó con la conductividad eléctrica medida y de acuerdo al Tabla 30 (Anexo B), se realizó la clasificación del agua según su salinidad (tabla 24); en este sentido, las aguas de trece (13) de los pozos estudiados en el estado Anzoátegui presentan salinidad baja (C1) (conductividad entre 0 a 250 µmhos/ cm) lo que indica que pueden usarse para riego en la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. El pozo

restantes presentan salinidad media (C2) (conductividad entre 250 a 750 µmhos/cm) indicando que esta agua puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado.

f) Sodicidad

Con el cálculo de la relación de adsorción de sodio (RAS), se clasificó el agua de acuerdo a su sodicidad (tabla 24), obteniendo como resultado que el agua de los pozos estudiados en el estado Anzoátegui es baja en sodio (S1) (RAS de 0 a 10), por lo que puede usarse en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

g) Bicarbonato

El cálculo del carbonato de sodio residual (CSR) arrojó como resultado, trece (13) pozos menores a 1,25 lo que indica que en relación a la concentración de bicarbonatos, estas aguas se consideran aptas para riego. En el pozo restante el valor de CSR es de 1,34, (tabla 24) considerándose esta agua regular para riego.

h) Toxicidad

El valor del boro, cloro y sodio se determinaron en laboratorio y las concentraciones obtenidas fueron menores a los valores estipulados en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), para aguas sub.-tipo 2A, razón por la cual se consideran aguas no tóxicas para los cultivos.

Tabla 24. Clasificación de acuerdo a la salinidad, sodicidad, RAS, CSR, estado Anzoátegui

Pozo	RAS	Sodicidad	Conductividad	Salinidad	CSR
12	0,74	Baja (S1)	124,00	Baja (C1)	-0,08
16	0,203	Baja (S1)	46,00	Baja (C1)	-0,04
17	0,177	Baja (S1)	138,00	Baja (C1)	-0,368
18	1,242	Baja (S1)	351,00	Media (C2)	1,344
19	0,06	Baja (S1)	18,00	Baja (C1)	-0,228
20	0,057	Baja (S1)	48,00	Baja (C1)	-0,112
21	0,414	Baja (S1)	136,00	Baja (C1)	0,354
24	0,135	Baja (S1)	31,00	Baja (C1)	0,016
25	0,286	Baja (S1)	112,00	Baja (C1)	0,042
26	0,228	Baja (S1)	108,00	Baja (C1)	0,136
27	0,156	Baja (S1)	57,00	Baja (C1)	-0,19
28	0,421	Baja (S1)	34,00	Baja (C1)	-0,102
29	0,24	Baja (S1)	30,00	Baja (C1)	-0,034
30	0,091	Baja (S1)	22,00	Baja (C1)	-0,15

De acuerdo con lo antes expuesto, con respecto a estos cuatro (04) parámetros, las aguas de los pozos estudiados en general son aptas para riego.

c. De acuerdo al Índice de Langelier, estado Anzoátegui

Para conocer la capacidad depositante y corrosiva del agua, se calculó el Índice de Langelier. Con este propósito se determinó la alcalinidad y el contenido de calcio; es importante señalar que la alcalinidad en estos pozos se debe sólo a bicarbonatos dado que su pH siempre fue menor a 8,3 unidades.

En tabla 25 son mostrados los valores del Índice de Langelier (IL) calculados, nótese que cinco (05) de los pozos tienen valores IL menores a cero, lo que indica que son aguas con tendencias disolventes o corrosivas; ocho (08) cuyos valores mayores de cero indican un agua

precipitante; es decir, que favorece la formación de depósitos cálcicos y magnésicos y uno (01) que no le fue posible su determinación.

De acuerdo con la relación de Lamont (Tabla 8) cinco (05) pozos estudiados se caracterizan por un grado de ataque ligero, correspondiente a las muestras 12, 17, 24, 25 y 30.

Tabla 25. Valores del Índice de Langelier, estado Anzoátegui

Pozo	Estación	Alcalinidad (mg $CaCO_3$/l)	Calcio (mg/l)	pH	IL
12	Granja Integral	38	13,6	7,85	-0,74
16	Carapa	-	0,8	4,59	-
17	Botalón	1,6	0,8	6,17	-0,325
18	Los Algodones	95,2	8	7,86	4,14
19	Torreño	2,6	3,2	6,24	0,558
20	Los Guaraunos	10,4	4,8	6,83	1,926
21	Cogollal	39,7	8	7,12	3,02
24	El Aceital 1	2,8	0,8	5,78	-0,472
25	Merey	4,1	0,8	5,47	-0,616
26	El Amparo	8,8	0,8	5,94	0,186
27	Nuevo Mamo	16,5	8,8	7,56	3,12
28	Palital 3	4,9	3,2	5,92	0,513
29	Palital 2	4,3	1,6	5,77	0,006
30	Los Pozos de Sotillo	2,5	1,6	5,85	-0,15

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

1. Las aguas subterráneas estudiadas presentan bajo contenido iónico (SDT<1000 mg/L), lo que permite clasificarlas como aguas del tipo dulces.

2. En relación con la composición química se pudieron identificar ocho (08) facies hidrogeoquímicas, a saber: clorurada-sódicas, cloruradas-cálcicas, bicarbonatadas-sódicas, bicarbonatadas-cálcicas, sulfatada-sódicas, sulfatadas-cálcicas, sulfatadas-magnésicas y clorurada-magnésica. Con predominio de las aguas de las facies clorurada-sódica probablemente proveniente de la Formación Las Piedras.

3. Los factores que controlan la composición de las aguas subterráneas en la zona de estudio es la precipitación atmosférica y la interacción agua-roca.

4. Los aniones de mayor dominio son el bicarbonato y el cloruro y su correlación con respecto a la conductividad indica la presencia de dos grupos de agua, señalando que existe más de una fuente de estos iones a las aguas bajo estudio, que pudiera ser consecuencia de la disolución de dióxido de carbono atmosférico en el caso del bicarbonato y la precipitación atmosférica y su concentración en el suelo para el cloruro.

