



El Colegio de Chihuahua

“Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.”

Tesis presentada por

Rosa Manuela Salas Escageda

Para obtener el grado de

DOCTORA EN INVESTIGACIÓN

Ciudad Juárez, Chihuahua, agosto de 2015



El Colegio de Chihuahua

“Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.”

Tesis presentada por

Rosa Manuela Salas Escageda

Para cumplir con los requisitos parciales para obtener el grado de

DOCTORA EN INVESTIGACIÓN

Director de Tesis

Dr. Jorge Arturo Salas Plata Mendoza

Comité de Tesis

Dra. Luz Helena Sanín Aguirre

Dr. Oscar Sotero Dena Ornelas

Ciudad Juárez, Chihuahua, agosto de 2015

Firmas Comité Examinador

Dr. Jorge Arturo Salas Plata Mendoza

Dra. Luz Helena Sanín Aguirre

Dr. Oscar Sotero Dena Ornelas

Dedicatoria

Agradecimientos

Mi frase celebre

Resumen

El objetivo de este estudio fue analizar la presencia de doce constituyentes químicos en el agua de los acuíferos que suministran este recurso natural a los usuarios de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Con base en la información proporcionada (2008-2010, 2012) por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) de la ciudad y la normatividad aplicable, se establecieron tres niveles de calidad para cada elemento estudiado; aceptable cuando el resultado es menor al límite de detección, alerta para resultados mayores al límite de detección y menor al límite máximo permisible (LMP), y fuera de norma para los que sobrepasan el LMP. Se realizó una georreferenciación de los pozos para estos tres niveles. Los resultados indicaron la ausencia de cromo y cadmio, y sobrepasando algunos pozos el LMP de varios de los elementos estudiados. Los registros de calidad de la JMAS para los elementos fuera de norma, son los siguientes: Plomo (1 %); Aluminio (1.34 %); Arsénico (4.46 %); Fierro (7.59 %); Mercurio (7.9 %); Manganeseo (11.33 %) y Sodio (14.7 %). Los valores promedio de las concentraciones correspondientes a los porcentajes anteriores son las siguientes: Plomo (0.033 mg/L, con LMP = 0.025 mg/L); Aluminio (0.294 mg/L, con LMP = 0.200 mg/L); Arsénico (0.050 mg/L, con LMP = 0.025 mg/L); Fierro (1.369 mg/L, con LMP = 0.300 mg/L); Mercurio (0.002 mg/L, con LMP = 0.001 mg/L); Manganeseo (0.527 mg/L, con LMP = 0.150 mg/L) y Sodio (296.540 mg/L, con LMP = 200 mg/L). No obstante estar dentro del LMP el cobre y el bario, reportaron concentraciones en calidad de alerta. La ciudad ya está en riesgo de impactos negativos a la salud pública por lo que se requiere la intervención inmediata de las autoridades de salud, JMAS y la comunidad, para implementar políticas públicas que incluyan tratamientos *ad hoc* de las aguas.

Palabras claves. Calidad del agua, metales y metaloides, pozos de agua, acuíferos, georreferenciación, normatividad.

Abstract

The objective of this study was to analyze the presence of twelve chemical constituents in water from the aquifers that supply this natural resource to users in Juarez city, Chihuahua, Mexico. Based on the information provided (2008-2010, 2012) by the Water Utilities (JMAS) of the city and the applicable regulations, it was established three quality levels for each element studied; acceptable, when the result is less than the limit of detection, alert, to results greater than the detection limit and less than the maximum allowable (PML), and above the standard, for those who exceed the PML. It was a georeferencing of these three levels. The results indicated the absence of chromium and cadmium, and some wells exceeding the PML of several of the elements studied. The quality records JMAS for non-standard elements are as follows: Lead (1%); Aluminum (1.34%); Arsenic (4.46%); Fierro (7.59%); Mercury (7.9%); Manganese (11.33%) and sodium (14.7%). The average values of the concentrations corresponding to the above percentages are: Lead (0.033 mg/L, with PML = 0.025 mg/L); Aluminum (0.294 mg/L, with PML = 0.200 mg / L); Arsenic (0.050 mg/L, with PML = 0.025 mg/L); Fierro (1.369 mg/L, with PML = 0.300 mg/L); Mercury (0.002 mg/L, with PML = 0.001 mg/L); Manganese (0.527 mg/L, with PML = 0.150 mg/L) and sodium (296.540 mg/L, with PML = 200 mg/L). Nevertheless be within the PML, copper and barium concentrations reported quality alert. The city is at risk of negative impacts to public health already so that the immediate intervention of the health authorities, JMAS and the community, is required to implement public policies that include *ad hoc* treatments of water.

Key words: Water quality, metals and metalloids, water wells, aquifers, georeferencing, standards

Tabla de Contenido

Introducción	1
Problema de estudio.....	2
Antecedentes	3
Justificación	4
Pregunta de investigación	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	6
Alcances y limitaciones	6
Resultados esperados	7
Capítulo I.	8
Marco teórico	8
1.1 Fuentes de abastecimiento de agua	8
1.1.1 Aguas meteóricas	9
1.1.2 Aguas subterráneas	9
1.1.3. Sobreexplotación, contaminación y vulnerabilidad del agua subterránea	14
1.1.4 Aguas superficiales	18
1.2 Uso y calidad del agua	19
1.3 Metales y metaloides	22
1.3.1 Metales pesados	23

1.3.2 Descripción de los constituyentes químicos normados (metales y metaloides)	26
1.3.2.1 Aluminio	26
1.3.2.2 Arsénico	29
1.3.2.3 Bario.....	34
1.3.2.4 Cadmio	35
1.3.2.5 Cobre.....	37
1.3.2.6 Cromo	39
1.3.2.7 Fierro	42
1.3.2.8 Manganeso	44
1.3.2.9 Mercurio.....	49
1.3.2.10 Plomo	51
1.3.2.11 Sodio	53
1.3.2.12 Zinc	55
1.4 Normatividad	57
1.4.1 Parámetros y periodicidad de análisis.....	58
1.4.2 Métodos de prueba.....	59
1.5 Abastecimiento en Ciudad Juárez.....	60
Capítulo II	62
Metodología	62
2.1 Área de estudio	65
2.2 Diseño de la investigación	65
2.3. Población de estudio	66
2.4 Criterios de inclusión	66

2.5 Criterios de exclusión	66
2.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	66
2.7 Variables de estudio.....	66
2.7.1 Operacionalización de las variables.....	67
Capítulo III.....	69
Resultados.....	69
Capítulo IV	157
Discusión	157
Conclusiones y recomendaciones	162
Referencias.....	165
Anexos	179

Índice de figuras

Figura 1. Resultados de análisis en las tres calidades, para los doce constituyentes químicos. 2008-2010, 2012.....	72
Figura 2. Aportaciones de cada elemento en los globales las tres calidades, 2008-2010, 2012.....	73
Figura 3. Resultados de las tres calidades para Arsénico. 2008-2010 y 2012.....	75
Figura 4. Resultados de las tres calidades para el aluminio, 2008-2010, 2012.	81
Figura 5. Resultados de las tres calidades para el manganeso, 2008-2010, 2012.	87
Figura 6. Resultados de las tres calidades para el bario, 2008-2010, 2012.	93
Figura 7. Resultados de las tres calidades para el cobre, 2008-2010, 2012.	99
Figura 8. Resultados de las tres calidades para el cromo, 2008-2010, 2012.	104
Figura 9. Resultados de las tres calidades para el cadmio, 2008-2010, 2012.....	109
Figura 10. Resultados de las tres calidades para el mercurio, 2008-2010, 2012.....	115
Figura 11. Resultados de las tres calidades para el plomo, 2008-2010, 2012.	121
Figura 12. Resultados de las tres calidades para el zinc, 2008-2010, 2012.....	127
Figura 13. Resultados de las tres calidades para el fierro, 2008-2010, 2012.	133
Figura 14. Resultados de las tres calidades para el sodio, 2008-2010, 2012.....	139
Figura 15. Tendencia del As al año 2016.	154
Figura 16. Tendencia del Fe al año 2016.....	155
Figura 17. Tendencia del Hg al año 2016.....	155

Figura 18. Tendencia del Mn al año 2016.156

Figura 19. Tendencia del Na al año 2016.156

Índice de tablas

Tabla 1. Límites máximos permisibles (mg/L) para los constituyentes químicos estudiados, en la OMS, países de América y del Caribe.....	70
Tabla 2. Resultados de análisis en las tres calidades, para los doce constituyentes químicos. 2008-2010, 2012.	71
Tabla 3. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para arsénico, 2008-2010, 2012.	74
Tabla 4. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para aluminio, 2008-2010, 2012.	80
Tabla 5. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para manganeso, 2008-2010, 2012.	86
Tabla 6. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para bario, 2008-2010, 2012.	92
Tabla 7. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para cobre, 2008-2010, 2012.....	98
Tabla 8. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para mercurio, 2008-2010, 2012.	114
Tabla 9. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para plomo, 2008-2010, 2012.	120

Tabla 10. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para zinc, 2008-2010, 2012.....	126
Tabla 11. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para fierro, 2008-2010, 2012.....	132
Tabla 12. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para sodio, 2008-2010, 2012.....	138
Tabla 13. Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012.....	145

Índice de mapas

Mapa 1. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2008.	76
Mapa 2. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2009.	77
Mapa 3. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2010.	78
Mapa 4. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2012.	79
Mapa 5. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Al en los pozos. Año 2008.....	82
Mapa 6. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Al en los pozos. Año 2009.....	83
Mapa 7. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Al en los pozos. Año 2010.....	84
Mapa 8. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Al en los pozos. Año 2012.....	85
Mapa 9. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Mn en los pozos. Año 2008. ...	88
Mapa 10. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Mn en los pozos. Año 2009. .	89
Mapa 11. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Mn en los pozos. Año 2010. .	90
Mapa 12. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Mn en los pozos. Año 2012. .	91
Mapa 13. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Ba en los pozos. Año 2008. ..	94
Mapa 14. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Ba en los pozos. Año 2009. ..	95
Mapa 15. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Ba en los pozos. Año 2010. ..	96
Mapa 16. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Ba en los pozos. Año 2012. ..	97
Mapa 17. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cu en los pozos. Año 2008. .	100
Mapa 18. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cu en los pozos. Año 2009. .	101
Mapa 19. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cu en los pozos. Año 2010. .	102

Mapa 20.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cu en los pozos. Año 2012.	103
Mapa 21.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cr en los pozos. Año 2008..	105
Mapa 22.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cr en los pozos. Año 2009..	106
Mapa 23.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cr en los pozos. Año 2010..	107
Mapa 24.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cr en los pozos. Año 2012..	108
Mapa 25.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cd en los pozos. Año 2008.	110
Mapa 26.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cd en los pozos. Año 2009.	111
Mapa 27.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cd en los pozos. Año 2010.	112
Mapa 28.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Cd en los pozos. Año 2012.	113
Mapa 29.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Hg en los pozos. Año 2008.	116
Mapa 30.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Hg en los pozos. Año 2009.	117
Mapa 31.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Hg en los pozos. Año 2010.	118
Mapa 32.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Hg en los pozos. Año 2012.	119
Mapa 33.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Pb en los pozos. Año 2008.	122
Mapa 34.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Pb en los pozos. Año 2009.	123
Mapa 35.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Pb en los pozos. Año 2010.	124
Mapa 36.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Pb en los pozos. Año 2012.	125
Mapa 37.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Zn en los pozos. Año 2008.	128
Mapa 38.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Zn en los pozos. Año 2009.	129
Mapa 39.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Zn en los pozos. Año 2010.	130
Mapa 40.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Zn en los pozos. Año 2012.	131
Mapa 41.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Fe en los pozos. Año 2008..	134
Mapa 42.	Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Fe en los pozos. Año 2009..	135

Mapa 43. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Fe en los pozos. Año 2010..	136
Mapa 44. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Fe en los pozos. Año 2012..	137
Mapa 45. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Na en los pozos. Año 2008.	140
Mapa 46. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Na en los pozos. Año 2009.	141
Mapa 47. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Na en los pozos. Año 2010.	142
Mapa 48. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Na en los pozos. Año 2012.	143
Mapa 49. Calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) en ocho de los constituyentes químicos. 2008-2010, 2012.....	152
Mapa 50. Calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) en siete de los constituyentes químicos. 2008-2010,2012	153

Índice de apéndices

Apéndice 1. Aluminio 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	179
Apéndice 2. Aluminio 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	188
Apéndice 3. Aluminio 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	189
Apéndice 4. Aluminio 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	190
Apéndice 5. Aluminio 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	198
Apéndice 6. Aluminio 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	199
Apéndice 7. Aluminio 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	200
Apéndice 8. Aluminio 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	209
Apéndice 9. Aluminio 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	210

Apéndice 10. Aluminio 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	211
Apéndice 11. Aluminio 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	218
Apéndice 12. Arsénico 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	219
Apéndice 13. Arsénico 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	221
Apéndice 14. Arsénico 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	228
Apéndice 15. Arsénico 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	229
Apéndice 16. Arsénico 2009. Calidad alerta con numero de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	231
Apéndice 17. Arsénico 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	238
Apéndice 18. Arsénico 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	239
Apéndice 19. Arsénico 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	242
Apéndice 20. Arsénico 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	248

Apéndice 21. Arsénico 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	249
Apéndice 22. Arsénico 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	250
Apéndice 23. Arsénico 2012. Calidad aceptable (no detectado) con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	251
Apéndice 24. Bario 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	257
Apéndice 25. Bario 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	257
Apéndice 26. Bario 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	266
Apéndice 27. Bario 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	266
Apéndice 28. Bario 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	266
Apéndice 29. Bario 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	274
Apéndice 30. Bario 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	274
Apéndice 31. Bario 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	275

Apéndice 32. Bario 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	282
Apéndice 33. Bario 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	283
Apéndice 34. Bario 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	290
Apéndice 35. Bario 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	290
Apéndice 36. Cadmio 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	291
Apéndice 37. Cadmio 2008. Calidad alerta con numero de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	300
Apéndice 38. Cadmio 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	300
Apéndice 39. Cadmio 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	301
Apéndice 40. Cadmio 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	309
Apéndice 41. Cadmio 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	309
Apéndice 42. Cadmio 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	310

Apéndice 43. Cadmio 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	318
Apéndice 44. Cadmio 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	318
Apéndice 45. Cadmio 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	319
Apéndice 46. Cadmio 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	325
Apéndice 47. Cadmio 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	325
Apéndice 48. Cobre 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	326
Apéndice 49. Cobre 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	334
Apéndice 50. Cobre 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	335
Apéndice 51. Cobre 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	336
Apéndice 52. Cobre 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	339
Apéndice 53. Cobre 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	339

Apéndice 54. Cobre 2009. Calidad NA con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	340
Apéndice 55. Cobre 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	346
Apéndice 56. Cobre 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	355
Apéndice 57. Cobre 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	356
Apéndice 58. Cobre 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	357
Apéndice 59. Cobre 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	363
Apéndice 60. Cobre 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	363
Apéndice 61. Cobre 2012. Calidad ND (no detectado) con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	364
Apéndice 62. Cromo 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	366
Apéndice 63. Cromo 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	374
Apéndice 64. Cromo 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	374

Apéndice 65. Cromo 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	375
Apéndice 66. Cromo 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	382
Apéndice 67. Cromo 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	382
Apéndice 68. Cromo 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	383
Apéndice 69. Cromo 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	393
Apéndice 70. Cromo 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	393
Apéndice 71. Cromo 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	394
Apéndice 72. Cromo 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	401
Apéndice 73. Cromo 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	401
Apéndice 74. Fierro 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	402
Apéndice 75. Fierro 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	406

Apéndice 76 Fierro 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	406
Apéndice 77. Fierro 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	408
Apéndice 78. Fierro 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	410
Apéndice 79. Fierro 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	412
Apéndice 80. Fierro 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	413
Apéndice 81. Fierro 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	417
Apéndice 82. Fierro 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	422
Apéndice 83. Fierro 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	424
Apéndice 84. Cromo 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	431
Apéndice 85. Cromo 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	431
Apéndice 86. Manganeso 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	432

Apéndice 87. Manganeso 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	437
Apéndice 88. Manganeso 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	440
Apéndice 89. Manganeso 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	442
Apéndice 90. Manganeso 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	447
Apéndice 91. Manganeso 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	451
Apéndice 92. Manganeso 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	452
Apéndice 93. Manganeso 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	455
Apéndice 94. Manganeso 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	457
Apéndice 95. Manganeso 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	458
Apéndice 96. Manganeso 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	458
Apéndice 97. Manganeso 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	467

Apéndice 98. Mercurio 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	468
Apéndice 99. Mercurio 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	476
Apéndice 100. Mercurio 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	476
Apéndice 101. Mercurio 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	478
Apéndice 102. Mercurio 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	487
Apéndice 103. Mercurio 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	487
Apéndice 104. Mercurio 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	488
Apéndice 105. Mercurio 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	495
Apéndice 106. Mercurio 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	497
Apéndice 107. Mercurio 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	499
Apéndice 108. Mercurio 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	503

Apéndice 109. Mercurio 2012. Calidad fuera de normas con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	503
Apéndice 110. Mercurio 2012. Calidad nd con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	504
Apéndice 111. Plomo 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	507
Apéndice 112. Plomo 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	516
Apéndice 113. Plomo 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	516
Apéndice 114. Plomo 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	517
Apéndice 115. Plomo 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	524
Apéndice 116. Plomo 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.	524
Apéndice 117. Plomo 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	525
Apéndice 118. Plomo 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	534
Apéndice 119. Plomo 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	534

Apéndice 120. Plomo 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	535
Apéndice 121. Plomo 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	541
Apéndice 122. Plomo 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	541
Apéndice 123. Sodio 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	542
Apéndice 124. Sodio 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	543
Apéndice 125. Sodio 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	558
Apéndice 126. Sodio 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	560
Apéndice 127. Sodio 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	560
Apéndice 128. Sodio 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	566
Apéndice 129. Sodio 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	568
Apéndice 130. Sodio 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	568

Apéndice 131. Sodio 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	575
Apéndice 132. Sodio 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	577
Apéndice 133. Sodio 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	577
Apéndice 134. Sodio 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	583
Apéndice 135. Zinc 2008. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	586
Apéndice 136. Zinc 2008. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	596
Apéndice 137. Zinc 2008. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	597
Apéndice 138. Zinc 2009. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	597
Apéndice 139. Zinc 2009. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	605
Apéndice 140. Zinc 2009. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	605
Apéndice 141. Zinc 2010. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	606

Apéndice 142. Zinc 2010. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	616
Apéndice 143. Zinc 2010. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	616
Apéndice 144. Zinc 2012. Calidad aceptable con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	616
Apéndice 145. Zinc 2012. Calidad alerta con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	619
Apéndice 146. Zinc 2012. Calidad fuera de norma con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	619
Apéndice 147. Zinc 2012. Calidad nd con número de pozo y su ubicación en coordenadas X y Y.....	619

Listado de acrónimos y siglas

ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades

CCA. Comisión para la Cooperación Ambiental

CNA. Comisión Nacional del Agua

COFEPRIS. Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

JCAS. Junta Central de Agua y Saneamiento

JMAS. Junta Municipal de Agua y Saneamiento

NOM. Norma Oficial Mexicana

ODM. Objetivos de desarrollo del Milenio

OMS. Organización Mundial de la Salud

ONU. Organización de las Naciones Unidas

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

UNICEF. Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia

USEPA. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

WHO. World Health Organization

Introducción

El agua es una sustancia líquida, incolora, inodora e insípida, que forma gran parte de la superficie terrestre. En la naturaleza forma parte de los seres vivos y en los minerales se encuentra como agua de cristalización, siendo considerada como el solvente universal más utilizado (Salcedo, M., 2014).

El agua es un recurso natural finito y esencial para la vida, estimándose que solo el 2.53% del total es agua dulce y el resto es agua salada. Sin embargo, los recursos disponibles de agua dulce, apenas representan el 0.1% del agua del planeta. No obstante que se considera la posibilidad de una disminución en el consumo per cápita debido a las campañas de ahorro y buen uso del recurso, la población crece y en consecuencia el porcentaje de agua demandada. Una fuente muy importante de agua dulce la constituyen los acuíferos subterráneos y la mayor proporción del agua utilizada en servicios de agua potable rural y urbano proviene de éstos (Meza, J., *et al*, 2007). En el estado de Chihuahua, el agua subterránea representa el 60% de los aprovechamientos de agua potable para el sostenimiento de las distintas actividades (JCAS, 2005, Sáenz CG, *et al*, 2011), precisamente por sus características geográficas y climatológicas, el agua subterránea es el principal recurso para el abastecimiento tanto público como industrial y para riego agrícola (Espino, M.S., *et al*, 2009) y en Ciudad Juárez, actualmente el abastecimiento esencial de agua proviene de dos acuíferos identificados como El Bolsón del Hueco y el Bolsón de Mesilla de donde se extraen un promedio de 156 millones de metros cúbicos por año (JMAS, 2015).

La ONU declaró en el año 2002: “El agua es un recurso natural limitado y un bien público fundamental para la vida y la salud” y de acuerdo con la FAO, más del 40% de la población mundial sufre carencia de agua, de tal forma que para el año 2025 más de 1,800 millones de personas vivirán en regiones con escasez drástica. El gran problema ambiental del siglo XXI será la disponibilidad de agua dulce y limpia, debido al cambio climático, el crecimiento poblacional y económico expansivo (que sobrepasa la capacidad de carga de los ecosistemas) que ejercen cada vez más presión sobre este recurso, pronosticándose las regiones norte y centro de México con mayor escasez de agua, de tal forma que para el 2025 se estima una reducción del 30% en cuanto a la disponibilidad por habitante/año (El agua en Chihuahua, 2012).

El agua es indispensable para la vida, y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio (suficiente, inocuo y accesible). La mejora del acceso al agua potable proporciona beneficios tangibles para la salud, por lo que es necesario realizar el máximo esfuerzo para lograr que la inocuidad del agua de consumo sea la mayor posible (OMS, 2004). El planteamiento anterior motiva este estudio en cuanto a la calidad del vital líquido asociada a los doce constituyentes químicos normados (metales y metaloides), para caracterizar, con base en la normatividad vigente, la calidad del agua de los pozos que abastecen a la población de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Problema de estudio

Hay incertidumbre entre la población de esta ciudad respecto a la calidad del agua domiciliaria. Se tiene evidencia de que en algunos sectores, eventualmente salen sedimentos de la llave; el agua tiene un sabor desagradable o una coloración inapropiada.

Sin embargo, la JMAS asegura entregar agua potable a los consumidores aunque reconoce la presencia de contaminantes adicionando hexametáfosfato de sodio (NaPO_3)₆ para evitar que el vital líquido llegue a las llaves de los usuarios con una cloración oscura café rojizo.

Adicionalmente, se sabe que la principal fuente de suministro de agua para esta ciudad es el acuífero Bolsón del Hueco que se considera, por algunas fuentes de información, como sobreexplotado en la parte mexicana. Esta sobreexplotación conlleva la presencia de contaminantes químicos como el arsénico que está clasificado como carcinógeno.

Antecedentes

En marzo de 2012 el comunicado de prensa conjunto OMS-UNICEF, informó que el mundo había cumplido con la meta de los ODM de reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso al agua potable mucho antes de la fecha límite del 2015; es decir, entre 1990 y 2010, más de 2,000 millones de personas obtuvieron acceso a fuentes mejoradas de agua potable, como, por ejemplo, el suministro de agua por medio de tuberías y pozos. De esta manera se estima que el 89% de la población mundial ya tiene acceso al agua potable (WHO, News 2012). Por otro lado, la modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 confirma que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otros padecimientos. Por lo anterior, se requiere establecer límites permisibles en cuanto a las características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el propósito de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor. En la Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-

1998. “Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público”, se decreta el requerimiento de una muestra semestral para su análisis en las fuentes de abastecimiento de agua potable que sean subterráneas, siendo este criterio aplicable a cada uno de los pozos de agua del área de estudio determinada y que componen el sistema de abastecimiento del vital líquido a la población de Ciudad Juárez, Chihuahua. Los parámetros identificados como constituyentes químicos (metales y metaloides) que se examinan en este estudio, son los que se ordenan en la normatividad mexicana donde se establecen los límites máximos permisibles para cada uno, por lo que es necesario revisar los registros de los resultados de análisis de agua de los pozos que se practican en el Laboratorio de Calidad de Agua de la JMAS, para precisar su cumplimiento, definir su calidad, caracterizar y ubicar geoespacialmente los puntos de muestreo, es decir, los pozos de agua.

Justificación

Para efectuar un correcto abastecimiento de agua potable, además del sistema de obras que conforman la red de abastecimiento que incluye las obras de captación, se debe contar con las fuentes correspondientes tomando en cuenta dos aspectos fundamentales: la capacidad de suministro y la calidad del agua. Determinar la calidad de abastecimiento para uso y consumo humano permite implementar la infraestructura necesaria para asegurar la calidad de agua que se entrega al consumidor y evitar impactos negativos a la salud, siempre y cuando se analice la información caracterizando su calidad de tal forma que, aportando nuevos elementos, sea la base para la elaboración y ejecución de políticas públicas.

Se ha dado gran importancia a la relación agua-salud, no obstante, el enfoque ha sido básicamente a los aspectos bacteriológicos y estéticos y no tanto a los constituyentes químicos, por lo que la investigación en cuanto a la calidad del vital líquido se ha visto rezagada y parcializada.

A pesar de la incidencia en la salud de elementos como el arsénico y el fluor en al menos nueve estados del noroeste, centro y sur de México, se han realizado pocas investigaciones de carácter hidrogeológico en cuencas y acuíferos que permitan evaluar los controles físicos y químicos de estos elementos y otros presentes en el agua subterránea, con efectos nocivos a la salud

En el caso de Ciudad Juárez existen algunos estudios bacteriológicos y químicos pero, lo que también es necesario, es un análisis de la calidad química del agua de toda la ciudad en cuanto a los metales y metaloides y, lo más importante, es el seguimiento a los resultados para decidir la implementación de medidas necesarias evitando la exposición de la población.

Pregunta de investigación

¿A qué metales y/o metaloides contenidos en el agua doméstica está expuesta geográficamente la población de Ciudad Juárez que puedan ser motivo de alerta de acuerdo a la normatividad?

Objetivo general

Analizar la presencia, en Ciudad Juárez, de doce constituyentes químicos (metales y metaloides) en el agua para el consumo humano de los dos acuíferos que la suministran, es decir, el Bolsón del Hueco y Mesilla (Conejos Médanos).

Objetivos específicos

- A. Recolectar, organizar y analizar los registros de calidad del agua de pozos administrados por la JMAS en el periodo 2008-2010, 2012, con base en las siguientes escalas: Aceptable, alerta y fuera de norma.
- B. Ubicar en un mapa de la ciudad la localización geográfica de los pozos asociados a cada una de las tres calidades y para cada uno de los doce constituyentes químicos estudiados.

Alcances y limitaciones

El estudio dirigió su atención al análisis de contaminantes químicos en el agua potable y a las posibles afectaciones a la salud pública, así como a la necesidad de procesos de tratamiento del vital líquido y la implementación de políticas públicas que eviten efectos nocivos en la población por la ingesta de dichos contaminantes cuando éstos sobrepasan las normas decretadas por las autoridades de salud. Se trata de una primera aproximación al fenómeno previo a posteriores estudios donde se aborde la evaluación de riesgo.

En el Valle de Juárez se encuentran pozos de agua que fueron habilitados para abastecer a la población de las pequeñas comunidades que lo conforman, además de continuar con su propósito inicial de ser utilizados para el riego de cultivos. Estos pozos no

fueron incluidos para el estudio de calidad de agua por estar insertos en sistemas hidroagrícolas y por no disponer de sus coordenadas geográficas.

Cuando se reporta un resultado de análisis de agua solamente como menor al límite permisible en la normatividad sin definir la concentración como fue el caso de gran cantidad de registros, no es posible su caracterización en cuanto a calidad acorde a lo definido en este estudio y no aporta información para una evaluación de riesgo ya que no permite especificar dosis-respuesta y exposición.

Resultados esperados

Dado que se tenía conocimiento (Olivas, 2013) de la aplicación de hexametáfosfato de sodio (NaPO_3)₆ para evitar que el agua llegue a las llaves domésticas con una cloración café rojizo; de que el acuífero Bolsón del Hueco presentaba signos de agotamiento de sus aguas dulces; de los procesos contaminantes potenciales del manto freático (fertilizantes de la agricultura, gasolina de las despachadoras, etc.); de la falta de cultura del agua de la población; de las políticas de manejo del agua que en ocasiones responden a los tiempos electorales, etc., se esperaba la presencia de algunos elementos químicos en las aguas de los pozos en las escalas de alerta y fuera norma.

Capítulo I.

Marco teórico

El agua es un sistema complejo, no homogéneo, que puede estar constituido por una fase acuosa, una gaseosa y una o más fases sólidas (Stumy Morgan, 1970). Es una especie química determinante de muchas de las características físico-químicas y biológicas importantes en el mundo, afirmándose que es la base de la vida y más aún, se asegura que sin su presencia y propiedades únicas, la vida sobre la tierra, no sería posible. El agua dulce o salada que se encuentra en la superficie de la corteza terrestre está sometida a radiaciones energéticas que proceden del sol, por lo que una parte del agua, experimenta un cambio de estado pasando a la atmósfera en forma de vapor de agua, y cuando llega a las altas capas de la atmósfera, donde la temperatura es más baja, se condensa formando pequeñas gotitas que forman las nubes (Catalán J., 1981). La misma agua ha subido una y otra vez de los océanos al aire, ha caído en la tierra y ha vuelto al mar. Este proceso natural que evapora el agua del océano, la distribuye de los océanos a todas partes de la tierra y la hace volver al mar, se conoce como Ciclo Hidrológico, aunque en el estado de Chihuahua este ciclo es muy lento (JMAS, 2012).

1.1 Fuentes de abastecimiento de agua

Las fuentes de abastecimiento de agua reconocidas de manera general, son las aguas meteóricas, superficiales y subterráneas.

1.1.1 Aguas meteóricas

Las aguas meteóricas son las aguas de lluvia que generalmente son potables; las que provienen de la nieve derretida son de calidad inferior pues ya suelen contaminarse al estar depositadas sobre el suelo. Las aguas de lluvia no sufren por lo general alteración apreciable a través de su paso por la atmósfera, de la cual recogen cantidades pequeñas de anhídrido carbónico, oxígeno, nitrógeno y polvo en suspensión coloidal, con la posible adición de contenido bacteriano. Estas aguas son muy apreciadas cuando faltan otros recursos y también en establecimientos rurales y pequeñas instalaciones, usándose comúnmente para su recolección los techos de las casas. Las aguas meteóricas precipitadas en el suelo sufren un fraccionamiento triple, de tal forma que una porción vuelve a la atmósfera por evaporación, otra se escurre por la superficie del suelo y el resto es el que se infiltra para formar depósitos subterráneos. La variación de ese fraccionamiento depende de las condiciones topográficas y la constitución geológica del suelo (Orellana, 2005).

1.1.2 Aguas subterráneas

El agua subterránea es un recurso natural muy valioso; es un componente esencial del Ciclo Hidrológico y está íntimamente relacionada con el resto de los componentes del ciclo, en particular con las aguas superficiales (Sahuquillo, A., 2009). Es la que se infiltra en el suelo y proviene de las precipitaciones, ríos, lagos y lagunas de fondo permeable, descendiendo por acción de la gravedad con velocidad de penetración inversamente proporcional al grado de permeabilidad de los suelos que atraviesa (Fagundo, G.R., et al 2007). La Comisión Nacional del Agua la define como el agua que satura por completo los

poros o intersticios del subsuelo. Por lo tanto es aquella que constituye la zona saturada (CNA, 2008).

En general, las aguas subterráneas poseen una composición química que se origina como resultado de un proceso complejo de interacciones donde primeramente las aguas procedentes de las precipitaciones (lluvia o nieve) adquieren los gases que se producen en la zona del suelo por descomposición y respiración de la materia orgánica y luego reaccionan con los minerales que subyacen en el medio rocoso. La composición química de las aguas subterráneas, al cabo de un determinado tiempo, se encuentra en equilibrio físico-químico con el contenido de gases y de fases sólidas disueltas. Estos equilibrios dependen de la temperatura y de la presión del sistema y cualquier cambio en esas condiciones produce una variación en la composición química que da lugar a una mayor disolución de los minerales o a la precipitación de éstos por recombinación iónica (Fagundo, G.R., et al 2007). Se encuentran en estratos geológicos muy diversos desde gravas y arenas hasta limos confinados entre capas de suelo impermeable. Estos reservorios comúnmente llamadas napas pueden estar contenidos entre dos capas impermeables o una sola que le sirve de piso. Según su ubicación dentro del subsuelo pueden ser napas libres o acuíferos confinados y por la forma como llegan a la superficie son semisurgentes cuando se extraen por bombeo y surgentes cuando brotan naturalmente (Orellana, 2005).

Las aguas subterráneas constituyen un recurso fácilmente accesible y vital para millones de personas en todo el mundo. Estas aguas representan una fracción importante de la masa de agua presente con un volumen mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante por los continentes. El agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie y se acumula en el interior de la tierra

formando acuíferos. De tal forma, y como es bien sabido, en los lugares alejados de ríos, lagos o mares, estos acuíferos son a menudo la única fuente de agua disponible para la población. (Universidad Politécnica de Cataluña, 2012).

Estas aguas subterráneas interaccionan con el suelo por lo que se les considera que integran un sistema multifase, donde intervienen factores físicos y geológicos principalmente. Los procesos que interactúan con la fase acuosa cambian con la atmósfera y la biosfera, y las interacciones con las fases mineralógicas determinan la composición de las aguas subterráneas desde el punto de vista de componentes disueltos. Los factores físicos a tener en cuenta serían el tiempo de residencia del agua y dirección del flujo por el sistema, que están íntimamente relacionados porque afectan la evolución química del agua. Los factores geológicos son el tipo de suelo y litología de subsuelo, meteorización y distribución de los mismos. Estos componentes interaccionan con el agua y se producen asociaciones de elementos trazas con grupos minerales para definir su composición química; o sea que se habla de un control geológico referido a las aguas subterráneas. Tanto los factores físicos como los geológicos son de especial importancia en la interpretación de estos resultados por la gran incidencia que tienen los diferentes tipos de suelos presentes en la calidad química del agua subterránea somera. Otros factores que inciden en este caso son las fluctuaciones de los niveles freáticos como consecuencia de la variabilidad climática típica de la región (Galindo, G. *et al*, s/f). La composición del agua subterránea está determinada principalmente por su tiempo de residencia en el acuífero y por las características de los materiales por donde circula, así como por la presencia de iones. La calidad para consumo humano está en función de la salinidad, dureza, concentración de hierro o anhídrido sulfhídrico y la presencia de compuestos potencialmente dañinos para la

salud, como fluoruro, arsénico, plomo, cromo y manganeso, entre otros (Galicia, L. et al, 2011). La composición del agua puede apreciarse desde los puntos de vista químico, bacteriológico, isotópico, etc., siendo común que las sustancias orgánicas disueltas en agua, aunque frecuentes, aparezcan en concentraciones mucho menores que los constituyentes inorgánicos. La incorporación de los constituyentes al agua, en variedad y concentraciones diferentes, es posible por su elevado poder disolvente y por sus propiedades de combinación, dándose precisamente esta última, antes de que se incorpore al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Puede sufrir modificaciones drásticas en su composición, debido a un conjunto de interacciones físicas, químicas y biológicas complejas con el medio, por lo que son varios los factores que condicionan la composición del agua subterránea natural, mencionándose entre éstos a la naturaleza y disposición espacial de los materiales con los que el agua entra en contacto, la superficie y duración del contacto, temperatura, presión, existencia de gases y grado de saturación del agua en relación con las diferentes sustancias incorporables, etc. Con respecto a la composición media del agua subterránea se considera invariable en un acuífero o porción del mismo, sin embargo, no debe olvidarse que las interacciones agua-medio que determinan su composición son procesos dinámicos que se desarrollan a ritmo distinto, tanto en el espacio como en el tiempo (IGME, 1985).

Los datos históricos muestran la utilización de las aguas subterráneas como un factor clave para el desarrollo de muchas ciudades. Algunas de las más pobladas del mundo se abastecen mayoritariamente con estas aguas, entre las que se cuentan además de México, D.F., a Calcuta, Shangai, Buenos Aires, Manila, Pekín, París y Londres. El aprovechamiento desde la antigüedad para abastecimiento de poblaciones y para riego ha

ido en aumento de forma espectacular en los últimos decenios, produciéndose degradación de la calidad del agua donde la explotación ha sido intensa. Cuando se da un descenso de niveles, se produce un aumento en la presión efectiva entre partículas que en el caso de formaciones poco permeables no consolidadas en el acuífero, produce una compactación irreversible que da lugar a subsidencias del terreno cuando los descensos de nivel son importantes. Esta compactación del terreno y los asentamientos provocan la rotura de tuberías de pozos y conducciones, daños en pavimentos y en las conducciones urbanas de agua y gas, o de la red de saneamiento. Se menciona que es fácil la explotación de las aguas subterráneas por el costo sensiblemente más barato que el del agua proporcionada por presas y canales (Sahuquillo, A., 2009). Además de la importancia por constituir un recurso vital no solo para uso doméstico, el desarrollo industrial y las actividades agrícolas, las aguas subterráneas son importantes en el mantenimiento del equilibrio ecológico (Navarro, A., *et al*, 1996). Sin embargo, no solo la contaminación antropogénica afecta la calidad del agua; también la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos y las sequías prolongadas han causado que los niveles de los mantos freáticos se vean disminuidos a tal grado que la mineralogía del yacimiento en que está en contacto el agua cambia en sus características y se detectan niveles altos de metales en aguas que originalmente no tenían valores apreciables (Salas Plata, J., 2006).

Las aguas subterráneas desempeñan un papel muy importante en el crecimiento socioeconómico del país ya que, gracias a sus características físicas que les permiten ser aprovechadas de manera versátil, funcionan como presas de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Funcionan además como filtros purificadores,

preservando la calidad del agua. La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios (CNA, 2013).

El agua en general y de manera específica la subterránea es un recurso limitado en nuestro planeta, enfatizando que más del 97% está concentrada en mares y océanos y es salada. Del tres por ciento restante, alrededor del 2% lo constituye los casquetes polares en forma de hielo, siguiéndole en magnitud el agua subterránea, cuya reserva hasta 1,000 m de profundidad se estima en el 0,5% del total, mientras que el volumen instantáneo de agua superficial llega a sólo el 0,02% y entre el agua del suelo y la atmosférica, componen algo más del 0,01% de la total. El aumento en la demanda de agua y la reducción en la disponibilidad, especialmente por el deterioro de su calidad, han causado problemas cada vez más graves para el abastecimiento tanto a nivel mundial y regional como en lo local. Es seguro que esta problemática reflejada durante el siglo XX mantenga una tendencia ascendente en el presente, principalmente por el crecimiento poblacional mundial, que ocasionará un aumento en la demanda de alimentos, bienes y servicios. (Auge, M., 2006).

1.1.3. Sobreexplotación, contaminación y vulnerabilidad del agua subterránea

De acuerdo al enfoque particular de varios especialistas y a la finalidad que se persiga con el aprovechamiento del agua subterránea, los conceptos de sobreexplotación y contaminación son diversos. Por sobreexplotación se entiende un exceso en el uso que afecta las reservas permanentes debido a que supera con amplitud y durante lapsos prolongados a la magnitud de la recarga. Es decir, es una disminución del potencial hidráulico que se manifiesta por un descenso apreciable de los niveles piezométricos y puede generar o acelerar la contaminación y/o salinización. La sobreexplotación siempre

causa una disminución marcada en la disponibilidad y productividad de los acuíferos, (Auge, M., 2006).

La CNA define un acuífero sobreexplotado como aquel en el que la extracción del agua subterránea supera al volumen de recarga media anual, de tal forma que la persistencia de esta condición, por largos periodos de tiempo, ocasiona alguno o varios de los siguientes impactos ambientales: agotamiento o desaparición de manantiales, lagos, humedales; disminución o desaparición del flujo base en ríos; abatimiento indefinido del nivel del agua subterránea; formación de grietas; asentamientos diferenciales del terreno; intrusión marina en acuíferos costeros y migración de agua de mala calidad. Estos impactos pueden ocasionar pérdidas económicas a los usuarios y a la sociedad, (CNA, 2008).

Con respecto al concepto de contaminación, se incluye a todo proceso que genere un deterioro apreciable en la calidad física, química y/o biológica del agua subterránea. Generalmente, la contaminación es causada por labores artificiales, aunque a veces tiene origen natural por la disolución de sustancias nocivas o metales pesados en yacimientos metalíferos y en otras se observa un origen natural inducido artificialmente por la salinización debido a la sobreexplotación de acuíferos. La contaminación del agua subterránea se liga a los procesos de degradación ambiental, aplicándole el concepto de interacción global de los recursos naturales que fue desarrollado por investigadores soviéticos. Estos señalan la imposibilidad de preservar la calidad de uno de los recursos si el resto está deteriorado o en vías de deterioro. La contaminación del aire por la actividad industrial o urbana se trasladará al agua superficial y al suelo a través de la acción gravitatoria o el arrastre producido por la lluvia y, de éste, mediante el proceso de infiltración efectiva podrá alcanzar al agua subterránea si la sustancia contaminante es

móvil y persistente. Otro componente que identifica el comportamiento dinámico del agua subterránea es su escasa movilidad con bajas velocidades de flujo que en condiciones de equilibrio natural, o sea cuando no existe alteración por explotación, normalmente varían entre algunos cm y decímetros por día, particularmente en acuíferos con porosidad primaria o intergranular. Debido a esto, los procesos de degradación relacionados con la contaminación se producen muy lentamente y es difícil detectarlos, sobre todo en las fases iniciales. Este comportamiento que parece ser beneficioso para la preservación, en realidad no lo es, pues la baja actividad dinámica se da en lapsos muy prolongados para la restauración o descontaminación. Sin embargo, es prácticamente imposible restaurar la calidad de un acuífero a su condición natural previa a la contaminación, y en este sentido, en la generalidad, sólo pueden lograrse mejoramientos parciales mediante tecnologías que requieren elevados costos (Auge, M., 2006).

De acuerdo con Valdivia (2013), hay tres grados de sobreexplotación:

- La explotación de las reservas de excedentes, que es cuando el acuífero se sobreexplota a un ritmo de 2 a 5 veces mayor que el rendimiento seguro, hasta que los niveles de agua alcanzan los niveles de equilibrio medidos con el rendimiento seguro. Esa parte de las reservas de excedente se usa sin perjudicar al agua subterránea.
- La sobreexplotación no destructiva del agua subterránea, que sobrepasa los límites de extracción de las reservas de excedentes, teniendo un daño menor en extensión controlable del sistema de agua subterránea para que sea reparable. Cuando se llegue a esta situación, se requiere no explotar el agua subterránea hasta que ésta llegue a los niveles del rendimiento seguro y sea nuevamente explotable.

- La sobreexplotación destructiva del agua subterránea consiste en una prolongación continua de la extracción hasta que los niveles de agua sean muy bajos, o exista mucha salinidad o cualquier cosa por el estilo que sea suficiente para que el acuífero sea inexplorable por cierto tiempo previsible.

El manejo planificado del agua subterránea es cuando se usa a lo largo de varias décadas sin necesidad de nuevas fuentes, es decir, manteniendo el acuífero en equilibrio entre extracciones y recargas.

Es difícil y en ocasiones hasta imposible establecer el límite por encima del cual la explotación se convierte en una sobreexplotación. Esta implica un concepto de marcado desequilibrio hidrodinámico cuyas consecuencias generan además de la disminución de la reserva y de la productividad, efectos perjudiciales como salinización, contaminación, subsidencia, y desecamiento entre otros (Auge, M., 2006).

La contaminación es la alteración de las propiedades físicas, químicas y/o biológicas del agua por la acción de procesos naturales o artificiales que producen resultados indeseables, y puede ser natural y artificial directa o inducida (Auge, M., 2004). En la contaminación natural es común la salinización del agua y la incorporación de metales como el plomo, mercurio, zinc y cobre, que forman los yacimientos metalíferos y la disolución de oligoelementos como el fluor y arsénico, a partir de sedimentos de origen volcánico. Regenerar la calidad de un acuífero deteriorado por la entrada de uno o varios contaminantes es un trabajo complicado tanto en el aspecto técnico como por su elevado costo. Además, es imposible restaurarlo a su condición original y en ocasiones ni siquiera se logra recomponerlo para las exigencias que requiere su uso (Auge, M., 2006).

Existen numerosas definiciones de vulnerabilidad. Auge (2006) la define como una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales. En el mismo documento se menciona que la vulnerabilidad a la polución expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones tanto naturales como artificiales. El riesgo a la contaminación es otro concepto asociado a la vulnerabilidad, definiéndose como el peligro de deterioro en la calidad de un acuífero por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno.