5. En el caso de los cationes los de mayor dominio son el sodio y el potasio y su presencia podría estar asociada a variadas fuentes que podrían estar relacionadas con la disolución de los minerales feldespato potásico y plagioclasa sódica, controlada por la acción del dióxido de carbono.

6. La presencia del calcio en las aguas subterráneas estudiadas, parecieran estar asociado a fuentes distintas, tales como disolución o hidrólisis de yeso, silicatos y aluminosilicatos presente en las formaciones geológicas La Mesa y Las Piedra.

7. La presencia de dos grupos en la correlación del magnesio podría asociarse a la disolución de silicatos ferro-magnésicos y equilibrio dióxido de carbono-agua.

8. De acuerdo a los índices hidrogeoqímicos las aguas estudiadas en la zona son en su mayoría del tipo continental, correspondiendo esto a la unidad estratigráfica del área de estudio que es la Formación Mesa.

9. El 88,24 % de las aguas subterráneas captadas, que corresponden a 30 pozos, se ubican dentro de la categoría sub.-tipo 1C (Decreto N° 883), lo que indica que "estas aguas pueden ser destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre y cuando sean acondicionadas por tratamiento de potabilización no convencional". Un 8,82 % corresponde a tres pozos que se ubican en la clasificación sub.-tipo 1A: "Aguas que pueden acondicionarse con la sola adición de desinfectantes". El 2,94 % restante es debido a un pozo que pertenece a la categoría sub-tipo 1B "Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración".

10. En cuanto a las posibilidades de uso agropecuario, el 53 % de los pozos analizados corresponden a aguas tipo 2 (Decreto N° 883), "las cuales pueden ser destinadas a usos agropecuarios tanto para el riego de vegetales destinados al consumo humano, como para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario". El 47 % restante, no se corresponden a aguas tipo 2 debido a que presentan concentraciones de hierro, aluminio y organismos coliformes por encima de los límites establecidos para esta clasificación.

11. Los pozos tipo aljibe, son los más susceptibles a reflejar presencia de organismos coliformes totales y fecales, esto como consecuencia de que son someros y para el momento del muestreo no estaban protegidos en su parte superior. En general treinta (30) pozos presentaron coliformes totales, sin embargo sólo cuatro (04) en valores mayores a 2000 NMP/100 mL. En cuanto a los organismos coliformes fecales estuvieron ausentes en 22 de los pozos (64,71 %). Solamente cuatro (04) del total, un 11,76 % reveló ausencia tanto de coliformes totales como de coliformes fecales.

12. El índice de Langelier calculado, indica que un 64,71 % del agua de los pozos presenta tendencias disolventes y un 35,29 % resultó con tendencia precipitante, por lo que se deben considerar y tomar las previsiones necesarias en cuanto a la elección del material y el mantenimiento de la red de tuberías.

13. A pesar que los iones dominantes son el bicarbonato y el sodio, la concentración de estos no interferían con la calidad del agua para el riego, expresado esto en el cálculo del CSR y RAS ratificando de esta manera su aptitud para riego en general.

14. La presencia de hierro en ocho (08) pozos puede correlacionarse con litologías Terciarias y Cuaternarias de rocas sedimentarias presentes principalmente en el sector Los Barrancos de Fajardo, pertenecientes a la Formación Mesa.

15. Para aquellas aguas que potencialmente pueden ser consideradas de uso doméstico, se recomienda aplicar el tratamiento para remoción de hierro manganeso, color, organismo coliformes fecales, totales y ajuste de pH.

16. En términos generales se podría inferir que la calidad de las aguas subterráneas al sur del estado Anzoátegui y Monagas, está definida por

procesos naturales, de manera que las actividades humanas llevadas a cabo en la zona de estudio no han ejercido hasta el momento efectos sobre la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarado, J. (1979). *Posibilidades de acumulación de aguas subterráneas área Cerro Negro. Estados Anzoátegui y Monagas. MARNR.* (Serie de Inf.Técnicos. DGIIA/IT/31). Caracas: Dirección de Hidrología.

Alvarado, J. (1981). *Estimación del orden de magnitud de las reservas renovables de aguas subterráneas área Cerro Negro, estados Anzoátegui y Monagas. MARNR.* (Serie de Inf. Técnicos. DGIIA/IT/89). Caracas: Dirección de Hidrología.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Enviroment Federation. (1998). *Standard Methods for examination of water and wastewater.* (20th Edition). Estados Unidos: Powered by Folío.

Appelo, C. y Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution.* Rotterdam: A.A. Balkema publish.

Baroni, L., Cenci, L., Tettamanti, M. y Berati, M. (2007). Evaluating the environmental impact of various dietary patterns combined with different food production systems. European Journal of Clinical Nutrition 61, 279–286. Recuperado en Febrero 22, 2011 de la World Wide Web: http://www.nature.com/ ejcn/ journal/ v61/ n2/ full/ 1602522a.html

Barrios, R., Ivaz, M., Telisman V., Urbiha H.; Villa, C., Hrgetic, P. y Hernández, R. (1982). *Proyecto de las exploraciones de Agua Subterránea cuenca del río Pao y Caris.* (Serie informes técnicos DGSII/IT/89). Caracas: MARNR-GEOCIN C.A.

Burz, F. (2005). *Infomonagas. com.* Recuperado en Marzo 15, 2011 de la World Wide Web: http://www.infomonagas.com/ modules.php? name= Content&pa=showpage&pid=63.

Canal de Isabel II Gestión (2012). *Tratamiento del agua potable.* Recuperado en Julio 21, 2014 de la World Wide Web: http://www.canaleduca.com/documents/10157/19805/Tratamiento+ de+agua+potable.

Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (COPLANARH). (1975). *Criterios para la Clasificación Legal y Control de Calidad de las Aguas.* Caracas: Autor.

Custodio E., y Llamas M. (1976), *Hidrología subterránea.* Barcelona – España: Omega, Tomo I.