1.1.4 Aguas superficiales

Las aguas superficiales son las aguas que se encuentran en la superficie y comprenden distintas categorías. Las animadas de un movimiento continuo por acción de la gravedad descienden desde los puntos más elevados y, después de un recorrido más o menos regular, se vierten en el mar. En forma genérica se denominan corrientes de agua. Otras aguas, en cambio, se detienen en depresiones naturales donde se acumulan formando grandes depósitos. Se llaman lagos cuando ocupan grandes extensiones con gran profundidad, siendo esta última mayor que la de sus tributarios o emisores. Los reservorios de menores dimensiones y profundidades se denominan lagunas cuando son de muy poca profundidad. Los esteros son abundantes en vegetación. Las cañadas son tierras bajas con poca o ninguna agua presente en la mayor parte del año pero tienen una especie de cauce que durante las épocas lluviosas llevan aguas abundantes. Las corrientes de agua se deslizan por una hendidura del suelo que se llama indistintamente lecho, alveo o cauce, que tiene características especiales según sea la topografía y características de los suelos que atraviese. Las variaciones de caudal quedan regularizadas por aportes de afluentes y/o

napas subterráneas. Los lagos sirven de depósitos naturales de reserva y regularizan el régimen de los ríos y del examen hidrogeográfico de una región puede inferirse su naturaleza geológica, el impacto en las componentes del agua y por ende de su calidad (Orellana, 2005). Las aguas superficiales son las aguas continentales que se encuentran en la superficie de la tierra. Pueden ser corrientes que se mueven en una misma dirección y circulan continuamente, como los ríos y arroyos; o bien estancadas como los lagos, lagunas, charcas y pantanos. Las aguas que fluyen en la superficie de la tierra son de gran importancia para los seres vivos, a pesar de representar una ínfima parte del total del agua que hay en el planeta (Universidad Politécnica de Cataluña, 2012).

Además de que el volumen almacenado en los lagos e instantáneamente en los ríos del mundo sólo alcanza al 0,02% del total, el agua superficial está más expuesta a la contaminación y generalmente es mucho más cara que la subterránea por el tratamiento que necesita para su potabilización (Auge, 2006).

1.2 Uso y calidad del agua

De acuerdo con la (SEMARNAT, 2007), la calidad del agua no es una característica absoluta, sino que es más bien un atributo definido socialmente en función del uso que se le piense dar al líquido. Cada uso requiere un determinado estándar de calidad, por lo que para evaluar la calidad del agua es necesario considerar el contexto del uso probable que se le dará.

Las estimaciones de disponibilidad de agua no reflejan por completo el problema de las necesidades de este recurso. En la mayor parte del mundo la calidad del agua está lejos de ser la adecuada. De acuerdo con la OMS para el año 2005, 1,100 millones de personas

no tenían acceso a una fuente de agua potable mejorada (WHO, 2005), particularmente en áreas rurales donde no existe posibilidad de que el agua tenga un tratamiento previo que mejore su calidad y posibilite su uso general (SEMARNAT, 2005).

En el año 2000, la ONU estableció los ODM con el fin de reducir la pobreza extrema para el año 2015. El objetivo número siete, “Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”, cuenta con la meta 7.C relacionada al agua potable y saneamiento, que establece reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso sostenible a fuentes de abastecimiento de agua potable mejoradas.

Por su repercusión en la salud de la población, la calidad del agua potable es un aspecto que preocupa a los países de todo el mundo, tanto a los declarados en desarrollo como a los desarrollados. Fuertes gradientes hidráulicos que se derivan de la extracción pueden inducir la formación de flujos preferenciales, conduciendo a elevadas concentraciones de contaminantes en las aguas subterráneas. Asimismo, el bombeo excesivo de agua subterránea con relación a la recarga, dará lugar al agotamiento del recurso vital y por ende a la competencia entre los usos, por ejemplo, entre el riego y el abastecimiento de agua potable. El uso de las aguas subterráneas como fuente de agua potable es con frecuencia preferido debido a que en su estado natural, en general, su calidad microbiana es buena. Algunas aguas subterráneas contienen normalmente componentes peligrosos para la salud, sin embargo, la comprensión del impacto en la salud pública es a menudo difícil por la complejidad en la interpretación de los datos de salud (WHO, 2006). El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada debe presentar ausencia de contaminantes, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causen efectos nocivos a la salud (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994). Para prevenir

y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, se establecen límites máximos permisibles en cuanto a características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas para asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas de abastecimiento, hasta la entrega al consumidor (Bianchini, F., 2007).

El documento marco “caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación en América del Norte”, publicado en abril del 2014, menciona que reconociendo los numerosos habitantes de América del Norte que están expuestos a múltiples fuentes de contaminación ambiental y que algunas personas o comunidades son más vulnerables que otras a sus efectos, la CCA encomendó la elaboración de un marco que permita a comunidades de todo el subcontinente identificar aquellos factores que es necesario considerar al momento de caracterizar la vulnerabilidad de un individuo o una comunidad a los efectos en la salud derivados de la contaminación ambiental. Enfatizando que esta vulnerabilidad se desprende de diferentes factores, a saber: edad, estructura genética, estilo de vida, ubicación geográfica y variabilidad climática, mayor susceptibilidad a sustancias químicas, nivel socioeconómico y otros más (por ejemplo, diferencias entre individuos o poblaciones en cuanto a susceptibilidad, exposición, preparación para hacer frente a factores de amenaza y capacidad de recuperación). Refiere además que muchos riesgos para la salud relacionados con el medio ambiente se pueden prevenir o mitigar, y que el marco busca demostrar que el uso de variables que influyen en la vulnerabilidad de individuos, comunidades o poblaciones, en combinación con otros datos, por ejemplo emisiones, permite caracterizar la vulnerabilidad de una comunidad en particular. De esta manera, se pueden identificar actividades de mitigación de riesgos. El documento está orientado a brindar información en torno a los factores que deben considerarse al momento

de caracterizar las posibles consecuencias que la contaminación ambiental tiene en la salud, y dicha información sea utilizada de diferente forma por los distintos diseñadores de herramientas para ofrecer instrumentos de comunicación eficaces y accesibles que describan tales factores y facilitar mecanismos con los cuales evaluar la vulnerabilidad a los posibles efectos de la contaminación ambiental en la salud (CCA, 2014).

1.3 Metales y metaloides

Se define metal como un elemento químico caracterizado por una fuerte conductividad térmica y eléctrica, brillo peculiar (metálico), aptitud para la deformación y una marcada tendencia a formar cationes (UHU, s/f).

Los metales conducen la electricidad y se pueden combinar fácilmente en aleaciones. Pierden con facilidad uno o algunos electrones para formar iones positivos, lo que explica parcialmente por qué los metales forman compuestos con elementos no metálicos. Además, suelen tener puntos de fusión muy altos. Asimismo, son los elementos químicos capaces de conducir la electricidad y el calor presentando un brillo característico y que, con la excepción del mercurio, resultan sólidos a temperatura normal. El concepto se utiliza para nombrar a elementos puros o aleaciones con características metalimetalicas. Entre las diferencias con los no metales, puede mencionarse que los metales disponen de baja energía de ionización y baja electronegatividad (Hogan, 2010).

Los metaloides son los elementos que tienen las propiedades entre los metales y los no metales. Pueden ser tanto brillantes como opacos y su forma puede cambiar fácilmente. Generalmente, los metaloides son mejores conductores de calor y de electricidad que los no metales, y no tan bien como los metales (Geología, 2003).

En la Unión Europea los once elementos más importantes normados para el agua de consumo humano son el arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, manganeso, níquel, plomo, estaño y talio. Algunos de ellos son necesarios para los humanos en pequeñas proporciones tales como cobalto, cobre, cromo, manganeso y níquel, mientras otros son carcinogénicos o tóxicos como el manganeso, mercurio, plomo y arsénico que afectan al sistema nervioso central; otros, como el mercurio, plomo, cadmio y cobre a los riñones o el hígado y finalmente, el níquel, cadmio, cobre y cromo que afectan a la piel, los huesos, o dientes (Zevenhoven, 2001).

1.3.1 Metales pesados

El término de metal pesado se refiere a aquellos metales de la tabla periódica cuya densidad específica es superior a 5 g/cm^3 o que tienen un número atómico por encima de 20, excluyendo generalmente a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos (Breckle, 1991; Tiller, 1989). Por otro lado, se dice que son un grupo de elementos de Peso Molecular equivalente a 63,5 y hasta 200,6 y cuentan con una distribución electrónica similar en su capa externa y se encuentran en cantidades pequeñas o trazas en el ambiente (UHU, s/f). A pesar de ser un término ampliamente utilizado no tiene una base científica rigurosa o una definición química y a pesar de que muchos de los elementos que se enlistan en el término metal pesado, tienen una gravedad específica mayor de cinco, existen diversas excepciones a esta regla. Una forma de nombrar a este grupo es como elementos tóxicos, los cuales, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, incluyen al arsénico, cromo, cobre, zinc, cadmio, mercurio y plomo (INECC, 2009).

Un metal pesado es un miembro de un grupo de elementos no muy bien definido que exhibe propiedades metálicas. Se incluyen principalmente metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. Se han propuesto varias definiciones diferentes con base en su densidad, en el número o peso atómico y algunas en sus propiedades químicas o de toxicidad (Duffus, 2002). Los metales pesados se encuentran libres y de forma natural en algunos ecosistemas y pueden variar en su concentración. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y comúnmente se hace referencia a ellos con el término genérico de metales pesados. En la actualidad, existen fuentes antropogénicas de metales pesados que los han agregado a los ecosistemas. Los metales pesados tóxicos más conocidos son el mercurio, el plomo, el cadmio y el arsénico (metaloide). A veces también se habla de contaminación por metales pesados incluyendo otros elementos tóxicos más ligeros, como el berilio o el aluminio (Hogan, 2010). La acumulación de metales pesados en sólidos y sedimentos puede acarrear, a la larga, consecuencias negativas para el entorno ecológico, ya que se facilita la lixiviación de cantidades significativamente elevadas de elementos tóxicos que, posteriormente, se hacen accesibles a los sistemas acuáticos y seres vivos. (Pérez, 2004). Los metales pesados tienen gran importancia como indicadores de la calidad de todo flujo de agua debido a su toxicidad y de manera especial al comportamiento bioacumulativo. La importancia de la acción de los metales es debido a esta bioacumulación, a la toxicidad y los efectos directos a la salud. Asimismo, no son biodegradables y por esto no se pueden eliminar de los sistemas acuáticos, siguiendo procesos naturales. La importancia del estudio de metales pesados en agua es por la elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos vivos; además los

efectos tóxicos no se detectan fácilmente a corto plazo aunque si puede haber una incidencia muy importante a medio y largo plazo. La toxicidad de estos metales es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos. Un metal disuelto en forma iónica puede absorberse más fácilmente que estando en forma elemental y, si esta se halla reducida finamente aumentan las posibilidades de su oxidación y retención por los diversos órganos (Buenfil, M., 2007). La presencia de metales pesados como plomo, mercurio y cadmio en el agua de consumo humano producen daño a la salud. La contaminación acuática originada por metales pesados proviene de diferentes fuentes entre las que se cuenta el desgaste geológico; esto debido a que los metales son un componente natural de la corteza terrestre, (Salcedo, M.T., 2014). Lo que hace tóxicos a los metales pesados no son sus características esenciales, sino las concentraciones en las que se presentan, y más relevante, el tipo de especie que forman en un determinado medio. Para los seres vivos, varios de estos elementos ejercen el efecto de hormesis, es decir, son necesarios en concentraciones muy pequeñas para funcionar adecuadamente; tal es el caso de cobalto, cobre, fierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc, entre otros. A concentraciones altas o exposición crónica son nocivos para la salud. Todos los metales pesados se encuentran presentes en medios acuáticos (el agua químicamente pura no existe en la naturaleza), aunque sus concentraciones, en ausencia de contaminación, son muy bajas. Generalmente se encuentran como coloides, partículas minerales que son sólidos en suspensión, o fases disueltas (cationes o iones complejos). Las formas coloidales frecuentemente forman hidróxidos, mientras que las partículas sólidas incluyen una gran variedad de minerales. Las fases disueltas pueden ser capturadas por adsorción o absorción en arcillas o hidróxidos y los compuestos orgánicos pueden constituir fases con alta

capacidad de captura de cationes metálicos, dando lugar, en ocasiones, a fases extremadamente tóxicas como el metilmercurio (Higueras P. y Oyarzun R., s/f).

La alta toxicidad, amplia distribución y uso extensivo de los metales pesados en diversas actividades antrópicas, hace necesario que se lleve a cabo un monitoreo continuo de sus concentraciones en los alimentos y agua para consumo humano (Velázquez, M., 2008).

1.3.2 Descripción de los constituyentes químicos normados (metales y metaloides)

A continuación se exponen diversas características de los constituyentes químicos estudiados: (aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cobre (Cu), cadmio (Cd), cromo (Cr), fierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), plomo (Pb), sodio (Na) y zinc (Zn).

En general, son varios los factores que determinan si la exposición a un constituyente químico es perjudicial o tiene efectos negativos para la salud. Estos factores incluyen la dosis (la cantidad), la duración (por cuanto tiempo) y la manera como se entró en contacto con la sustancia. También se debe considerar las otras sustancias químicas a las que se expone, la edad, sexo, dieta, características personales, estilo de vida y condición de salud (ATSDR, 2008).

1.3.2.1 Aluminio

Elemento químico de símbolo Al y número atómico 13, es un metal ligero y dúctil, de color y brillo semejantes a los de la plata, inoxidable y buen conductor eléctrico y térmico (ATSDR, 2014, Taringa.net, s/f). Es el metal más abundante en la corteza terrestre. Es muy reactivo, nunca se encuentra en forma de metal libre en la naturaleza y siempre

combinado con otros elementos tales como oxígeno, sílice y flúor. El aluminio metálico se obtiene de minerales que contienen aluminio, es liviano de color blanco-plateado. Se pueden encontrar pequeñas cantidades de aluminio disueltas en el agua y no puede ser destruido en el ambiente, solamente puede cambiar de forma. La exposición al aluminio generalmente no es perjudicial, pero la exposición a cantidades altas puede afectar la salud. Algunas personas con enfermedades del riñón almacenan una gran cantidad de aluminio en sus cuerpos y en ocasiones desarrollan enfermedades de los huesos o del cerebro que pueden deberse al exceso de aluminio. Algunos estudios sugieren que personas expuestas a niveles altos de aluminio pueden desarrollar la enfermedad de Alzheimer (González M.E. y Hernández C., 1991). No se sabe con certeza si el aluminio causa la enfermedad de Alzheimer. Los estudios en animales han demostrado que el sistema nervioso presenta la mayor susceptibilidad al aluminio. Aunque la administración de dosis altas de aluminio a animales no produjo señales obvias de toxicidad, afectó la capacidad para ejercer fuerza de las extremidades y la movilidad. Sin embargo, no se sabe si el aluminio afecta la reproducción en seres humanos (ATSDR, 2008).

En 1970 se puso de manifiesto que la alta concentración de aluminio en el agua de diálisis estaba relacionada con la presencia de este metal en los tejidos del cerebro y los huesos de dichos pacientes (Trejo R. y Hernández V., 2004). El metal absorbido, del que se ingiere, se acumula en varios tejidos tales como hígado, huesos, cerebro, músculos estriados, interfiriendo además con el transporte de hierro, produciendo un tipo de anemia. Asimismo, disminuye la absorción del calcio, originando dolores, deformaciones y fracturas en los huesos. Pasa al cerebro produciendo enfermedades neurológicas y se considera asociado a la Enfermedad de Alzheimer, la cual produce un proceso degenerativo

de la corteza cerebral que conduce a la demencia (González, M.E. y Hernández, C., 1991; Luján, J.C., 2001).

Por parte de la EPA (Agencia de Protección del Ambiente por sus siglas en inglés) y el Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos, no se ha evaluado la carcinogenicidad del aluminio en seres humanos. Algunas personas con enfermedades del riñón lo almacenan en gran cantidad en sus cuerpos, desarrollando en ocasiones enfermedades de los huesos o del cerebro que pueden deberse al exceso de aluminio (Luján, J.C., 2001).

Estudios epidemiológicos que han investigado la posible relación entre el aluminio en el agua y la Enfermedad de Alzheimer, muestran resultados muy diversos, sobre todo por la dificultad de corregir todos los factores que influyen en el resultado (AEA, 2008, Kuprat, M., 2013). La posibilidad de que el aluminio pueda tener alguna relación con el desarrollo de la Enfermedad de Alzheimer se plantea en un trabajo de Christopher Exley y Margaret Esiri, donde se hace autopsia a una mujer británica de 58 años que sufría una forma muy poco habitual de Alzheimer, con demencia progresiva muy rápida y desenlace fatal, concluyendo que no pueden saber si el aluminio ha sido la causa del Alzheimer, pero si saben que la mujer no tenía antecedentes familiares de demencia (Fernández, M., 2006).

La presencia de aluminio en agua para beber y en productos de uso y consumo es la principal vía de ingestión del metal al organismo humano, y los complejos fluoruroaluminados pueden ser un riesgo potencial a la salud (Trejo, R. y Hernández, V., 2004).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el aluminio una concentración de 0.20 mg/L.

1.3.2.2 Arsénico

El arsénico (As) es un elemento químico con número atómico 33; se encuentra de forma natural en la corteza terrestre ampliamente distribuido en todo el medio ambiente; está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico. El arsénico está presente de forma natural en niveles altos en las aguas subterráneas de varios países. Su mayor amenaza para la salud pública reside en la utilización de agua contaminada para beber, preparar alimentos y regar cultivos alimentarios. La exposición prolongada al arsénico a través del consumo de agua y alimentos contaminados puede causar cáncer y lesiones cutáneas. También se le ha asociado a problemas de desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes (OMS, 2012). En el entorno natural, el arsénico (As) está presente en cantidades abundantes en la corteza terrestre y en numerosos minerales, y en cantidades más reducidas en la roca, el suelo, agua y el aire. Alrededor de un tercio del arsénico presente en la atmósfera proviene de fuentes naturales, por ejemplo de los volcanes, y el resto proviene de actividades humanas. Cuando hay contaminación geológica natural, se pueden encontrar altos niveles de arsénico en el agua de bebida que proviene de pozos profundos (PISQ, 2001). Se determinó la composición geomorfológica en diferentes regiones del planeta y la presencia en el agua subterránea de varios elementos y compuestos inorgánicos potencialmente nocivos para el ser humano como es el caso del As. Se encontró que, naturalmente, dicha presencia se da a través de procesos geoquímicos como la solubilización en los acuíferos de las sales que contienen arsénico (Ortega-Guerrero, M.A., 2009). El As se presenta en diferentes formas, y parte del arsénico es transportado de un medio a otro en el entorno, lo que puede provocar un

cambio en su forma. El viento o el agua pueden mover el arsénico presente en las rocas o suelos erosionados. Muchos compuestos orgánicos se fijan en el suelo y solo se mueven un poco cuando el agua se filtra a través de éste. En el momento que procedimientos industriales o actividades volcánicas emiten arsénico a la atmósfera, éste se une a partículas que el viento transporta y que vuelven a caer al suelo. Los microbios presentes en suelos y sedimentos emiten a la atmósfera sustancias que contienen As. Estos se transforman más tarde en otros compuestos de As que vuelven a fijarse en el suelo (PISQ, 2001). En su fase acuosa, se encuentra especialmente en forma de arsénico inorgánico (iAs), formando precipitados insolubles con varios elementos como el calcio, azufre, bario, aluminio y fluor, que disminuyen la biodisponibilidad de los compuestos de As en el agua (Regmi, R., *et al*, 2007).

La exposición a altos niveles de iAs puede deberse a diversas causas como el consumo de agua contaminada o su uso para la preparación de comidas, para el riego de cultivos alimentarios y para procesos industriales, así como al consumo de tabaco y de alimentos contaminados. La exposición prolongada, principalmente a través del consumo de agua contaminada o comida preparada con ésta y cultivos alimentarios regados con agua rica en arsénico puede causar intoxicación crónica. Los efectos más característicos son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel (ATSDR, 2007).

El arsénico en su forma inorgánica representa una amenaza importante para la salud pública cuando se encuentra en aguas subterráneas contaminadas, estimándose que más de 100 millones de personas en el mundo están expuestas a concentraciones elevadas de arsénico en agua de bebida proveniente de pozos profundos (Mukherjee, A., *et al*, 2007), y para América Latina, la exposición se estima en cuatro millones de personas (Castro de

Esparza ML, 2006). Esta forma inorgánica del As, está naturalmente presente en altos niveles en las aguas subterráneas de diversos países, entre ellos Argentina, Bangladesh, Chile, China, Canadá, India, México y los Estados Unidos de América (Moyano, *et al*, 2003). En el caso particular de México, son varias las regiones con concentraciones de arsénico por arriba de la norma oficial mexicana. Existe el caso crónico endémico de hidroarsenosis en la cuenca cerrada de la Región Lagunera, en los estados de Coahuila y Durango. En cuencas abiertas, el problema de presencia regional de iAs aparece en las últimas dos a tres décadas, principalmente en acuíferos granulares de zonas áridas y semiáridas de México, como las ciudades de Durango y San Luis Potosí. La CNA reconoce que hay problemas locales de arsénico inorgánico en diferentes acuíferos granulares del centro y noroeste de México (Ortega-Guerrero, M.A., 2009).

Los pescados, mariscos, carnes, aves de corral, productos lácteos y cereales también pueden ser fuentes alimentarias de arsénico, aunque la exposición a través de estos alimentos suele ser muy inferior a la exposición a través de aguas subterráneas contaminadas (Moyano, *et al*, 2003; Mora, D., *et al* 2008; OMS, 2014).

Si un ser humano ingiere una gran cantidad de arsénico en una forma que se absorba fácilmente, puede provocar un envenenamiento rápido y la muerte. El intestino, el corazón y el sistema nervioso se ven afectados. Los que sobreviven a un envenenamiento severo, pueden desarrollar manchas en la piel y daños en los glóbulos rojos, la médula ósea (donde se producen los glóbulos sanguíneos), el hígado, los nervios y el cerebro. Una exposición a largo plazo a altos niveles de arsénico en el agua de bebida, puede causar un engrosamiento y pigmentación en la piel, así como cáncer de piel, pulmón, vejiga o riñón. (PISQ, 2001). Otros síntomas que se mencionan de envenenamiento crónico por arsénico

son diarrea, prurito generalizado, lagrimeo, vitiligo y alopecia, siendo en las palmas de las manos y las plantas de los pies donde se observa más comúnmente la dermatitis y queratosis. Se puede producir ictericia por la dilatación de hígado y la obstrucción de los conductos biliares y, al avanzar la intoxicación, puede desarrollarse una encefalopatía, siendo la anemia aplásica el trastorno hematopoyético más común, produciéndose serios daños en la médula ósea (Pérez, R., 2011). La clasificación como carcinógeno para el humano es debido a la evidencia de sus efectos adversos a la salud (ATSDR, 2007), aunque sus mecanismos de acción carcinogénica no han sido del todo explicados se ha descrito que actúa indirectamente sobre el ADN (Hick, A.S., *et al*, 2007).

En la tesis de Andrea Díaz Villaseñor titulada “El arsénico como factor de riesgo en la inducción de diabetes tipo 2”, reconocida por la Academia Mexicana de Ciencias, se menciona que en México la exposición al arsénico es un problema grave de salud que, agregado a diferentes estilos de vida y ciertos factores genéticos, podría explicar la alta prevalencia de diabetes en nuestro país. El estudio demuestra inicialmente, mediante experimentos *in vitro* con células beta de páncreas de rata, y posteriormente con un estudio efectuado en población humana expuesta ambientalmente al arsénico en la Comarca Lagunera, que la exposición a este metaloide, sí es un claro factor de riesgo para el desarrollo de la enfermedad, destacando en sus conclusiones que si bien la exposición al arsénico parece no ser suficiente para desencadenar la enfermedad, los estudios *in vitro* y epidemiológico-moleculares, muestran que sí es un claro factor de riesgo que debería de ser tomado en cuenta (Gaceta Innovación, 2014).

La contaminación natural del agua de consumo humano con Arsénico (As) en Argentina tiene más de 100 años de antigüedad y aún no ha sido solucionada. Son muchos

los trabajos científicos que ponen de manifiesto el problema del As en Argentina donde alrededor de cuatro millones de personas están expuestas. El HACRE (hidroarsenicismo crónico regional endémico), patología provocada por la ingesta crónica de As en el agua y los alimentos, provoca afecciones de piel (leucodermia y/o queratosis), cáncer de piel, pulmón, vejiga, riñón, entre otros, alteraciones en el desarrollo, afecciones cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes. Dada la importancia del tema se señalan los avances en el conocimiento científico sobre el As en Argentina, especialmente en los últimos años. Se desarrollan diversos aspectos como los niveles actuales de As en aguas en el país y la contaminación de alimentos por la utilización de estas aguas. En población de Argentina, se evalúan biomarcadores de exposición, el perfil metabólico, biomarcadores y polimorfismos genéticos implicados en la susceptibilidad a la toxicidad del arsénico, biomarcadores de efecto, genotoxicidad, y evaluaciones del riesgo carcinógeno, relacionadas con la exposición al As, de tal forma que la evidencia recopilada no deja dudas sobre la gravedad del problema y del riesgo a la salud por la exposición crónica al As para una gran parte de los habitantes de ese país (Villaamil E.C., 2015).

La Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) y la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (U.S.EPA, por sus siglas en inglés) recomiendan una concentración máxima para el arsénico en agua potable de 0.01 mg/L; en el caso de México se ha establecido un límite máximo permisible de 0.025 mg/L (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994).

La exposición crónica a concentraciones de arsénico inorgánico iAs en agua significativamente mayores a 0.05 mg/L resulta en serios problemas de salud epidérmicos, cardiovasculares, renales, hematológicos y respiratorios (Ortega-Guerrero, M.A., 2009).

1.3.2.3 Bario

El bario (Ba) es un elemento químico con número atómico 56; se encuentra en la naturaleza en diferentes formas llamadas compuestos de bario. Hay dos formas del Ba, el sulfato de bario y el carbonato de bario, que se encuentran a menudo en la naturaleza en forma de depósitos minerales subterráneos. A veces se encuentra naturalmente en el agua potable y en alimentos. El bario es abundante en la naturaleza y representa aproximadamente el 0.04% de la corteza terrestre. Sus principales fuentes son los minerales barita (sulfato de bario) y witerita (carbonato de bario). Se produce solo en cantidades limitadas por reducción del óxido de bario en presencia de aluminio en retorta (Lenntech, 2013).

La exposición al Ba ocurre principalmente al tomar agua contaminada con esta sustancia (ATSDR, 1995, Lenntech, 2013). Los efectos sobre la salud dependen de la solubilidad de los compuestos, siendo los que se disuelven en agua los que pueden ser dañinos para la salud humana y posibles responsables de parálisis. En algunos grados de exposición puede incluso causar la muerte. La ingestión de una cantidad muy alta de compuestos de bario solubles en agua o en el contenido estomacal produce alteraciones del ritmo cardíaco. Algunas personas que ingieren cantidades de bario más bajas durante un período breve pueden sufrir vómitos, calambres estomacales, diarrea, dificultad para respirar, alteraciones de la presión sanguínea, adormecimiento de la cara y debilidad muscular (Lenntech, 2013, Nordberg, G., 2012). La absorción del Ba por el tracto gastrointestinal en humanos, depende en gran medida, de la edad del individuo y de la solubilidad del compuesto, pudiendo ser significativamente más alta en los niños y en los adultos. Se piensa que la absorción es de menos del 10% de la cantidad ingerida. El

metabolismo del Ba es similar al del calcio, no obstante, a diferencia del calcio, el Ba no tiene una función biológica conocida (OMS, 1995). No se ha demostrado que el bario cause cáncer en los humanos y no hay pruebas de que pueda causar infertilidad o defectos de nacimiento (OMS, 1995, Lenntech, 2013).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el bario una concentración de 0.70 mg/L.

1.3.2.4 Cadmio

El cadmio (Cd) es un elemento químico relativamente raro con número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, de color blanco argentino con un ligero matiz azulado. Es miembro del grupo IIb (zinc, cadmio y mercurio) en la tabla periódica, y presenta propiedades químicas intermedias entre las del zinc metálico en soluciones ácidas de sulfato. El Cd es divalente en todos sus compuestos estables y su ion es incoloro. No se encuentra en estado libre en la naturaleza, y la greenockita (sulfuro de cadmio), único mineral de Cd, no es una fuente comercial de metal. En su forma elemental es un metal blanco plateado, dúctil y maleable. Representa el $1.5 \times 10^{-5}\%$ en peso de la corteza terrestre, encontrándose ampliamente distribuido en la misma. Aparece con frecuencia en forma isomorfa en casi todos los yacimientos de zinc (que constituye el 95% de la producción de cadmio), y en los minerales de cobre y plomo, además de aparecer en la naturaleza formando compuestos con óxidos, sulfuros y carbonatos. La movilidad y biodisponibilidad del cadmio depende principalmente de su especie química. El Cd y los compuestos de éste son en comparación con otros metales pesados, relativamente solubles en agua. Son también, en general, más

biodisponibles y móviles (Vicente, 2010). El Cd entra al organismo humano por vía respiratoria y gastrointestinal, encontrándose en el organismo adulto en cantidades de 25-30 mg. Es, por tanto, un metal muy tóxico para el organismo humano debido a su prolongada vida media (10-30 años), lo cual lo hace muy acumulativo. El 90% del metal absorbido se acumula en diversos órganos, particularmente en el hígado y en la corteza renal (Rubio C. *et al*, 2006). El Cd primero es transportado hacia el hígado por la sangre. Allí es unido a proteínas para formar complejos que son transportados hacia los riñones. El metal se acumula en los riñones, donde causa un daño en el mecanismo de filtración. Esto causa la excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo y el consecuente daño de los riñones. Lleva bastante tiempo antes de que el cadmio que ha sido acumulado en los riñones sea excretado del cuerpo humano. La incorporación natural del metal procede, principalmente, de la actividad volcánica, lixiviación de rocas e incendios forestales. Las fuentes antropogénicas varían desde productos de la extracción de zinc, combustión de carbón, escoria de las minas, material catódico de baterías, producción de hierro y acero, y fertilizantes y pesticidas (Sarabia, R., 2002). En humanos y otros mamíferos la absorción del Cd se lleva a cabo a través de un proceso similar al de la absorción de metales esenciales como el hierro y zinc; esta absorción es potenciada cuando existen deficiencias de calcio y hierro en la dieta o dietas bajas en proteínas, siendo transportado por la sangre y distribuido inicialmente al hígado y al riñón. El cadmio afecta diversos órganos y tejidos como son: riñón (produciendo disfunción renal tubular, proteinuria e insuficiencia renal crónica), corazón (produciendo arteroesclerosis aórtica y coronaria, incremento en colesterol y ácidos grasos); huesos, testículos, placenta y sistema nervioso central y periférico (Nava-Ruíz, 2011). Se considera que el riñón es el órgano más dañado en las

poblaciones expuestas. Las enfermedades crónicas obstructivas de las vías respiratorias están asociadas a la exposición prolongada e intensa por inhalación. Hay pruebas de que esa exposición al cadmio puede contribuir al desarrollo de cáncer de pulmón aunque las observaciones en trabajadores expuestos han sido difíciles de interpretar a causa de la presencia de factores que inducen a la confusión (WHO, 1992). Por otro lado, se menciona al Cd como un metal sumamente tóxico, además de cancerígeno, produciendo serias afectaciones con lesiones para el embarazo en madres expuestas y en intoxicación crónica se acumula el elemento en los riñones, produciéndose severos daños a éstos. Además, disminuye la actividad pulmonar, produciendo enfisema y cáncer pulmonar (Pérez, R., 2011).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el cadmio una concentración de 0.005 mg/L.

1.3.2.5 Cobre

El Cobre (Cu) es un elemento químico con número atómico 29, perteneciente al grupo de los metales de transición y es un importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos. La mayoría de los compuestos del cobre se depositan y se enlazan tanto a los sedimentos del agua como a las partículas del suelo. Los compuestos solubles del cobre forman la mayor amenaza para la salud humana. Usualmente los compuestos del cobre solubles en agua ocurren en el ambiente después de liberarse a través de aplicaciones en la agricultura. Es uno de los metales más importante industrialmente. De coloración rojiza es

un metal maleable, dúctil con una muy buena conductividad al calor y la electricidad (Bradl, 2005). El Cu puede encontrarse en muchas clases de comidas, en agua potable y en el aire. La absorción es necesaria porque es un elemento traza indispensable para la salud de los humanos y aunque éstos pueden manejar concentraciones proporcionalmente altas, grandes cantidades pueden causar problemas de salud. La mayoría de los compuestos del Cu, se depositarán y se enlazarán tanto a los sedimentos del agua como a las partículas del suelo, siendo los compuestos solubles la mayor amenaza para la salud humana. Algunos artículos científicos indican una correlación entre exposiciones crónicas a elevadas concentraciones y una disminución de la inteligencia en adolescentes. En cuanto a los animales, éstos pueden absorber el Cu de los suelos de las granjas contaminadas con Cu y dañar su salud. Un ejemplo de esto es el gran efecto por envenenamiento que sufren las ovejas debido a que los resultados se manifiestan a bajas concentraciones (Lenntech, 2012).

Este elemento presenta tres estados de oxidación Cu^{+1} , Cu^{+2} y Cu^{+3} (Vicente, 2010). Las exposiciones de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una ingesta grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte. No se ha determinado aún que el cobre sea cancerígeno. Hay artículos científicos que indican una asociación entre exposiciones crónicas con elevadas concentraciones de cobre y una disminución de la inteligencia en adolescentes (Lenntech, 2012). El cobre, como elemento traza esencial, es fundamental en diversos procesos fisiológicos y metabólicos como el crecimiento corporal, los mecanismos de defensa, el mantenimiento de la estructura ósea, la maduración de las células sanguíneas de las series blanca y roja, el transporte del Fe, el metabolismo del colesterol, la contractilidad miocárdica, el metabolismo de la glucosa y el desarrollo y

función del cerebro (Vicente, 2010). Este metal es un componente esencial en muchas metaloenzimas, dentro de las que se incluyen las siguientes: la Citocromo C oxidasa, la tirosinasa, la dopaminaβ-hidroxilasa y la ceruloplasmina. El cobre inorgánico es muy reactivo y una toxina celular potente. Es absorbido en el estómago y el duodeno por un proceso regulado por la concentración de metalotioneína (MT) en las células de la mucosa intestinal (Melo & Cuamatzi, 2007). Los efectos tóxicos crónicos atribuibles al cobre sólo parecen existir en personas que han heredado una pareja específica de genes recesivos autosómicos y que, como consecuencia, desarrollan una degeneración hepatolenticular (enfermedad de Wilson), que es una enfermedad rara (Cespón, 2008).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el cobre una concentración de 2.00 mg/L.

1.3.2.6 Cromo

El Cromo (Cr) es un elemento químico con número atómico 24, es de color blanco plateado, duro y quebradizo. Sin embargo, es relativamente suave y dúctil cuando no está tensionado o cuando está muy puro. Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados. El Cr elemental no se encuentra en la naturaleza. Su mineral más importante, por su abundancia, es la cromita. Es de interés geoquímico el hecho de que se encuentre 0.47% de Cr_2O_3 en el basalto de la Luna, proporción que es de 3-20 veces mayor que el mismo espécimen terrestre (Lenntech, 2014).

El cromo es un elemento metálico en la tabla periódica. No tiene olor ni sabor. Se encuentra ampliamente distribuido en el medio ambiente en rocas, plantas, suelos, y el

polvo volcánico, los humanos y animales. Puede existir en una variedad de estados de oxidación, manifestándose en el medio ambiente más comúnmente como el cromo (III), cromo (VI) y en la forma metálica Cr^0 . El cromo (III) se presenta naturalmente en muchos vegetales, frutas, carnes, granos y levadura. El cromo (VI) y el cromo (0) son producidos generalmente mediante procesos industriales. Las fuentes principales del cromo (VI) en el agua potable son descargas de fábricas de acero y celulosa, y la erosión de depósitos naturales de cromo (III). En muchos lugares, los compuestos de cromo han sido diseminados al medio ambiente mediante filtraciones, pobre almacenaje, o prácticas inadecuadas de disposición. Los compuestos de cromo son muy persistentes en el agua como sedimentos. El cromo (III) es un nutriente esencial para los seres humanos ya que promueve la acción de la insulina. El cromo hexavalente es tóxico y sus derivados usualmente son de origen antropogénico (EPA, 2010; ACSA, 2014). Es un metal pesado de la primera serie de metales de transición, a lo que debe sus principales propiedades químicas y bioquímicas. Entre ellas destacan que tiene varios estados de oxidación, algunos de sus compuestos son paramagnéticos, muchos de ellos son coloridos, por lo que ciertos minerales y piedras preciosas deben su color al cromo (Albert, L., 1997). En el borrador de la evaluación de riesgos a la salud humana para el cromo (VI) que se publicó en septiembre de 2010 por la EPA (Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés), con base en un panel de expertos y comentarios públicos, la EPA está proponiendo clasificar el cromo hexavalente o cromo (VI) como una sustancia que probablemente ocasiona cáncer en humanos cuando es ingerido a lo largo de una vida (EPA, 2010). Los efectos adversos del cromo para la salud dependen, sobre todo, del estado de valencia en el momento de la exposición y de la solubilidad del compuesto del que se

trate (Albert, L., 1997). Dentro de las afecciones locales se mencionan la dermatitis, además de la sensibilización y la irritación de mucosas, y en las afecciones generales se enumeran la producción de tos, bronquitis crónica, ulceraciones del tabique nasal y piel, dolores respiratorios y de cabeza, hemorragia nasal y dermatitis aguda (Pérez, R., 2011). Las únicas formas de importancia toxicológica son el cromo (III) y el cromo (VI). Los compuestos de cromo (VI) son agentes oxidantes fuertes y tienden a ser irritantes y corrosivos, razón por la cual, son considerablemente más tóxicos que los compuestos de cromo (III) si las dosis y la solubilidad son similares (Albert, L., 1997). Los efectos cancerígenos del Cr (VI) se han comprobado. Así, los cromatos de zinc y calcio parecen ser los más dañinos y se encuentran entre los carcinógenos más potentes para el ser humano. También se ha descrito una mayor incidencia de cáncer de pulmón en personas expuestas a cromatos de plomo y a humos de trióxido de cromo. No existe un nivel de exposición seguro claramente establecido (Cespón, 2008).

Al igual que muchos otros elementos, el cromo puede existir en una amplia variedad de formas. Mientras que el cromo trivalente (cromo III) puede ser un elemento esencial potencialmente requerido en cantidades traza para el metabolismo de los mamíferos, la exposición a concentraciones mayores de cromo (III) y a distintas formas incluyendo el cromo hexavalente cromo (VI), puede ser tóxica (Albert, L., 1997, Reynolds, K., 2013).

Quizás la ruta de exposición más extendida para la población es a través del agua potable contaminada con este metal. En 2010 una investigación encabezada por el Environmental Working Group (EWG), documentó la presencia de cromo hexavalente en 31 de 35 ciudades en los Estados Unidos, y de éstas, 25 dieron concentraciones por encima

de la meta de salud pública propuesta por el estado de California, la cual es menor que la meta actual de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Además, el EWG, reportó que se asume que 70 millones de estadounidenses consumen agua conteniendo Cr (VI). Dado que el metal es inodoro e insípido no se sabe cuándo se está expuesto, por lo que el cromo podría ser difícil de controlar en el agua potable debido a los niveles naturales que existen en el medio ambiente. Aceptando que las exposiciones de bajo nivel y las exposiciones crónicas están asociadas con efectos cancerígenos, tanto en los seres humanos como en animales, deben hacerse más investigaciones para evaluar la relación dosis-respuesta de manera más completa. La Dra. Kelly Reynolds concluyó que hoy en día la nueva información sugiere que las normas deberían ser reducidas para proteger la salud pública (Reynolds, K., 2013).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el cromo total una concentración de 0.05 mg/L.

1.3.2.7 Fierro

El fierro (muchas veces llamado hierro) es un elemento químico con número atómico 26, el segundo metal más abundante y el cuarto de todos los elementos, superado únicamente por el oxígeno, el silicio y el aluminio. Los minerales de hierro más comunes son: hematita (Fe_2O_3), que contiene un 70% de hierro; limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$), con un 42 % de hierro; magnetita (Fe_3O_4), con un alto contenido de hierro; siderita o mineral de hierro espático (FeCO_3); pirita (FeS_2) y la pirrotita o pirita magnética (FeS) (Nordberg, 2001). Es un metal maleable, tenaz, de color gris plateado y magnético. Se encuentra en muchos otros minerales y está presente en las aguas freáticas y en la hemoglobina roja de la sangre. La

hemocromatosis es un trastorno que se origina cuando el cuerpo absorbe demasiado hierro de los alimentos (y otras fuentes que incluye a las vitaminas que lo contienen). Este trastorno provoca que el hierro adicional se deposite gradualmente en tejidos y órganos del cuerpo, lo que se denomina acumulación de hierro en la sangre, y puede producir daño en los órganos del cuerpo con el paso de los años. Los efectos sobre la salud de la exposición a cualquier sustancia peligrosa van a depender de la dosis, la duración y el tipo de exposición, la presencia de otras sustancias químicas, así como de las características y los hábitos de la persona (ATSDR, 2008). Para los organismos vivos el hierro es un constituyente esencial; este se encuentra en dos estados de oxidación en la naturaleza: el ión férrico (Fe^{3+} , la forma oxidada) y el ión ferroso (Fe^{2+} , la forma reducida). La mayoría de los compuestos ferrosos son solubles, con la excepción del sulfuro ferroso (FeS) (Fuentes & Massol-Deyá, 2002). Siendo uno de los metales más abundantes en el cuerpo humano, el hierro participa en numerosos procesos celulares tales como la síntesis de ADN, ARN y proteínas, transporte de electrones, respiración celular, diferenciación y proliferación celular, y en la regulación de la expresión de los genes. Elevados niveles de hierro se encuentran en el hígado, cerebro, células rojas sanguíneas, y macrófagos. Además, el hierro participa en la formación de la mielina y en el desarrollo de las dendritas neuronales siendo crítica la homeostasis del hierro en la función normal del cerebro, especialmente en el aprendizaje y la memoria. El hierro se encuentra formando parte de numerosas biomoléculas con diversas funciones bioquímicas y fisiológicas. Su deficiencia produce diferentes trastornos funcionales que generalmente aumentan a medida que se produce la depleción de los compuestos esenciales del metal. Muchas de las manifestaciones clínicas son consecuencia de la anemia, sin embargo, otras pueden deberse a la disminución de

hierro en los distintos tejidos o bien ser una combinación de ambos procesos (Haro, 2006). La acumulación de hierro en exceso, aunque mucho menos frecuente que la deficiencia del metal, puede ocasionar efectos adversos derivados de las lesiones producidas en hígado, corazón y páncreas principalmente. Existen dos tipos de intoxicación crónica por hierro: la hemocromatosis genética o idiopática caracterizada por una absorción de hierro en el tracto gastrointestinal extraordinariamente activada, y la hemocromatosis adquirida que suele ser consecuencia del padecimiento de determinadas enfermedades que requieren transfusiones frecuentes o de la existencia de aportes de hierro anormalmente altos (Rubio, 2004).

El fierro se encuentra presente de manera natural en acuíferos y los niveles tienden a aumentar por disolución de rocas ferrosas. Cuando es disuelto en las aguas subterráneas se reduce a su forma fierro II, que es soluble y normalmente no causa problemas por sí misma, luego el fierro II se oxida a formas de fierro III que son hidróxidos insolubles en agua. Sin embargo, por ser el agua un disolvente natural, la mayoría de los minerales de las aguas subterráneas, incluyendo el fierro, serán absorbidos por ésta (Lenntech, 2014).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el fierro una concentración de 0.30 mg/L.