Davis S. y De Wiest R., (1971), "*Hidrogeología*", Ed. Ariel, Barcelona – España.

Del Catillo, L. (2007). *La gestión del agua en Argentina.* Recuperado en Marzo 17, 2011 de la World Wide Web: http://ar.vlex.com/vid/usos-agua-37489188.

Deustch, W. (1997). *Groundwater Geochemistry Fundamentals and Applications to Contamination.* United States of America: CRC Printed.

Eaton, F. (1950) Significance of carbonate in irrigation Waters. *Soil Science 69, 123.*

Ferrara, G., Najul, M. y Sánchez, R. (2001). *Calidad del Recurso Hídrico.* Caracas: Universidad Central de Venezuela, Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Ferrara, G., Najul, M., Lara M. y Sánchez, R. (2008). *Fundamentos para la Evaluación y Control de la Calidad Ambiental.* Caracas: CENDES.

Flores J., (2006), "*Estudio geoquímica de los acuíferos medio y profundo, de la Formación Las Piedras en la región de Jusepín – El Furrial, Estado Monagas. Trabajo especial de grado*", Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra

Franco, F. (s.f). *Acueductos y alcantarillados.* Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales. Recuperado en Marzo 04, 2011 de la World Wide Web: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ sedes/ manizales /4080004/contenido/Capitulo2/Pages/ciclohidrologico.html.

Frape, S., Fritz, P., y McNutt R. (1984), Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the canadien shield. *Geochimica et Cosmochimica, 48* 1617-1627.

García, R. (1981). *Estudio evaluativo de los acuíferos del área DSMA.* Venezuela. Caracas: R.G.R. Ingeniería

Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling World Water Chemistry. Departament of Geological Sciences, Northwestern University. Evanston, Illinois. Science 170: 1088–1090.

González de Juana, C. (1946). Estudio de las aguas subterráneas en los Llanos de Venezuela. Caracas: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).

González de Juana C., Iturralde J. y Picard C., (1980), "*Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*", Ed. FONINVES, Caracas – Venezuela.

Gordana D., Dragana D., Sanja S., (2013). *Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia.* Sciencie of the total environment.

Hamblin, W., (1992). *Earth's dynamics system.* New York: Macmillan Publishing Company.

Hem J., (1985), "*Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*", U.S. Geological Survey - supply paper 2254, 3rd edition.

Henry J. y Heinke, G. (1999). *Ingeniería ambiental* (2da ed.). México: Prentice Hall.

Hernández, M. (2007). *Estudio geoquímico de las aguas subterráneas al sur de Calabozo estado Guárico, Venezuela.* Tesis de grado de licenciatura no publicada. Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Ketata, M., Hamzaoui, F., Gueddari, M., Bouhlila, R. y Ribeiro, L. (2010). Hydrochemical and statistical study of groundwaters in Gabes-south deep aquifer. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 36,* 187-196.

Lamont, P.A. (1981). *Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness.* Journal AWWA.

Lenntech (2009). *Water treatment solutions.* Recuperado en Marzo 17, 2011 de la World Wide Web: http://www.lenntech.es/aplicaciones/ riego/ sar/ riesgo-sodio-en-regadios.htm#ixzz1EWZ29ixe.

Lopez-Gunn, E., Llamas, M., Garrido, A. y Sanz, D. (2011). Groundwater Management. *Treatise on Water Sciencie,* 97-127.

Lozano, F., Silva, C., Mendez, Y., Hernández, M. (2010). Estudios Hidrogeológico zona norte del río Orinoco, estado Anzoátegui y Monagas, *Venezuela.* Ponencia presentada en el X Congreso de Aguas Subterráneas y Desarrollo Sustentable de los Pueblos Latinoamericanos. Hotel Alba Caracas. Caracas.

Marcano, J. (2004). *EducaciónAmbiental.* Recuperado en Marzo 15, 2011 de la World Wide Web: http://www.jmarcano.Com/nociones/ciclo 1. html.

Medina, M. (1984). *Caracterización Físico-Química de las aguas de 13 ríos del Estado Monagas y T.F.D.A.* Maturín: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Departamento de Suelos, Vegetación y Fauna.

Ministerio del Ambiente de los Recursos Naturales Renovables. (1982). *Esquema de Ordenamiento Territorial de la Faja Petrolífera del Orinoco. Diagnóstico. Medio Físico Natural.* (Volumen 1). Caracas: Autor.

Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. (2006). *Recursos Hídricos de Venezuela.* Caracas: FUNDAMBIENTE.

Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos. Decreto N° 883, Gaceta Oficial, 5021 (Extraordinaria). Diciembre 18, 1995. Caracas.

Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 36.395.

Norma Venezolana, Aguas Naturales, Industriales y Residuales. *Determinación de sólidos.* COVENIN 2461-87. (1987, 08 de Diciembre) Caracas: FONDONORMA.

Norma Venezolana, Aguas Naturales, Industriales y Residuales. *Guía para las técnicas de Muestreo.* COVENIN 2709:2002. (2002, 28 de Mayo) Caracas: FONDONORMA.

Norma Venezolana, Aguas Naturales, Industriales y Residuales. *Definiciones.* COVENIN 2634:2002. (2002, 29 de Mayo) Caracas: FONDONORMA

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2003). *No hay crisis mundial de agua, pero muchos países en vías de desarrollo tendrán que hacer frente a la escasez de recursos hídricos.* Recuperado en Febrero 22, 2011 de la World Wide Web: http://www.fao.org/spanish/ newsroom / news / 2003 / 15254-es.html.

Pérez H., (1983). *Investigación sobre la ocurrencia de las aguas subterráneas en la Región Oriental.* Tesis de grado de la Universidad Central de Venezuela.

Piper, A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union. 25*, 914 – 923.

Purwaningsih E. y Notosiswoyo S. (2013). *Hydrogeochemical study of groundwater in Sidoarjo Mud Volcano area, east Java Indonesia.* International Symposium on Earth Sciencie and Technology, CINEST.