1.3.2.8 Manganeso

El manganeso (Mn) es un elemento químico con número atómico 25, abundante en la corteza terrestre y es el cuarto metal más usado a nivel mundial. Es un metal encontrado en la naturaleza en diversos tipos de rocas, disolviéndose regularmente en aguas subterráneas. Se usa principalmente en la producción de acero para mejorar su dureza, rigidez y solidez. Asimismo, se ha utilizado actualmente como sustituto parcial o total del tetraetilo de plomo

como aditivo en la gasolina para mejorar el octanaje en las llamadas gasolinas sin plomo, mientras que diversos bactericidas y fungicidas lo contienen en su composición, en forma de permanganato de potasio (OMS, 2004; ATSDR, 2000). Es además un elemento esencial para algunas plantas y por esto tiene igualmente gran aplicación en la agricultura, la cual es en gran parte responsable de la contaminación ambiental por este elemento (Galvao & Cassanha, 1987). Los compuestos del Mn existen de forma natural en el ambiente como sólidos en suelos y pequeñas partículas en el agua, por lo que el metal en el aire está presente en las partículas de polvo, las cuales posteriormente se sedimentan. Puede estar presente tanto en aguas superficiales y subterráneas, como en las residuales (Szpir, 2006; Lenntech, 2011), no tiene olor ni sabor especial (ATSDR, 2012). Su presencia en las aguas provoca el desarrollo de ciertas bacterias que producen la formación de depósitos insolubles de donde pasa del estado manganeso en solución, al estado mangánico en el precipitado. Cuando se presenta en cantidades importantes, produce en el agua un sabor desagradable (Catalán, J., 1981). Entre los minerales que contienen Mn, los óxidos, carbonatos y silicatos son las formas más importantes. Este metal puede presentarse en ocho estados de oxidación diferentes, siendo los más importantes: +2, +4 y +7. El dióxido de manganeso (MnO_2) es el óxido más estable. El Mn forma diversos compuestos organometálicos (Nordberg, 2001). Ingresa al organismo por absorción gastrointestinal y por inhalación. En la sangre, el que es absorbido, se une a las proteínas plasmáticas y se concentra en pulmones, hígado, riñones, intestino, corazón, hueso y cerebro. Es excretado mayormente por la vía biliar, por lo que al haber una disfunción hepática o derivación portosistémico, es posible la producción de un aumento de los niveles sanguíneos y depósito en el sistema nervioso central; además, el metal tiene especial afinidad por el sistema extrapiramidal que está compuesto

fundamentalmente por los ganglios basales como los núcleos pálidos, putamen, caudado y sustancia nigra en mesencéfalo. Asimismo, es neurotóxico, ya sea a través de la disminución de dopamina es daño excitotóxico mediado por glutamato o estrés oxidativo (Miranda, M. y Caballero, L., 2001). El Mn es de los metales que presenta el efecto de hormesis, considerándose uno de los tres elementos traza tóxicos esenciales. En pequeñas dosis es esencial para nuestro organismo y tóxico cuando se encuentra en altas concentraciones. Es considerado un elemento esencial para todas las formas de vida, sin embargo, un aumento relativamente pequeño por encima de la dosis requerida del mismo puede resultar tóxico, clasificándose como neurotóxico, es decir, encefalopatía que se acompaña con trastornos del movimiento de tipo temblor propositivo-voluntario. En los últimos tiempos el Mn ha comenzado a considerarse como peligroso desde el punto de vista ambiental, pero no se dispone de mucha información en lo referente a sus efectos y modos de acción; no obstante, se ha reportado que es responsable de la inhibición de la síntesis de dopamina y serotonina en el cerebro de mamíferos (Crosby, 1998). Se recalca la presencia del efecto de hormesis, habiendo estudios epidemiológicos que notifican efectos neurológicos adversos tras la exposición prolongada a concentraciones altas en el agua de consumo (ATSDR, 2012). La exposición a niveles excesivos del metal ataca al sistema nervioso central produciendo problemas motores y demencia que se asemejan al Parkinson, una enfermedad neurodegenerativa caracterizada por la pérdida de neuronas que producen dopamina, un neurotransmisor clave, lo que da lugar a temblores, rigidez y síntomas asociados (Noticias ambientales, 2012). La exposición a Mn provoca el desarrollo de sistemas neurológicos, cambios de conducta, estados de debilidad generalizada y dificultades respiratorias. Los cambios en la capacidad de concentración y de atención,

acompañados de movimientos involuntarios, señala la posibilidad de un primer nivel de intoxicación. La intoxicación aguda provoca dolores de cabeza, somnolencia, irritabilidad, debilidad y confusión mental (Vega, 1988). La Organización Mundial de la Salud (OMS) reporta que los síntomas por envenenamiento con el Mn son alucinaciones, olvidos, daños en el sistema nervioso, Enfermedad de Parkinson, embolia de los pulmones y bronquitis. Asimismo, reporta que es responsable de un síndrome cuyos síntomas son: esquizofrenia, depresión, debilidad de músculos, dolor de cabeza e insomnio (OMS, 2011).

Son varios los estudios que relacionan la exposición al Mn por la ingesta de agua, con daños neurológicos, específicamente la Enfermedad de Parkinson y algunos investigadores en estudios independientes relacionan la neurotoxicidad del Mn en niños, por la ingesta de agua. Se menciona que en América del Norte no se han hecho estudios para determinar la cantidad del Mn, precisamente en aguas subterráneas o pozos de agua que abastecen a poblaciones (Pérez, R., 2011, Bouchard, *et al*, 2007, Wasserman, *et al*, 2006, H.E., *et al*, 1994.).

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), en el apartado ToxFAQs, menciona que este metal en altos niveles puede dañar el cerebro y que el Mn se ha encontrado en por lo menos 869 de los 1,669 sitios de la Lista de Prioridades Nacionales identificados por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (EPA por sus siglas en inglés). Estudios en animales han mostrado que altos niveles de Mn en agua pueden causar cambios cerebrales, es decir, en la función del sistema nervioso. Se destacan resultados de estudios en humanos y animales que indican la población susceptible de adultos mayores para efectos adversos en la salud por la exposición a este elemento. En otros estudios se observa que la gente más joven también

puede ser población susceptible, mencionándose la existencia de una Enfermedad de Parkinson juvenil (ATSDR, 2012, NIH, 2010).

La competencia entre el hierro y el Mn por el mismo sistema transportador tiene implicaciones importantes por el incremento potencial de la acumulación de Mn en el Sistema Nervioso Central (SNC), en las poblaciones con deficiencia de hierro. A nivel mundial, más de 2,000 millones de personas, sobre todo niños, mujeres embarazadas y en edad fértil, padecen de anemia ferropénica por ingestión inadecuada de hierro, por lo que los efectos potenciales asociados a la acumulación en el SNC en estas poblaciones, representan un gran reto para su evaluación (Ortega, J.A., 2005).

Por otro lado, el Dr. Angel Fusaro en el 2010, afirma que la neurotoxicidad por metales pesados en sus etapas incipientes suele ignorarse, pues el pensamiento se direcciona al comportamiento psíquico, sin siquiera sospechar su base neuro-orgánica. El Dr. Fusaro en su artículo, recuerda y reseña el acontecimiento de 1984 cuando James Oliver Huberty entró a un restaurante en San Isidro California de los EE.UU. dando muerte a 21 comensales e hiriendo a otras 19 personas. Su intención de referir este acontecimiento es por las pruebas que se le practicaron en el cabello del asesino, encontrando grandes cantidades de Mn, además de plomo y cadmio y más aún, el cabello mostraba un modelo de elementos traza observado solamente en personas con conducta psicopática violenta.

En varias ciudades del país incluyendo a Ciudad Juárez, el Mn que se encuentra en el agua abastecida para consumo humano se enmascara con la adición de hexametafosfato de sodio para evitar visualmente su presencia, ya que el metal da una coloración oscura al agua, siendo rechazada por el consumidor, quien toma en cuenta el aspecto estético. Además, el agua estaría fuera de norma en cuanto a que debe ser incolora. La preocupación

y ocupación por la adición de este compuesto para evitar la presencia visual del manganeso, se ha hecho por décadas (Olivas, M., 2013).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece como límite permisible para el manganeso una concentración de 0.15 mg/L.

1.3.2.9 Mercurio

El mercurio (Hg) es un elemento químico con número atómico 80, metal pesado plateado que a temperatura ambiente es un líquido inodoro. Es muy tóxico, el único en estado líquido a 0°C, muy denso y poco compresible; de tensión superficial muy alta y débil reacción calorífica, posee gran capacidad de amalgamar a casi todos los metales. Se evapora a 13°C y se encuentran trazas de él en cualquier producto que se analice. No es esencial para ningún proceso biológico, pero se acumula en la mayoría de los seres vivos. No es buen conductor del calor comparado con otros metales, aunque es buen conductor de la electricidad. Se considera de fácil aleación, llevándola a cabo con muchos otros metales como el oro o la plata produciendo amalgamas, pero no con el hierro. Es insoluble en agua y soluble en ácido nítrico. Cuando aumenta su temperatura por encima de los 40 °C, produce vapores tóxicos y corrosivos más pesados que el aire por lo cual éste se evapora, creando miles de partículas en vapor que se enfrían cuando caen al suelo. Es dañino por inhalación, ingestión y contacto; se trata de un producto muy irritante para la piel, ojos y vías respiratorias. En la naturaleza existe como sulfuros de mercurio (cinabrio, rojo), de arsénico (rejalgar), hierro (piritas), mixto (metacinabrio, negro), de antimonio (estibina), pero también se le encuentra directamente unido a minerales de zinc, cobre, oro y plomo (Ramírez, 2008). El mercurio puede encontrarse en tres estados de oxidación, cada uno con

un perfil tóxico específico. En el estado de oxidación cero (Hg^0), el mercurio elemental se encuentra en forma de líquido metálico o como vapor. Las otras dos formas inorgánicas de mercurio son la mercuriosa (Hg^+) o la mercúrica (Hg^{2+}). El estado mercúrico también puede formar compuestos orgánicos como metil, etil, fenil o dimetilmercurio (Clifton, 2007). El sistema nervioso es muy sensible a muchas de las formas de mercurio. El metilmercurio y los vapores de mercurio metálico son más nocivos que otras formas, ya que más mercurio llega al cerebro en estas formas. La exposición a altos niveles de mercurio metálico, inorgánico, u orgánico puede dañar permanentemente el cerebro, los riñones y al feto en desarrollo. Los efectos sobre el funcionamiento del cerebro son los siguientes: irritabilidad, timidez, temblores, cambios en los problemas de visión o audición, y en la memoria. Este metal es considerado uno de los más tóxicos (Sepúlveda, 1997). El Hg metálico produce efectos neurológicos y el llamado síndrome vegetativo asténico, cuyos efectos son los siguientes: bocio, taquicardia, pulso lábil, gingivitis, irritabilidad, temblores, pérdida de memoria y salivación intensa. Estos efectos son reversibles. El Hg^{2+} , presenta un cuadro clínico de fuerte sabor metálico, estomatitis, gingivitis, aflojamiento de dientes, aliento fétido, así como una toxicidad renal grave, por necrosis tubular renal. Típica de los efectos tóxicos de este catión, y de los calomelanos, es la llamada enfermedad rosa o acrodinia, que es una reacción de hipersensibilidad con eritema en extremidades tórax y cara, fotofobia, taquicardia y diarrea. Estos cuadros clínicos presentan una buena recuperación. Los derivados orgánicos producen una reducción irreversible del campo visual, dificultad auditiva, así mismo irreversible, ataxia, parálisis y muerte. Los efectos dependen de la dosis, produciéndose los dos primeros a bajas concentraciones, y los últimos a altas concentraciones del tóxico. Además, son teratógenos y afectan al feto

produciéndole retardo mental y deficiencias neuromusculares (Doadrio, 2004). En casos de exposición a altas dosis en forma oral, colapsa el aparato digestivo, siendo mortal en horas (Pérez, R., 2011).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el mercurio una concentración de 0.001 mg/L.

1.3.2.10 Plomo

El plomo (Pb) es un elemento químico con número atómico 82; es un metal que raramente se encuentra en su estado elemental. Representa aproximadamente el 0.002% de la corteza de la tierra y es el elemento más abundante entre los metales pesados. Aunque hay más de 200 minerales de plomo, sus minerales más importantes son la galena (PbS), la cerusita (PbCO₃), la crocoita (PbCrO₄) y la piromorfita (Pb₅(PO₄)₃Cl). Presenta dos estados de oxidación +2 y +4. En la mayoría de sus compuestos inorgánicos el plomo tiene estado de oxidación +2. Las principales causas naturales de movilización de plomo desde la corteza terrestre la constituyen las erupciones volcánicas y la meteorización de las rocas (Vicente, 2010). Es un metal pesado de color azulado que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico y se funde con facilidad. Es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico, pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico. El plomo es anfótero, ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico. El plomo forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos (Lenntech, 2012).

El Pb ha sido usado ampliamente desde el 5000 a.c. para aplicaciones en productos metálicos, cables y tuberías, pero también en pinturas y pesticidas. Es uno de los cuatro

metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida, el agua y el aire. El efecto más significativo del plomo en la salud es la asociación de la exposición al plomo con el desarrollo cognitivo reducido e intelectual de los niños. Sin embargo, en el ser humano, el plomo puede tener una amplia variedad de efectos biológicos según el nivel y la duración de la exposición. Se han observado efectos en el plano subcelular y efectos en el funcionamiento general del organismo que van desde la inhibición de las enzimas hasta la producción de fuertes cambios morfológicos y la muerte. Dichos cambios se producen a dosis muy diferentes; en general, el ser humano que se está desarrollando es más sensible que el adulto (OMS, 2002). La absorción del plomo en el organismo se produce a través del sistema respiratorio o por el tracto gastrointestinal; la absorción percutánea sólo se da en su estado orgánico. Su absorción varía dependiendo del estado nutricional y de la edad. La absorción es mayor en la niñez, siendo en ellos de 30 a 50% mientras que en el adulto es del 10%. La deficiencia de hierro, calcio, así como el incremento de la ingesta de magnesio, fosfato, alcohol y grasas se ha asociado a un incremento de la absorción gastrointestinal del plomo (Ramos *et al.*, 2009). El Pb afecta todos los órganos y sistemas. Actúa como agonista o antagonista de las acciones del calcio y se relaciona con proteínas que poseen los grupos sulfidrílicos, amina, fosfato y carboxilo (Poma, 2008; Sanín, Luz H., 1998). La toxicidad del plomo es consecuencia de la afinidad que tiene éste por el grupo sulfihidrido (SH) de las proteínas, uniéndose en forma irreversible y alterando completamente su función (Ramos *et al.*, 2009). La toxicidad aguda se presenta luego de una exposición respiratoria a altas concentraciones, con encefalopatía, insuficiencia renal y síntomas gastrointestinales. La toxicidad crónica es la más frecuente y se manifiesta con compromiso multisistémico:

hematopoyético, del sistema nervioso, gastrointestinal, riñón y sistema reproductor (Valdivia, 2005). Como síntomas avanzados específicos se incluyen anemia, cólicos intestinales, náuseas y vómitos, enfermedad renal, impotencia sexual, delirio, esterilidad, daños al feto, hipertensión arterial, estreñimiento agudo, afectación de los nervios, enfermedad ósea, problemas de cáncer y muerte (Pérez, R., 2011).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el plomo una concentración de 0.01 mg/L.

1.3.2.11 Sodio

El sodio (Na) es un elemento químico con número atómico 11, ocupa el sexto lugar por su abundancia entre todos los elementos de la corteza terrestre, que contiene el 2.83% de sodio en sus formas combinadas. El sodio es, después del cloro, el segundo elemento más abundante en solución en el agua de mar. Las sales de sodio más importantes que se encuentran en la naturaleza son el cloruro de sodio (sal de roca), el carbonato de sodio (sosa y trona), el borato de sodio (bórax), el nitrato de sodio (nitrato de Chile) y el sulfato de sodio. Las sales de sodio se encuentran en el agua de mar, lagos salados, lagos alcalinos y manantiales minerales (Lenntech, 2013). Es un metal suave, reactivo y de bajo punto de fusión. Es el más importante de los metales alcalinos. Es necesario para los humanos para mantener el balance de los sistemas de fluidos físicos. Es también requerido para el funcionamiento de nervios y músculos y su ausencia puede causar convulsiones, deshidratación, parálisis muscular, disminución del crecimiento y entumecimiento general. Sin embargo, un exceso de sodio puede dañar los riñones y también potencialmente

incrementar las posibilidades de hipertensión arteriosclerosis, edemas e hiperosmolaridad (ATSDR, 2010).

El Na es el principal electrolito o catión cargado positivamente en el líquido extracelular. Con el potasio, funciona como una bomba que regula la cantidad de agua en el cuerpo y permite el intercambio de nutrientes y residuos dentro y fuera de las células. El sodio también trabaja en conjunto con el cloruro, que es el electrolito o anión principal cargado negativamente, en el fluido extracelular. Las concentraciones de electrolitos son controladas por una variedad de hormonas que se producen en los riñones y las glándulas suprarrenales que se sitúan en los riñones. Las concentraciones normales de sodio en el plasma deben estar entre 135 y 145 milimoles por litro de sangre. Cuando los niveles son más altos se produce lo que se denomina hipernatremia, que típicamente está causada por comer alimentos de alto contenido en sodio o por no beber suficiente agua. Sin embargo, consumir agua alta en sodio puede también contribuir a tener hipernatremia, cuyos síntomas incluyen sed excesiva, edema, cambios de humor y aumento de la presión arterial. Por otro lado, una concentración baja de sodio en el plasma se denomina hiponatremia, que normalmente ocurre con una enfermedad aguda de los riñones, del hígado o del corazón, pero también se pueden producir por sudoración profusa o "intoxicación" de agua. El sudor excreta sal a través de la piel, mientras que beber demasiada agua, especialmente si está filtrada o destilada, diluye la concentración de sodio en el plasma. Los triatletas y los corredores de maratón corren un alto riesgo de padecer hiponatremia si reponen los líquidos perdidos con agua que no contenga ningún electrolito. Los síntomas de hiponatremia incluyen calambres musculares severos, inflamación cerebral, presión arterial baja y ritmo e índice cardíaco alterados (Dubois, S., 2013).

El sodio se encuentra en casi todos los alimentos y en el agua de consumo, y aunque no se propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud, las autoridades de salud establecen en la normatividad mexicana vigente un límite máximo de 200 mg/L en el agua potable (Química del agua, 2014).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el sodio una concentración de 200 mg/L.

1.3.2.12 Zinc

El Zinc (Zn) es un elemento químico con número atómico 30, ampliamente distribuido en la naturaleza, aunque no es abundante. En los suelos su concentración media es de 70 a 400 mg/kg (Stietya, 2013). Su estado de oxidación es (+2). El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la blenda, marmatita o esfalerita de zinc, ZnS. Es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales. La deficiencia de zinc en la dieta humana deteriora el crecimiento y la madurez y produce también anemia. La insulina es una proteína que contiene zinc. Está presente en los alimentos ricos en proteínas (Lenntech, 2012). Es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Cuando la gente absorbe poco zinc puede experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor así como pequeñas llagas, y erupciones cutáneas. La acumulación del zinc puede incluso producir defectos de nacimiento. Aunque los humanos pueden manejar proporcionalmente largas cantidades de zinc, demasiada cantidad de zinc puede también causar problemas de salud eminentes, como es úlcera de estómago,

irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. Niveles altos de zinc pueden dañar el páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, y causar arterioesclerosis (Lenntech, 2012).

Este elemento es uno de los llamados esenciales más abundantes en el cuerpo humano y al ser un ión intracelular se encuentra en su mayoría en el citosol. Es el segundo oligoelemento en relación a la cantidad total en el organismo, siendo superado tan sólo por el hierro. La mayor parte del zinc es intracelular. El 90% se distribuye principalmente en los tejidos óseo y muscular y el resto se localiza en la piel, el hígado, el páncreas, la retina, las células hemáticas y los tejidos gonadales en el varón. El contenido en los hematíes, músculo, pelo y testículos se intercambia más rápidamente que el contenido en el esqueleto y dientes. La sangre total contiene aproximadamente diez veces más zinc que el plasma, debido a la presencia de este catión en el enzima eritrocitario anhidrasa carbónica (Rubio *et al.*, 2007). La mayoría del Zn se absorbe en el intestino delgado, siendo el yeyuno el lugar de mayor velocidad en el transporte del mismo. La absorción es un proceso saturable ya que cuando los niveles de zinc disminuyen se produce un aumento en la velocidad de transporte. Luego es transportado principalmente por la albúmina que es la proteína plasmática hacia el hígado a través de la circulación portal y desde ahí se distribuye a diferentes tejidos. Este metal forma parte de 100 enzimas, las cuales están ligadas al retinol, al metabolismo de proteínas y glúcidos y también a la síntesis de insulina, ARN y ADN (Hernando, A., 2009).

La acumulación del zinc puede incluso producir defectos de nacimiento. Incluso los humanos pueden manejar proporcionalmente grandes cantidades de este metal, aunque demasiada cantidad de zinc puede también causar problemas de salud eminentes, como es

úlceras de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. Niveles altos de este elemento pueden dañar el páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, y causar arterioesclerosis. Exposiciones al clorato de zinc intensivas pueden causar desordenes respiratorios (Lenntech, 2012).

La Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece como límite permisible para el zinc una concentración de 5.0 mg/L.

1.4 Normatividad

La normatividad en México, establece exigencias para el contenido de constituyentes químicos en el agua para uso y consumo humano, con el propósito de evitar el potencial impacto negativo a la salud pública. Específicamente en este rubro, toma en cuenta los siguientes metales y metaloides: aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, fierro, manganeso, mercurio, plomo, sodio y zinc.

La modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 anota que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, por lo que se requiere establecer límites permisibles en cuanto a características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor. Los límites permisibles de características microbiológicas se establecen con respecto a los organismos coliformes totales y *E. coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes, determinando la ausencia o no detectables para ambos parámetros. La normatividad vigente en México para el agua de consumo humano, comparada con lo normado en la Unión Europea, no incluye

el cobalto, níquel, estaño y talio, sin embargo agrega el aluminio, bario, fierro, sodio y zinc, haciendo un total de doce elementos.

1.4.1 Parámetros y periodicidad de análisis

La normatividad aplicable y vigente en México establece la vigilancia y evaluación del control de calidad de agua para uso y consumo humano distribuida por sistema de abastecimiento público en la norma oficial mexicana NOM-179-SSA1-1999. En esta se asienta que el objetivo es prevenir la transmisión de enfermedades infecciosas y parasitarias, así como las derivadas de la continua ingestión de sustancias tóxicas que puede contener el agua abastecida a la población. Asimismo, menciona que la vigilancia debe consistir en programas estructurados por las autoridades competentes para evaluar el control de calidad que llevan a cabo los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento que, en el caso que nos ocupa en este estudio, es la JMAS. El programa de análisis de calidad del agua incluye, como mínimo, en cuanto al examen microbiológico en red de distribución, una muestra por cada 250,000 habitantes con periodicidad diaria, cuando la población es mayor de 500,000 habitantes. La vigilancia contempla el análisis general del agua de abastecimiento considerando los parámetros a determinar, el número de muestras y la frecuencia de acuerdo a la fuente (superficial, subterránea, mezcla de dos o más tipos de fuentes y/o tanque de almacenamiento y regulación y planta potabilizadora). Para las fuentes subterráneas se define el requerimiento de una muestra semestral, por lo que esto aplica para cada uno de los pozos y en los parámetros a analizar. Además de los constituyentes químicos (metales y metaloides), se incluyen cloruros, dureza total,

fluoruros, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, pH potencial de hidrógeno, sólidos disueltos totales, sulfatos y parámetros especiales que determine la autoridad sanitaria competente, entre los que se consideran las características radiactivas especificadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

1.4.2 Métodos de prueba

La selección de los métodos de prueba para la determinación de los parámetros definidos en la normatividad es responsabilidad de los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano y son aprobados por la Secretaría de Salud (SSA). Estos métodos se asientan en el programa de control de calidad analítica del agua para cada uno de los parámetros. La JMAS utiliza métodos específicos dependiendo del parámetro analizado. El EPA-METHOD-200.7, es el método de análisis empleado para determinar la concentración en agua de aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), Cobre (Cu), cromo (Cr), fierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb), sodio (Na) y zinc (Zn), mientras que para el mercurio se utiliza el comprendido en la Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. El método de muestreo de agua utilizado es el ordenado en la *“Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo”*. En esta norma se incluyen los criterios para manejo, preservación y transporte de muestras. Para el análisis de metales, la muestra debe ser contenida en envase y tapa de plástico enjuagado con ácido nítrico 1:1, adicionados con un mililitro de ácido nítrico concentrado por cada 100 mililitros de muestra, colectando mínimo 1000 mililitros con un tiempo máximo de

almacenamiento para 180 días, excluyendo al mercurio que se almacena por un máximo de cuatro semanas. En cuanto al sodio, el envase utilizado es de plástico o vidrio; se colectan mínimo 100 mililitros de muestra y ésta se preserva refrigerando a temperatura de 4 a 10 grados centígrados, en la oscuridad y 18 días como máximo para su almacenamiento. En lo que hace a la cadena de custodia de la muestra se incluye la identificación y control de la misma, donde para la identificación de las muestras se etiquetan los frascos y envases con la siguiente información: número de control para identificar la muestra, independientemente del registro del laboratorio, fecha y hora de muestreo. Para el control de la muestra se lleva un registro en formato establecido con los datos anotados en la etiqueta del envase con la identificación del punto o sitio de muestreo, temperatura del agua, potencial de hidrógeno, tipo de análisis a efectuar, reactivo empleado para la preservación, las observaciones relativas a la toma de muestra, de preferencia en situaciones de muestras especiales provenientes de alguna contingencia o evento ocasional y el nombre de la persona que realizó el muestreo.

1.5 Abastecimiento en Ciudad Juárez

En Ciudad Juárez, el incremento excesivo y en gran medida anárquico de la economía y la ciudad con el consiguiente aumento poblacional, han generado un aumento desmedido en la demanda de agua, lo que ha significado la sobreexplotación de la fuente más antigua de abastecimiento (El Bolsón del Hueco), y la consecuente búsqueda de fuentes adicionales (Bolsón de Mesilla), que coadyuven con la primera. El crecimiento demográfico en Ciudad Juárez con una población de 1,132,331 habitantes (INEGI, 2010), se caracteriza por no ser uniforme ya que entre otras razones, es flotante por su cualidad de frontera. Actualmente el

abastecimiento de agua en Ciudad Juárez, Chihuahua, proviene de dos acuíferos (confinados), el Bolsón del Hueco y el Bolsón de Mesilla, a través de pozos profundos (semisurgentes). Este último bolsón es de explotación reciente que data de mayo del 2010. Las actividades de búsqueda, localización, estudios geohidrológicos, perforación extracción, y distribución de agua a la población del municipio está a cargo de la JMAS, organismo operador dependiente del orden estatal, que contabilizó para el año 2012 un total de 441,454 cuentas de usuarios y una cobertura del 98%. El consumo por habitante por día calculado es de 279 litros de agua abastecidos mediante un promedio de 217 pozos y un volumen anual promedio de extracción de agua de 13,879,869 m³ (Franco, R., 2012; Herrera, J.M., 2014).

Capítulo II

Metodología

La JMAS proporcionó los archivos de resultados de análisis a muestras de agua de los pozos de los cuatro años de estudio 2008-2010, 2012, donde se prescinde del 2011 por inconvenientes en el registro de datos.

Los reportes de los años 2008-2010 estuvieron conformados por dos páginas en formato Excel. La primera que fue la utilizada para este estudio, estaba identificada como APFQ y como título “Resultados de análisis físicoquímicos-metales” conteniendo la fecha y el número de pozo muestreado, así como una columna para parámetro, unidad, resultado y L.P. Contenía la información de los pozos con respecto a los constituyentes químicos estudiados (Al, As, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Na, Pb, Zn). La jefatura del Laboratorio de Calidad del Agua mencionó que se utiliza el método de muestreo y análisis correspondiente para cada elemento estudiado de acuerdo a la norma aplicable con equipos y técnicas universalmente aceptadas y mediciones de alta precisión.

Se revisaron los resultados para cada elemento y año estudiado y se extrajeron los datos para capturarse en hoja Excel. En esta hoja se encontraban todos los números de pozos y resultados de cada elemento, es decir, una hoja de captura para cada elemento estudiado y para cada año.

Posteriormente estos datos capturados se analizaron aplicando los criterios de inclusión y exclusión para generar una segunda hoja de captura para cada elemento estudiado y para cada año.

Con la intención de incorporar la información espacial que permitiera explicar la ubicación de los pozos de agua y su respectiva calidad para cada elemento estudiado, se hizo uso de los sistemas de información geográfica (SIG). Se utilizó el software Arc GIS 9.3. Por lo tanto, se agregó la información referente a la ubicación geográfica de los pozos en las coordenadas X y Y que fue proporcionada por la COESPRIS (Comisión Estatal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios) y de nuevo se aplicaron los criterios de exclusión.

Se decidió considerar tres calidades para el agua de los pozos. La calidad aceptable para resultados de concentración menores al límite de detección, la calidad alerta para cuyos resultados tuvieron una concentración mayor al límite de detección pero menor al límite máximo permisible y la calidad fuera de norma para los resultados mayores al límite máximo permisible. Entonces en una hoja de Excel se anotó el número de pozo, la fecha de muestreo, el resultado de análisis en mg/L de acuerdo a las tres calidades antes mencionadas y la ubicación geográfica de los pozos en coordenadas X y Y, por lo que de esta forma se tuvo la información en tres hojas de Excel (tres calidades) para cada constituyente químico estudiado y para cada uno de los años de estudio.

Aplicando los criterios de exclusión, se depuraron los reportes de resultados, ya que de un total de 1767 reportes para los cuatro años, se revisaron 1403 que estuvieron acorde a los criterios de inclusión.

Con esta información se procedió a determinar el número de registros de resultados de análisis, la concentración máxima observada, la concentración mínima, el promedio de todos los registros y la media de las concentraciones. Para cada año se sumó el total de reportes determinando los porcentajes correspondientes a cada una de las calidades. Finalmente se sumaron los totales de cada calidad para determinar un promedio para el total

de años estudiados. De esta manera se tuvo una clasificación global, en cuanto a calidad para los cuatro años estudiados.

Para determinar los pozos de menor calidad, los cuales contienen concentración de elementos en calidad alerta y/o fuera de norma se elaboró una tabla de Excel donde se capturaron los números de pozos y la clasificación para estas dos calidades.

Se elaboraron mapas para cada elemento químico, cada año y cada calidad presentándose en proyección UTM 213N WGS84, donde se identificaron en color verde los pozos con calidad aceptable, en color amarillo los pozos de calidad alerta y en color rojo los pozos de calidad fuera de norma.

Por otro lado, para revisar la tendencia de la concentración proyectada al 2016 de los elementos fuera de norma, se elaboraron gráficas utilizando línea de tendencia polinómica de orden 2.

2.1 Área de estudio

La zona de estudio es Ciudad Juárez, localizada al norte del estado de Chihuahua y al sur de la ciudad de El Paso, Texas. Se encuentra ubicado en latitud $31^{\circ} 44'$ N y longitud $106^{\circ} 29'$ O, a una altitud de 1,140 msnm. Su clima es muy seco templado, el rango de temperatura se encuentra entre 14 y 18° C y el rango de precipitación oscila entre los 200 a 300 mm (INEGI, 2010). Asimismo, todos los pozos de extracción de agua que la suministran a la red pública de la ciudad y son operados por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez (JMAS).

El Municipio de Juárez se ubica sobre un sistema de terrazas, compuesto por dos gradientes significativos, valle bajo y valle alto, con respecto al Río Bravo. El valle bajo tiene pendientes planas que varían entre 0 y 5% y en el valle alto del 5 al 15% en la zona poniente; en la zona sur las pendientes son mínimas. Además de la Sierra de Juárez, existen otros relieves topográficos notables que circundan la zona. Estos son la Sierra de Presidio que se localiza al sureste, la Sierra de Samalayuca localizada al suroeste y El Barreal que es un bajo topográfico o playa que capta la corriente que baja de la Sierra de Juárez durante la época de lluvias. Al suroeste se localizan también los cerros El Mesudo y El Picacho que conforman la Sierra del Mezquite y finalmente el desierto de los Médanos de Samalayuca que se encuentran al sur de la Sierra de Samalayuca (INE, 1998).

2.2 Diseño de la investigación

Investigación no experimental, descriptiva, analítica, transversal con temporalidad retrospectiva.

2.3. Población de estudio

El total de pozos de agua administrados por la JMAS, localizados en Ciudad Juárez, Chihuahua.

2.4 Criterios de inclusión

Los pozos de agua operados por la JMAS que integran el sistema de abastecimiento a la población de Ciudad Juárez.

Los pozos de agua que cuenten con sus resultados de análisis y localización geográfica en coordenadas X y Y.

2.5 Criterios de exclusión

Los pozos de agua de particulares.

Los pozos de agua que no cuenten con resultados de análisis.

Los pozos de agua que no cuenten con la ubicación geográfica en coordenadas X y Y.

Los pozos de agua que no abastecen a Ciudad Juárez, Chihuahua.

2.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Recolección de resultados de análisis al agua de los pozos que integran el sistema de abastecimiento de agua a Ciudad Juárez, Chihuahua y que se encuentran en la base de datos de la JMAS, así como la ubicación geográfica en coordenadas X y Y de los pozos.

2.7 Variables de estudio

La calidad del agua se estableció como variable dependiente y la concentración

de los elementos de estudio (Aluminio, Arsénico, Bario, Cadmio, Cobre, Cromo, Fierro, Manganeso, Mercurio, Plomo, Sodio y Zinc) como variable independiente.

2.7.1 Operacionalización de las variables

Concentración en mg/L es la cantidad del elemento medida en miligramos en un litro de agua, es cuantitativa, de razón.

Calidad de agua se define como un atributo que está en función del uso que se le quiera dar al líquido, así como de la concentración medida en miligramos en un litro de agua.

En este estudio se establecieron tres escalas de calidad, mismas que se definen como:

Calidad aceptable. Resultados o registros de concentración de los análisis practicados al agua de los pozos y que se encuentran por debajo del límite de detección de la técnica y equipo, en el período de estudio.

Calidad alerta. Resultados o registros de concentración de los análisis practicados al agua de los pozos y que se encuentran por arriba del límite de detección de la técnica y equipo, y por debajo del límite máximo permisible normado en México, en el período de estudio.

Calidad fuera de norma. Resultados o registros de concentración de los análisis practicados al agua de los pozos y que se encuentran por arriba del límite máximo permisible normado en México, en el período de estudio.

Capítulo III

Resultados

Los resultados de los análisis permitieron definir las necesidades de tratamiento de agua en los pozos y emitir las recomendaciones para que dicho tratamiento corresponda a lo formulado en la normatividad aplicable, evitando la exposición por ingesta de estos constituyentes químicos. Asimismo, fueron la pauta para la revisión de los límites máximos permisibles normados para los constituyentes químicos estudiados.

La tabla 1 muestra un comparativo de los límites máximos permisibles, (estándares de calidad), para los constituyentes químicos en agua potable que han sido normados en países de América y del Caribe y los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Para México se observan límites máximos superiores a los recomendados por la OMS en el caso del As, ya que el LMP es 0.025 mg/L y la OMS establece 0.01 mg/L. Con respecto al Zn la OMS recomienda 3 mg/L y en México el LMP es 5 mg/L. Sin embargo, para el Mn lo recomendado por la OMS es 0.5 mg/L, mientras que México lo regula en 0.15 mg/L. Al respecto vale la pena destacar que en la primera edición de las Guías para la Calidad del Agua, publicada en 1984, se estableció un valor de referencia de 0.1 mg/L basado en sus propiedades colorantes y para 1993 las Guías dan un valor de referencia de 0.5 mg/L basándose en pruebas de estudios de ingesta diaria real y de toxicidad en animales de laboratorio a los que se les suministró manganeso en el agua de bebida, señalando que los consumidores suelen considerar aceptable el agua con concentraciones inferiores a 0.1 mg/L (OMS, 2003).

Tabla 1. Límites máximos permisibles (mg/L) para los constituyentes químicos estudiados, en la OMS, países de América y del Caribe.

País	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Pb	Mn	Zn	Na	Al	Ba	Fe
Argentina	0.05	0.005	1	0.05	0.001	0.05	0.1	5	200	0.2	*	0.3
Bolivia	0.05	0.005	1	0.05	0.001	0.01	0.1	5	200	0.2	0.7	0.3
Brasil	0.05	0.005	1	0.05	0.001	0.05	0.1	5	*	*	1.0	0.3
Canadá	0.005	0.005	1	0.05	0.001	0.01	0.05	*	200	0.1	*	0.3
Costa Rica	0.01	0.005	2	0.05	0.001	0.01	0.5	3	200	0.2	*	0.3
El Salvador	0.01	0.003	1	0.05	0.001	0.01	0.05	5	*	0.2	*	0.3
EE.UU.	0.01	0.005	1.3	0.1	0.002	0.015	0.05	*	*	0.2	*	0.3
Guatemala	0.01	0.003	1.5	0.05	0.001	0.01	0.5	7	200	0.1	0.7	0.3
México	0.025	0.005	2	0.05	0.001	0.01	0.15	5	200	0.2	0.7	0.3
OMS	0.01	0.003	2	0.05	0.001	0.01	0.5	3	200	0.2	0.7	0.3
Panamá	0.01	0.003	1	0.05	0.001	0.01	0.1	*	*	0.2	*	0.3
Perú	0.01	0.003	1	0.05	0.001	0.01	0.5	*	200	0.2	*	0.3
República Dominicana	0.05	0.01	1	0.05	*	0.05	0.4	*	*	*	*	0.3
Uruguay	0.05	0.01	1	0.05	0.001	0.05	0.1	*	200	0.2	*	0.3
Venezuela	0.01	0.003	2	0.05	0.001	0.01	0.5	*	200	0.2	*	0.3

Fuente: Adaptada de las Guías de la OMS y los diferentes países para la calidad del agua potable.

*Sin límite máximo establecido

En los cuatro años estudiados, no se encontraron pozos con concentraciones de Ba, Cu, Cr, Cd y Zn sobrepasando la norma (calidad fuera de norma). De estos, solo para el Cr y el Cd, los registros para calidad aceptable son del cien por ciento. Ver tabla 2 y figura 1.

Tabla 2. Resultados de análisis en las tres calidades, para los doce constituyentes químicos. 2008-2010, 2012.

Constituyente químico	Porcentaje		
	Calidad aceptable	Calidad alerta	Calidad fuera de norma
Arsénico	39.32	56.22	4.46
Aluminio	93.02	5.64	1.34
Manganeso	37.08	51.59	11.33
Bario	25.00	75.00	0.00
Cobre	89.54	10.46	0.00
Cromo	100.00	0.00	0.00
Cadmio	100.00	0.00	0.00
Mercurio	85.80	6.30	7.90
Plomo	97.00	2.00	1.00
Zinc	98.90	1.10	0.00
Fierro	58.95	33.46	7.59
Sodio	0.20	85.10	14.70

Fuente: Cálculos propios basados en datos de la JMAS, 2013.

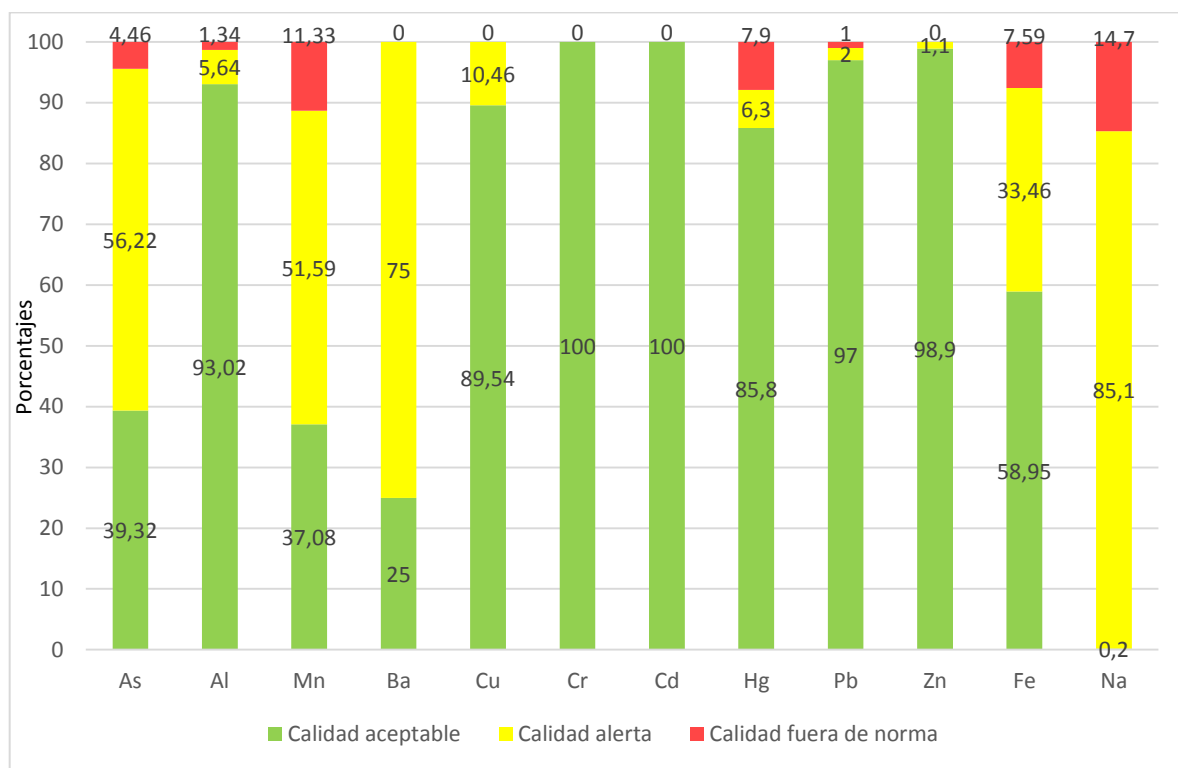


Figura 1. Resultados de análisis en las tres calidades, para los doce constituyentes químicos. 2008-2010, 2012.

La revisión del total de registros de análisis en los cuatro años estudiados y agrupando el total de constituyentes químicos, es decir, la calidad global, se encontró en un 68.73% aceptable, 27.24% en alerta y el 4.03% fuera de norma. Los tres elementos que más contribuyen a la calidad fuera de norma son el Mn, Hg y Fe. Para el 27.24% de la calidad alerta contribuyen principalmente el Na, Ba y el As (fig. 2).

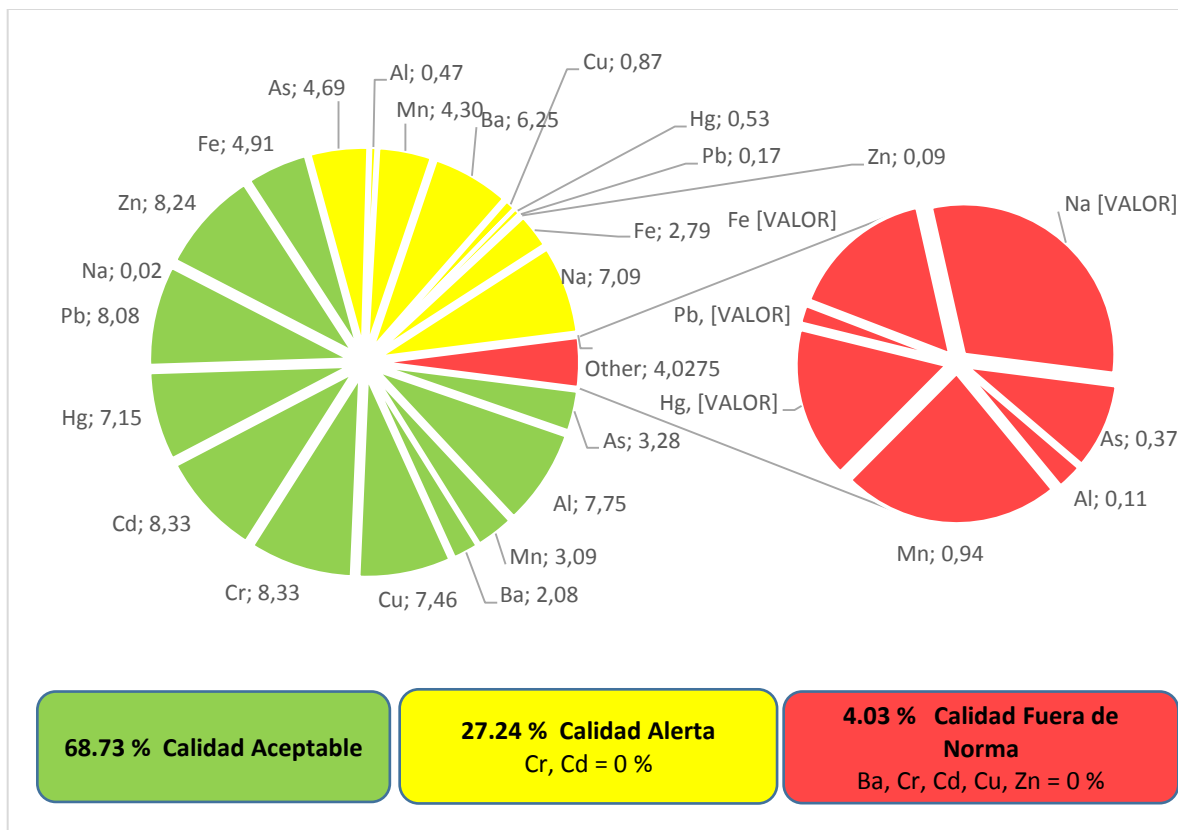


Figura 2. Aportaciones de cada elemento en los globales de las tres calidades, 2008-2010, 2012.

Siguiendo el orden de la tabla 2, en cuanto al arsénico se obtuvo el 39.32% de los registros en la clasificación de calidad aceptable, el 56.22% en calidad alerta y 4.46% en calidad fuera de norma (límite permisible de 0.025 mg/L). En cuanto a la calidad aceptable se reportan valores <0.005 mg/L en los años 2008, 2009 y 2010. Para el año 2012 los resultados se concretan a anotar <0.025 mg/L, es decir, menor al límite permisible normado y no se reporta un valor específico que permita definir calidad alerta. En esta calidad se

obtuvo una concentración media de 0.0137 mg/L, donde la concentración máxima fue de 0.0218 y la mínima de 0.0050 mg/L, es decir, la concentración media fue mayor al criterio propuesto por la Organización Mundial de la Salud de 0.01 mg/L. Con respecto a la calidad fuera de norma, se observa una media de las concentraciones de los valores reportados de 0.0505mg/L, con una concentración máxima de 1.0 mg/L y una mínima de 0.0264 mg/L, es decir, la media dio un valor del doble del límite normado de 0.025mg/L y la máxima concentración es cuatro veces este límite (ver tabla 3 y figura 3), sin embargo, en el año 2012 no hay reportes fuera de norma, los resultados en general se reportan menores al LMP. Con respecto a los resultados encontrados para el arsénico que es el que se ha muestreado en el estado de Chihuahua, los resultados coinciden con su presencia en acuíferos de diferentes zonas.

Tabla 3. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para arsénico, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	39.32	Menor a 0.0050	
Alerta	56.22	0.0137	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.0218	0.0050
Fuera de norma	4.46	0.0505	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		1.0000	0.0264

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para arsénico: 0.025mg/L.

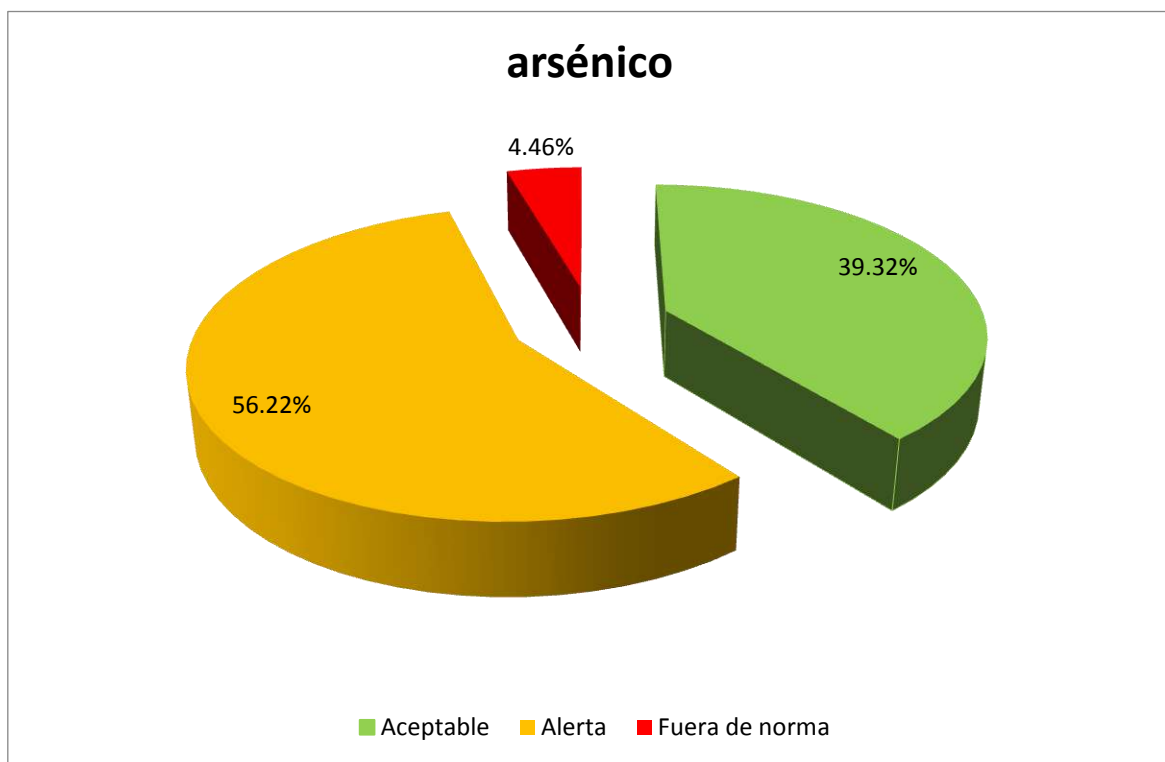
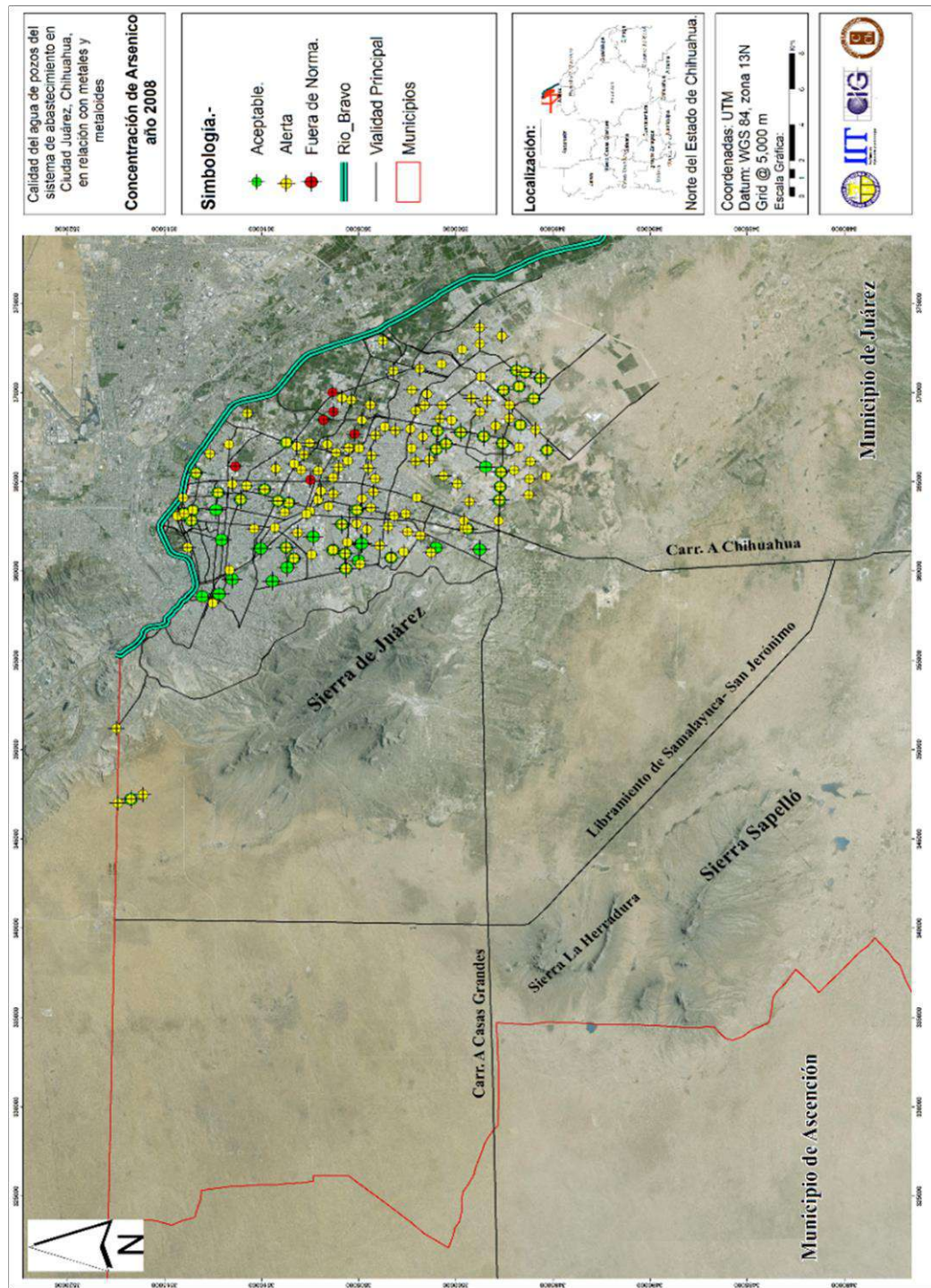


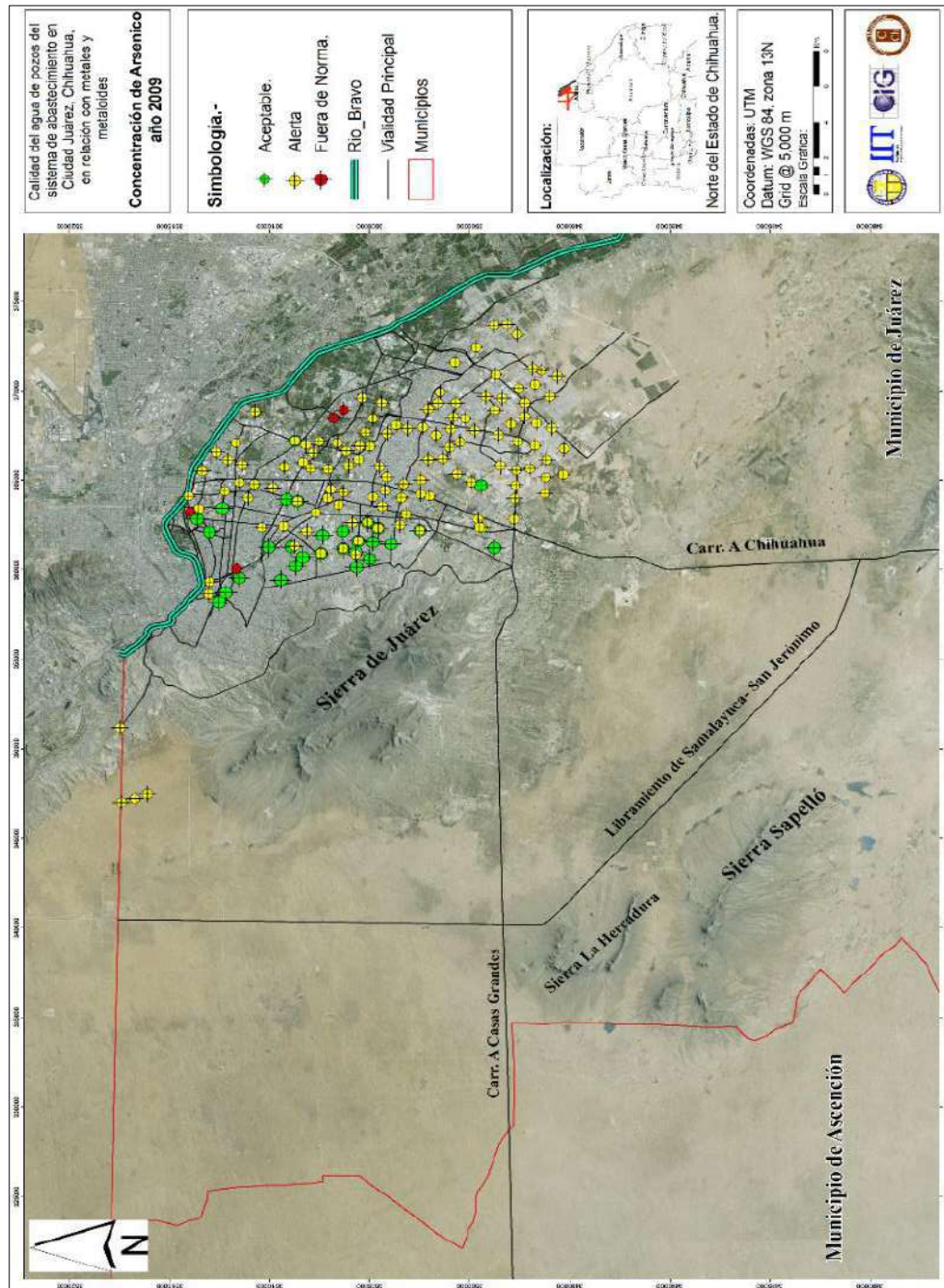
Figura 3. Resultados de las tres calidades para Arsénico. 2008-2010 y 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con As correspondiente a las tres escalas de calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) y para los cuatro años de registro de la JMAS, donde se observa principalmente la calidad fuera de norma hacia el norte de la mancha urbana. (mapas 1 al 4).

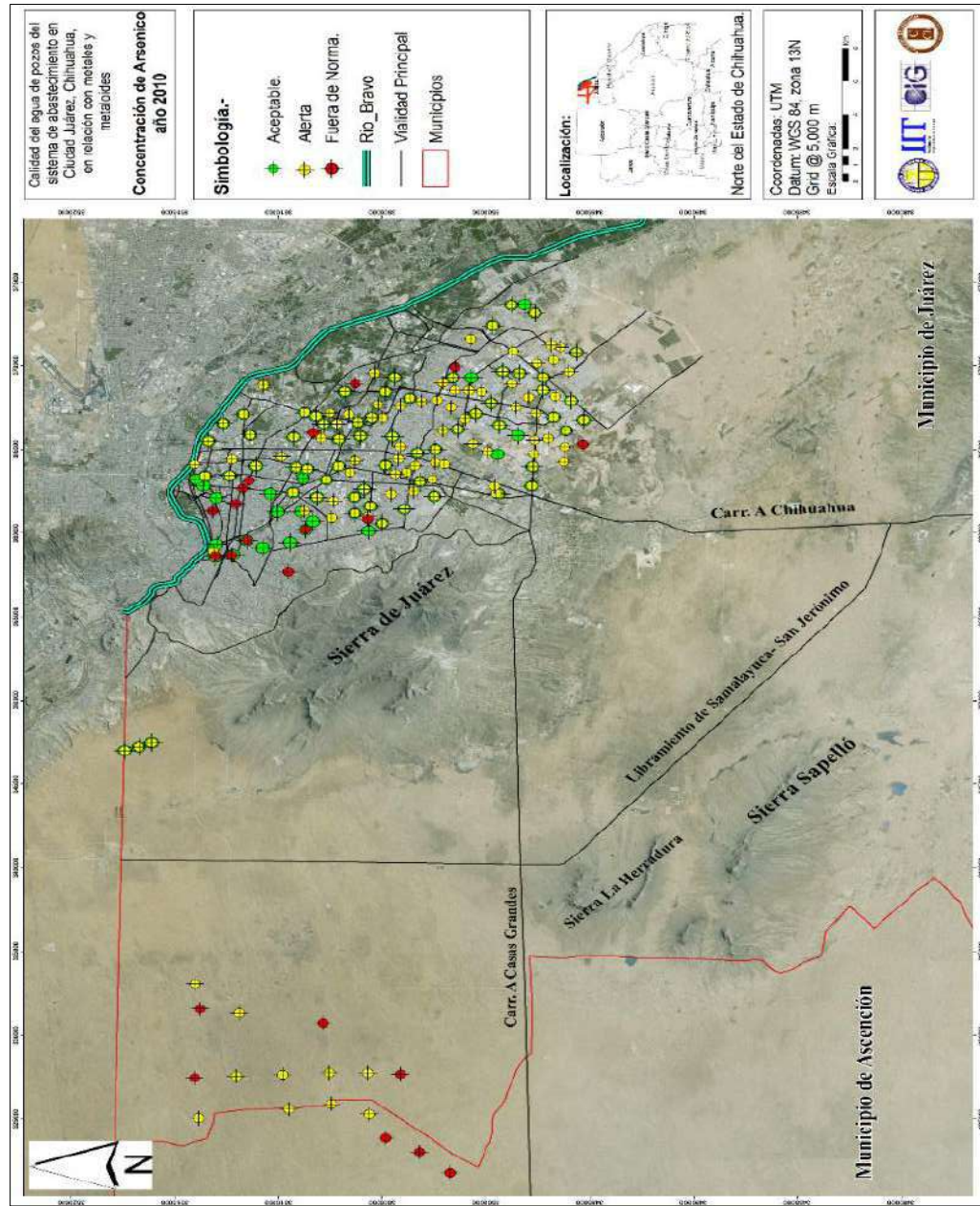
Mapa 1. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2008.



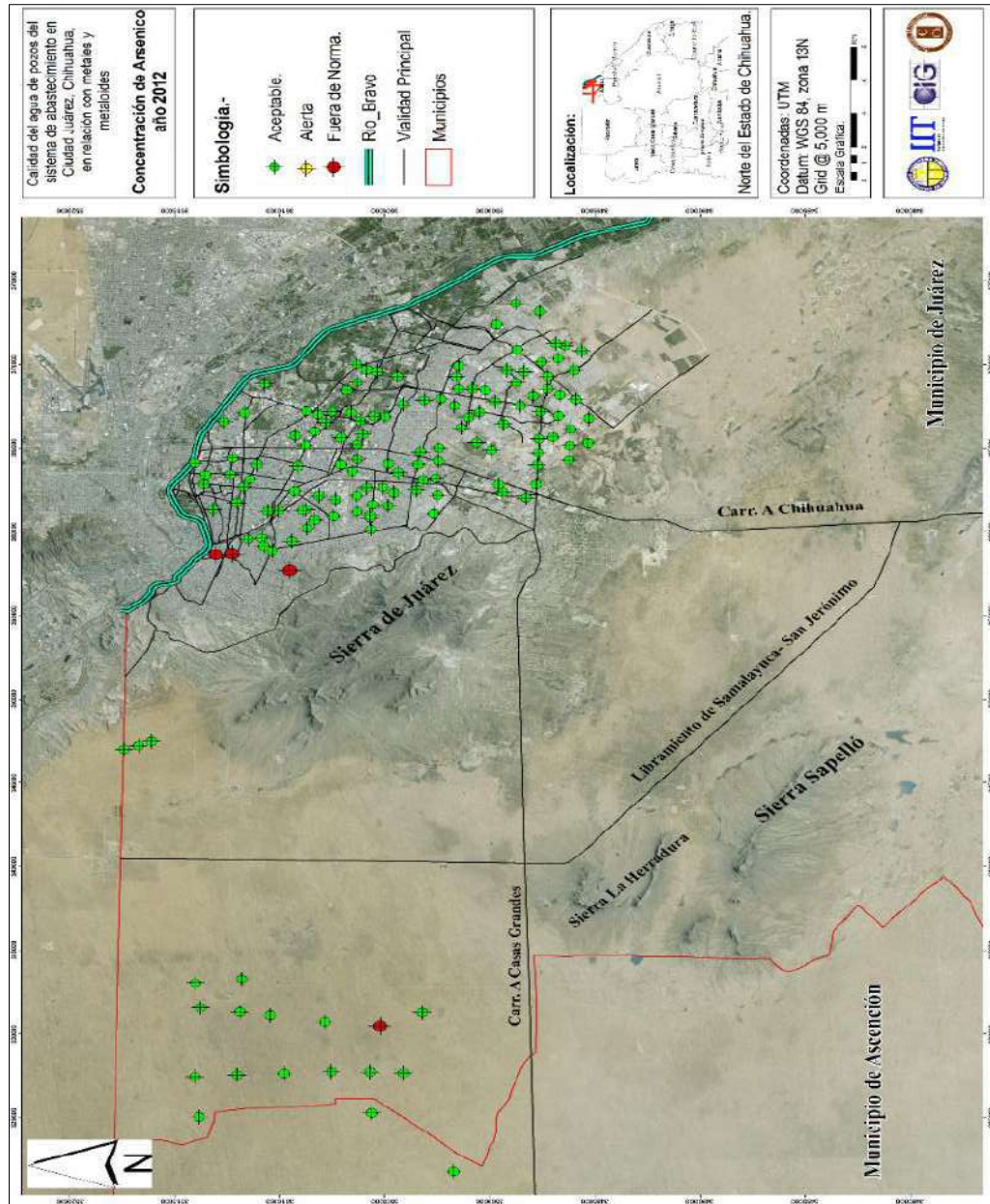
Mapa 2. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2009.



Mapa 3. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2010.



Mapa 4. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para As en los pozos. Año 2012.



Para el aluminio, los reportes de resultados son de un 93.02% para calidad aceptable, el 5.64% para calidad alerta y solo el 1.34% para calidad fuera de norma. En la calidad aceptable para los años 2008 y 2009, los valores reportados fueron (<0.05 mg/L), en el año 2009 se incluyó este valor, además de (<0.01 mg/L) y ($=0.01$ mg/L) y para el 2012 el reporte incluyó valores de (0.0051 mg/L) y No Detectado. Para este último año, se incluyó en la calidad alerta los valores reportados (<0.1 mg/L). En relación con la calidad alerta se encontró una media de las concentraciones reportadas de 0.0927 mg/L, con una concentración máxima de 0.1353 mg/L y una mínima de 0.0680 mg/L. Para la calidad fuera de norma, la media de las concentraciones que se reportaron fue 0.2943 mg/L con una concentración máxima de 0.5000 mg/L y una mínima de 0.200 mg/L (ver tabla 4 y figura 4).

Tabla 4. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para aluminio, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	93.02	Menor a 0.05, <0.01 , <0.1	
Alerta	5.64	0.0927	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.1353	0.0680
Fuera de norma	1.34	0.2943	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.5000	0.2000

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para aluminio: 0.20 mg /L.

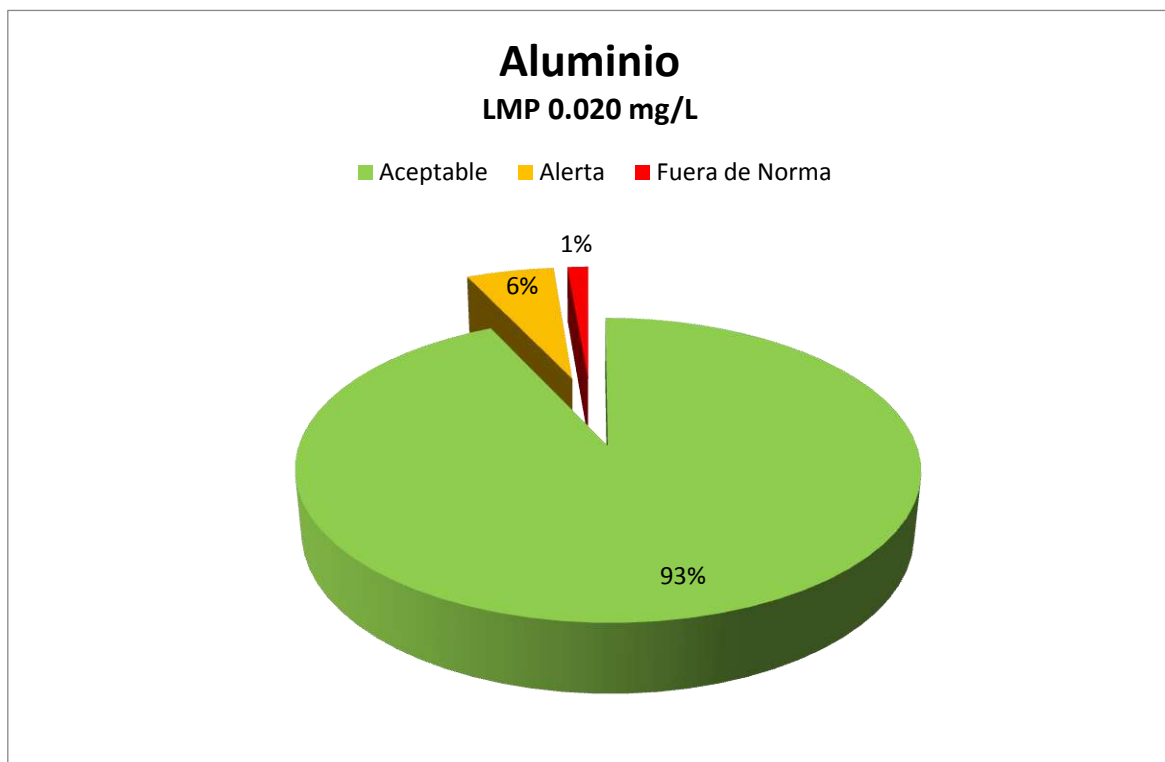
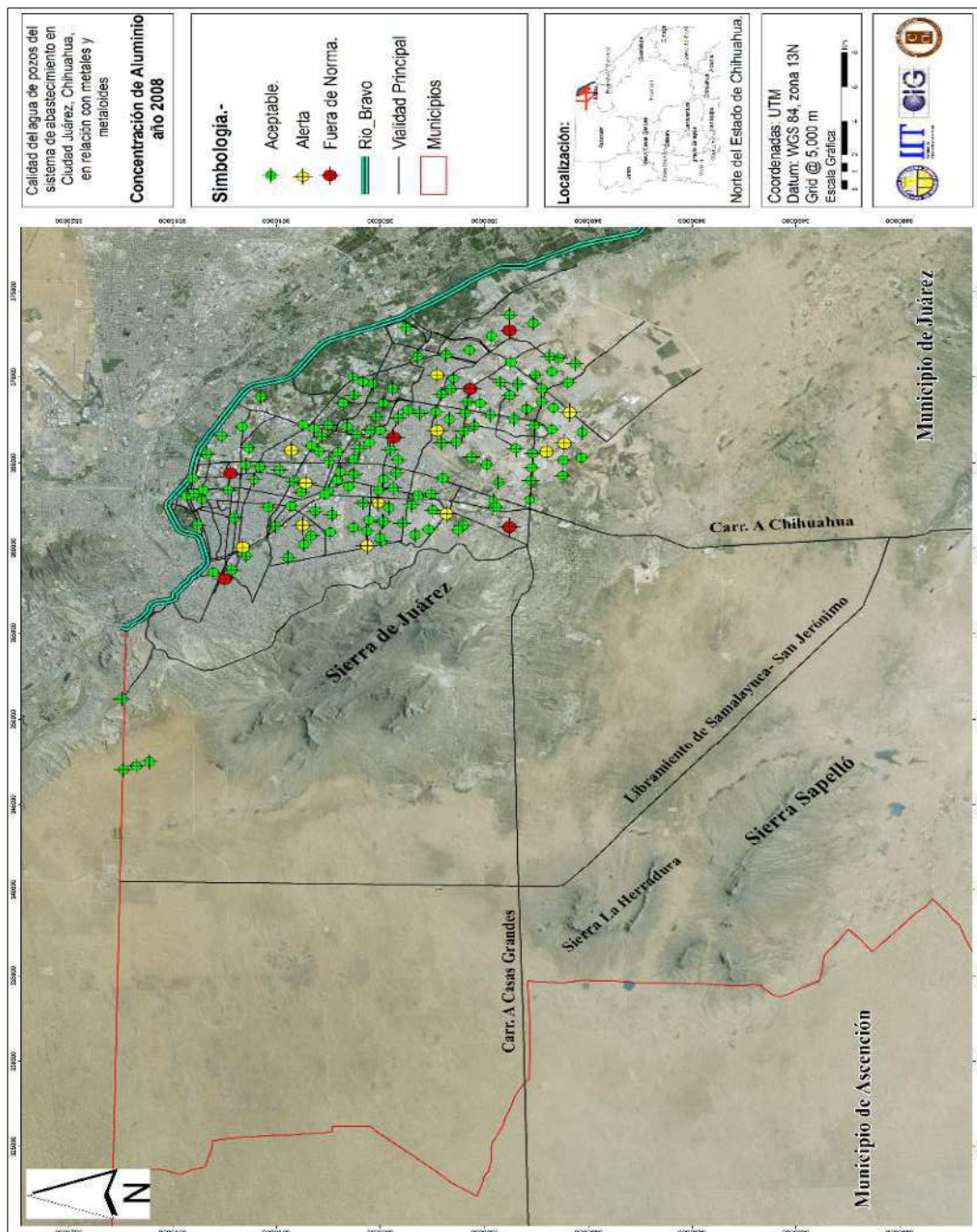


Figura 4. Resultados de las tres calidades para el aluminio, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con Al correspondiente a las tres escalas de calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) y para los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 5, 6, 7 y 8).

Mapa 5. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Al en los pozos. Año 2008.



Mapa 6. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para Al en los pozos. Año 2009.

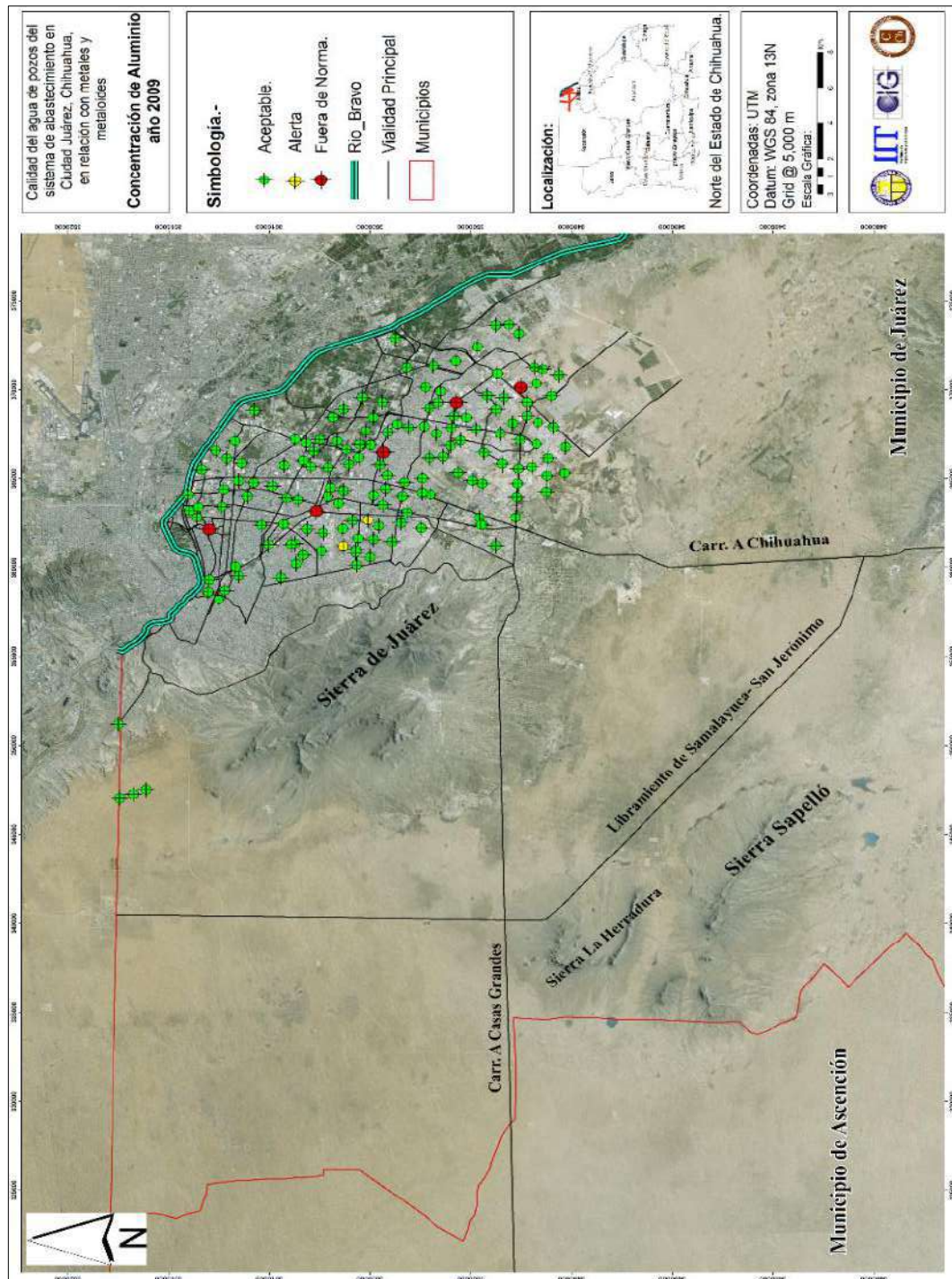


Figura 1. Mapa de la calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.

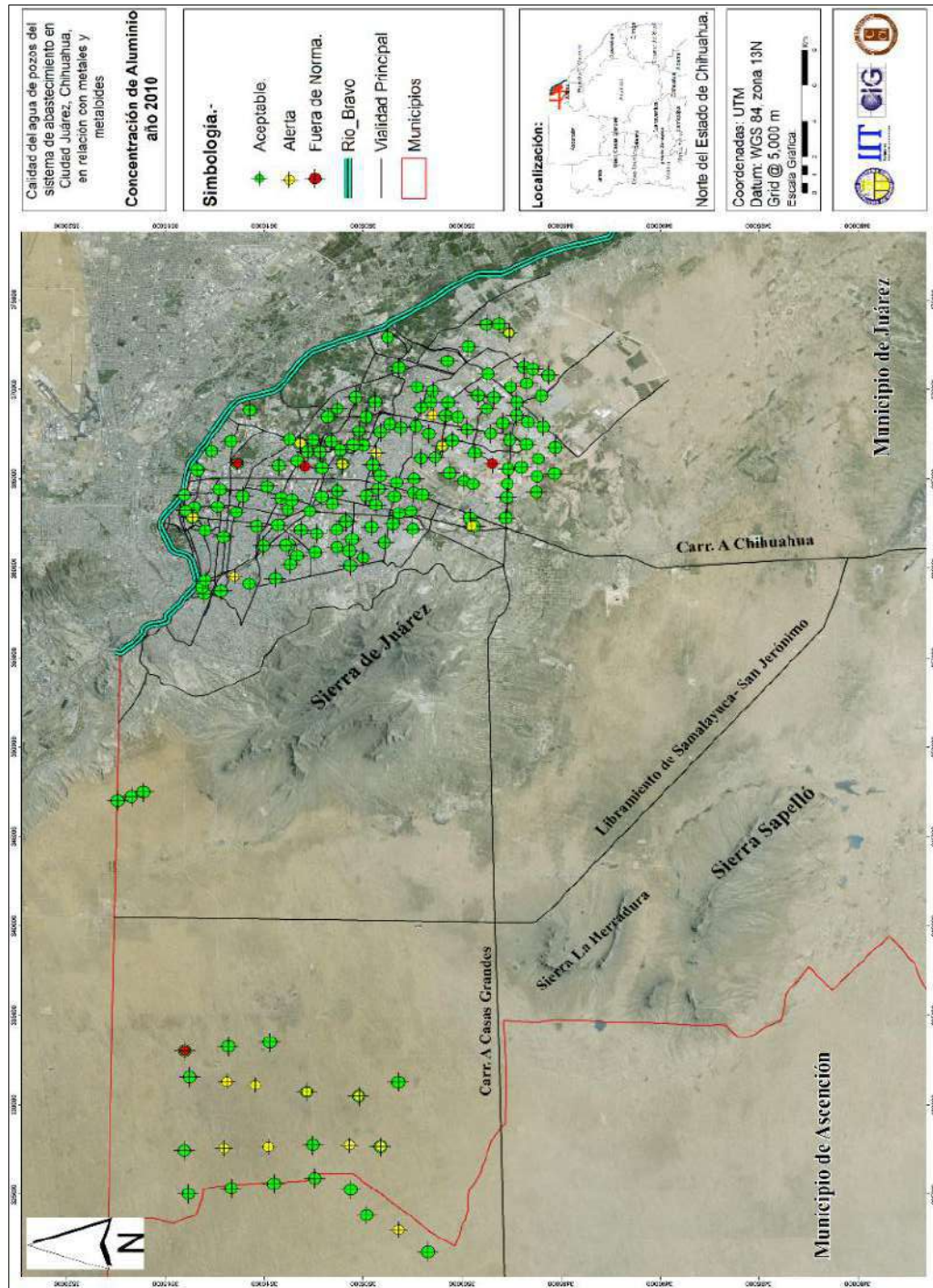
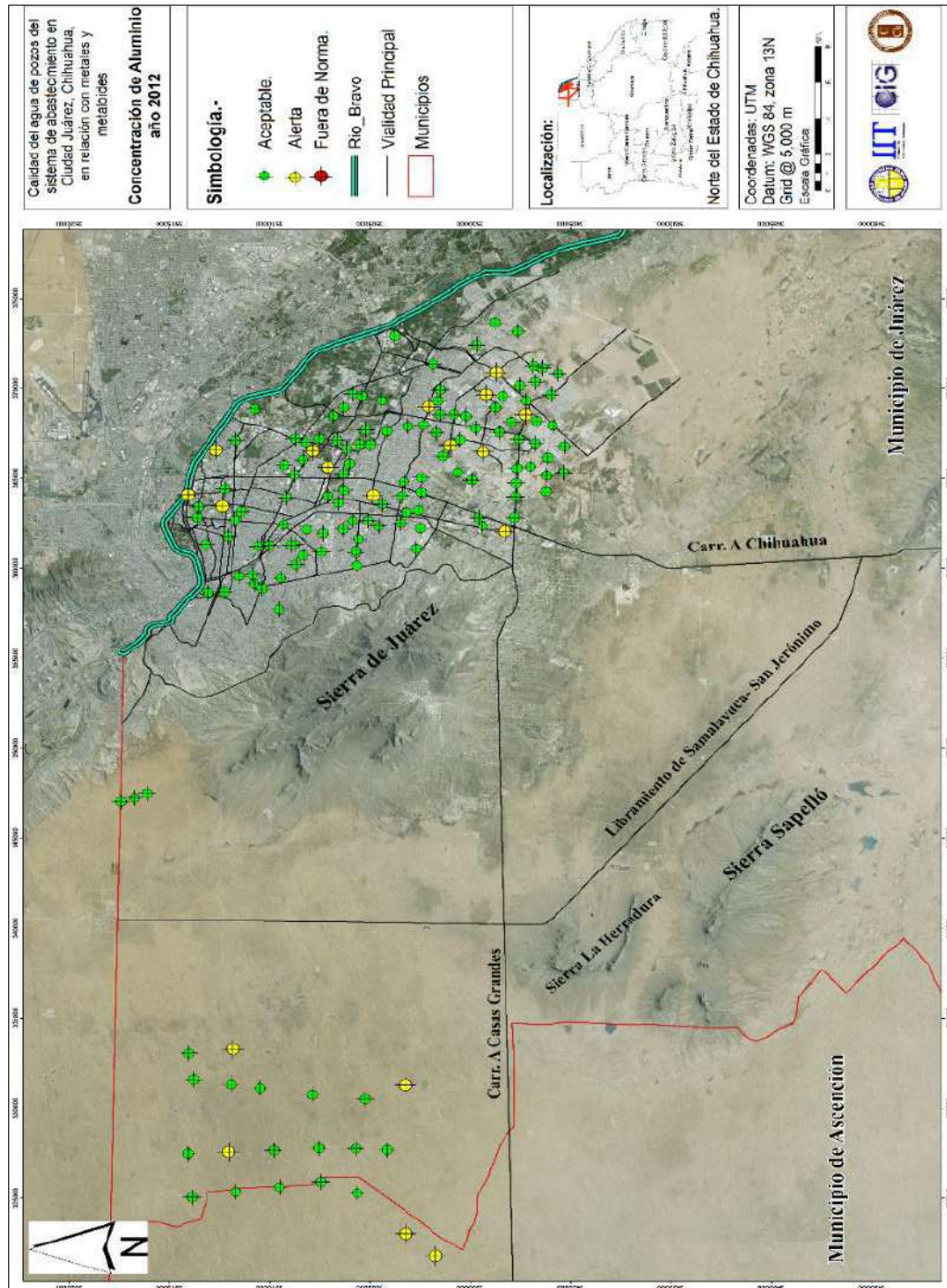


Figura 5. Calidad del agua de pozos y ríos de la zona de estudio, año 2012.



En cuanto al manganeso, la calidad aceptable se dio en un 37.08% de los resultados reportados, un 51.59% de calidad alerta y un 11.33% de calidad fuera de norma. Los años 2008 y 2010 reportaron para la calidad aceptable concentraciones (<0.020 mg/L), el 2009 además de esta concentración, reportó (<0.0006 mg/L y <0.0005 mg/L) y para el 2012 no se reportaron valores para esta calidad. La media de las concentraciones en la calidad alerta fue de 0.0755 mg/L, con una concentración máxima de 0.1468 mg/L y una mínima de 0.0390 mg/L. Para el 11.33% de los resultados clasificados fuera de norma, la media que se encontró de las concentraciones reportadas fue de 0.5273 mg/L, con una concentración máxima de 0.9858 mg/L y una mínima de 0.1588 mg/L (ver tabla 5, figura 5).

Tabla 5. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para manganeso, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	37.08	Menor a 0.020	
Alerta	51.59	0.0755	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.1468	0.0390
Fuera de norma	11.33	0.5273	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.9858	0.1588

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
 Límite Máximo Permisible normado para manganeso: 0.15 mg /L.

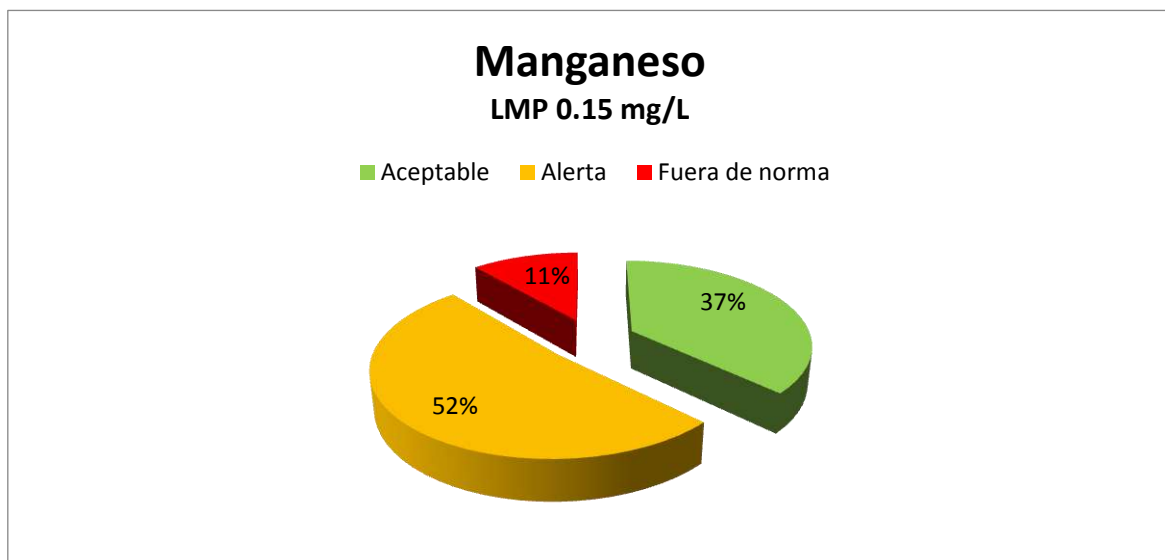


Figura 5. Resultados de las tres calidades para el manganeso, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con Mn correspondiente a las tres escalas de calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) y para los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 9, 10, 11 y 12).

Figura 3. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.

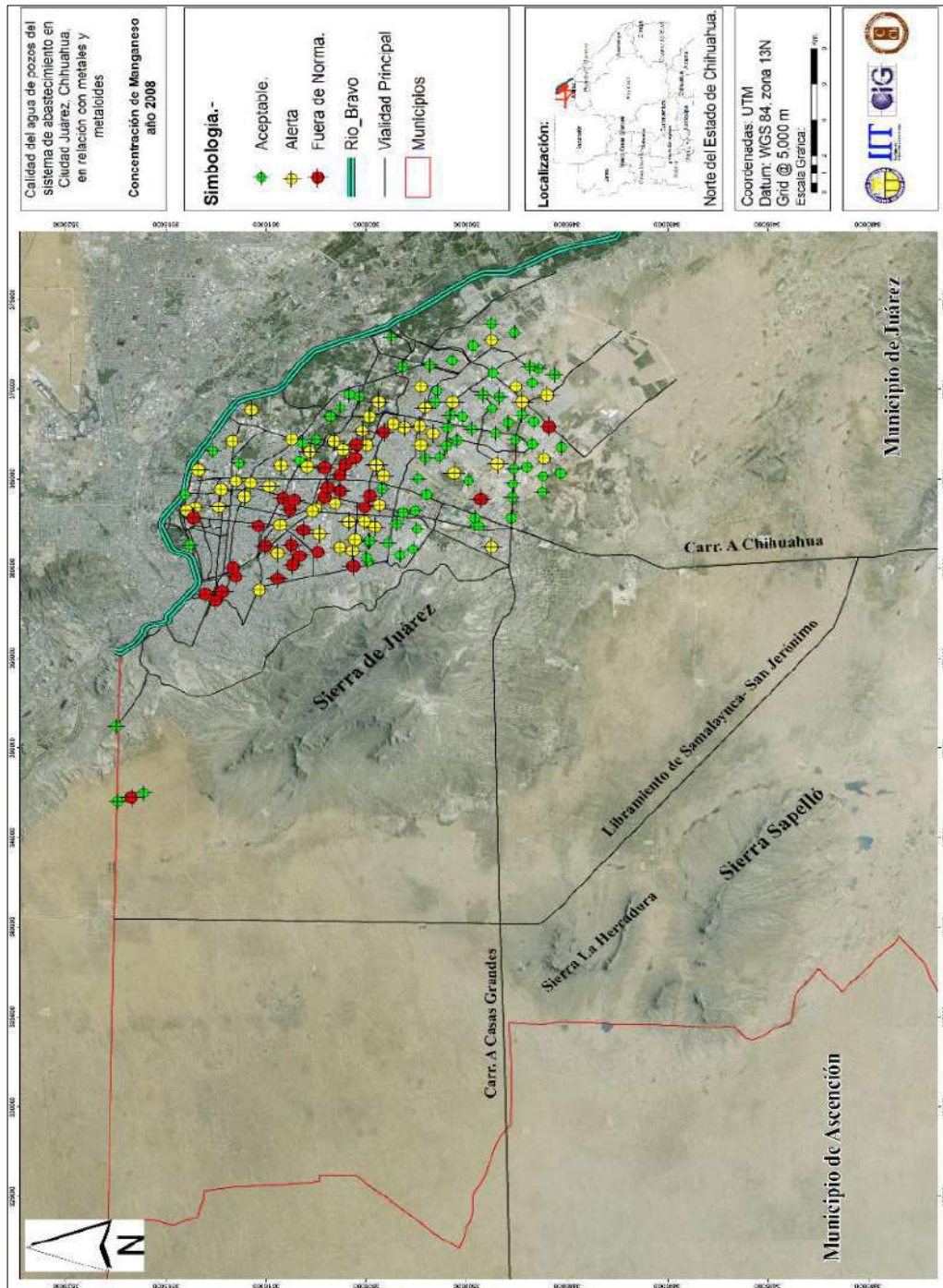


Figura 10. Sistema (acuíferos, manantiales y pozos) para el abastecimiento de agua en el municipio de Ascención, Chihuahua, 2009.