Sánchez, A y Gómez, M. (1978). *Prospección geoeléctrica de aguas subterráneas en el área de Maturín–Jusepín, estado Monagas.* Informe Técnico. Caracas: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables.

Sánchez, J. (2007). *Clasificación y uso de las aguas de riego.* Recuperado en Marzo 16, 2011 de la World Wide Web:

http://www.fertitec.com/PDF/Clasificacion%20y%20Uso%20de%20las%20Aguas%20de%20Riego.pdf.

Santos, A. (1974). *Estudio del medio poroso en las Formaciones Mesa y Las Piedras para el desarrollo de aguas subterráneas en el área, mayor de Oficina cuadrángulo de Oficina estado Anzoátegui.* Trabajo especial de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Sawyer, C., Perry, L. y Parkin G. (2000). *Química para ingeniería ambiental.* Cuarta edición. Bogotá: McGraw Hill.

Stiff, H. (1951), The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal Petroleum Technology. 3*, 10.

Sommerrfeld, E. (2000). *Iron and Manganese Remo val Handbook*, American Water Works Association.

Soto, N. (2009). *Fundamentos de Estadística para todas las ciencias.* Liven Editores, C. A. Caracas, Venezuela.

Tchobanoglous, G. y E. Schroeder (1985). *Water Quality.* Ed. Addison-Wesley Pub. Co.

Venciclopedia.com. (2010). *La Venciclopedia de Venezuela.* Recuperado en Marzo 15, 2011 de la World Wide Web: http://venciclopedia.com/index.php?title=Municipio_Sotillo_(Monagas).

Vivot, E., Rugna, C., Gieco, A., Sánchez C., Ormaechea, M. y Sequin, C. (2010). Calidad del Agua subterránea para usos agropecuarios en el departamento Villaguay, Entre Ríos. *Revista Electrónica del Comité del Medio Ambiente de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo.* 2, 1-15. Recuperado en Febrero 10, 2011, de la

World Wide Web: http://www.revistas.unlp.edu.ar/index.php/domus/ article/ viewFile/96/159.

Winter T. C., Harvey J. W, Franque O. L., y Alley W. M., (1998). Ground Water and Surface Water a Single Resource. US Geological Survey Circular 1139.

Yanes, C. (1997), "*Estudio geoquímico regional de los ríos del Escudo de Guayana, tesis Doctoral*" UCV, Instituto de Ciencias de la Tierra – Facultad de Ciencias y Escuela de Geología, Minas y Geofísica – Facultad de Ingeniería.

Zambrano F., (1999), "*Caracterización geoquímico de las aguas subterráneas en el estado Táchira. Trabajo especial de grado*", Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Instituto de Ciencias de la Tierra, 209p.

Zaporozec A. (1972). Graphical interpretation of Water Quality Data. *Groundwater,* 10 (2), 32 – 43.

ANEXO A. Articulo 3 y artículo 4 del Decreto N° 883

CAPITULO II

De la clasificación de las aguas

Artículo 3°.- Las aguas se clasifican en:

- **Aguas tipo 1:** Aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él.

  Las aguas del tipo 1 se desagregan en los siguientes sub-tipos:

  - **Sub Tipo 1A:** Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.
  - **Sub Tipo 1B:** Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.
  - **Sub Tipo 1C:** Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional.

- **Aguas tipo 2:** Aguas destinadas a usos agropecuarios.

  Las aguas del Tipo 2 se desagregan en los siguientes sub-tipos:

  - **Sub Tipo 2A:** Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano.
  - **Sub Tipo 2B:** Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario.

- **Aguas tipo 3:** Aguas marinas o de medios costeros destinadas a la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo.

- **Aguas tipo 4:** Aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia.

- **Aguas tipo 5:** Aguas destinadas para usos industriales que no requieren de agua potable.

- **Aguas tipo 6:** Aguas destinadas a la navegación y generación de energía.

- **Aguas tipo 7:** Aguas destinadas al transporte, dispersión y desdoblamiento de poluentes sin que se produzca interferencia con el medio ambiente adyacente.

Artículo 4°.- A los efectos de esta Norma, se establecen los siguientes criterios para la clasificación de las aguas, así como los niveles de calidad exigibles de acuerdo con los usos a que se destinen:

1. Las aguas del sub-tipo 1A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Tabla 26. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 1A

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D)	mayor de 4,0 mg/l. (*)
PH	mínimo 6,0 y máximo 8,5
Color real	menor de 50, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 25, UNT
Fluoruros	menor de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 2000 NMP por cada 100 ml.

(*) Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%.

2. Las aguas del sub-tipo 1B son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Tabla 27. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 1B

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D)	mayor de 4,0 mg/l. (*)
pH	Mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 150, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 250, UNT.
Fluoruros	Menos de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 10000 NMP por cada 100 ml.

(*) Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%.

3. Las aguas de los sub-tipo 1A y 1B no deberá exceder, además, los siguientes límites:

Tabla 28. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 1A y 1B

Elementos compuestos	Límites
Aceites minerales	0,3 mg/l
Aluminio	0,2 mg/l
Arsénico total	0,05 mg/l
Bario total	1,0 mg/l
Cadmio total	0,01 mg/l
Cianuro total	0,1 mg/l
Cloruros	600 mg/l
Cobre total	1,0 mg/l
Cromo total	0,05 mg/l
Detergentes	1,0 mg/l
Dispersantes	1,0 m_g/l
Dureza, expresada como $CaCO_3$	500 mg/l
Extracto de carbono al cloroformo	0,15 mg/l
Fenoles	0,002 mg/l
Hierro total	1,0 mg/l
Manganeso total	0,1 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Nitritos + Nitratos (N)	10,0 mg/l

Elementos compuestos	Límites
Plata total	0,05 mg/l
Plomo total	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sodio	200 mg/l
Sólidos disueltos totales	1500 mg/l
Sulfatos	400 mg/l
Zinc	5,0 mg/l
Biocidas	**Límite**
Organofosforados y Carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l
Radiactividad	**Límite**
Actividad α	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l)
Actividad ß	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l)