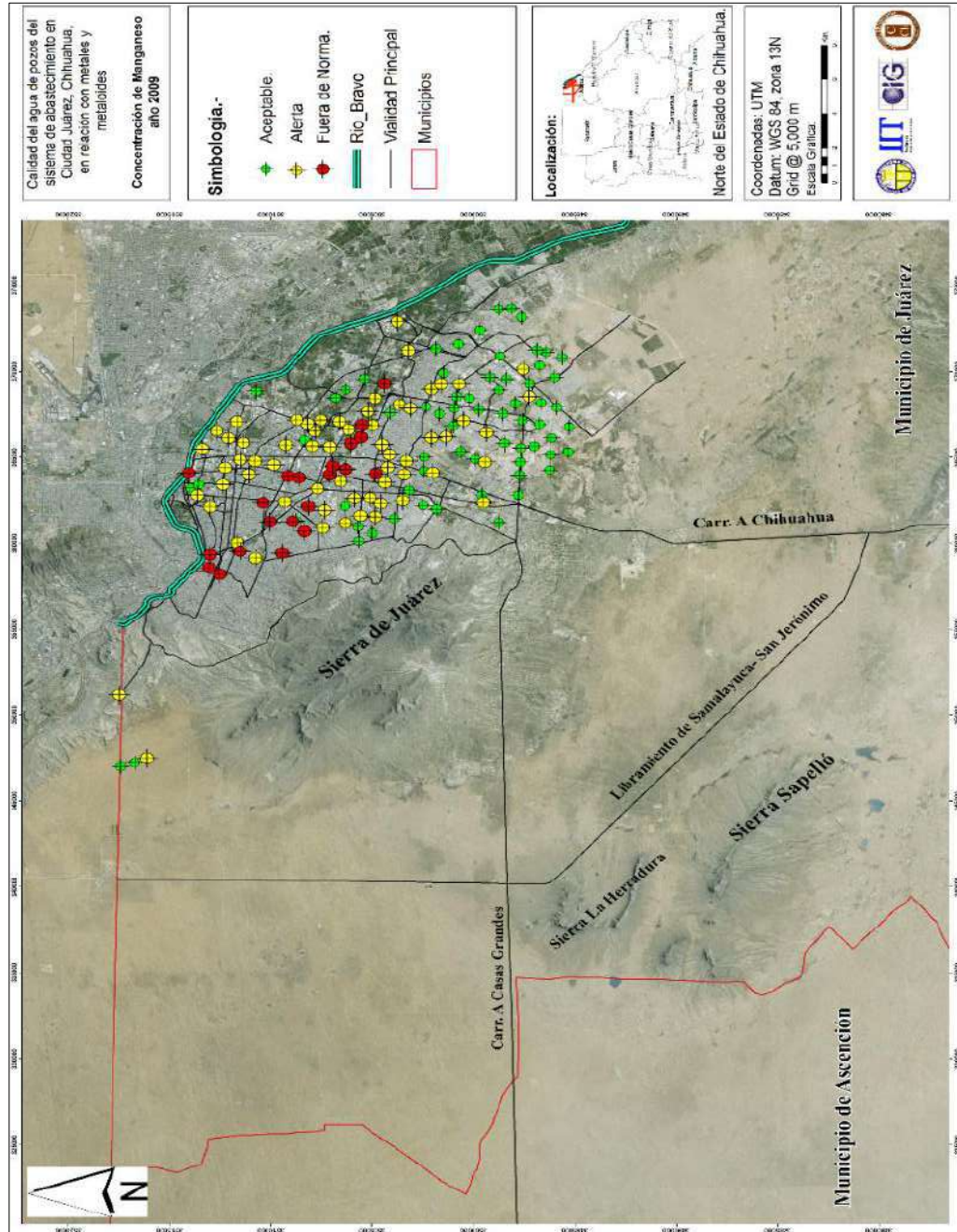


Figura 2.1. Mapa de distribución de la calidad del agua de pozos en el sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides

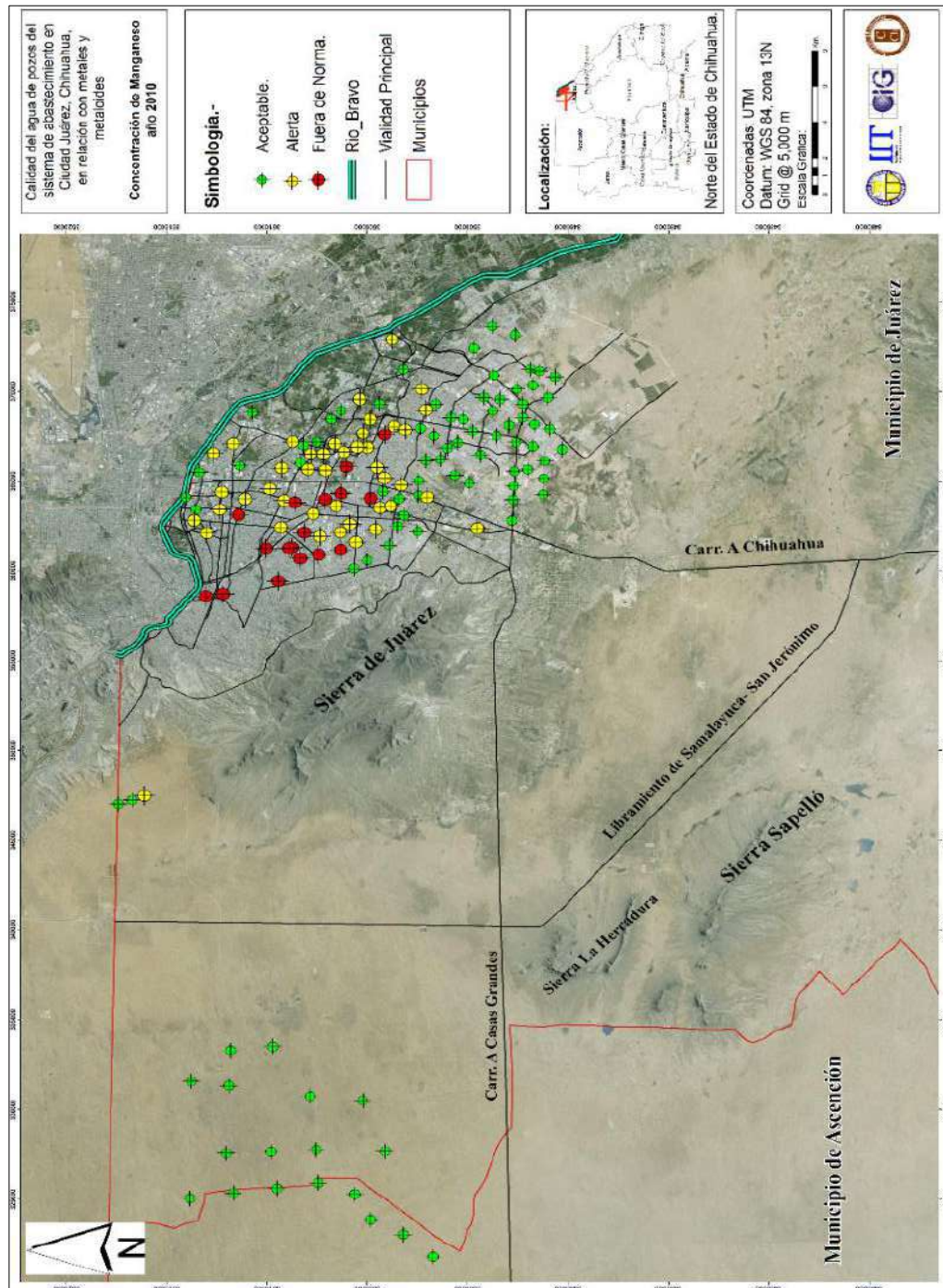
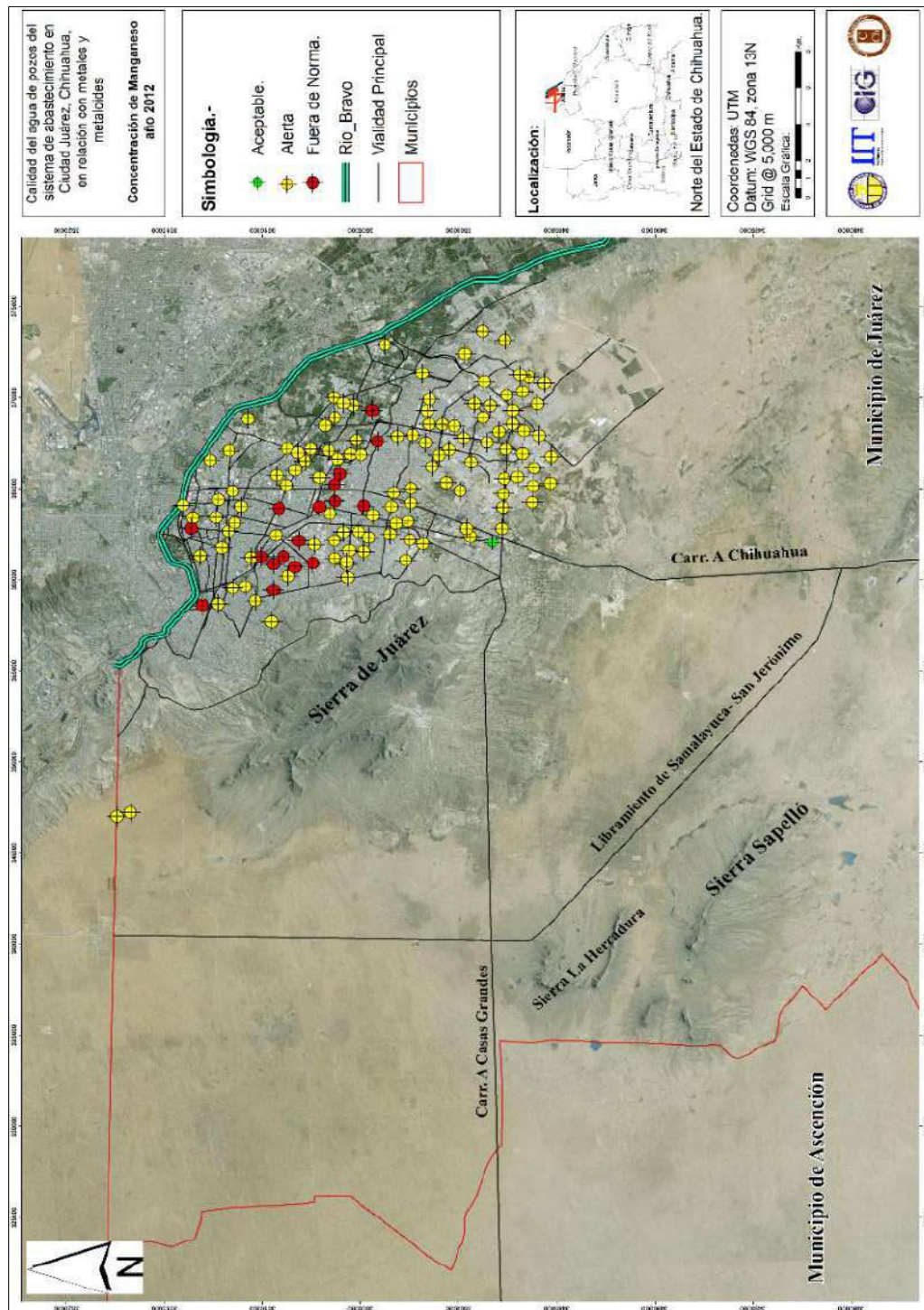


Figura 14. Mapa de la calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides año 2012.



Para el bario no se obtuvieron valores superiores al límite permisible normado (0.7 mg/L), el 25% de los reportes se encontraron en calidad aceptable y el 75% en calidad alerta. En los primeros tres años (2008, 2009, 2010), los valores reportados en esta última calidad, son diferentes a un límite de detección, solo en el año 2012 se reportan valores (<0.1 mg/L) y éstos se clasifican en la calidad aceptable. Para este metal en la calidad alerta se obtiene una media de las concentraciones reportadas de 0.0593 mg/L, con una concentración máxima de 0.3625 mg/L, y una mínima de 0.0098 mg/L (ver tabla 6 y figura 6).

Tabla 6. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para bario, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	25	Menor a 0.1, 0.001	
Alerta	75	0.0593	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.3625	0.0098
Fuera de norma	0	0	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0	0

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para bario: 0.7 mg /L.

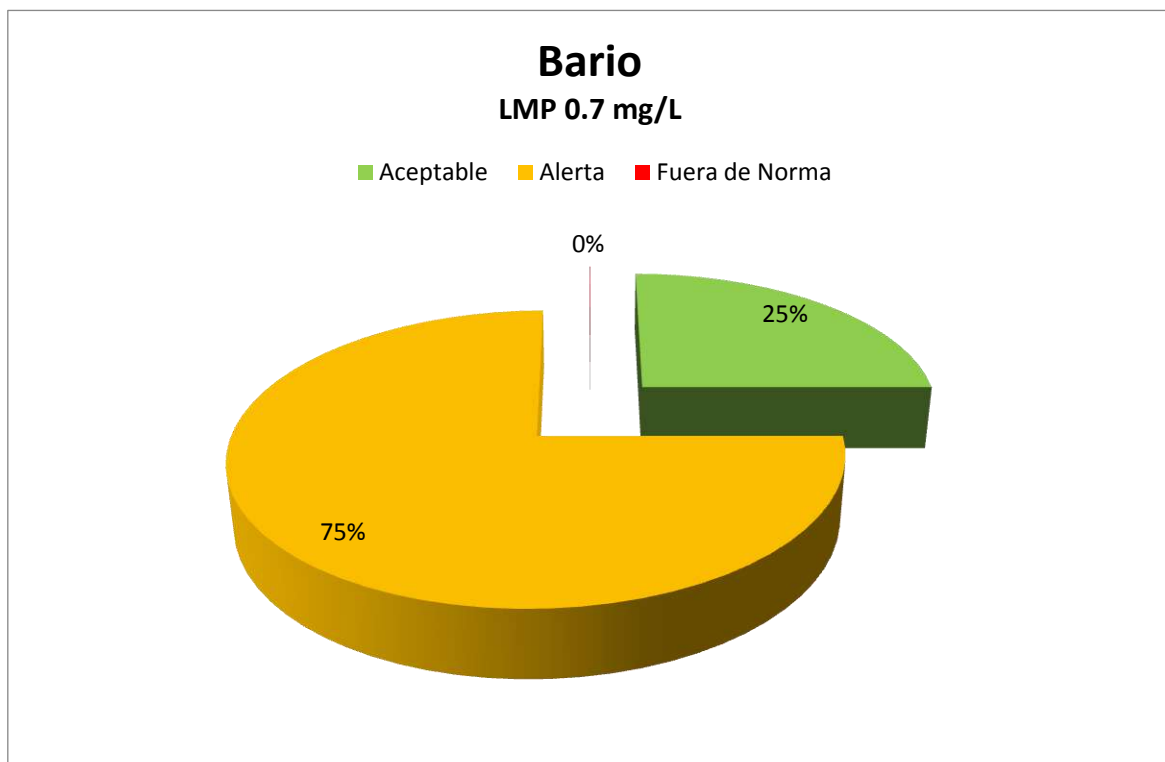


Figura 6. Resultados de las tres calidades para el bario, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con Ba correspondiente a las tres escalas de calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) y para los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 13 al 16).

Figura 10. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para el agua de pozos en el municipio de Juárez.

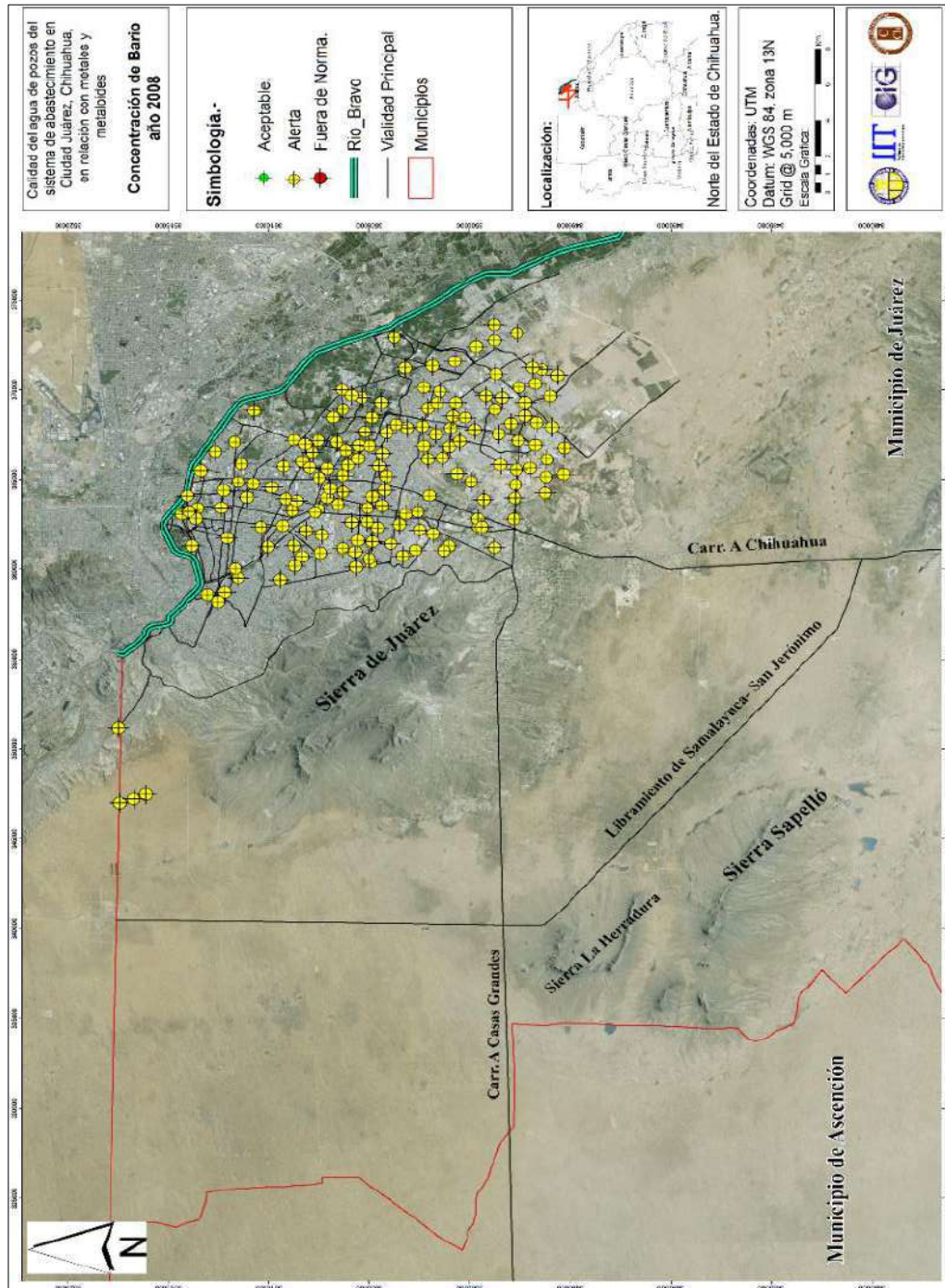


Figura 1.1. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides

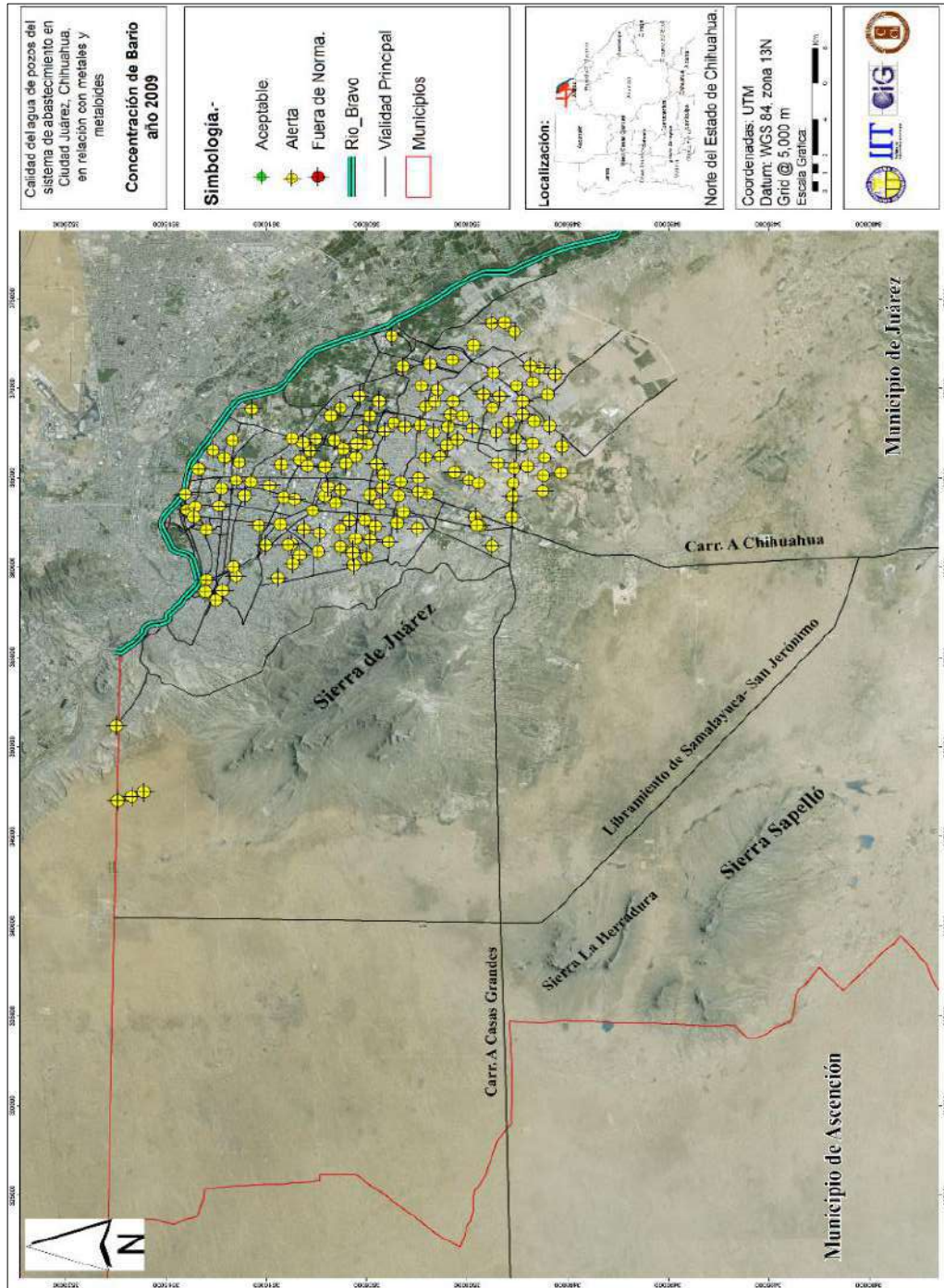


Figura 10. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.

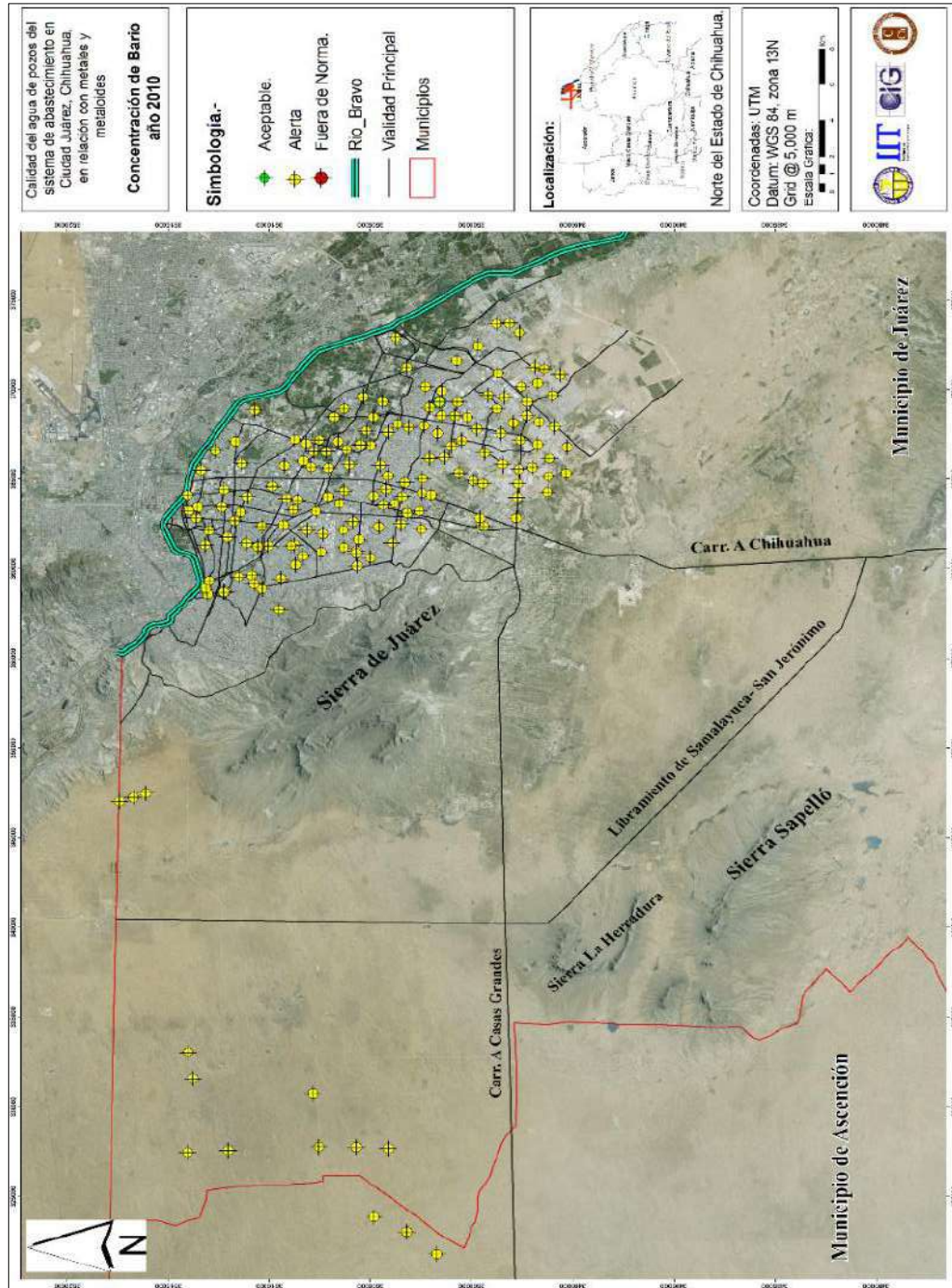
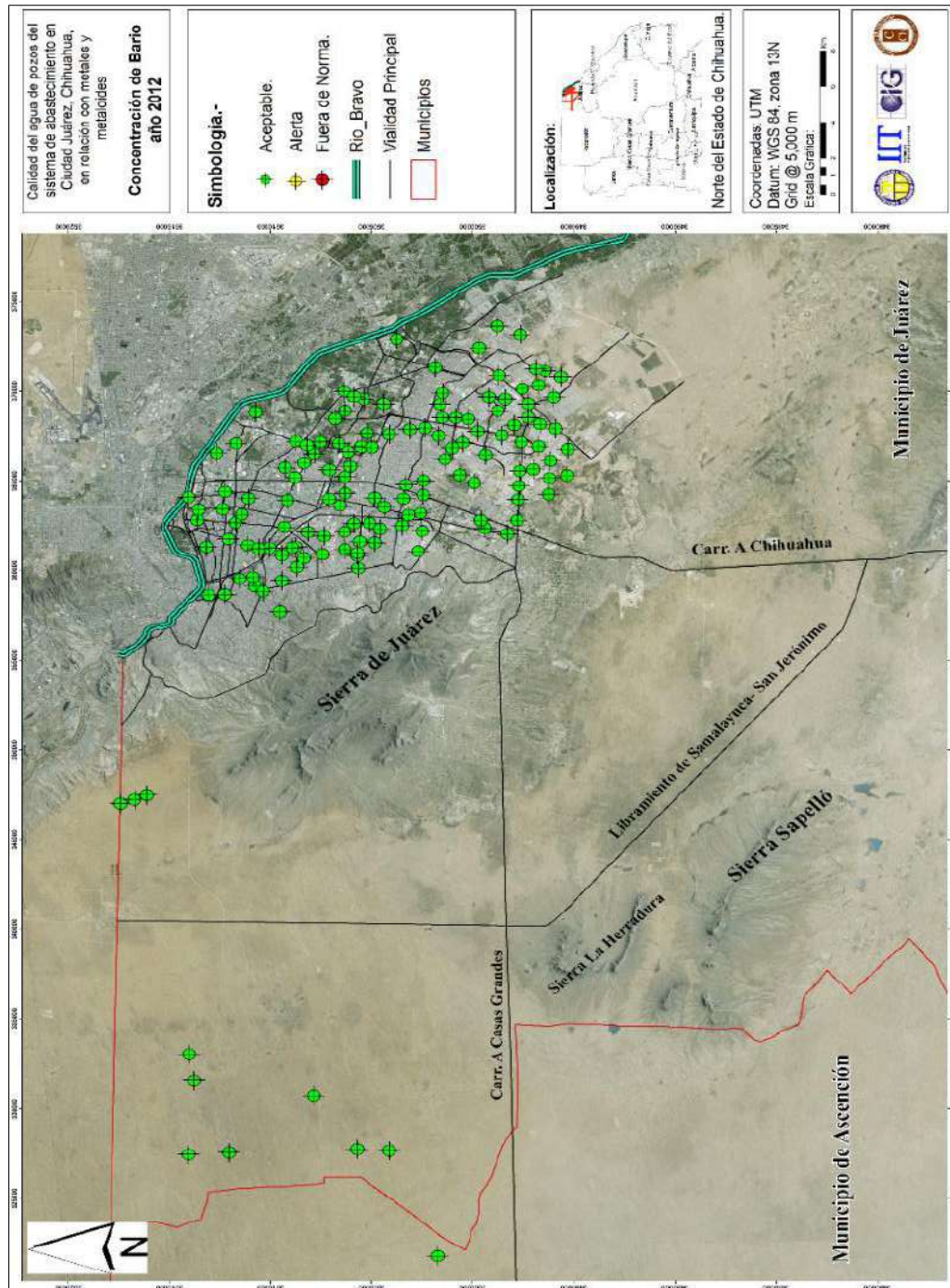


Figura 10. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.



Para el cobre, si bien no se reportan valores que excedan el límite permisible normado (2.0 mg/L), y en la calidad aceptable se alcanza casi el 90% de los resultados reportados, se obtiene el 10.46% en la clasificación alerta. Asimismo, se advierte la diferencia en lo anotado en los reportes clasificados para la calidad aceptable, ya que en los años 2008 y 2010 fue (=0.02 mg/L), en el año 2009 (<0.020 mg/L) y en el 2012 reporta valores (<0.1) y ND (No Detectado). En este último año el límite de detección es el determinado como límite práctico de cuantificación, donde se considera el tratamiento de muestra (dilución, concentración). En la calidad alerta (10.46% de los resultados), se obtiene una media del total de los valores reportados de 0.1106 mg/L. La concentración máxima que se observó fue de 0.7848 mg/L y la mínima de 0.0489 mg/L y un promedio de éstas dos, de 0.1106 mg/L (ver tabla 7 y figura 7).

Tabla 7. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para cobre, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	89.54	Menor a 0.02, =0.02 y <0.1	
Alerta	10.46	0.1106	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.7848	0.0489
Fuera de norma	0	0	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0	0

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para cobre: 2.0 mg /L.

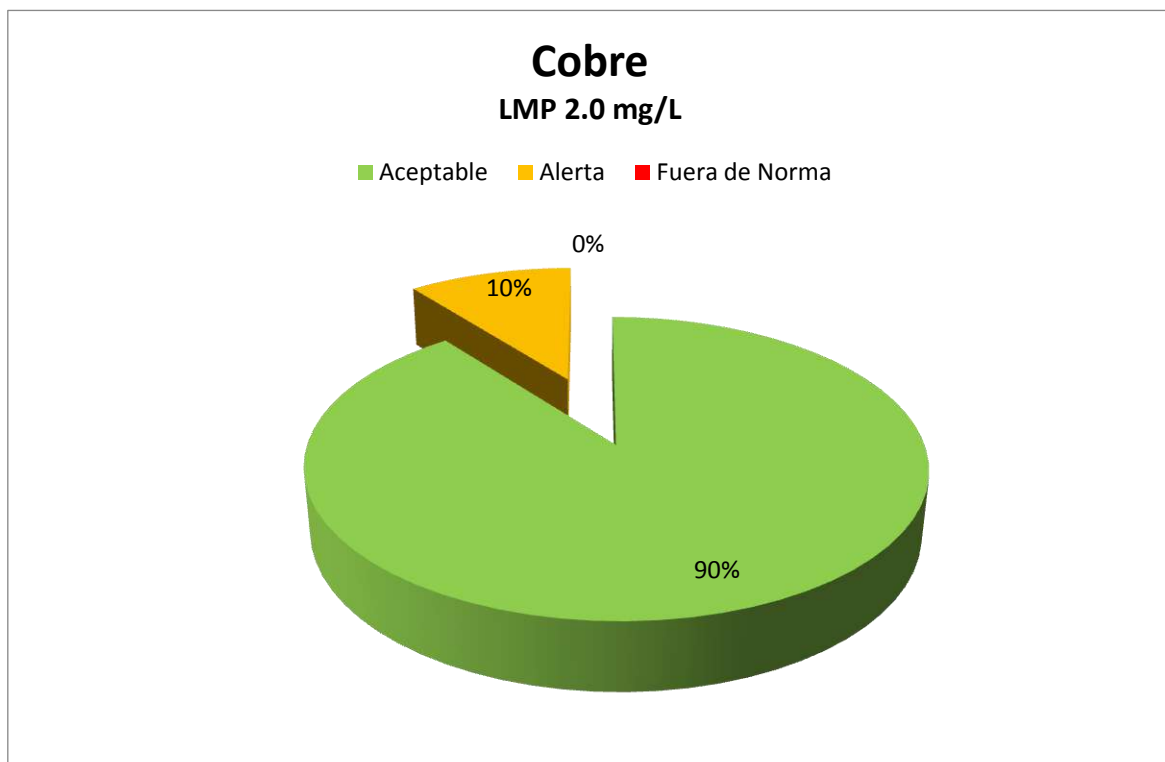


Figura 7. Resultados de las tres calidades para el cobre, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con Cu correspondiente a las tres escalas de calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) y para los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 17 al 20).

Figura 2.7. Cobertura (acuíferos), calidad y estado de los pozos en el sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides

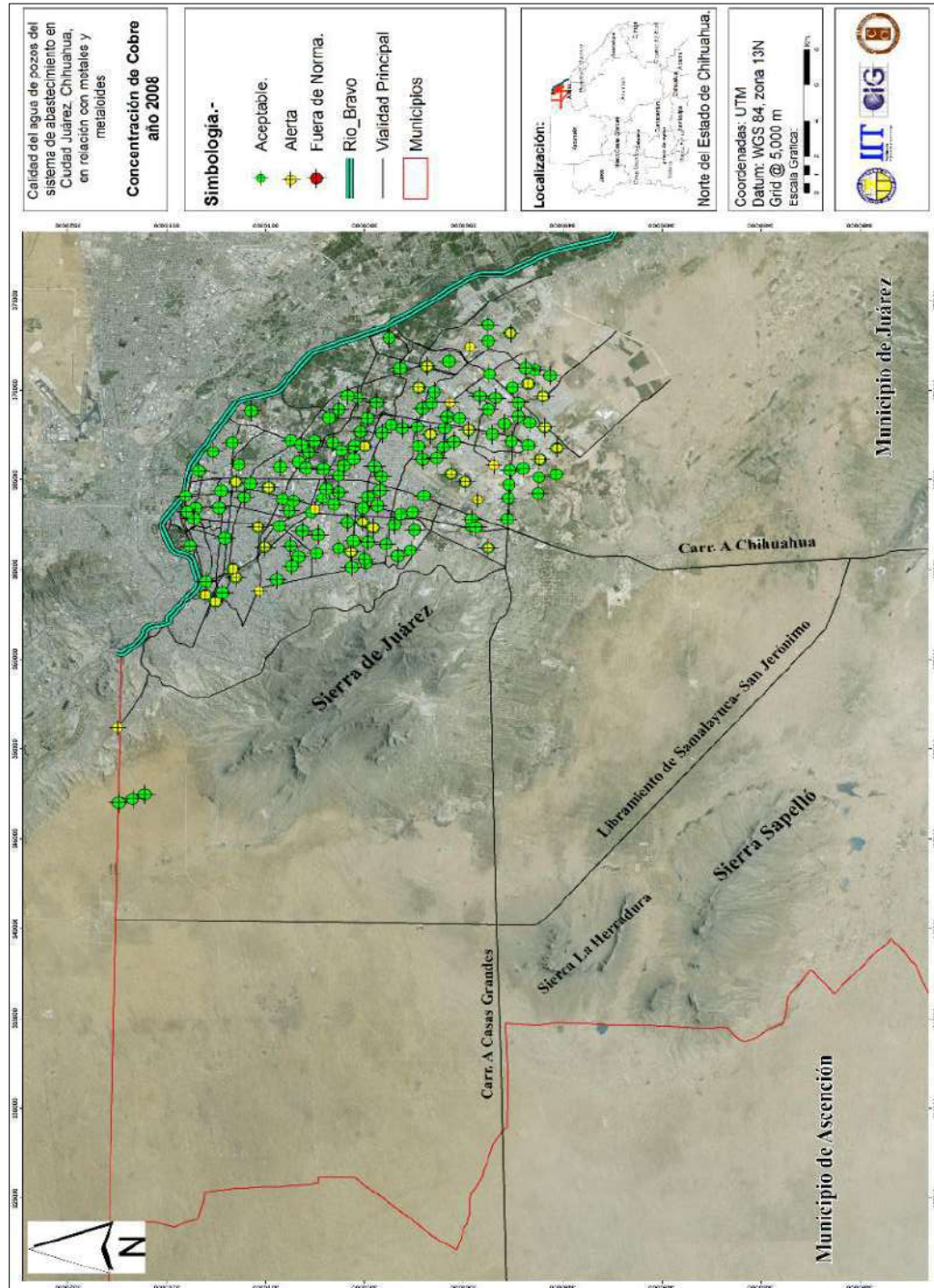


Figura 10. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.

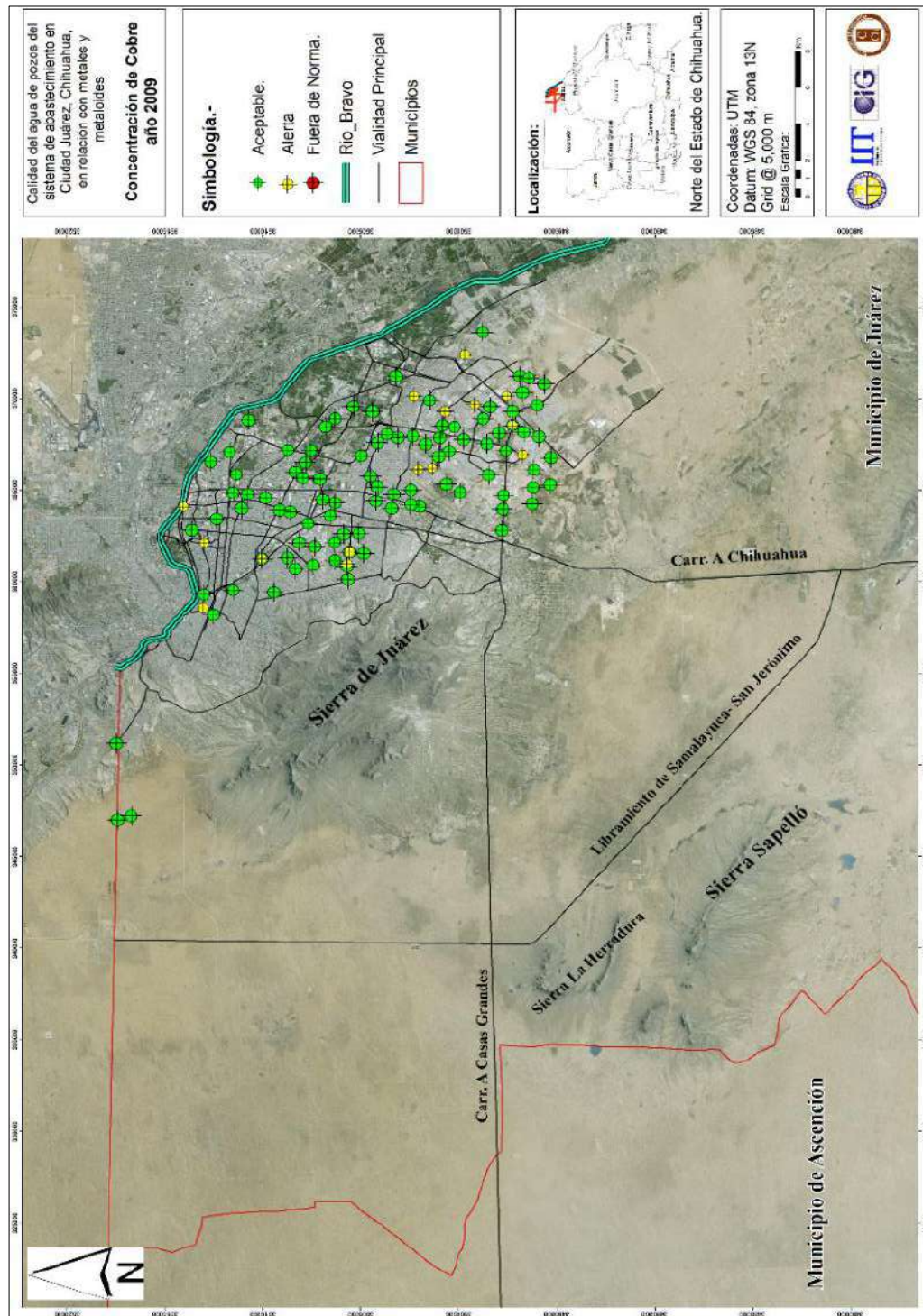


Figura 10. Calidad del agua de pozos (aceptable, alerta y fuera de norma) para el sistema de abastecimiento de agua en el municipio de Juárez, Chihuahua, 2010.

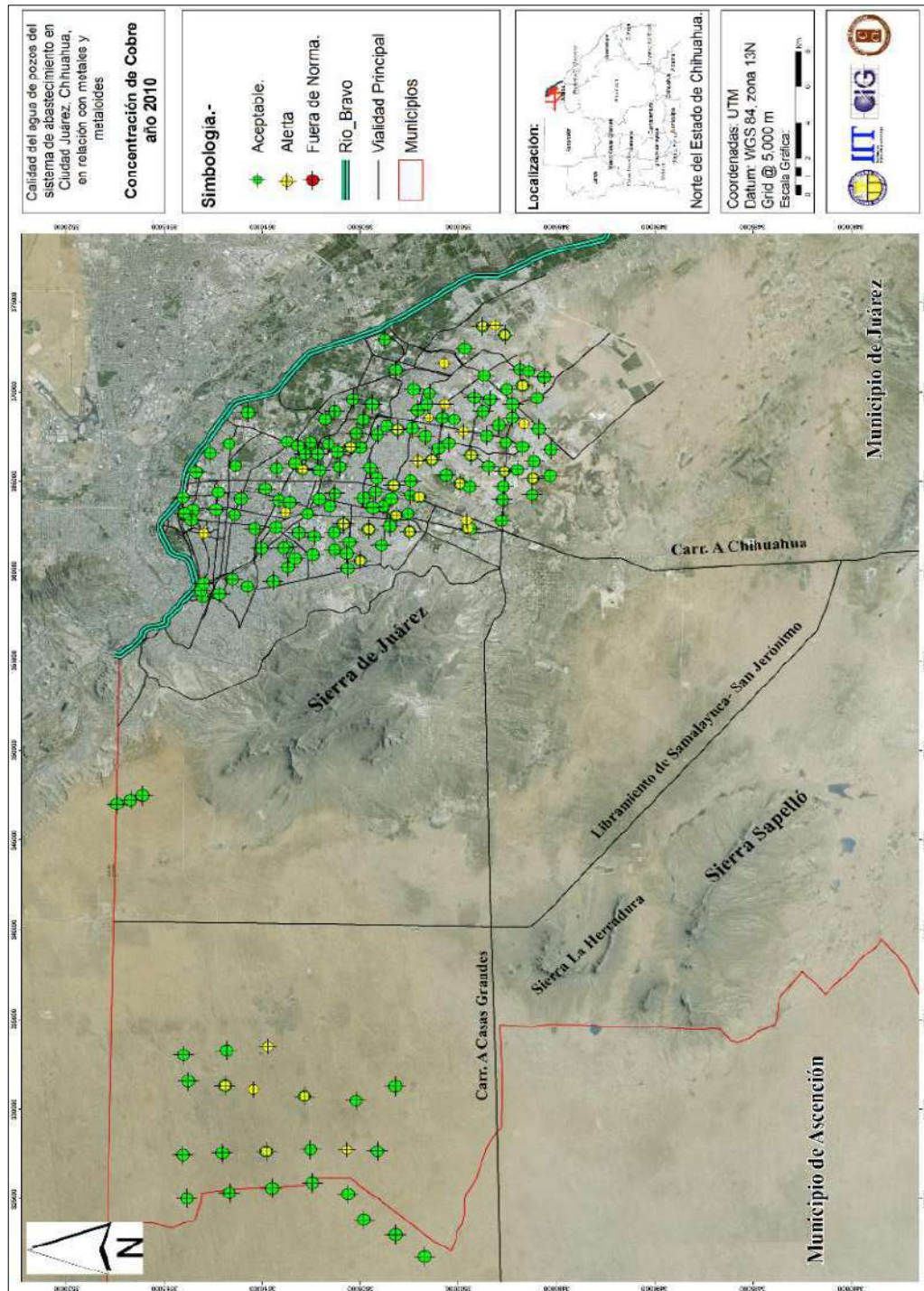
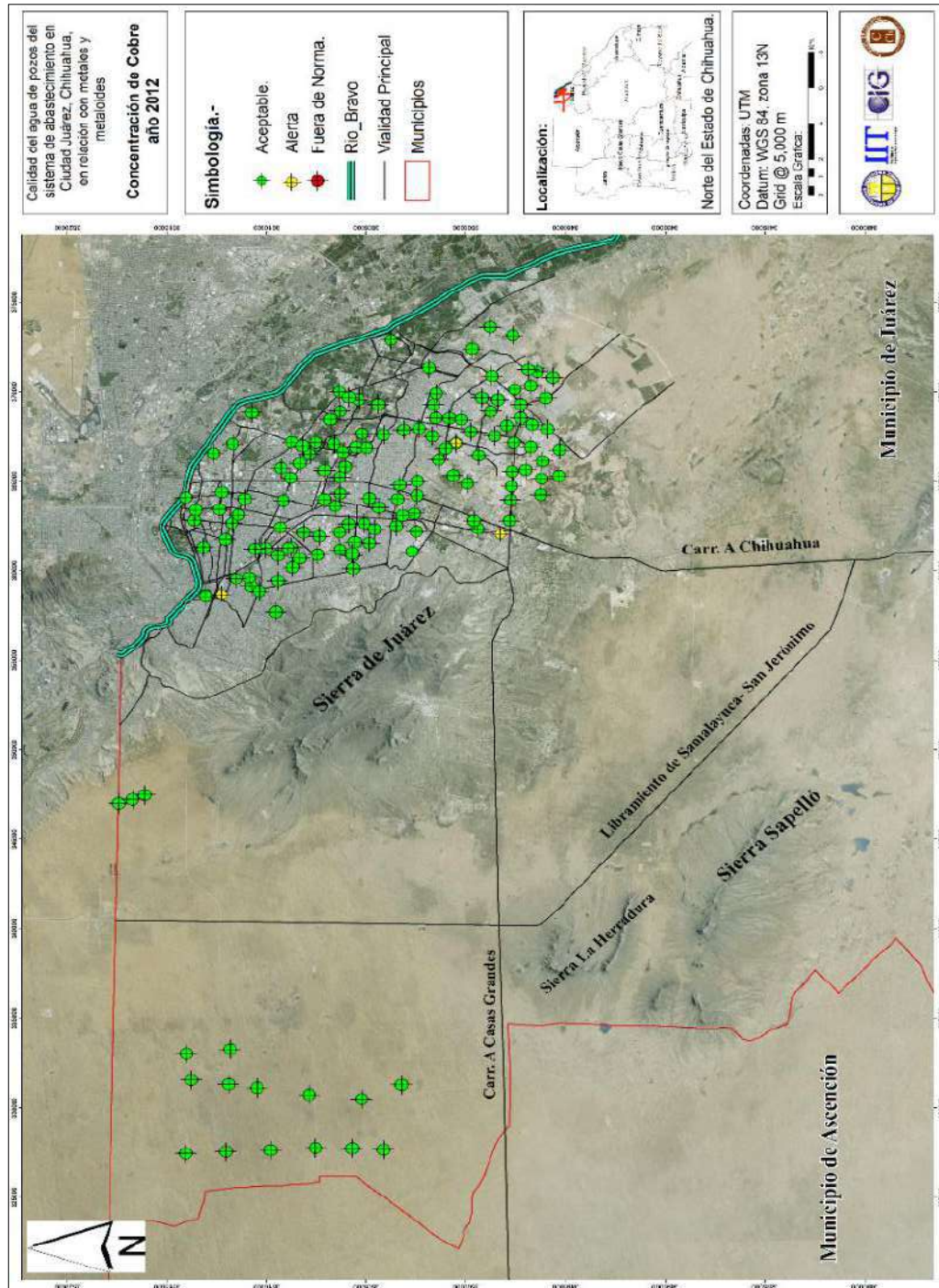


Figura 20. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides año 2012.



Para el cromo los resultados de los años 2008, 2009 y 2010 en la calidad clasificada como aceptable se reportaron valores ($<0.010 \text{ mg/L}$). En el año 2012 el límite de detección cambia para reportarse ($<0.05 \text{ mg/L}$). Para este metal los resultados de los cuatro años de estudio se reportaron en calidad aceptable (figura 8).



Figura 8. Resultados de las tres calidades para el cromo, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con calidad aceptable para el Cr correspondiente a los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 21, 22, 23 y 24).

Figura 2.1. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides

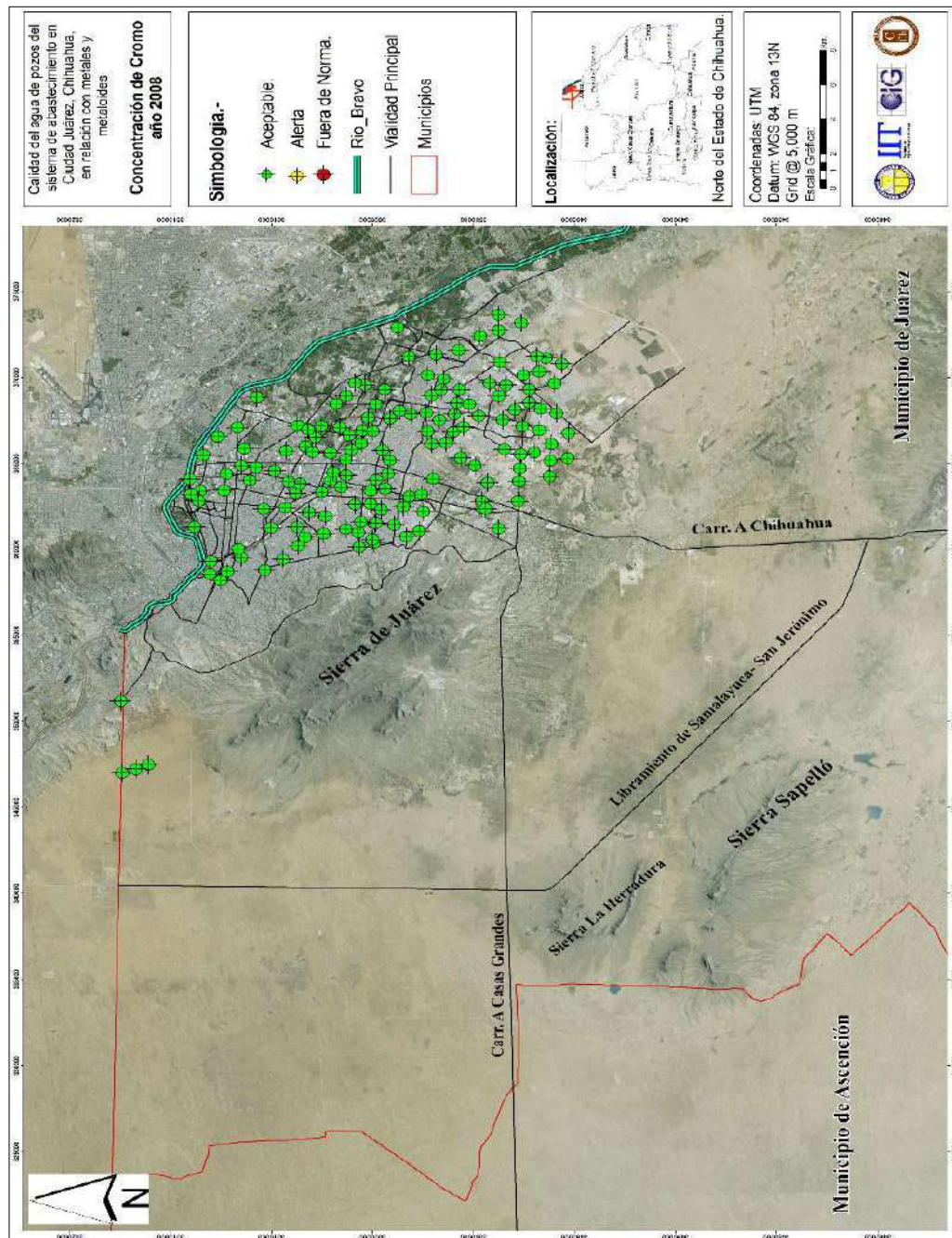


Figura 2.1. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides

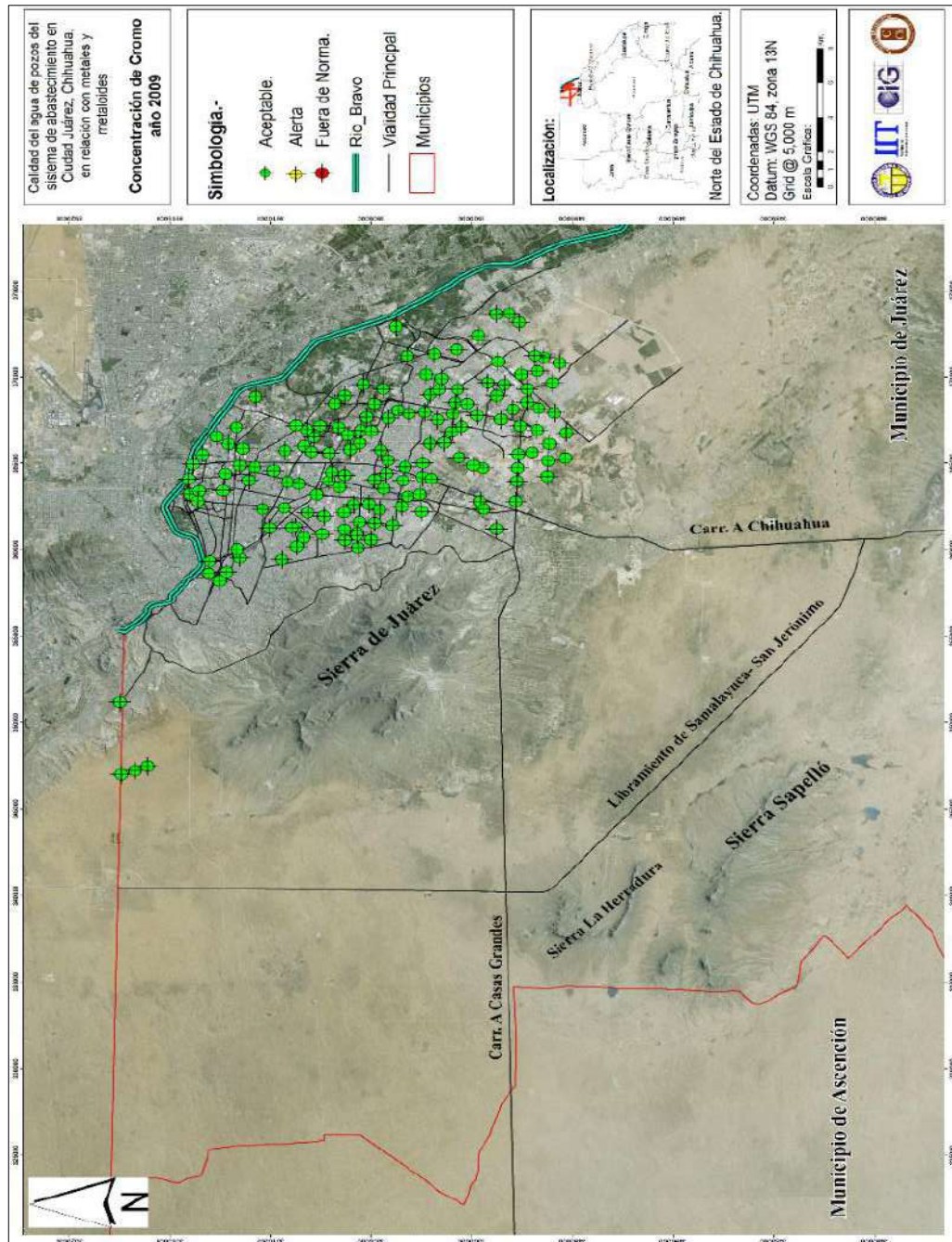


Figura 20. Contorno (accesible, alerta y fuera de norma) para la calidad de pozos. Año 2010.

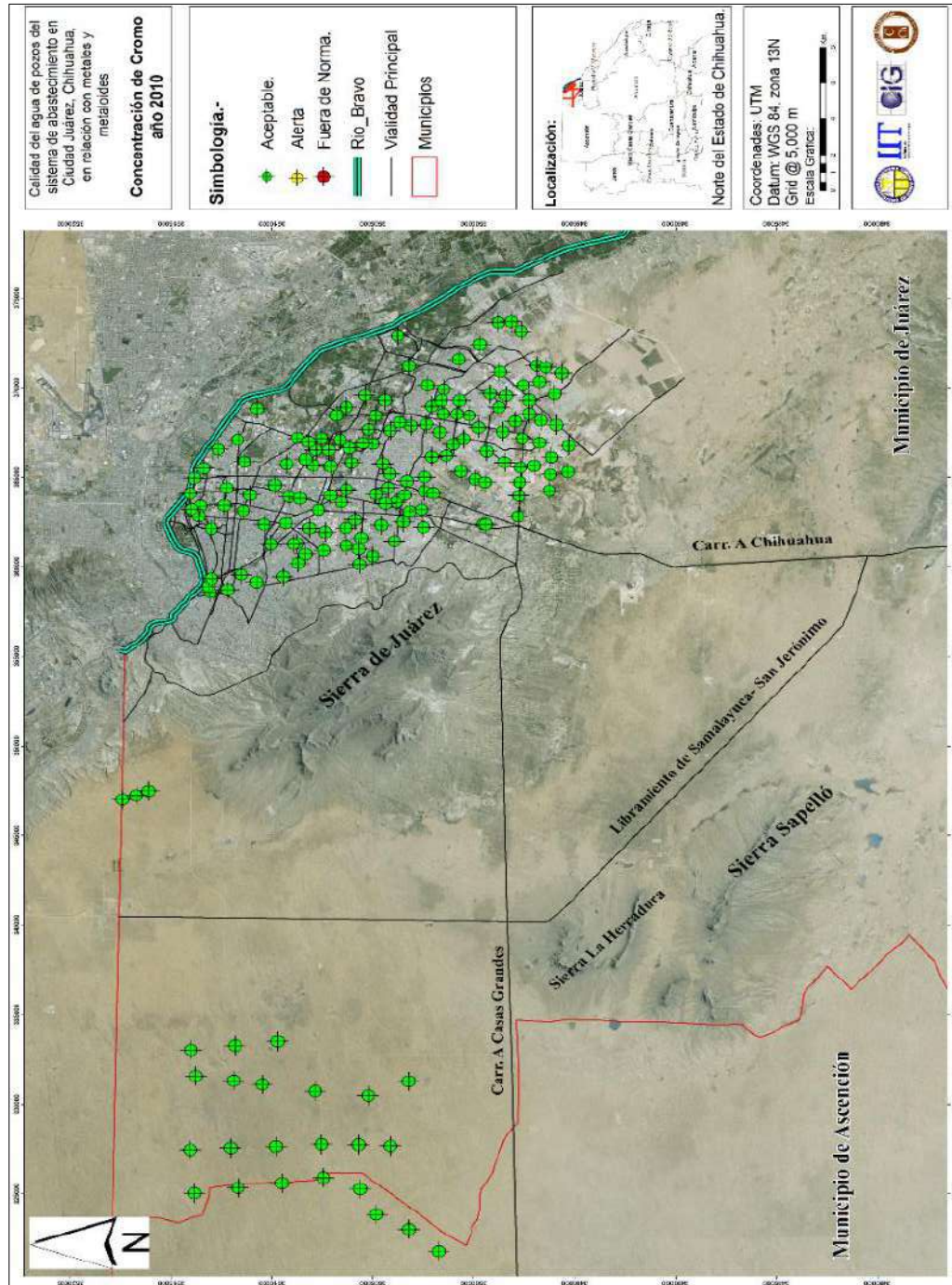
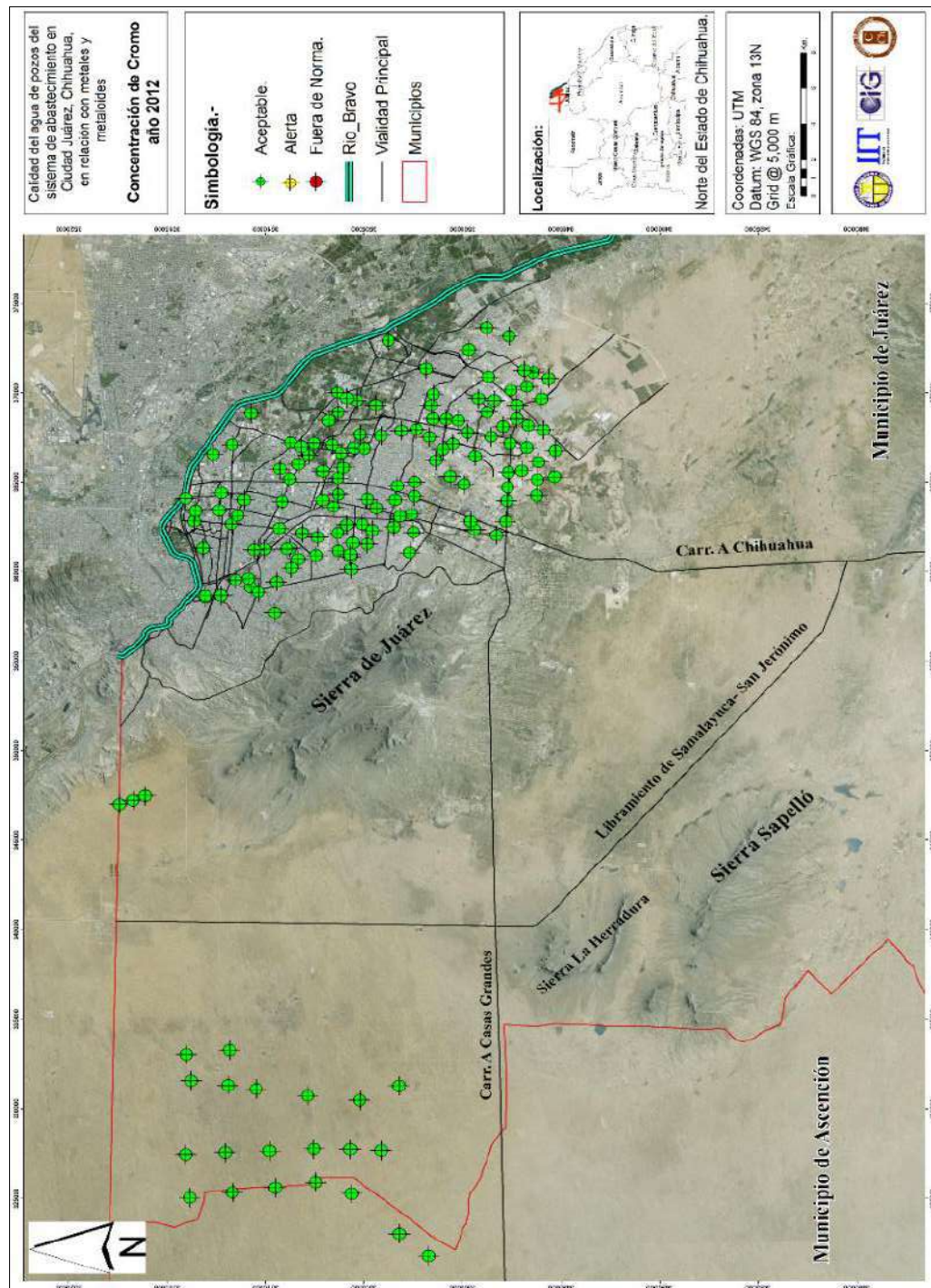


Figura 2.7. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides



Con respecto al cadmio, en los años 2008 y 2009 se reportan para la clasificación de aceptable, concentraciones (<0.001 mg/L). En el año 2010 en la clasificación de calidad aceptable se reportan 147 valores (<0.001 mg/L), 138 valores ($=0.001$ mg/L), un reporte con resultado ($=0.0011$ mg/L) y otro (<0.02 mg/L). En este año se descartó el resultado para el pozo 167, ya que la concentración anotada en el reporte es de 174.090 mg/L. En el año 2012, se anota en 191 de los reportes una concentración ($=0.0000$ mg/L) y en 50 de los resultados, la concentración reportada es ($=0.0009$ mg/L). Para este metal los resultados de reportes de los cuatro años estudiados, se clasifican en calidad aceptable (figura 9).

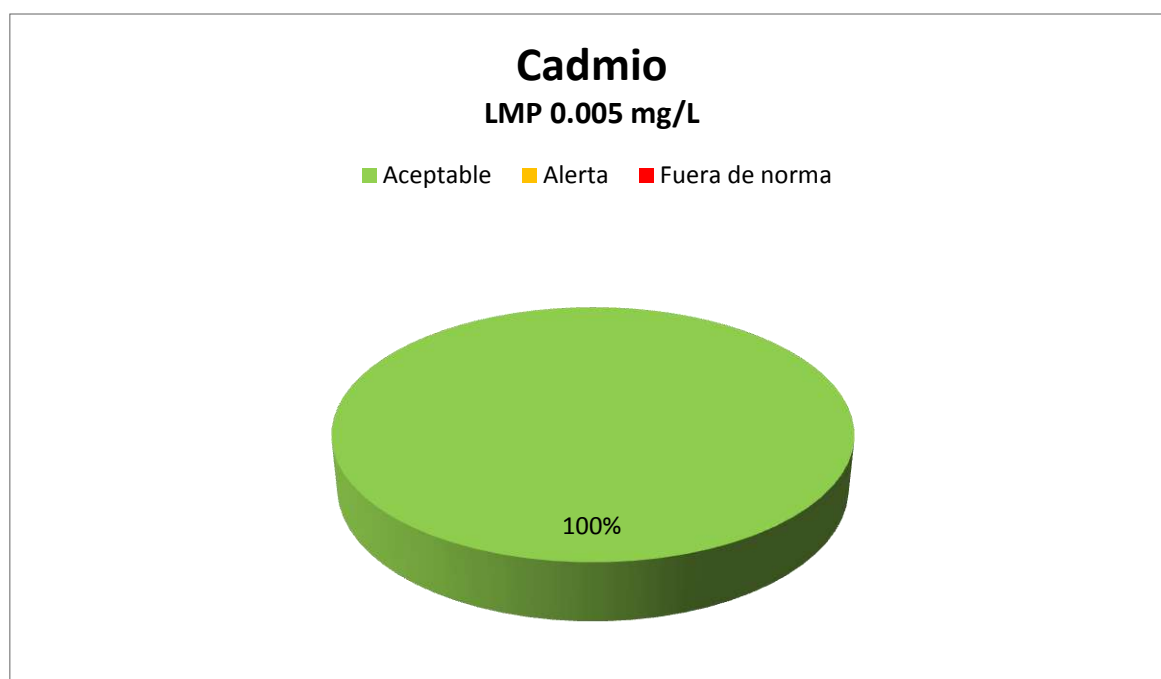


Figura 9. Resultados de las tres calidades para el cadmio, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con calidad aceptable para el Cd correspondiente a los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 25 al 28).

Figura 25. Calidad del agua de pozos (aceptable, alerta y fuera de norma) para consumo humano en el municipio de Ascención.

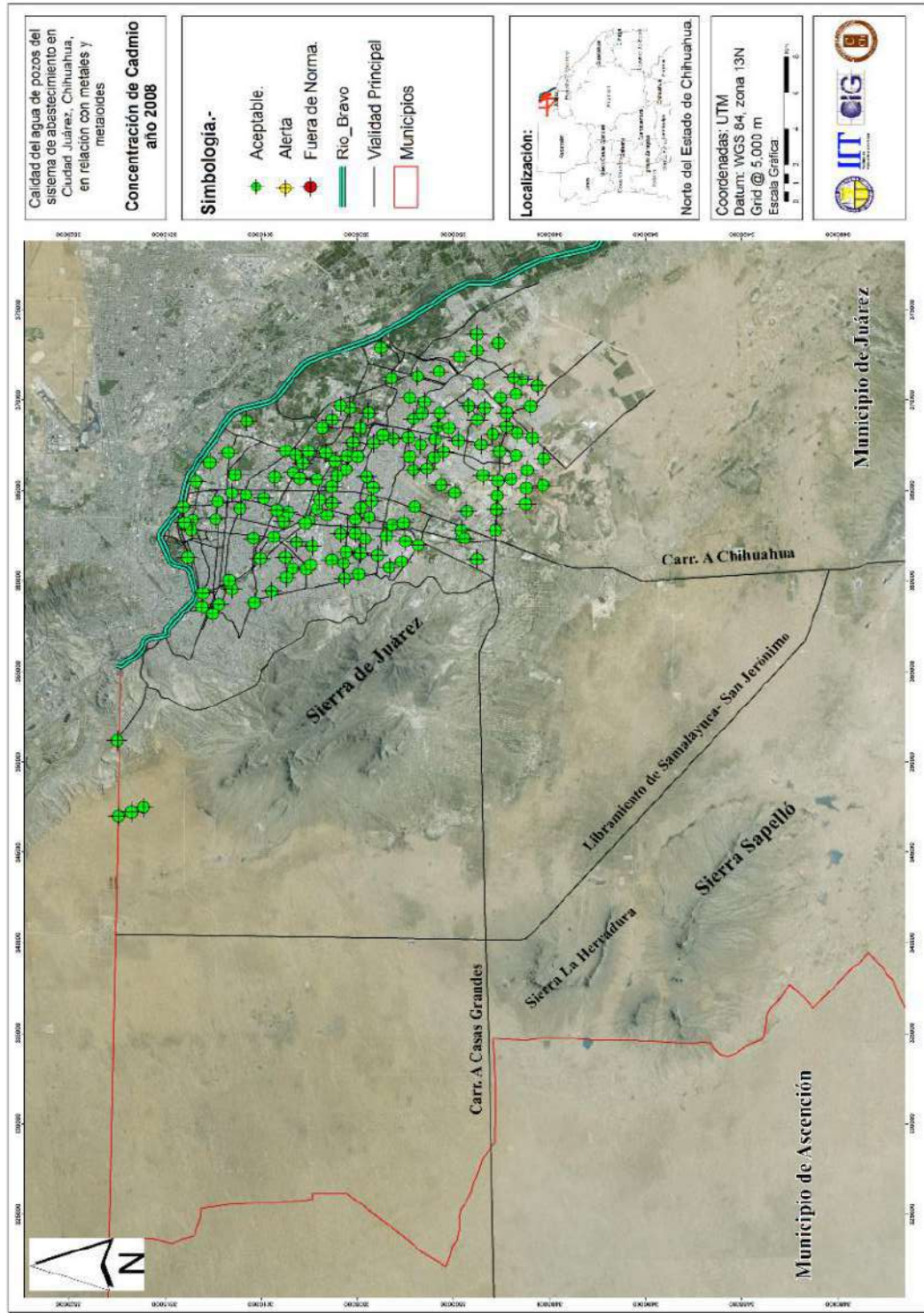


Figura 20. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides

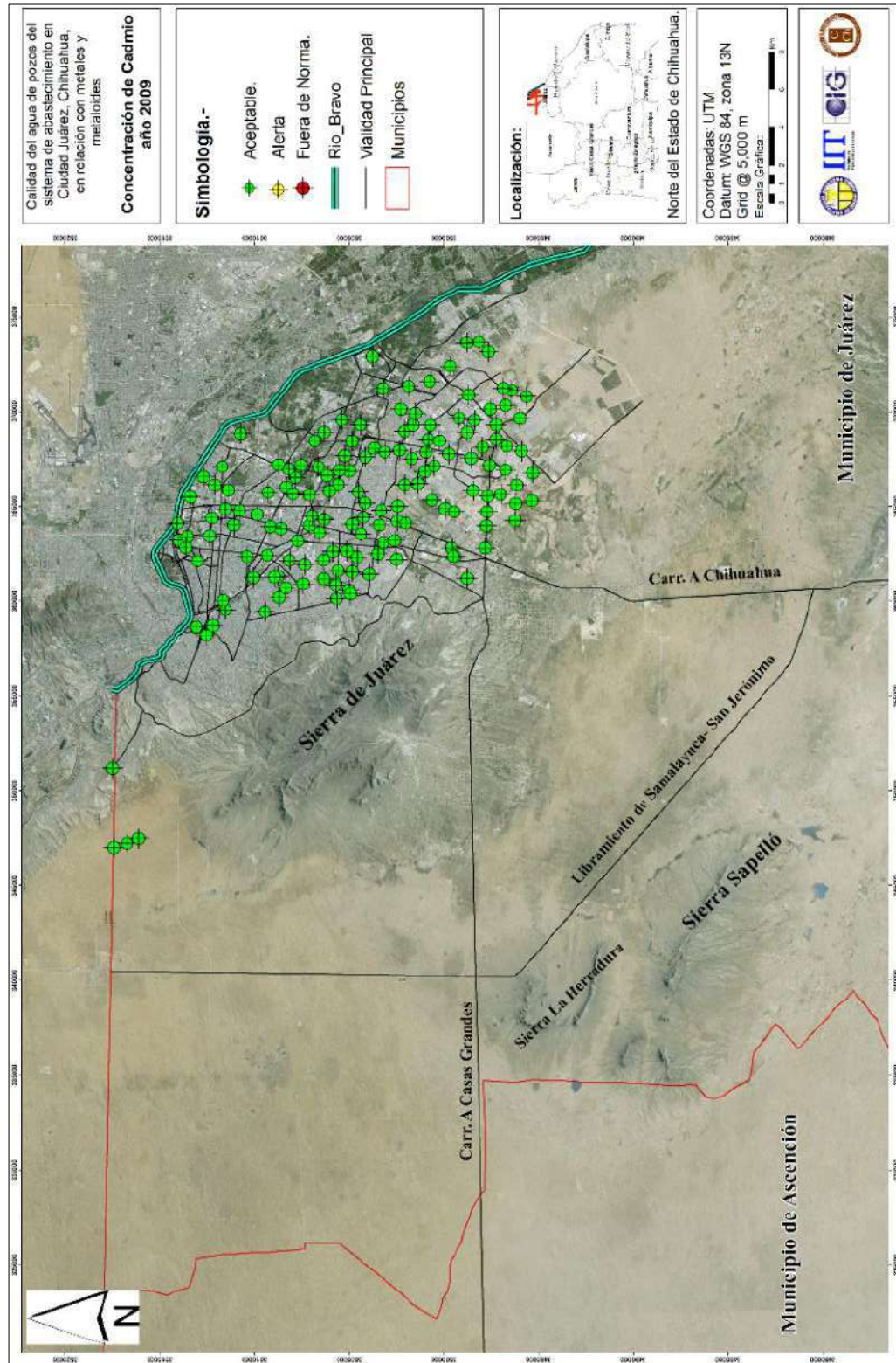


Figura 2.1. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides año 2010.

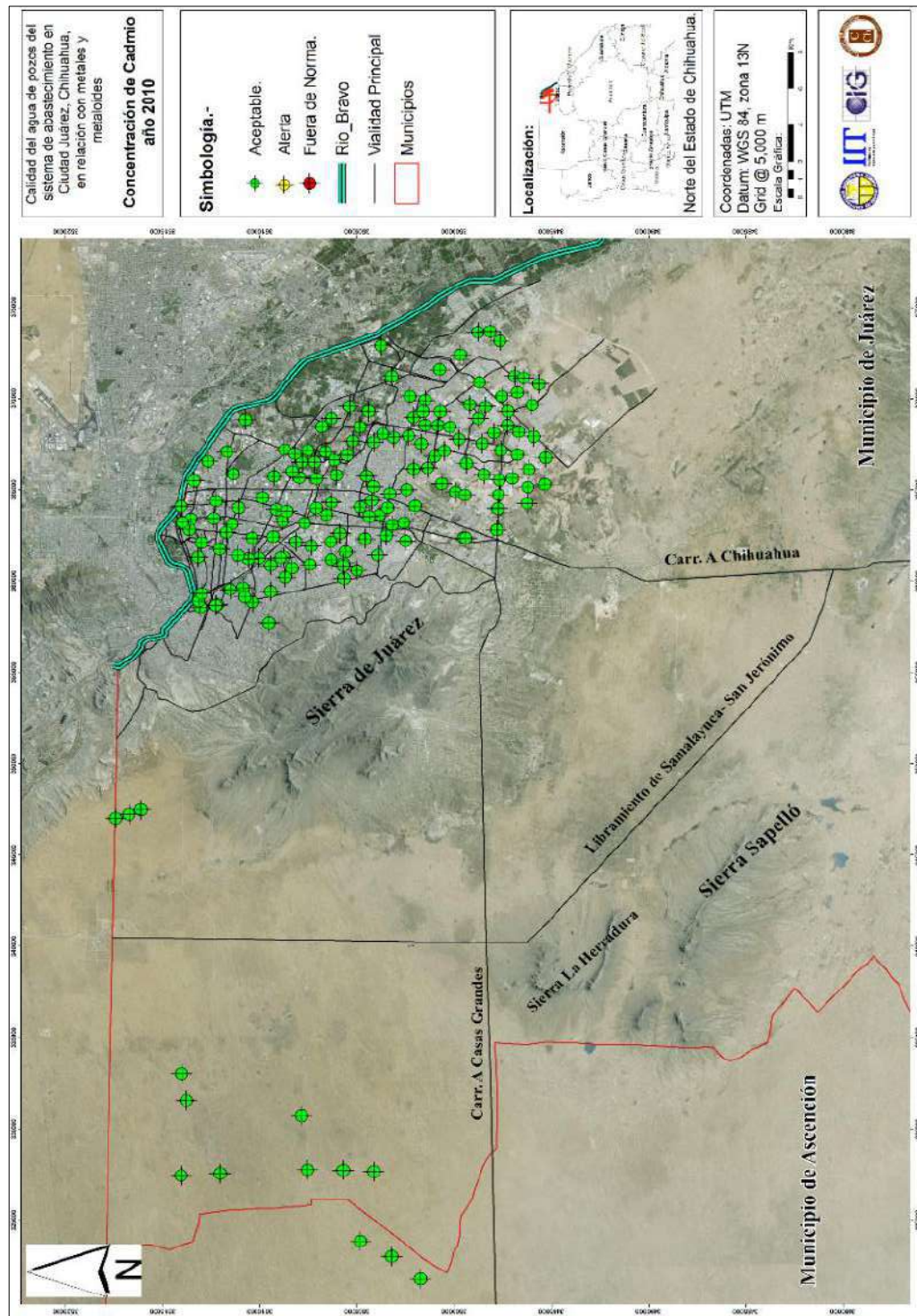
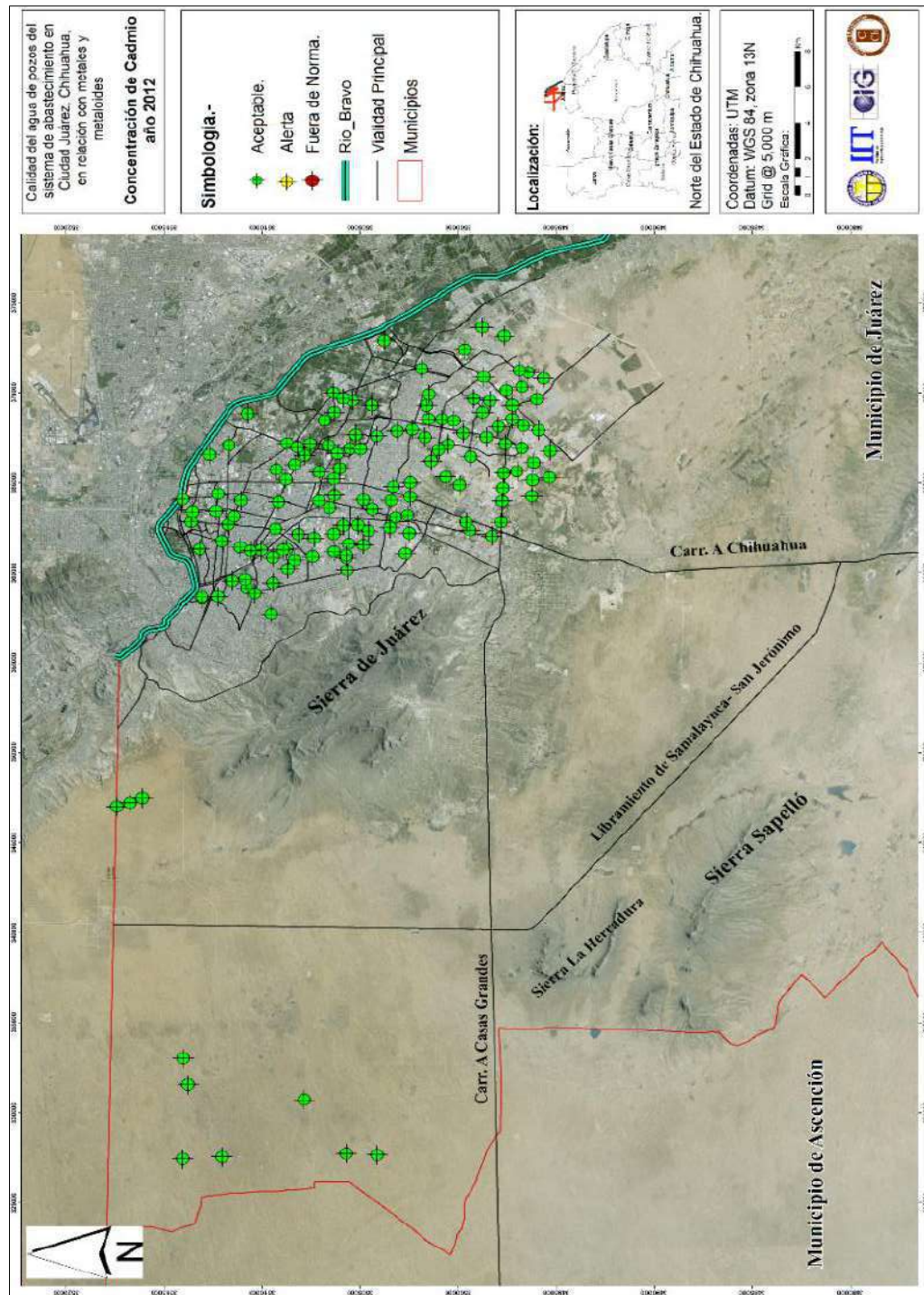


Figura 20. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides



Los resultados para el mercurio fueron el 85.8% de reportes clasificados en la calidad aceptable, el 6.3% en alerta y el 7.9% en calidad fuera de norma. El 6.3% de calidad alerta dio una media de las concentraciones de 0.00054 mg/L con una concentración máxima de 0.00065 mg/L y una mínima de 0.0005 mg/L. El 7.9% de los reportes que se encontraron por arriba del límite normado de 0.001 mg/L, tuvieron una media de las concentraciones de 0.0021 mg/L, con una concentración máxima de 0.0049 y una mínima de 0.0011 mg/L (ver tabla 8 y figura 10).

Tabla 8. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para mercurio, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	85.8	Menor a 0.0005	
Alerta	6.3	0.00054	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.00065	0.0005
Fuera de norma	7.9	0.0021	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.0049	0.0011

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para mercurio: 0.001 mg /L.

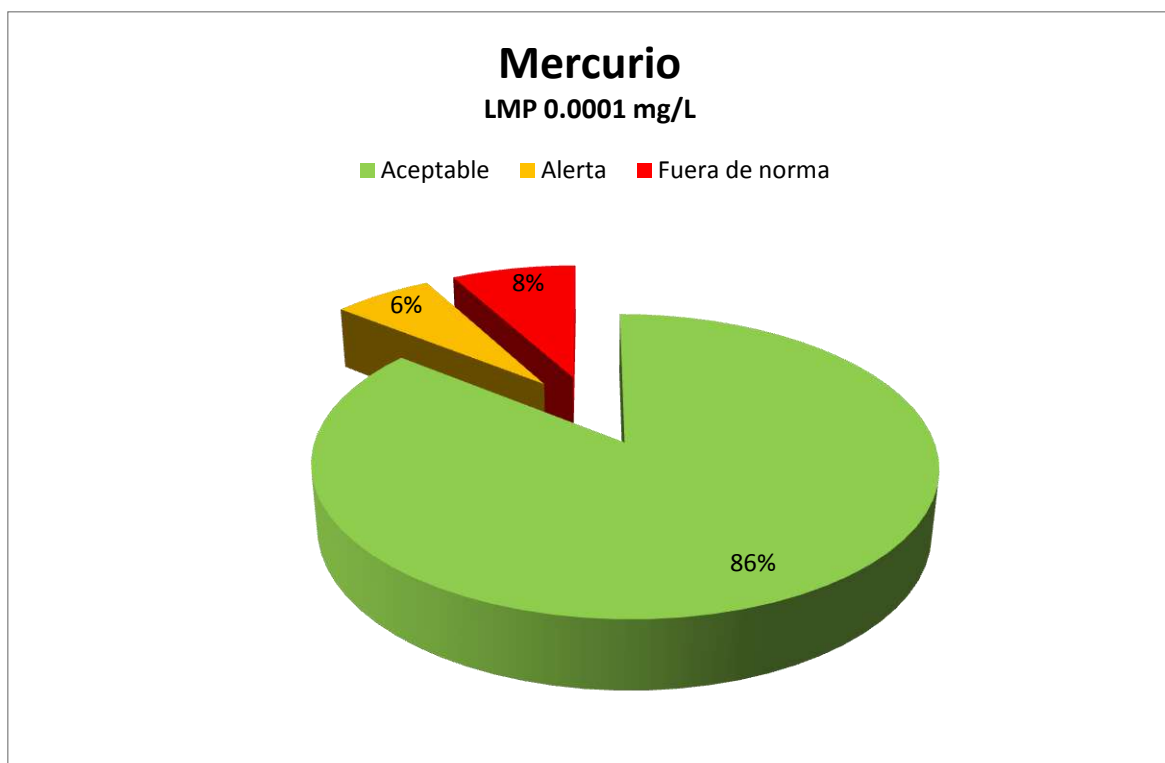
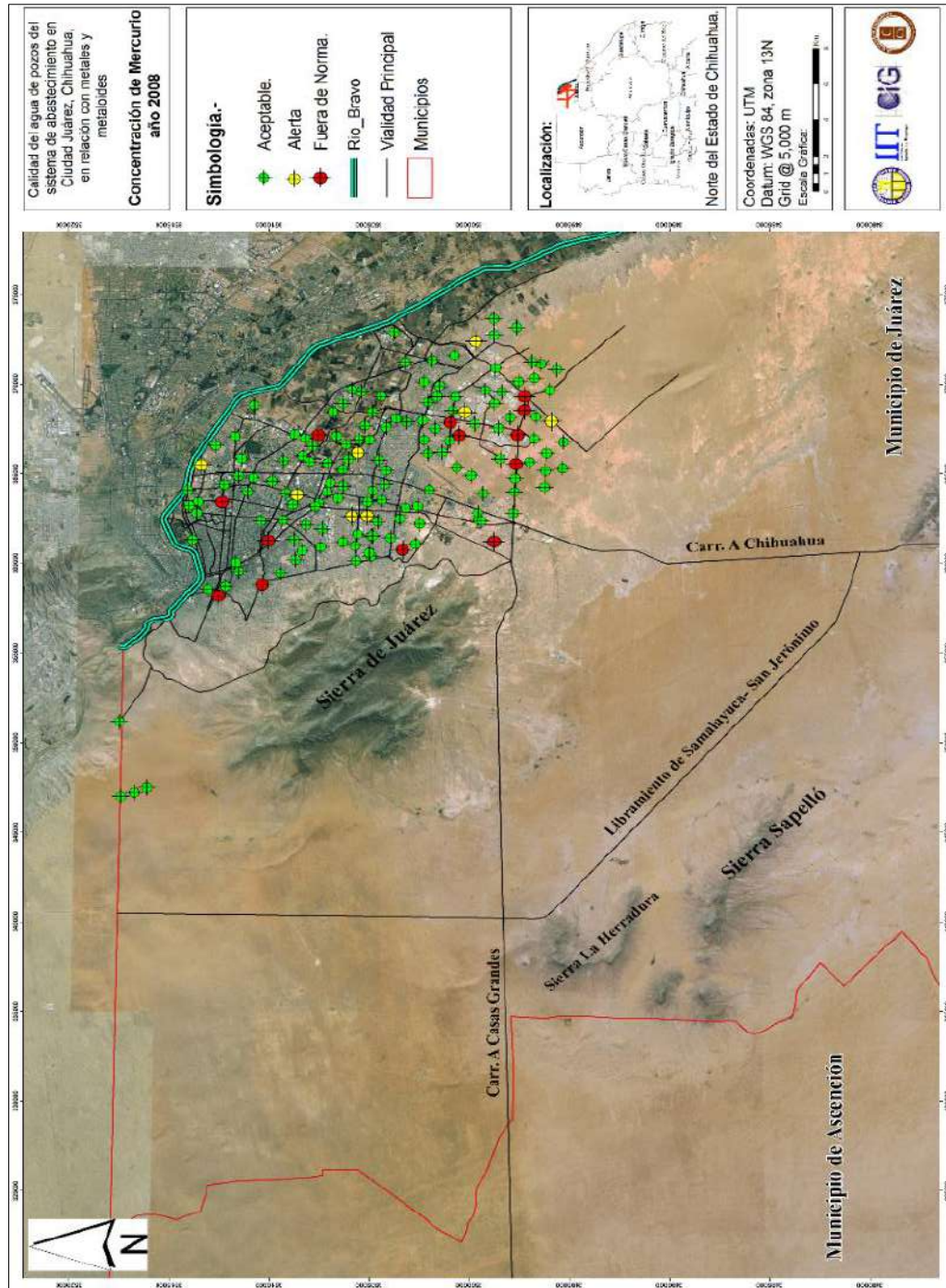


Figura 10. Resultados de las tres calidades para el mercurio, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con calidad aceptable para el Hg correspondiente a los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 29 al 32).

Figura 2. Calidad del agua de pozos en el sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.



mapa de la calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.