4. Las aguas del Sub-Tipo 1C son aquellas en las cuales el pH debe estar comprendido entre 3,8 y 10,5.

5. Las aguas del Sub-Tipo 2A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Tabla 29. Límites y rangos máximos para aguas sub-tipo 2A

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 ml.
Organismos coliformes fecales	menor a 100 NMP por cada 100 ml.
Elementos compuestos	**Límites**
Aluminio	1,0 mg/l
Arsénico	0,05 mg/l
Bario	1,0 mg/l
Boro	0,75 mg/l
Cadmio	0,005 mg/l
Cianuro	0,2 mg/l
Cobre	0,20 mg/l
Cromo Total	0,05 mg/l
Hierro Total	1,0 mg/l
Litio	5,0 mg/l
Manganeso Total	0,5 mg/l

Parámetro	Límite o rango máximo
Mercurio	0,01 mg/l
Molibdeno	0,005 mg/l
Níquel	0,5 mg/l
Plata	0,05 mg/l
Plomo	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sólidos disueltos totales	3000 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes
Vanadio	10,0 mg/l
Zinc	5,0 mg/l
Biocidas	**Límites**
Organofosforados y carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l
Radiactividad	**Límites**
Actividad a	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l)
Actividad ß	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l)

ANEXO B. Clasificación de las aguas de riego según su salinidad y sodicidad

Tabla 30. Clasificación de aguas de riego según su salinidad

Salinidad	Conductividad Eléctrica (μmhos/ cm a 25 °C)
Agua de Baja Salinidad (C1) Puede usarse para riego en la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero éste se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.	0 a 250
Agua de Salinidad Media (C2) Puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden lograr planta moderadamente tolerantes a las sales.	250 a 750
Agua Altamente Salina (C3) No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.	750 a 2.250
Agua muy Altamente Salina (C4) No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso, se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.	2.250 a 5.000

Fuente: Boletín de Información N° 197 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Tabla 31. Clasificación de aguas de riego según su sodicidad

Sodio	RAS
Agua Baja en Sodio (S1): Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.	0-10
Agua Media en Sodio (S2): En suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.	10-18
Agua Alta en Sodio (S3): Puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, razón por la cual, éstos necesitarán prácticas especiales de manejo - buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para substituir al sodio intercambiable; sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta salinidad.	18-26
Agua muy Alta en Sodio (S4): Es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.	26-30

Fuente: Boletín de Información N° 197 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

ANEXO C. Tabla de resultados

Tabla 32. Características estructurales de los pozos

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Profundidad perforada (m)	60		90		8		15	30	30	90	70	23	50		36
Nivel estático (m)				4,83				6	6	5,06				4,21	2,31
Tipo	P	P	P	P	A-B	P	P	P	A-B	A-B	P	A-B	P	A-B	P

P: Perforado
A-B: Aljibe con bomba

Tabla 33. Características estructurales de los pozos, continuación

Municipio	Independencia													Libertador			Uracoa		
Nro Estación	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**22**	**23**	**32**	**33**	**34**
Profundidad perforada (m)	13	25	60	102	108	99	100	67	96	25	25	86	13	-	100	100	25	-	80
Nivel estático (m)	-	-	27	26	20		26	-	-	15	18	16	10.5	-	24	26	1.24	-	-
Tipo	P	P	P	P	P	P	P			A-B	P	P	P	P	P	P	P	P	P

P: Perforado
A-B: Aljibe con bomba

Tabla 34. Parámetros Fisicoquímicos

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Alcalinidad (mg/L $CaCO_3$)	26	36	12	6	12	4	4	8	20	6	8	38	6	8	18
Color verdadero (UCV)	4	8	<L.D	182	14	43	<L.D	<L.D	30	<L.D	<L.D	<L.D	6	8	160
Conductividad (µS/cm)	130	145	270	298	116	36	36	47	82	558	21	124	29	158	80
Dureza Total (mg/L $CaCO_3$)	18	10	30	52	14	12	14	8	16	96	2	42	6,0	8	14
pH	6,1	7,2	7,1	5,6	5,85	5,2	5,3	5,25	6,06	5,4	6,58	7,85	6,07	5,35	5,71
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	32	62	125	135	53	15	15	20	37	255	17	56	11	70	37
Sílice (mg/L)	13,5	4,4	5,9	4,0	4,1	4,5	3,5	3,7	3,5	3,6	8,3	7,4	5,1	4,0	6,0
Temperatura (°C)	29,34	29,32	29,68	29,97	28,84	29,75	29,66	29,64	30,11	29,68	30,46	31,5	28,50	27,86	29,16
Turbiedad (NTU)	0,14	1,63	2,84	24,10	4,89	1,27	1,55	0,86	5,36	0,92	0,11	1,60	1,30	2,46	22,8

Tabla 35. Parámetros Fisicoquímicos, continuación

Municipio	Independencia												
Nro	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	29	30
Alcalinidad (mg/L CaCO3)	<L.D	1.6	95.2	2.6	10.4	39.7	2.8	4.1	8.8	16.5	4.9	4.3	2.5
Color verdadero UCV	26	25	60	165	14	< L.D	< L.D	50	98	6	6	1	<L.D
Conductividad	46	138	351	18	48	136	21	36	31	112	108	57	34
Dureza Total (mg/L CaCO3)	2.0	20.0	28.0	14.0	16.0	22.0	2.0	2.0	2.0	26.0	10.0	6.0	10.0
pH	4.59	6.17	7.86	6.24	6.83	7.12	5.78	5.47	5.94	7.56	5.92	5.77	5.85
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	12.0	32.0	149.0	13.0	20.0	58.0	9.0	15.0	13.0	49.0	46.0	25.0	16.0
Sílice (mg/L)	11.11	14.44	8.43	10.00	11.70	27.49	9.68	11.02	10.14	8.55	14.96	11.81	9.44
Temperatura (°C)	31.3	31.96	33.11	32.3	31.96	32.16	30.12	30.29	30.92	30.62	32.3	32.8	31.32
Turbiedad (NTU)	4.7	1.7	5.2	32.9	2.1	0.8	0.3	9.2	30.2	0.8	2	0.6	0.8