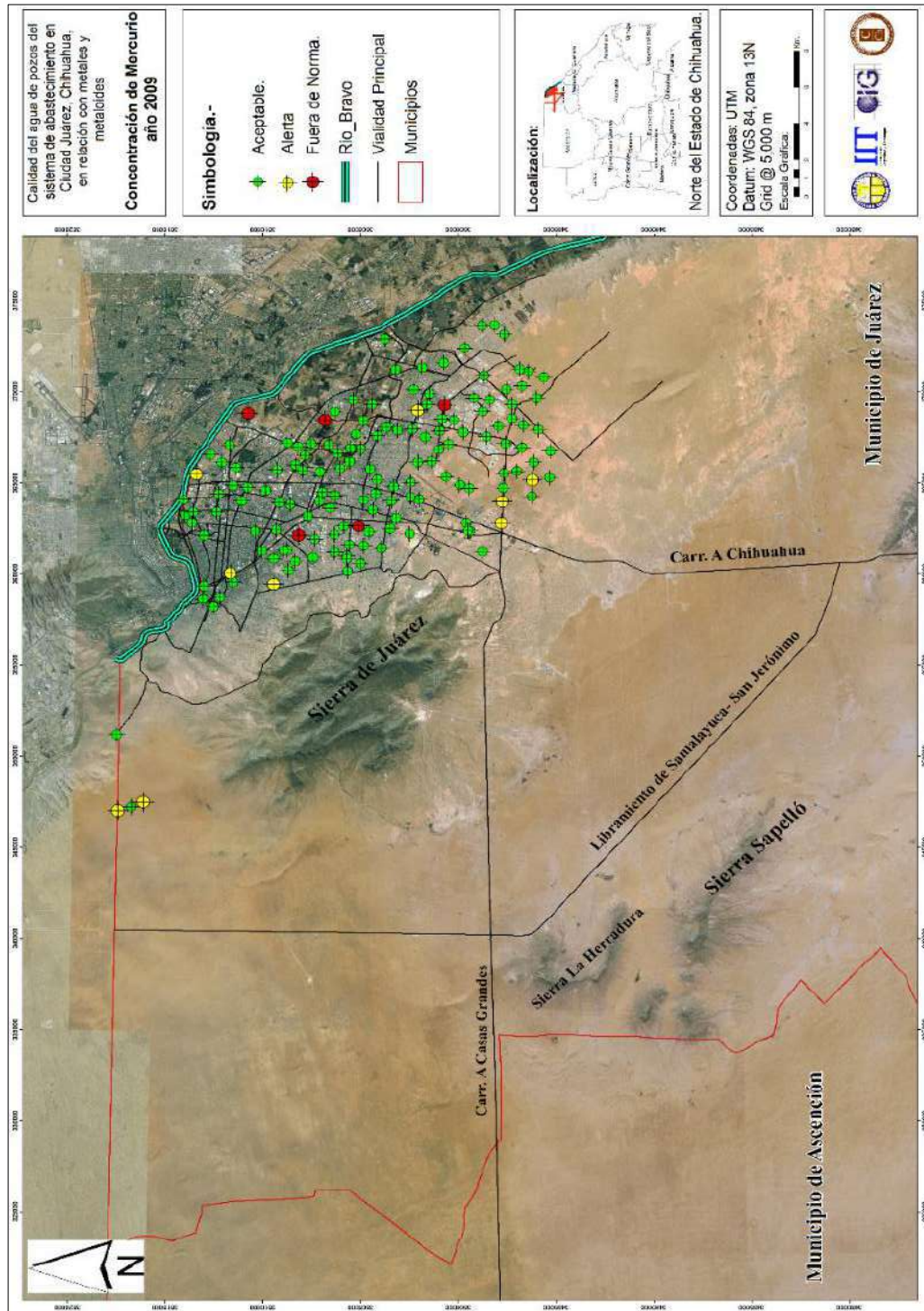
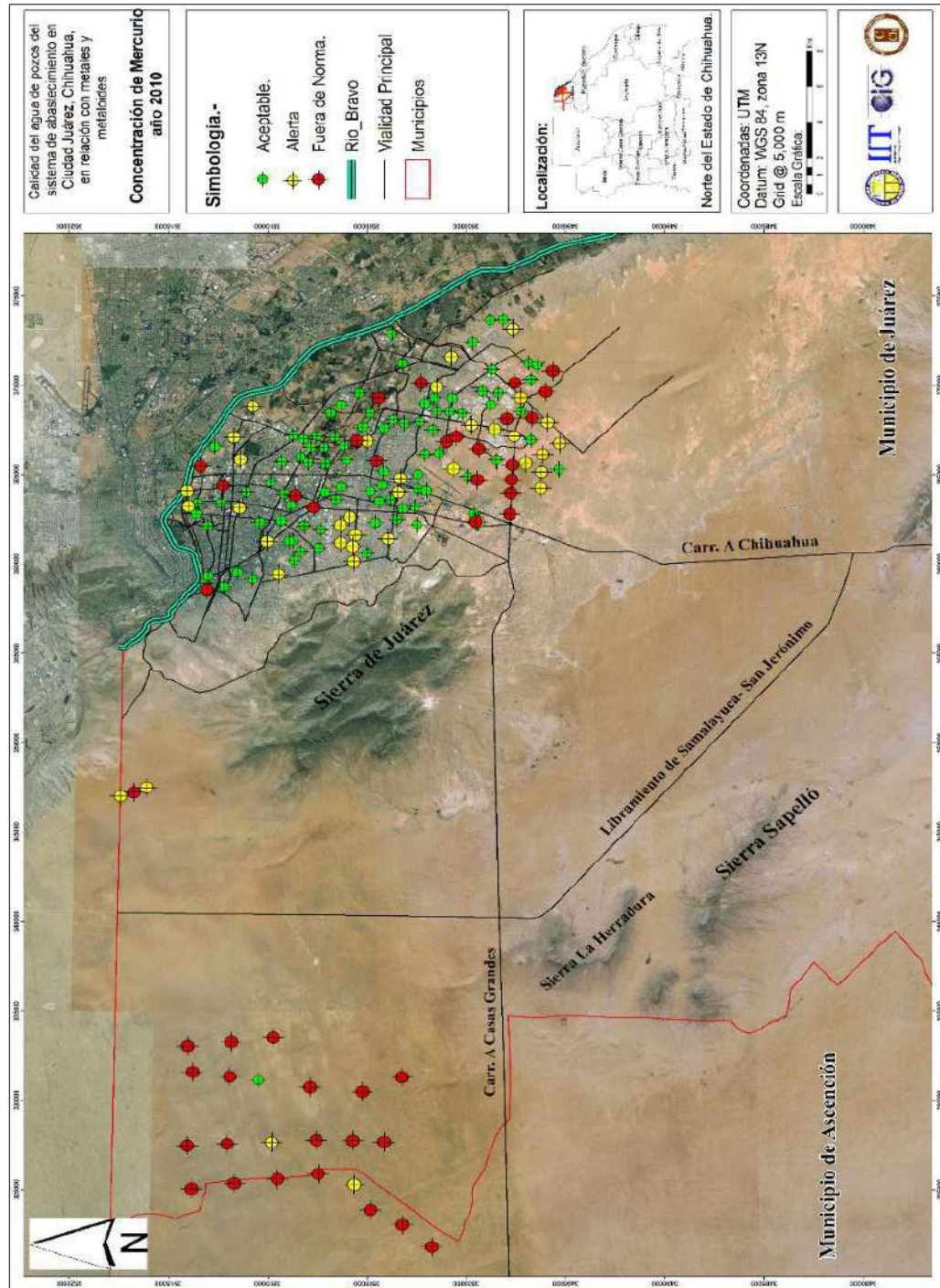
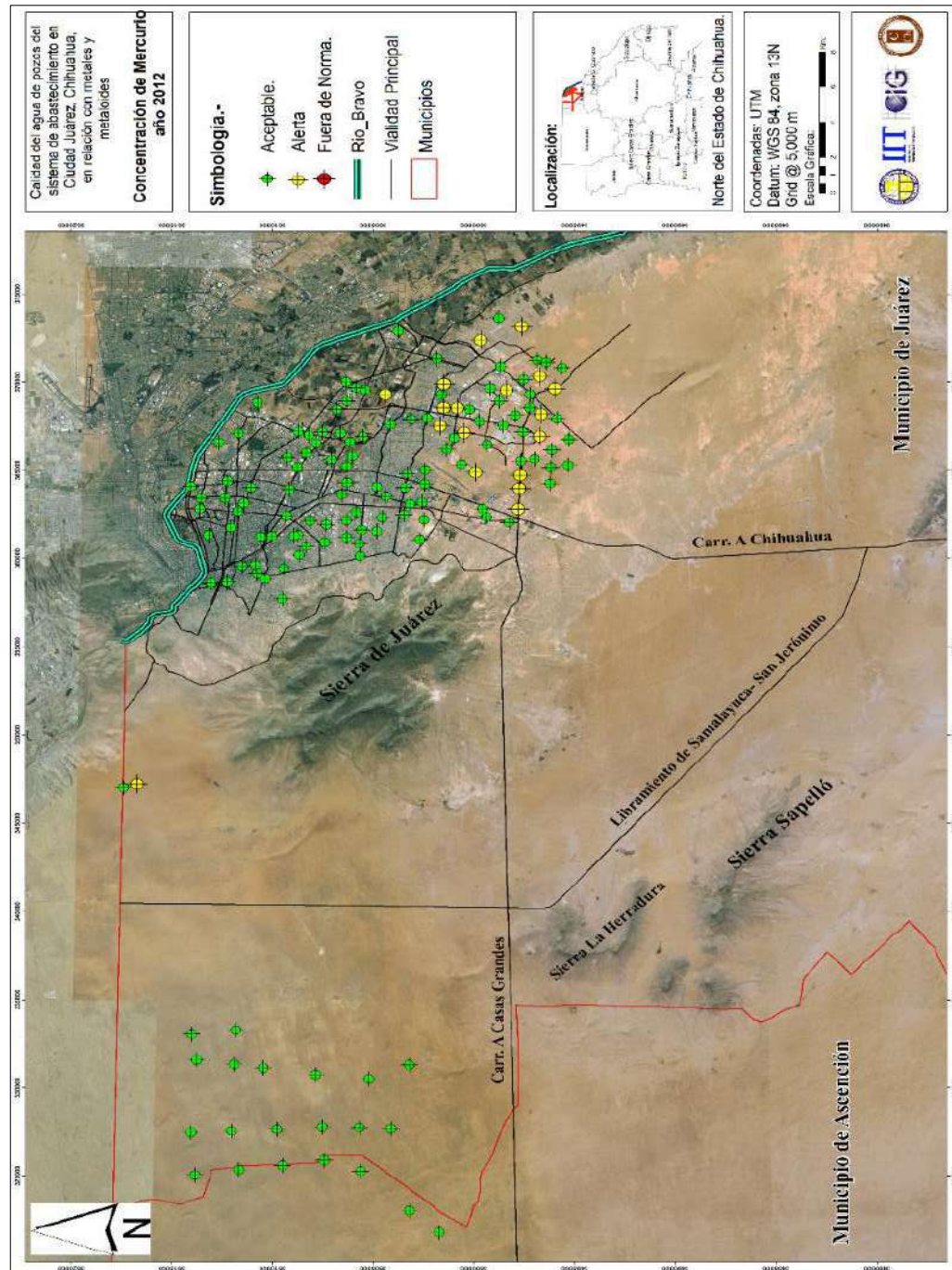


Figura 3. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.





Con respecto al plomo, los resultados indicaron el 97% de los reportes para la calidad aceptable, el 2% para la calidad alerta y solo el 1% para calidad fuera de norma sobrepasando 0.01 mg/L que corresponde al límite permisible. Para los cuatro años estudiados, los valores en calidad aceptable se reportaron (<0.005 mg/L). En calidad alerta la media de las concentraciones para los cuatro años de estudio fue de 0.0081 mg/L, con una concentración máxima de 0.010 mg/L y una mínima de 0.0063 mg/L. En relación con el 1% de calidad fuera de norma, la media de los resultados reportados fue de 0.0333 mg/L, con una concentración máxima de 0.0551 mg/L y una mínima de 0.0183 mg/L (ver tabla 9 y figura 11).

Tabla 9. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para plomo, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	97	Menor a 0.005	
Alerta	2	0.0081	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.010	0.0063
Fuera de norma	1	0.0333	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.0551	0.0183

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para plomo: 0.01 mg /L.

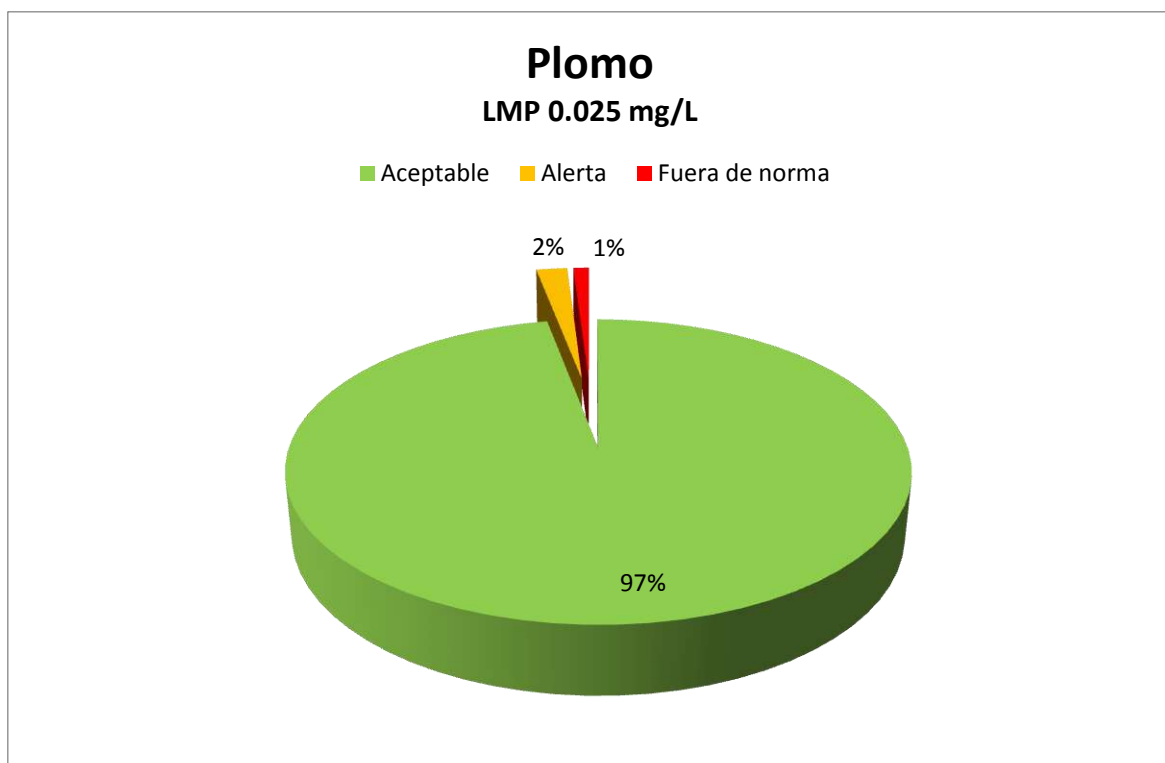
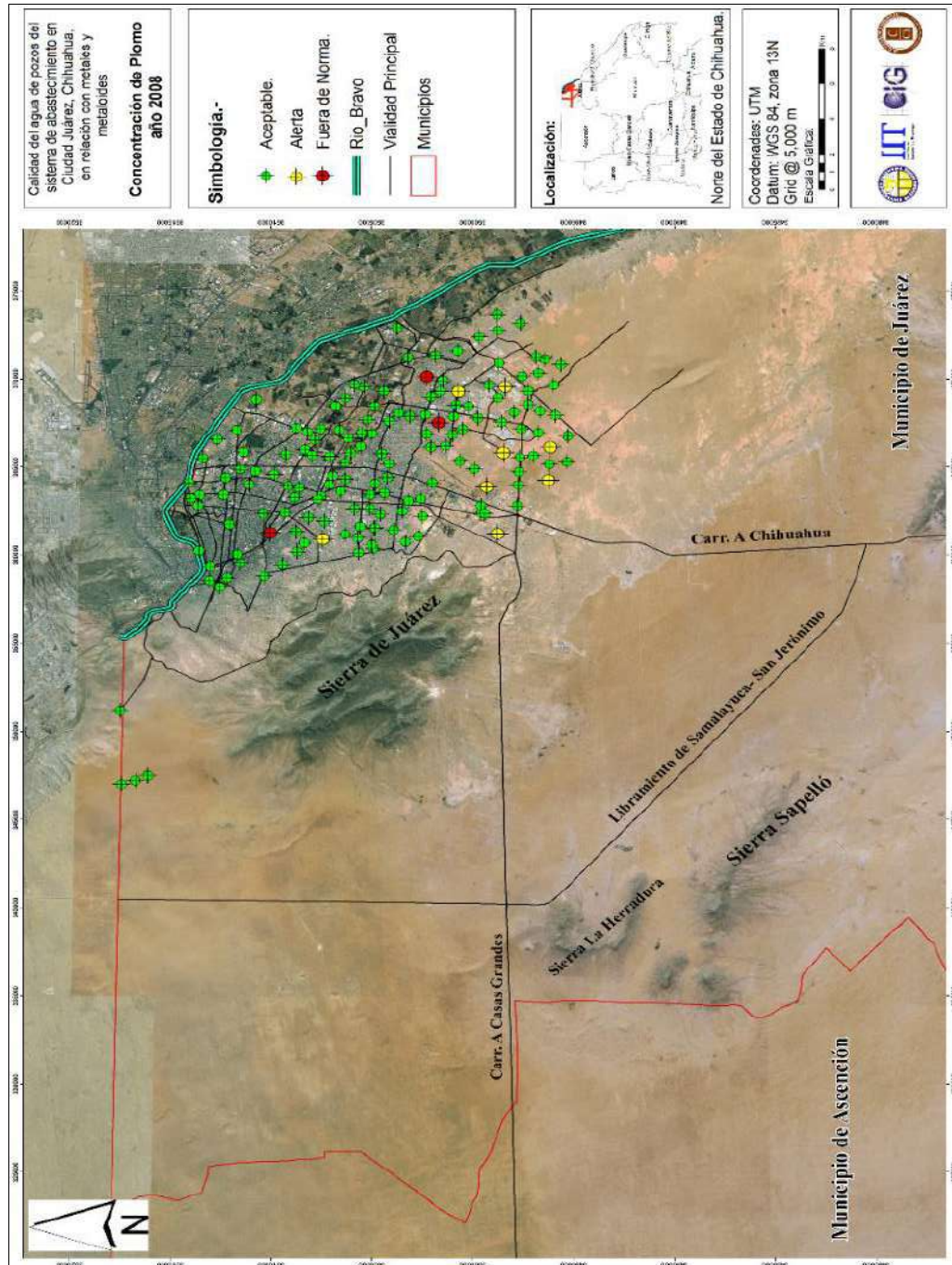


Figura 11. Resultados de las tres calidades para el plomo, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con calidad aceptable para el Pb correspondiente a los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 33 al 36).

Figura 3. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.



Mapa de la calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metales pesados.

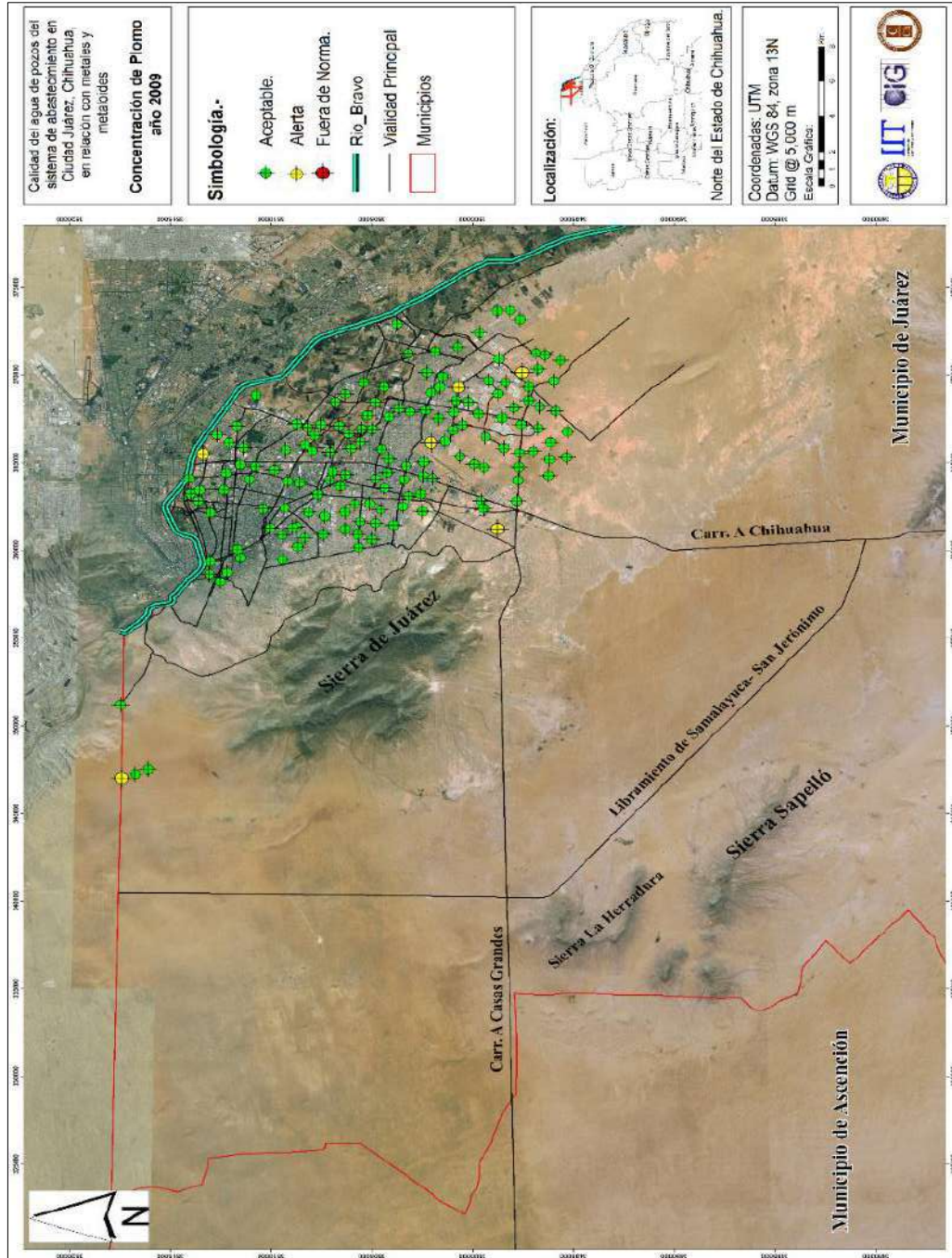


Figura 3. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides año 2010.

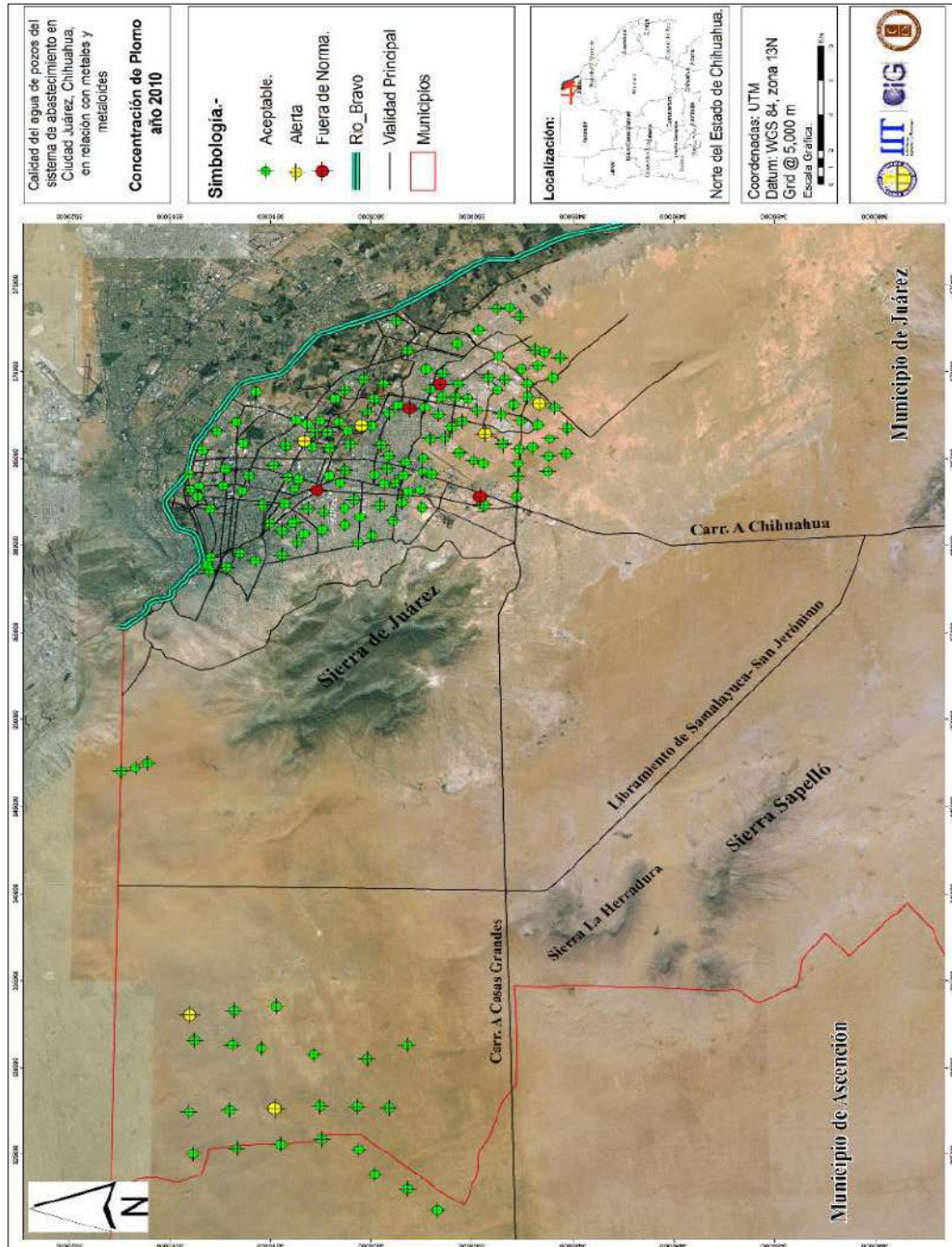
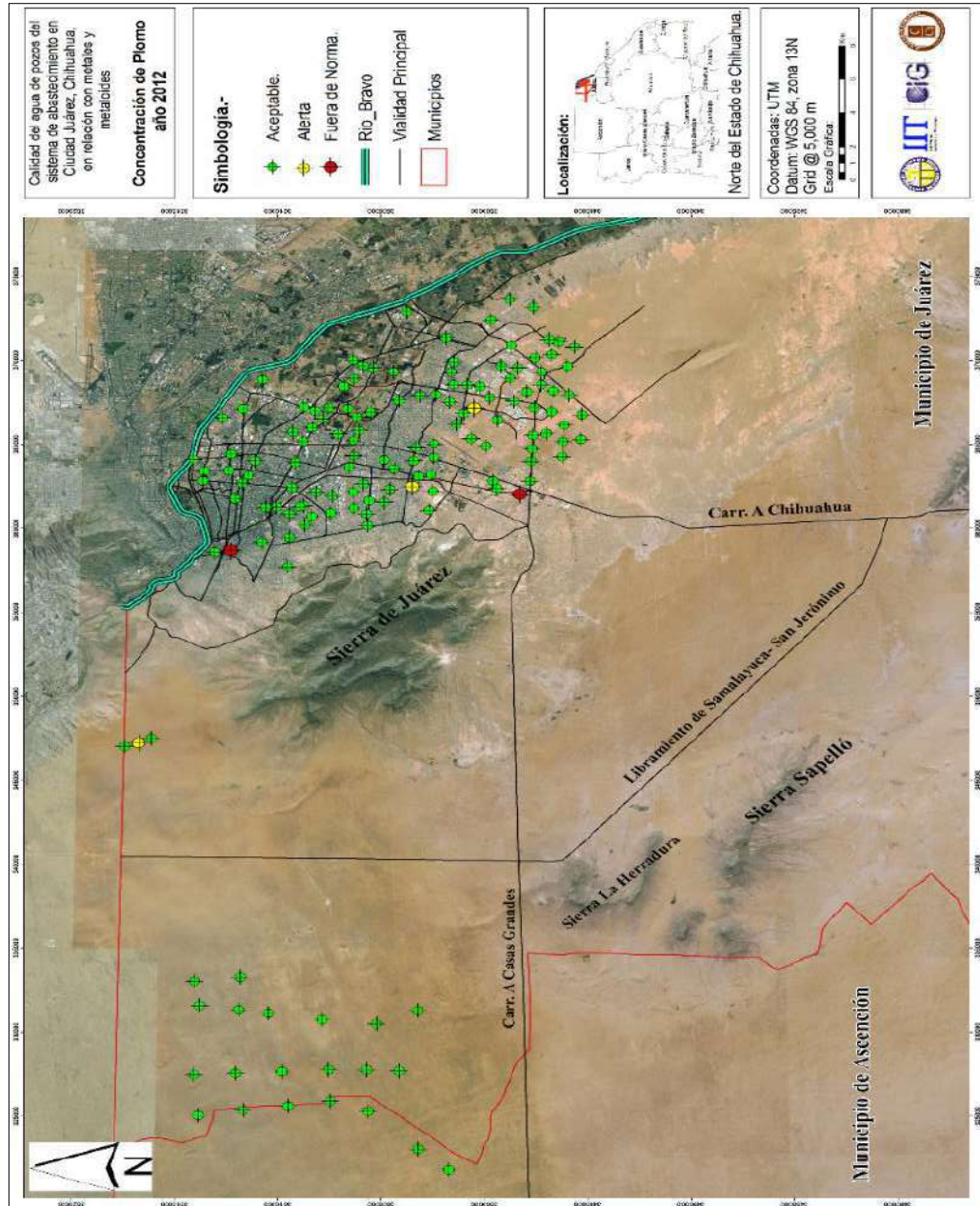


Figura 2. Calidad de agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.



Para el zinc no se reportan resultados que sobrepasen el límite permisible normado (5.0 mg/L). A la calidad aceptable le corresponde el 98.9% y solo el 1.1% para calidad alerta. En los años 2008 y 2009 los valores reportados para calidad aceptable son (<0.030 mg/L), para el año 2010 los reportes son (<0.010 mg/L) y para el año 2012 se reporta (<0.1 mg/L y No Detectado). En cuanto a la calidad alerta la media de las concentraciones reportadas fue de 0.1138 mg/L, con una concentración máxima de 0.1588 mg/L y una mínima de 0.062 mg/L. (Ver tabla 10 y figura 12).

Tabla 10. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para zinc, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	98.9	Menor a 0.00083	
Alerta	1.1	0.113	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.1588	0.062
Fuera de norma	0	0	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0	0

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permissible normado para zinc: 5.0 mg /L.

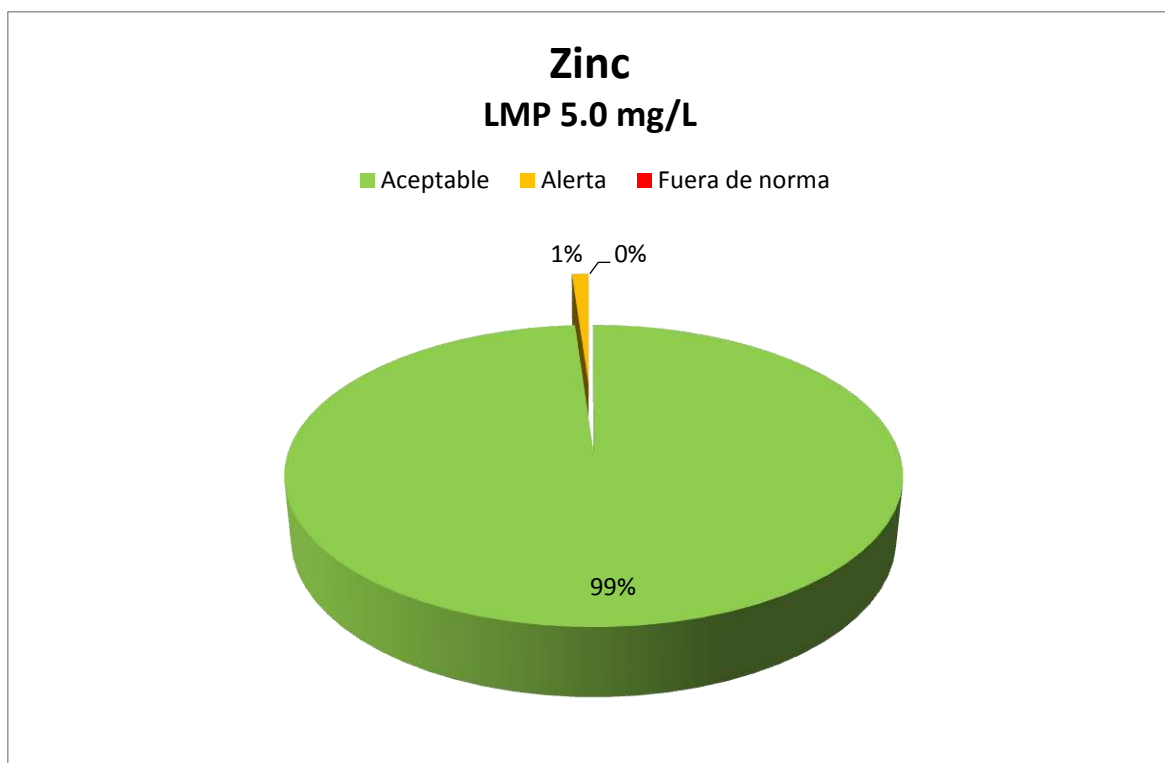
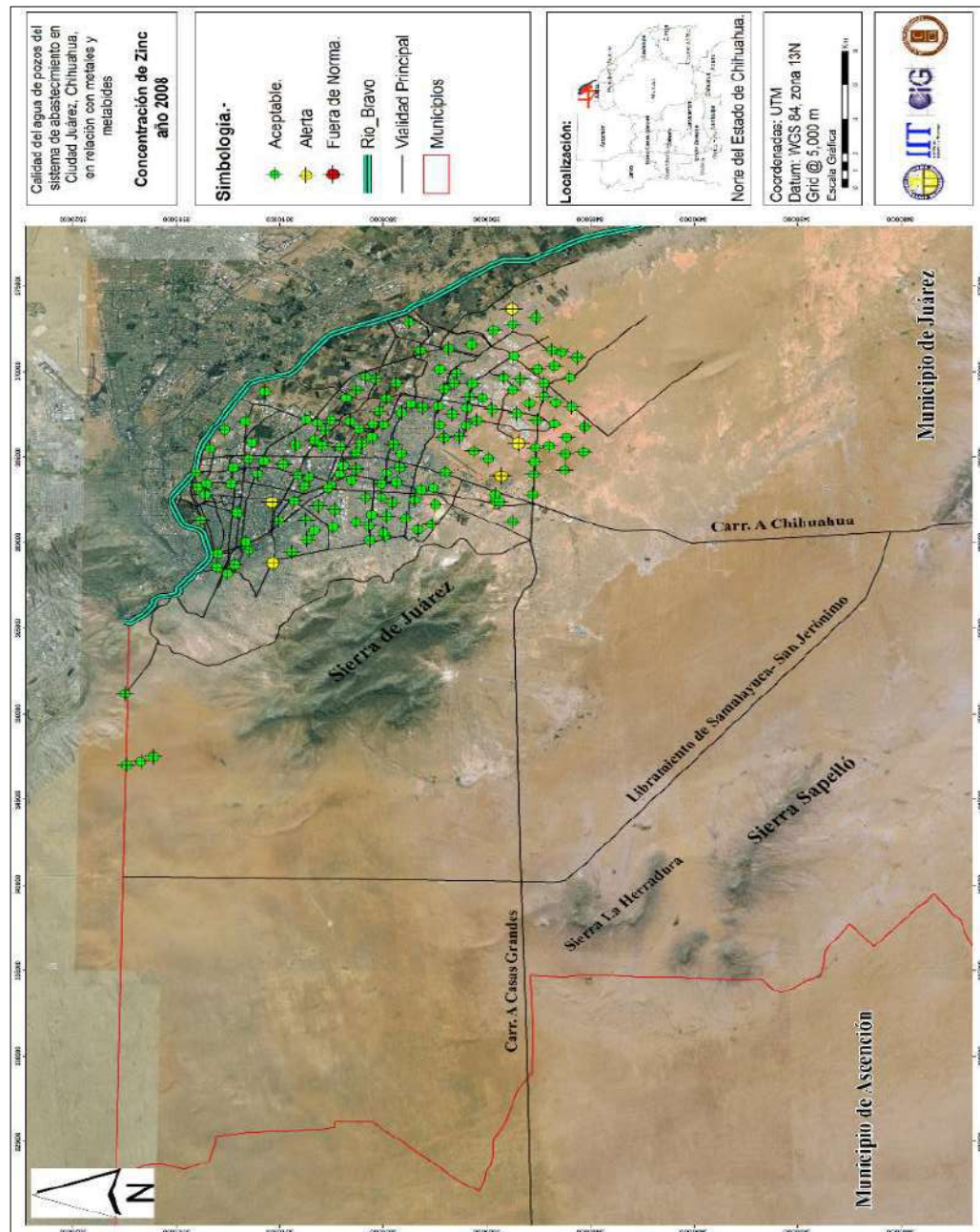


Figura 12. Resultados de las tres calidades para el zinc, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con calidad aceptable para el Zn correspondiente a los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 37 al 40).

Figura 3.3. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides año 2008.



Mapa de Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metales pesados.

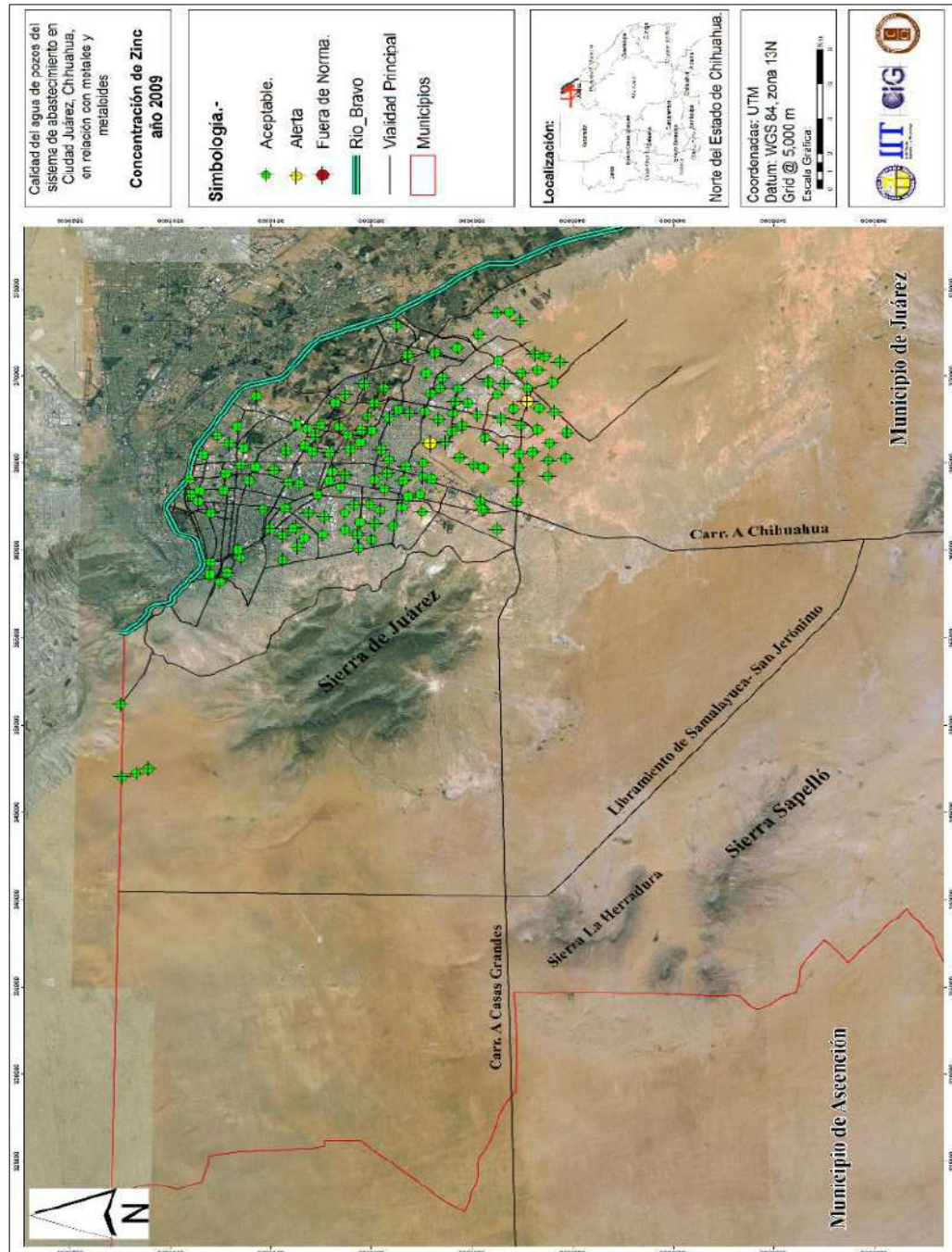


Figura 55. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.

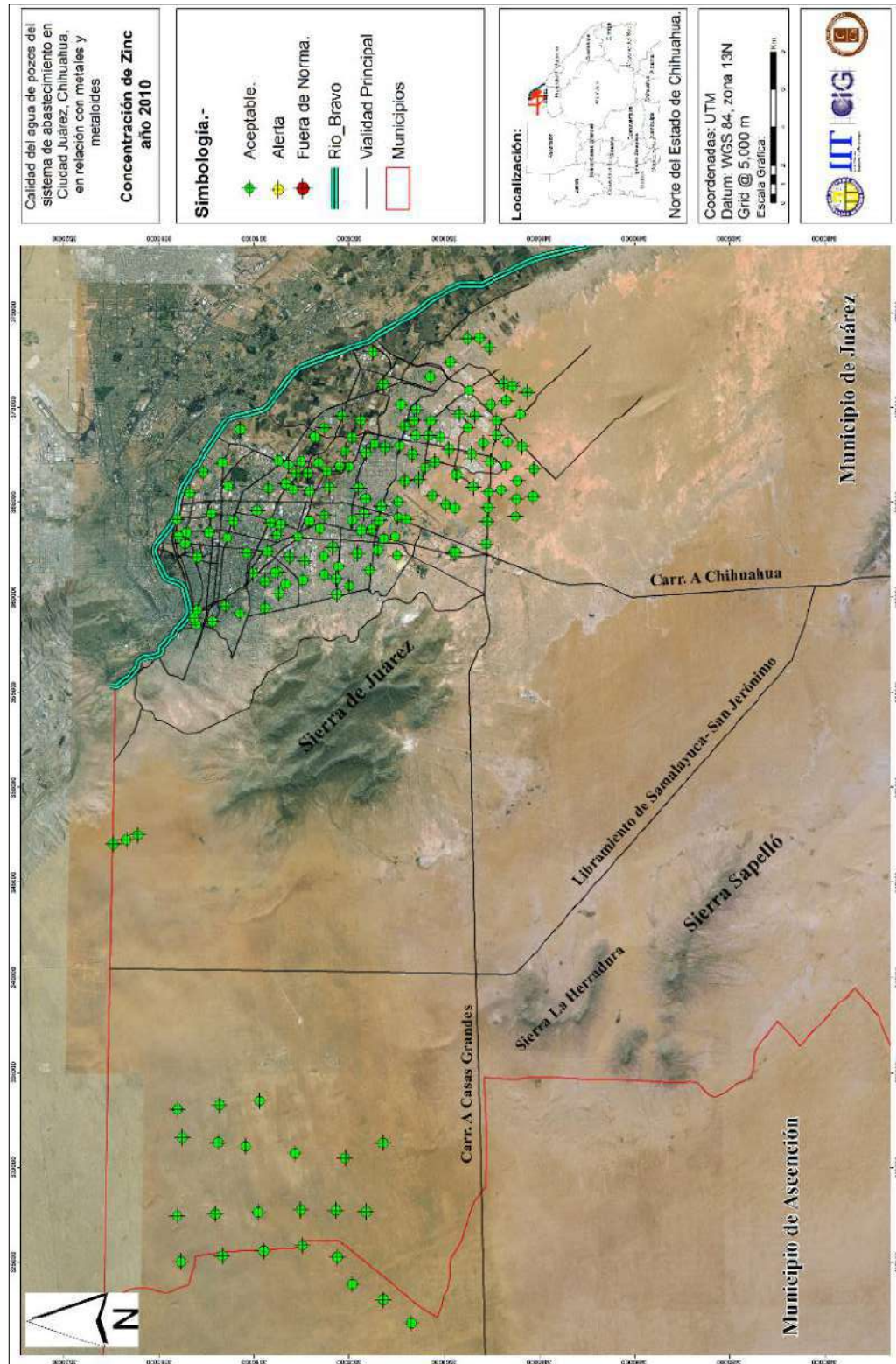
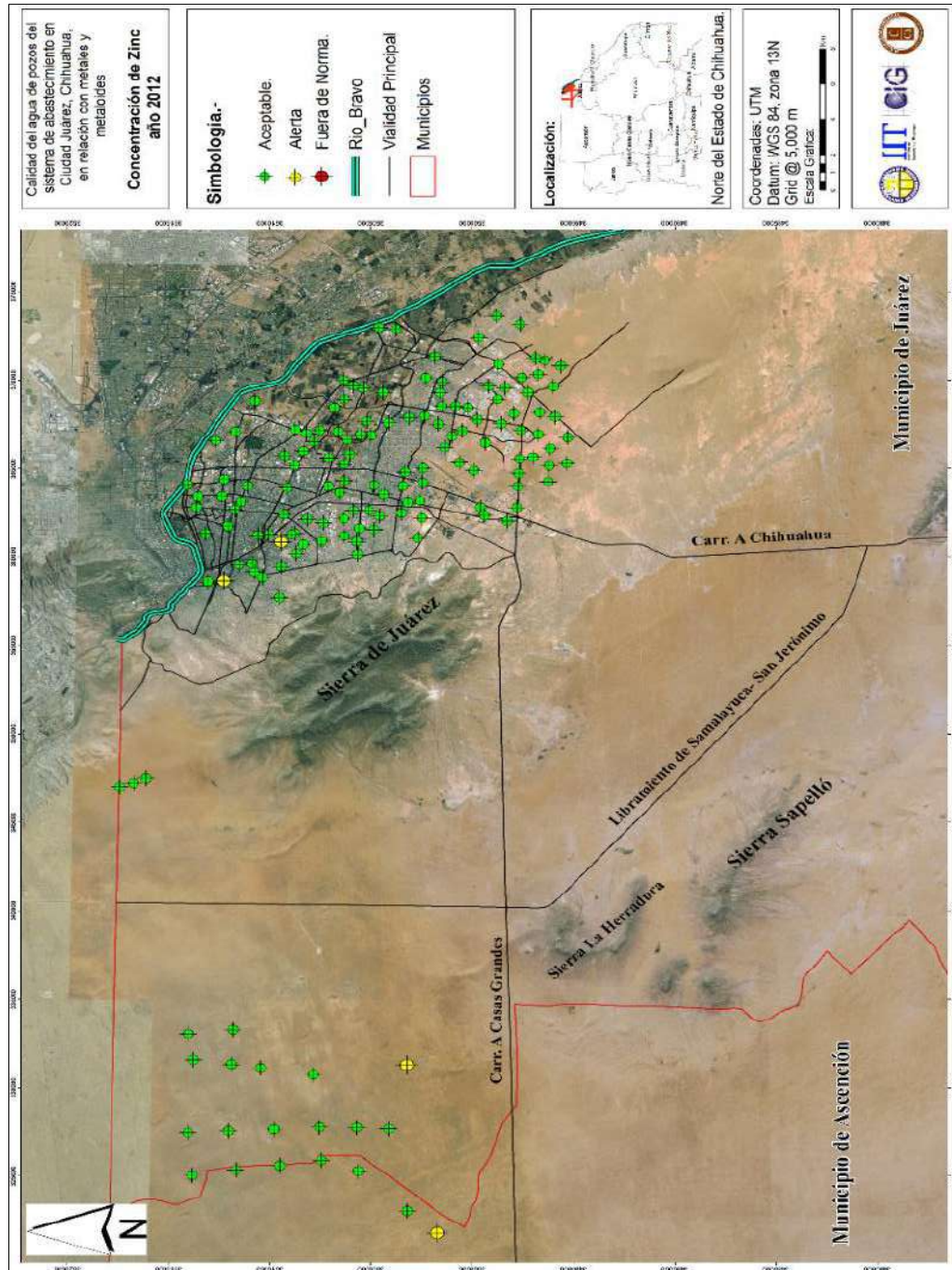


Figura 10. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides año 2012.