Tabla 36. Parámetros Fisicoquímicos, continuación

Municipio	Libertador			Uracoa		
Nro	31	22	23	32	33	34
Alcalinidad (mg/L CaCO3)	1.7	2.8	5.5	34.6	3.5	71.8
Color verdadero UCV	<L.D	< L.D	< L.D	145	< LD	40
Conductividad	30	22	22	231	140	229
Dureza Total (mg/L CaCO3)	2.0	2.0	2.0	10	10.0	26
pH	5.57	5.82	5.22	6.43	5.26	7.47
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	13.0	9.0	9.0	105	60	96
Sílice (mg/L)	8.64	9.42	9.97	18.97	20.36	30.62
Temperatura (ºC)	30.17	29.5	29.91	28.54	29.19	31.11
Turbiedad (NTU)	2.7	1.2	0.4	19.4	0.9	0.6

Tabla 37. Parámetros inorgánicos

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Boro (mg/L)	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	0,11	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
Cianuro (mg/L)	0,008	0,007	< 0,002	0,005	0,006	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	< 0,002	0,007	0,005	0,006
Cloruros (mg/L)	6,1	22,5	38,0	55	27	6	6	10	10	107	5	9,2	5,0	39	12,0
Fluoruro (mg/L)	< 0,02	0,25	< 0,02	0,05	< 0,02	0,32	< 0,02	0,16	0,13	0,21	0,25	< 0,02	0,09	0,13	0,08
Nitratos ((mg/L)_N)	0,1	0,2	3,7	4,7	0,4	0,3	0,5	0,2	0,7	9,1	0,5	0,5	0,2	0,3	0,2
Nitritos ((mg/L)_N)	0,003	0,002	0,012	0,068	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,036	0,004	0,005	0,002	0,002	0,002
Ortofosfatos ((mg/L))	0,47	0,23	0,06	0,23	0,21	0,28	0,31	0,15	1,02	0,41	0,16	0,35	0,18	0,21	0,38
Sulfatos (mg/L)	27	2	23	1,5	1,5	1,1	0	1	1,5	0	27	2	1	1	5

Tabla 38. Parámetros inorgánicos, continuación

Municipio	Independencia												
Nro	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	29	30
Boro (mg/L)	0.1	0.1	0.4	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
Cianuro (mg/L)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<L.D
Cloruros (mg/L)	4.5	13.0	16.5	5	3.5	7	3.5	5.5	5	18	4.3	4.6	1.4
Fluoruro (mg/L)	0.10	0.22	0.32	0.19	0.38	0.34	0.24	0.25	0.3	0.41	0.22	0.36	0.32
Nitratos (mg/L)	0.7	1.3	0.1	0.1	0.30	10	10	1.1	0.8	1.3	1.1	1.0	<L.D
Nitritos (mg/L)	<L.D	<L.D	<L.D	0.001	0.003	<L.D	<L.D	0.005	0.005	0.006	0.005	0.004	<L.D
Ortofosfatos (mg/L)	0.1	0.13	0.4	0.10	0.06	1.8	0.12	0.08	0.07	0.2	0.14	0.09	<L.D
Sulfatos (mg/L)	4.0	2.4	3.5	8.0	2.8	<L.D	<L.D	3.5	3.5	<L.D	8.9	12.2	5.8

Tabla 39. Parámetros inorgánicos, continuación

Municipio	Libertador			Uracoa		
Nro	31	22	23	32	33	34
Boro (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
Cianuro (mg/L)	-	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0
Cloruros (mg/L)	4.5	3.5	3	35	30.5	12.5
Fluoruro (mg/L)	0.28	0.22	0.37	0.62	0.31	0.41
Nitratos (mg/L)	<L.D	10	10	10	10	10
Nitritos (mg/L)	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
Ortofosfatos (mg/L)	<L.D	0.07	0.09	0.43	0.31	1.09
Sulfatos (mg/L)	<L.D	<L.D	<L.D	4.6	4.0	<L.D

Tabla 40. Parámetros orgánicos

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fenoles (mg/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Aceites minerales e Hidrocarburos (mg/L)	< 0,1	0,6	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	0,4	< 0,1	< 0,1

Tabla 41. Parámetros orgánicos, continuación

Municipio	Independencia												
Nro	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	29	30
Fenoles (mg/L)	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hidrocarburo Total (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Tabla 42. Parámetros orgánicos, continuación

Municipio	Libertador			Uracoa		
Nro	31	22	23	32	33	34
Fenoles (mg/L)	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hidrocarburo Total (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Tabla 43. Parámetros orgánicos Biocidas

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Organofosforados y Carbamatos (mg/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Organoclorados (µg/L)	0,18	0,03	0,07	0,02	0,01	0,07	0,01	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,05

Tabla 44. Parámetros orgánicos Biocidas, continuación

Municipio	Independencia												
Nro	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	29	30
Organofosforado y Carbamatos (mg/L)	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Organoclorados (mg/L)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	-	0.003	< 0.001	0.012	< 0.001	0.016	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.006

Tabla 45. Parámetros orgánicos Biocidas, continuación

Municipio		Libertador		Uracoa		
Nro	31	22	23	32	33	34
Organofosforado y Carbamatos (mg/L)	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Organoclorados (mg/L)	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	-	< 0.001

Tabla 46. Parámetros metálicos y no metálicos.

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Aluminio (mg/L)	0,6	0,05	0,3	2	0,3	0,2	0,07	0,1			0,14	0,6	0,22	0,1	0,1
Arsénico (mg/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Bario (mg/L)	0,07	0,06	0,23	0,21	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,47	0,02	0,03	0,03	0,08	0,05
Cadmio (mg/L)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Calcio (mg/L)	2,4	3,2	5,6	8	4	2,4	1,6	2,4	4,8	13	0	13,6	0,8	1,6	4
Cobre (mg/L)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cromo (mg/L)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Hierro (mg/L)	9	1,7	1,3	1,1	0,3	0,5	< 0,1	0,3		< 0,1	< 0,1	0,3	0,9	0,7	1,3
Litio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Magnesio (mg/L)	2,8	0,48	3,8	7,7	0,96	1,44	2,4	0,48	0,96	15,3	0,48	1,92	0,96	0,96	0,96
Manganeso (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Mercurio (mg/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Molibdeno (mg/L)	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Níquel (mg/L)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Potasio (mg/L)	3,1	4,1	2,4	4	1,1	1	1	0,8	1,2	2,3	2,2	2,3	1,5	1,4	1,4

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Plata (mg/L)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Plomo (mg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sodio (mg/L)	13	30	41	31	19	14	15	16	14	82	14	11	15	33	21
Selenio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Vanadio (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zinc (mg/L)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,57	< 0,1	< 0,1

Tabla 47. Parámetros metálicos y no metálicos, continuación

Municipio	Independencia												
Nro	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	29	30
Aluminio (mg/L)	0.1	**0.4**	0.2	0.0	**0.35**	**0.57**	0.0	0.1	0.1	**0.2**	0.1	0.05	0.05
Arsénico (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Bario (mg/L)	< 0.02	0.25	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.12	0.08	0.09	0.02
Cadmio (mg/L)	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Calcio (mg/L)	0.8	0.8	8	3.2	4.8	8	0.8	0.8	0.8	8.8	3.2	1.6	1.6
Cobre (mg/L)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Cromo (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Hierro (mg/L)	0.38	0.67	**1.2**	< 0.1	< 0.1	0.58	< 0.1	< 0.1	**3.6**	< 0.1	< 0.1	0.3	0.54
Litio (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	< 0.01	0.03
Magnesio (mg/L)	0.00	4.32	1.92	1.44	0.96	0.48	0.00	0.00	0.00	0.96	0.48	0.48	1.44
Manganeso (mg/L)	0.04	0.02	< 0.01	0.02	< 0.01	0.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.02
Mercurio (mg/L)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Molibdeno (mg/L)	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Niquel (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Potasio (mg/L)	3.9	3.8	5.1	2.3	3.2	4.3	2.7	2.2	2.5	2.6	3.5	4.2	2.5
Plata (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Plomo (mg/L)	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sodio (mg/L)	0.66	1.82	15.12	0.52	0.52	4.47	0.44	0.93	0.74	1.83	3.06	1.35	0.66
Selenio (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Vanadio (mg/L)	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Zinc (mg/L)	< 0.1	< 0.1	0.45	0.17	**5.8**	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	3.2	< 0.1	2.1	< 0.1

Tabla 48. Parámetros metálicos y no metálicos, continuación.

Municipio	Libertador			Uracoa		
Nro	31	22	23	32	33	34
Aluminio (mg/L)	0.07	0.0	0.0	**0.4**	0.1	**0.3**
Arsénico (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Bario (mg/L)	< 0.02	0.02	0.02	0.04	< 0.07	0.02
Cadmio (mg/L)	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Calcio (mg/L)	0.8	0.8	0.8	3.2	3.2	4.8
Cobre (mg/L)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Cromo (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Hierro (mg/L)	0.62	< 0.1	< 0.1	**1.20**	0.3	**2.65**
Litio (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03
Magnesio (mg/L)	0.0	0.00	0.00	0.48	0.48	3.36
Manganeso (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.06	1.28
Mercurio (mg/L)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Molibdeno (mg/L)	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Niquel (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Potasio (mg/L)	1.5	2.4	2.3	4.7	1.4	4.1
Plata (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Plomo (mg/L)	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sodio (mg/L)	0.7	0.42	0.46	10.05	4.95	8.82
Selenio (mg/L)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Vanadio (mg/L)	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Zinc (mg/L)	0.12	0.19	< 0.1	0.31	< 0.1	< 0.1

Tabla 49. Parámetros microbiológicos

Municipio	Sotillo										Libertador	Independencia	Uracoa		
Nro de Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Organismos coliformes totales (NMP/100 ml)	32,3	A	1,0	613,1	172	13,4	5,2	52	>2419,6	160,7	2	>2419,6	A	>2419,6	1,0
Organismos coliformes fecales (NMP/100 ml)	A	A	A	26,5	2	A	A	A	7,5	9,7	A	579,4	A	2419,6	A

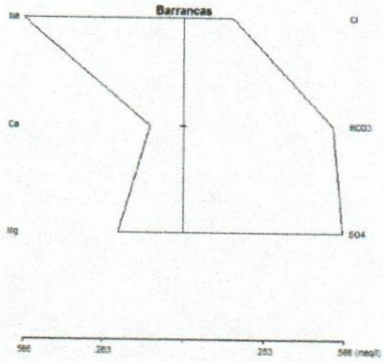
Tabla 50. Parámetros microbiológicos, continuación

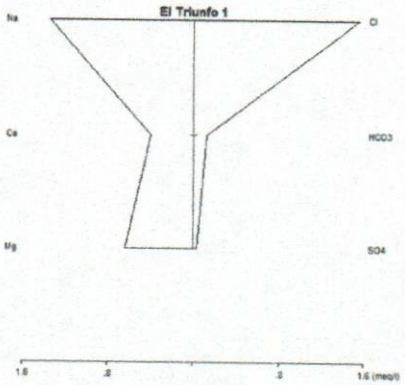
Municipio	Independencia												
Nro	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	29	30
Coliformes totales (NMP/100 ml)	2	12.2	3.1	5	A	13	10.8	5.2	5.2	55	183.3	8.6	1299.7
Coliformes fecales (NMP/ 100 ml)	1	5.2	A	A	A	A	A	A	A	46.2	157.3	3.1	A

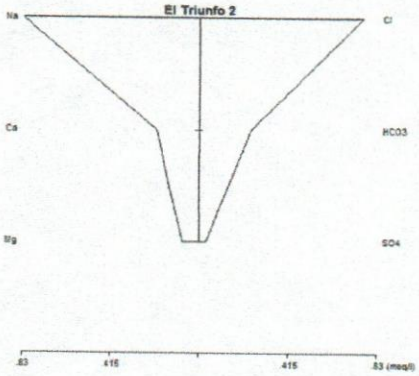
Tabla 51. Parámetros microbiológicos, continuación

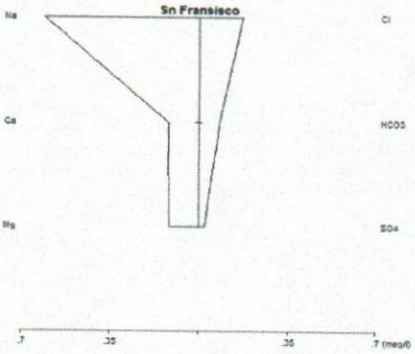
Municipio	Libertador			Uracoa		
Nro	31	22	23	32	33	34
Coliformes totales NMP/100 ml	2	59.9	1	866.4	> 2419.6	A
Coliformes fecales NMP/ 100 ml	A	A	A	A	> 2419.6	A

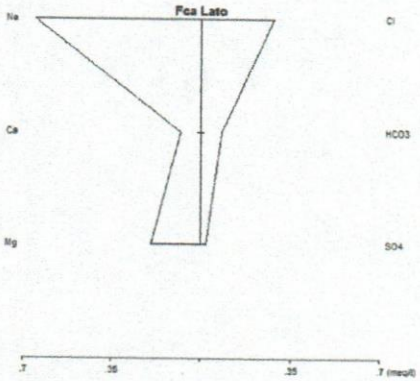
ANEXO D. Diagramas de Stiff

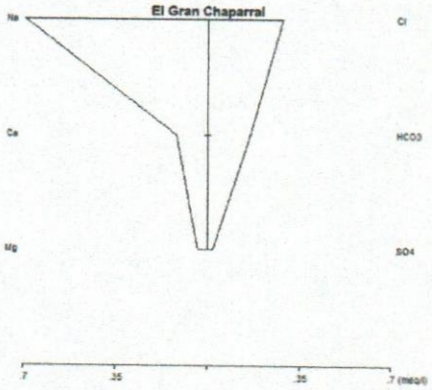












ANEXO E. Decreto N° 883, abastecimiento humano

- **Municipio Sotillo**

Tabla 52. Pozos muestreados en el Municipio Sotillo

Parámetro	Barrancos de Barrancas	Sector INAVI	Barrio Moscú	El Triunfo 1	El Triunfo 2	San Francisco	Finca Lato	El Gran Chaparral 1	El Gran Chaparral 2	El Guayabo 1	Sub-tipo 1A	Sub-tipo 1B	Sub-tipo 1C
Aceites minerales (mg/l)	<0,1	0,6	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	0,3	
Aluminio (mg/l)	0,6	0,05	0,3	2	0,3	0,2	0,07	0,1	-	-	0,2	0,2	
Arsénico (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	0,05	
Bario (mg/l)	0,07	0,06	0,23	0,21	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,47	1,0	1,0	
Cadmio (mg/l)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,01	0,01	
Cianuro (mg/l)	0,008	0,007	< 0,002	0,005	0,006	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,1	0,1	
Cloruros(mg/l)	6,1	22,5	38	55	27	6	6	10	10	107	600	600	
Cobre (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,0	1,0	
Coliformes totales (NMP/100 ml)	32,3	A	1,0	613,1	172	13,4	5,2	52	>2419,6	160,7	< 2000	< 10000	
Color verdadero UCV	4,0	8,0	0	182	14	43	0	0	30	0	<50	<150	
Cromo (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		< 0,1	0,05	0,05	
Dureza Total (mg/l CaCO3)	18	10	30	52	14	12	14	8	16	96	500	500	
Fenoles (mg/l)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	0,002	
Fluoruro (mg/l)	< 0,02	0,25	< 0,02	0,05	< 0,02	0,32	< 0,02	0,16	0,13	0,21	< 1,7	< 1,7	

Parámetro	Barrancos de Barrancas	Sector INAVI	Barrio Moscú	El Triunfo 1	El Triunfo 2	San Francisco	Finca Lato	El Gran Chaparral 1	El Gran Chaparral 2	El Guayabo 1	Sub-tipo 1A	Sub-tipo 1B	Sub-tipo 1C
Hierro (mg/l)	9,0	1,7	1,3	1,1	0,3	0,5	< 0,1	0,3		< 0,1	1,0	1,0	
Manganeso (mg/l)	-	-	-	-	-	-	-		-	-	0,1	0,1	
Mercurio (mg/l)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,01	0,01	
Nitritos + Nitratos (mg/l_N)	0,103	0,202	3,712	4,768	0,403	0,303	0,503	0,203	0,704	9,136	10	10	
Organoclorados (µg/l)	0,18	0,03	0,07	0,02	0,01	0,07	0,01	0,05	0,04	0,02	0,2	0,2	
Organofosforados y Carbamatos (mg/l)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,1	0,1	
pH	6,1	7,2	7,1	5,6	5,85	5,2	5,3	5,25	6,06	5,4	6,0 - 8,5	6,0 - 8,5	3,8 - 10,5
Plata (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05	0,05	
Plomo (mg/l)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,05	0,05	
Selenio (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	
Sodio (mg/l)	13	30	41	31	19	14	15	16	14	82	200	200	
Sulfatos (mg/l)	27	2	23	1,5	1,5	1,1	0	1	1,5	0	400	400	
Turbiedad (NTU)	0,14	1,63	2,84	24,1	4,89	1,27	1,55	0,86	5,36	0,92	< 25	< 250	
Zinc (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	5,0	5,0	
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	32	62	125	135	53	15	15	20	37	255	1500	1500	

- No determinado