Los resultados para el fierro fueron de un 58.95% para la calidad aceptable, el 33.46% para calidad alerta y el 7.59% para la calidad fuera de norma. En la calidad aceptable se incluyeron para el año 2008, valores de 0.010 mg/L, 0.020 mg/L y 0.030 mg/L. En el año 2009 se incluyó el valor de 0.030 mg/L, en el 2010 la concentración fue de 0.005 mg/L, 0.02 mg/L, 0.029 mg/L y 0.030 mg/L. Para el 2012 la concentración cambia a 0.0055 mg/L. La media de las concentraciones en calidad alerta fue de 0.069 mg/L, con una concentración máxima de 0.2072 y una mínima de 0.022 mg/L. Con respecto a la calidad fuera de norma, la media es 1.3692 mg/L con una concentración máxima de 3.8938 mg/L y una mínima de 0.30 mg/L (ver tabla 11 y figuras 13).

Tabla 11. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para fierro, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	58.95	Menor a 0.030	
Alerta	33.46	0.069	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		0.2072	0.022
Fuera de norma	7.590	1.3692	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		3.8938	0.30

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para fierro: 0.30 mg /L.

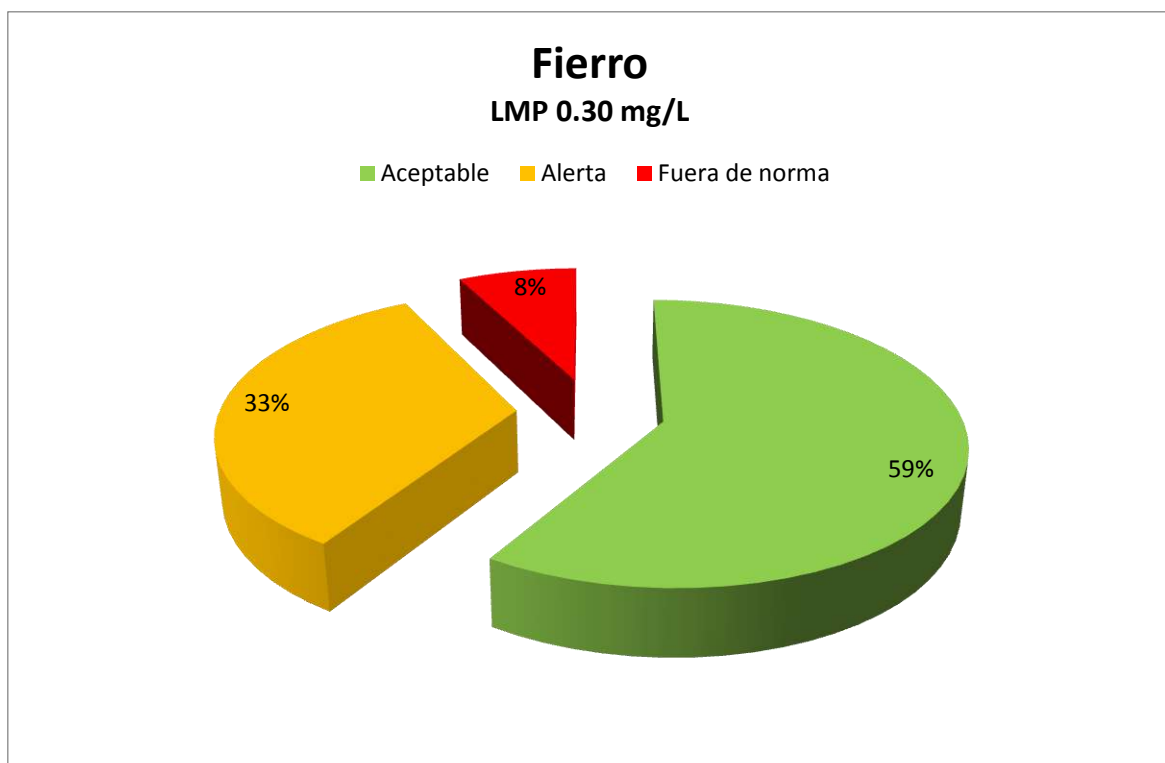


Figura 13. Resultados de las tres calidades para el fierro, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con calidad aceptable para el Fe correspondiente a los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 41 al 44).

Figura 11. Calidad del agua de pozos y ríos de la zona de estudio.

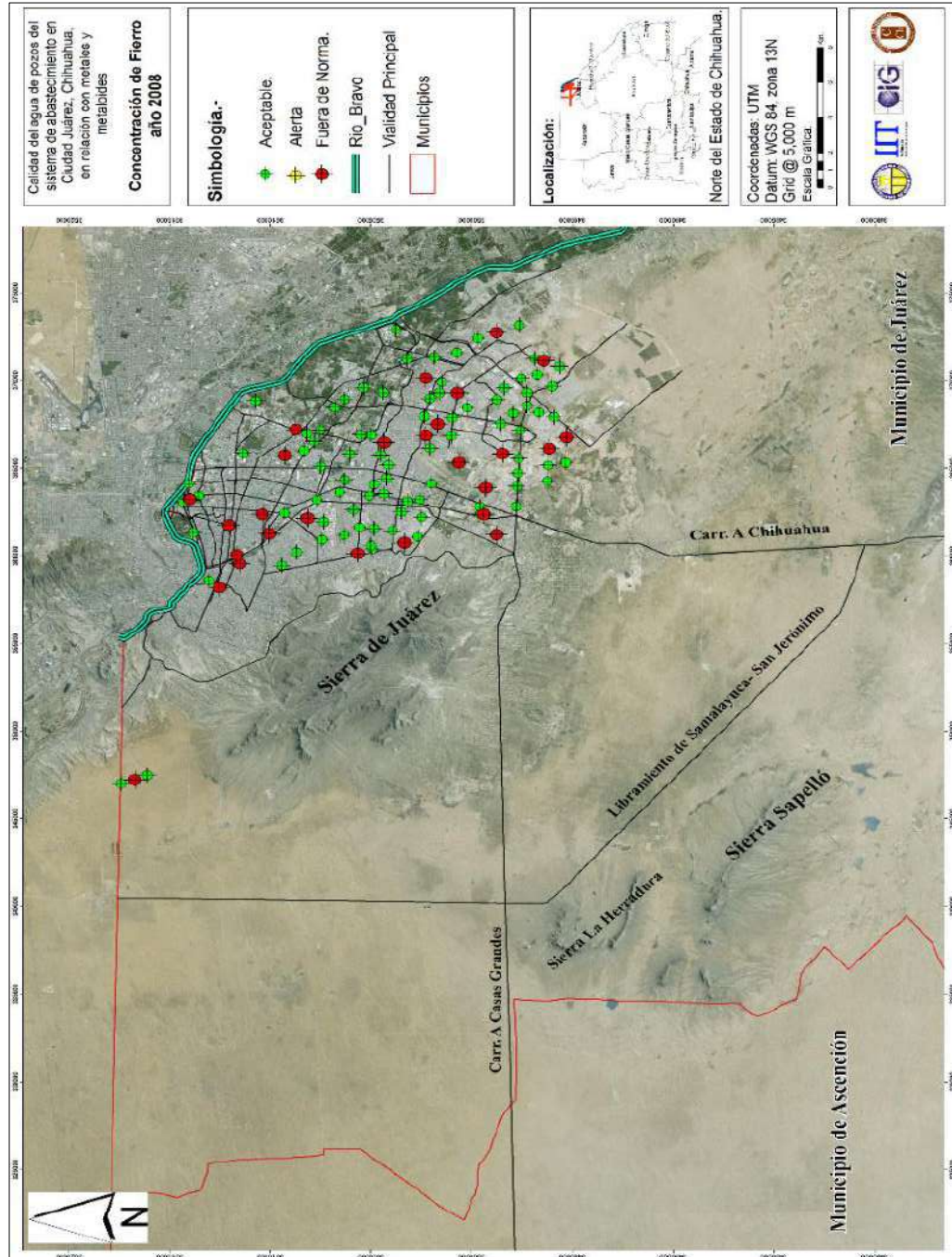


Figura 10. Concentración de metales pesados en pozos de agua potable en el municipio de Juárez.

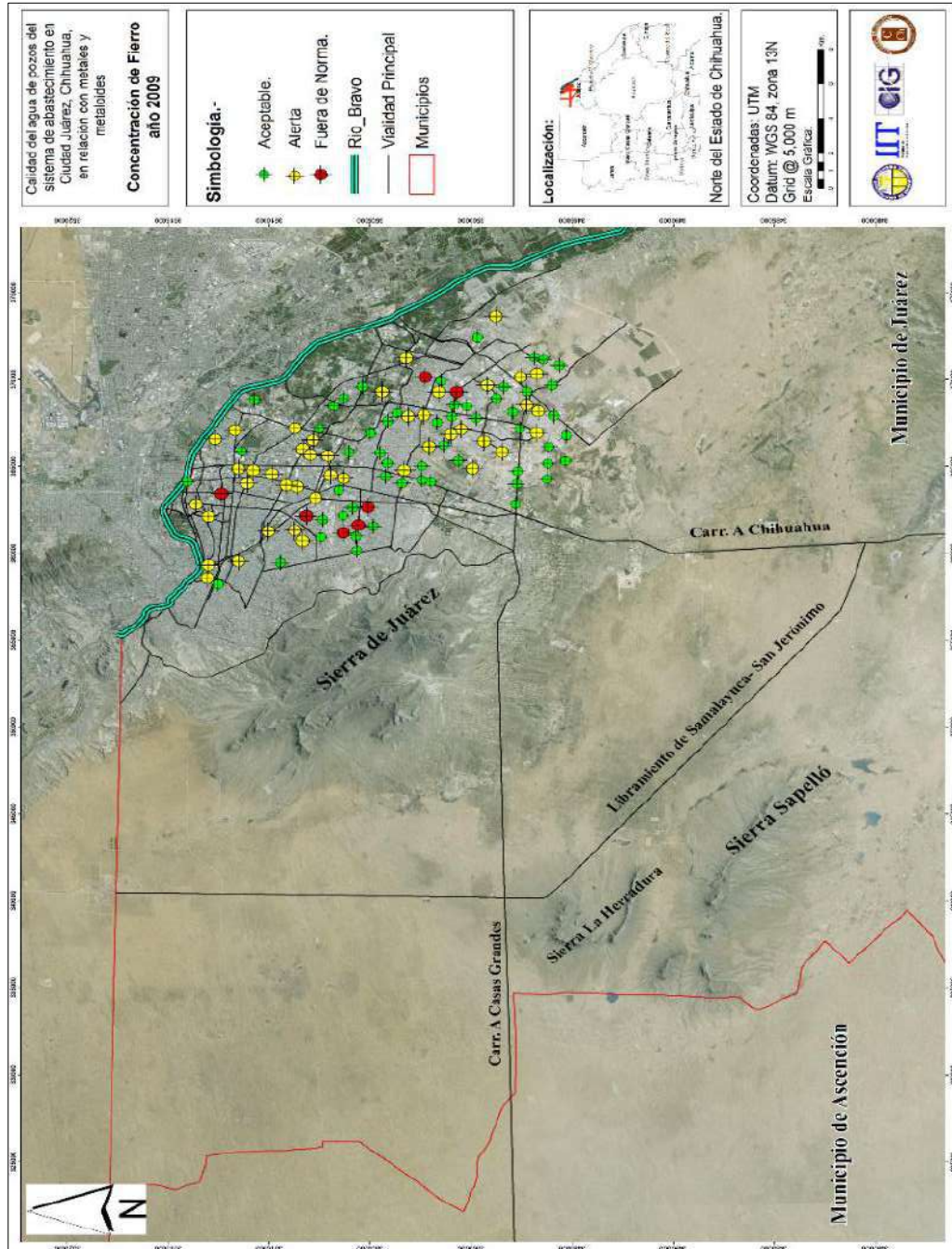


Figura 10. Calidad del agua de pozos y riego en el municipio de Juárez, Chihuahua, México y zona de riego para el cultivo de papa en el año 2010.

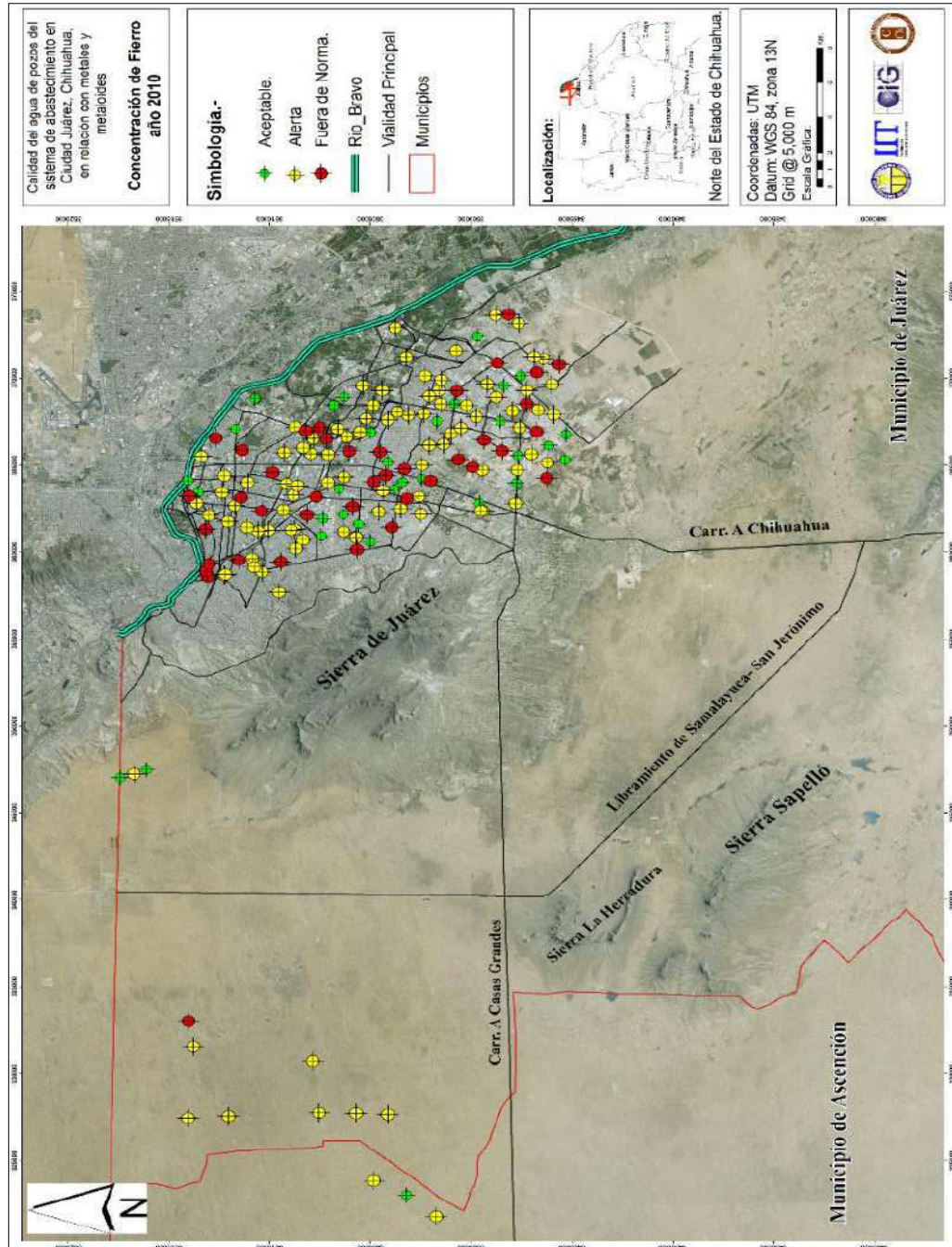
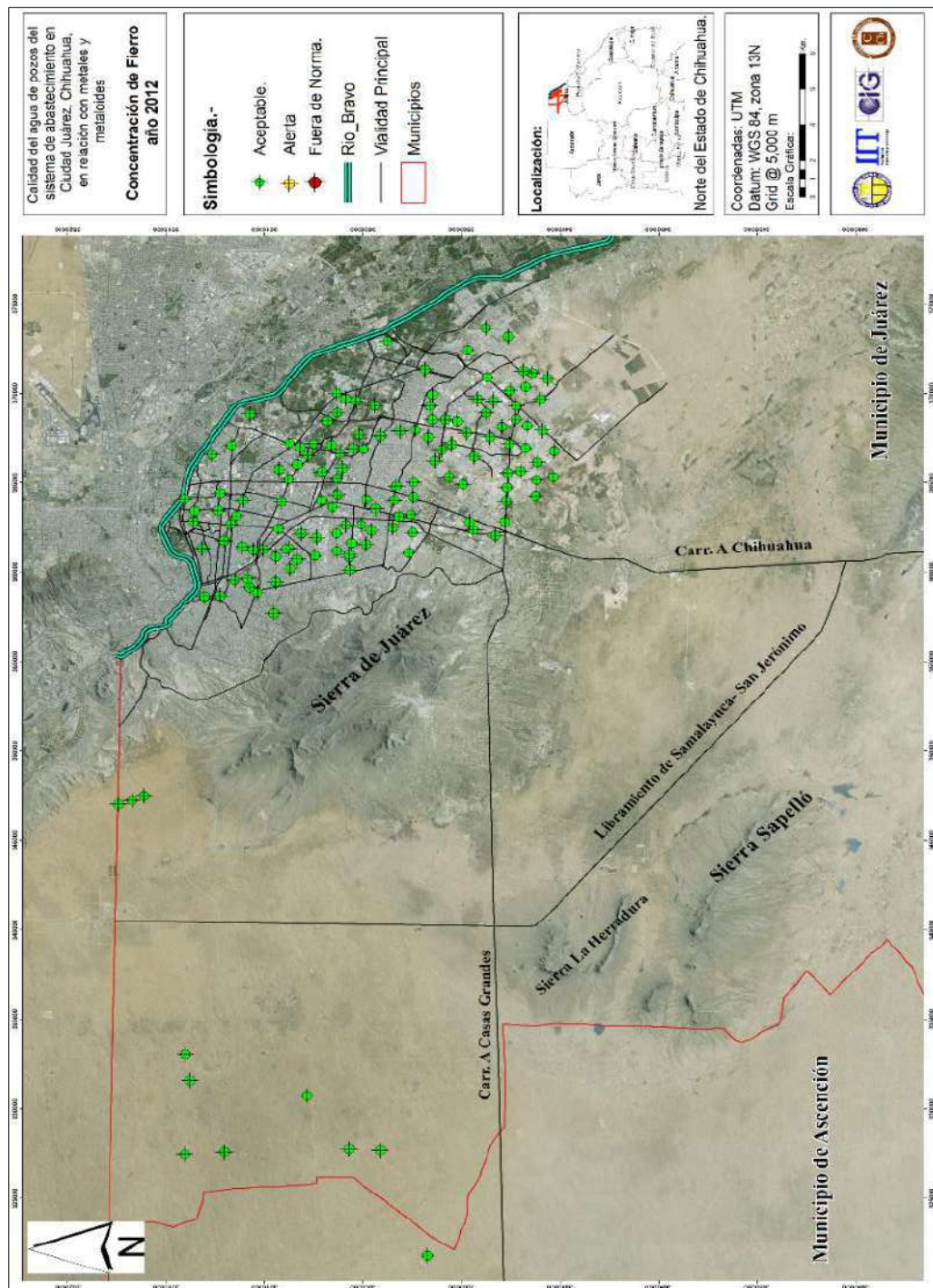


Figura 11. Calidad del agua de pozos del sistema de abastecimiento en Ciudad Juárez, Chihuahua, en relación con metales y metaloides.



Los resultados para el sodio fueron 85.1% de resultados clasificados en calidad alerta, el 14.7% en calidad fuera de norma y solo el 0.2% en calidad aceptable. En la calidad aceptable se consideró el valor <0.030 mg/L en los años 2008 y 2009, mientras que para el 2010 el reporte fue (=0.030). Los valores reportados en el año 2012 y asignados en la calidad alerta se expresaron (=1.7860 mg/L). En calidad alerta, la media de las concentraciones reportadas fue de 106.44 mg/L, con una concentración máxima de 199.0 mg/L y una mínima de 45.83 mg/L. En relación con la calidad fuera de norma, con un límite permisible de 200 mg/L, la media de las concentraciones fue de 296.54 mg/L, con una máxima concentración de 751.35 mg/L y una mínima de 200.45 mg/L (ver tabla 12, figuras 14).

Tabla 12. Resultados de las tres calidades y sus concentraciones máximas y mínimas para sodio, 2008-2010, 2012.

Calidad	Porcentaje	Media de concentración mg/L	
Aceptable	0.2	Menor a 0.030	
Alerta	85.1	106.44	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		199.0	45.83
Fuera de norma	14.7	296.54	
		Concentración máxima	Concentración mínima
		751.35	200.45

Fuente: Cálculos propios con datos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, 2013.
Límite Máximo Permisible normado para sodio: 200 mg /L.

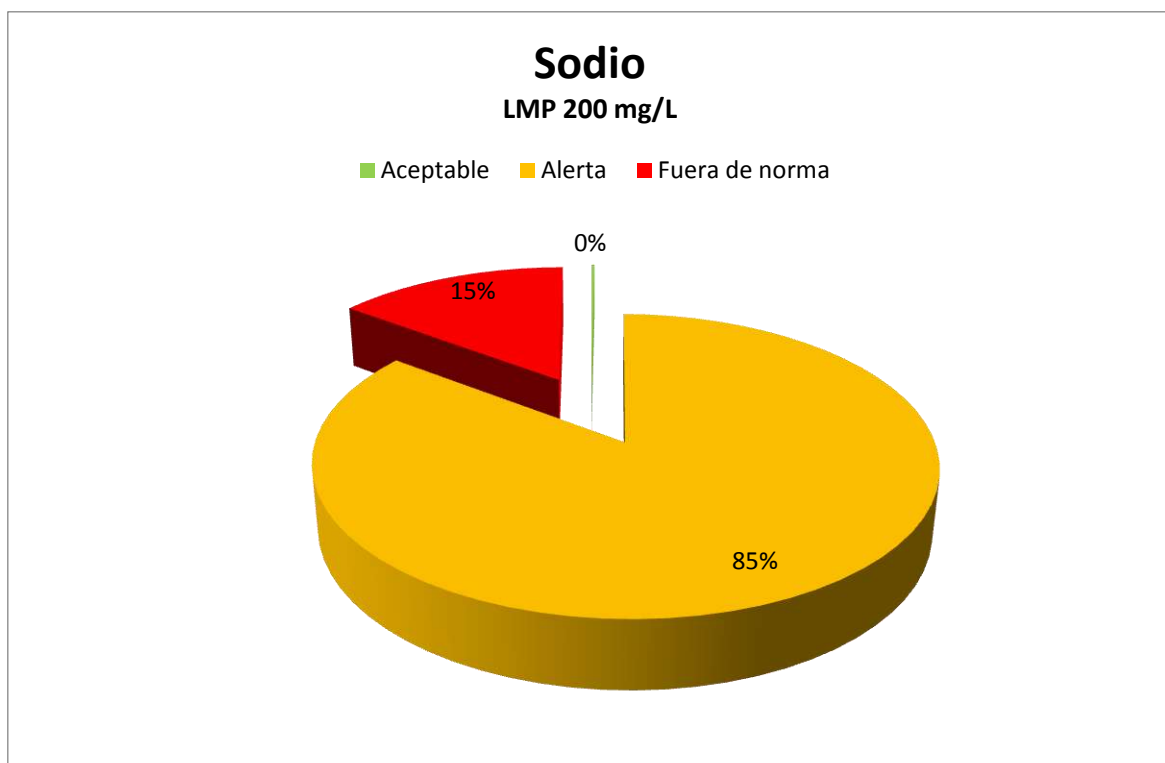


Figura 14. Resultados de las tres calidades para el sodio, 2008-2010, 2012.

A continuación se muestra la ubicación geográfica de los pozos con calidad aceptable para el Na correspondiente a los cuatro años de registro de la JMAS (Mapas 45 al 48).

Mapa 10. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para el agua de pozos en el municipio de Juárez.

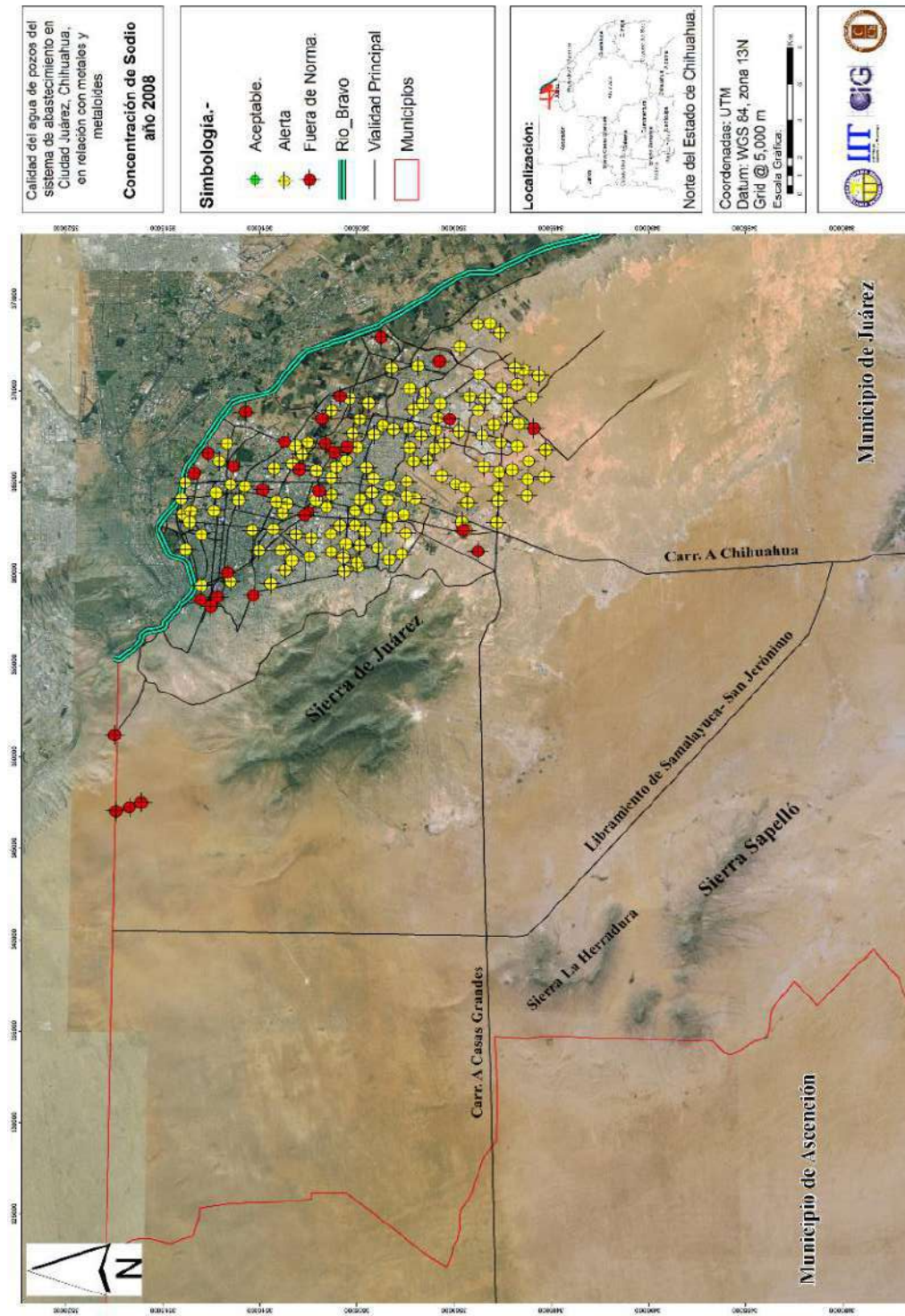
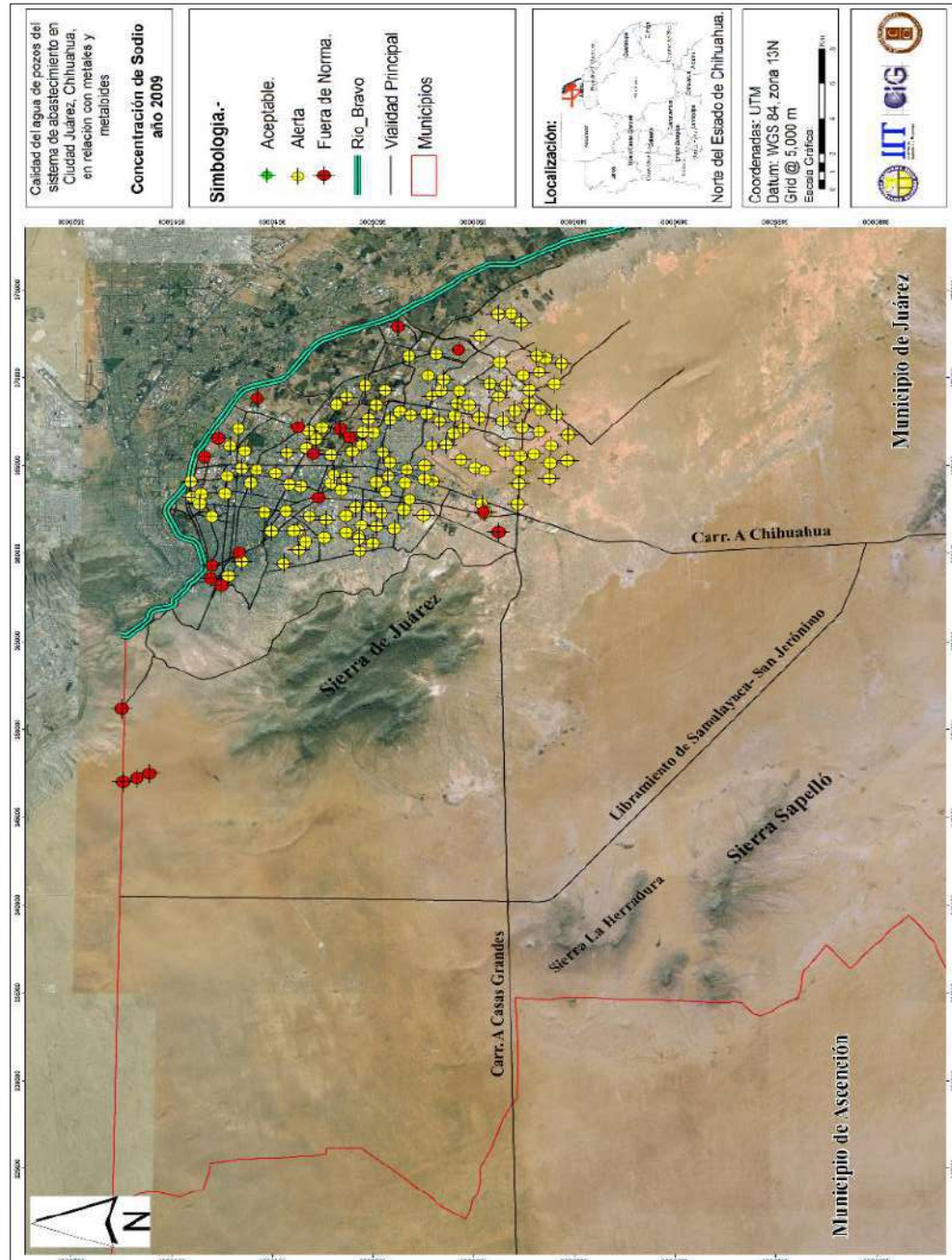
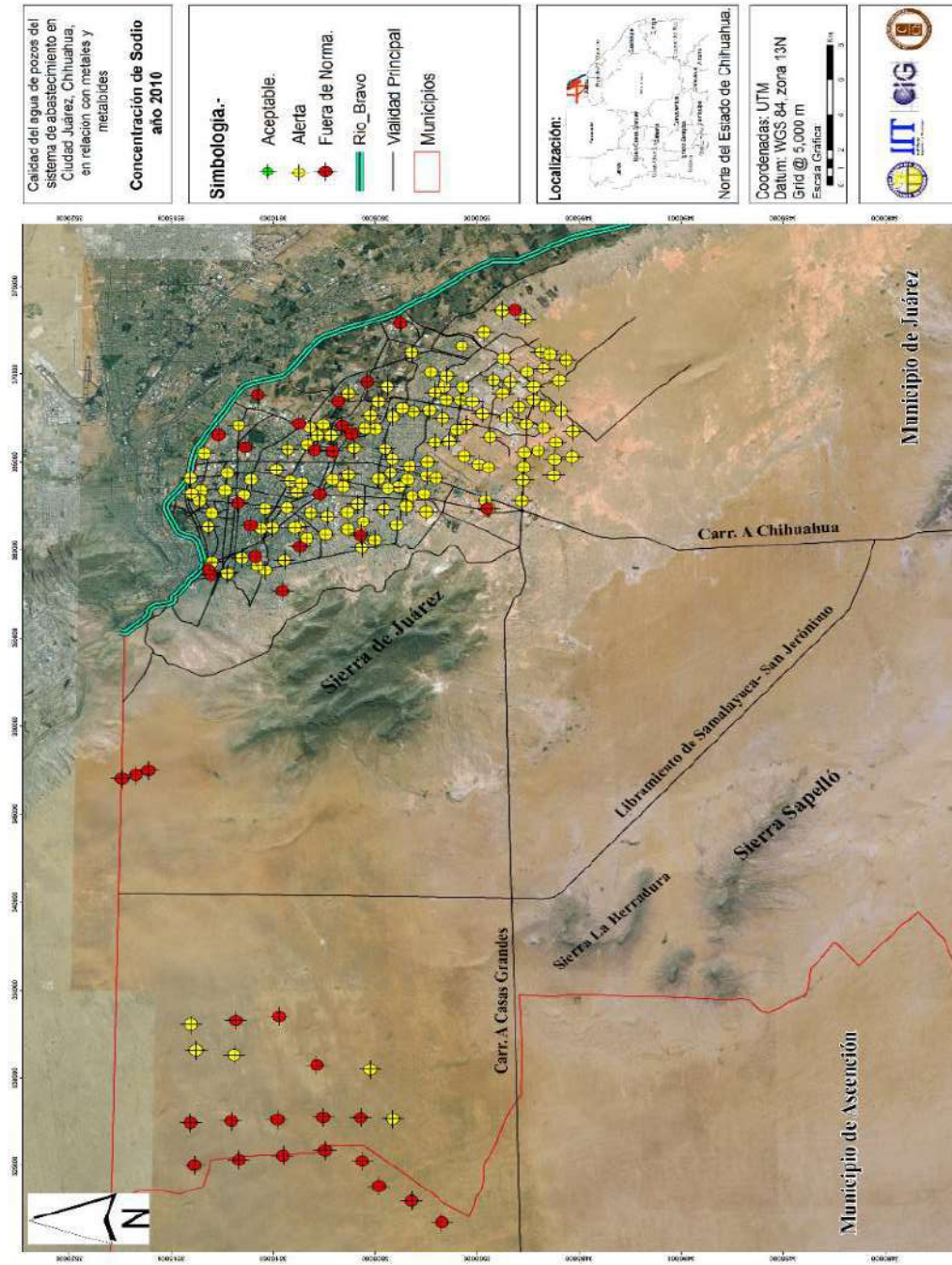


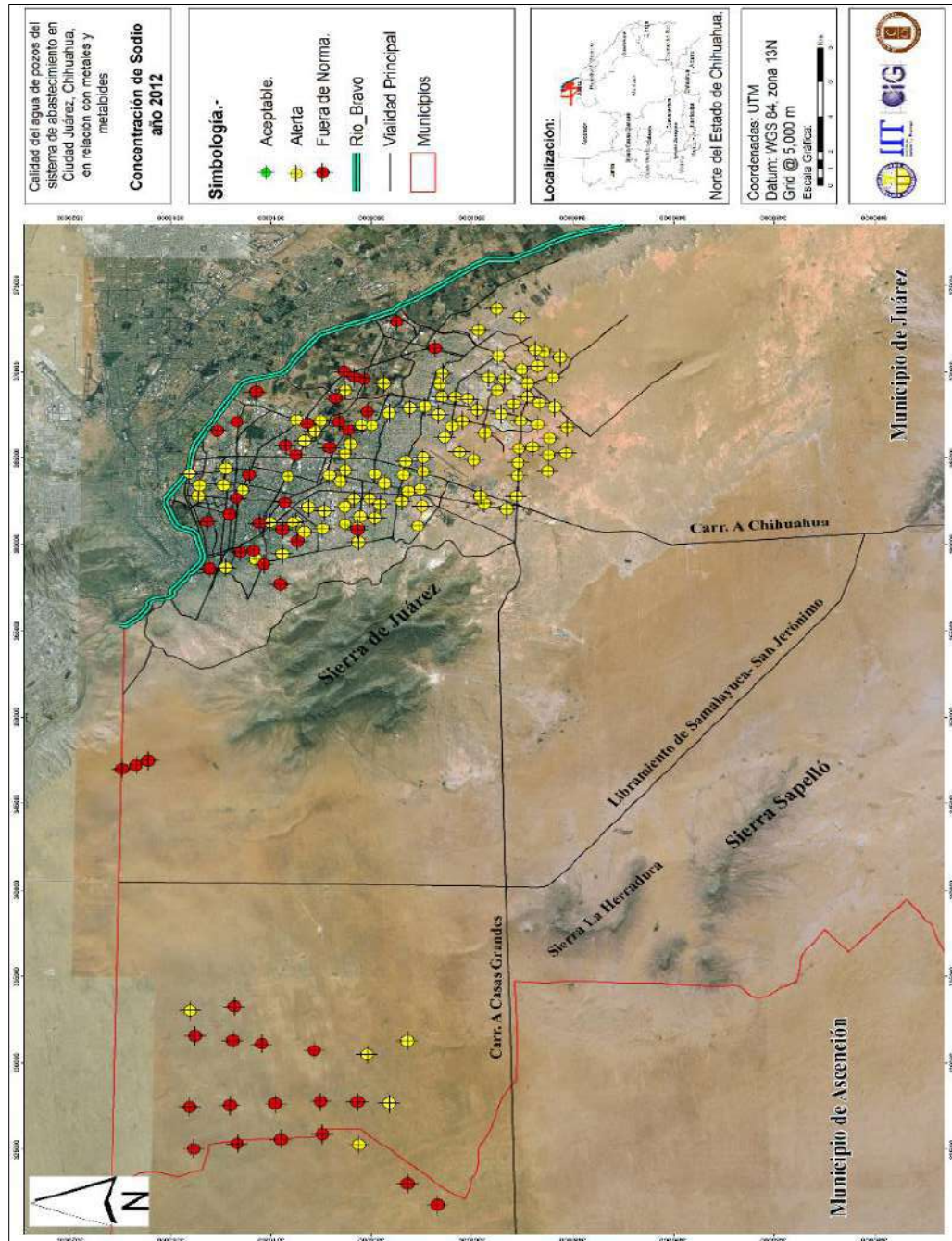
Figura 10. Calidad del agua de pozos (aceptable, alerta y fuera de norma) para la zona de pozos de la zona 13N.



Mapa 10. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para nitrato en los pozos de agua potable.



Mapa 10. Calidad (aceptable, alerta y fuera de norma) para metales pesados en pozos de agua de 2012.



Se reportaron resultados fuera de norma para los siguientes constituyentes químicos: arsénico, aluminio, manganeso, mercurio, plomo, fierro y sodio.

En la tabla 13 se observa la identificación de los pozos y la calidad en escala alerta (A) y/o fuera de norma (FN) asignada a cada uno de éstos, de acuerdo a la concentración encontrada para los elementos estudiados. Contiene la revisión de los años 2008-2010 y 2012 y aunque solamente se anotó una vez la calidad alerta y/o calidad fuera de norma, pudieron tener o no, para los cuatro años la misma clasificación, es decir, el agua de un pozo fue clasificada en calidad alerta en los cuatro años o en uno solo de los años estudiados. El mismo criterio se siguió para FN.

Los pozos localizados en la zona identificada como conejos médanos y cuya agua proviene del acuífero Mesilla se encontraron clasificados en calidad alerta para el mercurio, excepto para el pozo identificado como número 20, lo mismo se observó para el bario. La mitad de los pozos contienen aluminio en la clasificación alerta. Con respecto al arsénico las concentraciones de los pozos se clasificaron en alerta y/o fuera de norma, excepto el número 20. Los pozos 9, 10, 11 y 18 de esa zona contienen cobre en calidad alerta y el 1 y 10 se clasificaron en calidad fuera de norma para el fierro. Los pozos 2, 10, 13, 16, 20, 22 y 23 se clasificaron para el sodio en calidad aceptable y el resto sobrepasó el límite normado.

Otra zona importante es Anapra donde tanto para el bario como para el arsénico la calidad se encontró en alerta para los cuatro pozos ahí localizados. Es importante anotar que todos estos se encontraron FN (Fuera de Norma) en cuanto al sodio. Las concentraciones de mercurio mostraron calidad alerta en los pozos identificados con números 2,3 y 4. Los pozos 1, 2 y 3 se clasificaron en calidad alerta para el plomo y en esta misma clasificación de calidad se encontraron para el manganeso a los pozos 2, 3, y 4.

En el resto de la ciudad el comportamiento encontrado en cuanto a las calidades es muy variable. Sobresalen y puede decirse que la calidad del agua es mas mala en los pozos identificados con los números 15-R, 53-R, 174, 191, 210-R, 217, 221 y 2-Zaragoza, los cuales presentaron calidad alerta y/o fuera de norma en ocho de los elementos estudiados. Asimismo, los identificados con los números 1-RR, 9-R, 11-R, 13-RR, 70-R, 114, 135, 144, 145, 168, 200, 201, 222 y número 11 de Conejos Médanos se clasificaron en alerta y/o fuera de norma en siete de los constituyentes estudiados (tabla 13, mapas 49 y 50).

Tabla 13. Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012

Pozo	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Hg	Pb	Na	Zn
1R		A	A							
1-RR	A	A	A	A		A	FN		A-FN	
5-R		A	A							
5			A		FN					
6			A			FN			FN	
7									FN	
9		A-FN							FN	
9-R		A	A	A	FN	FN	A-FN		FN	
11									FN	
11-R	A	A	A	A		FN	A			
13-RR	A		A	A		A	FN		FN	A
14	A		A	A	FN	FN				
15-R	A	A-FN	A	A	FN	A-FN	A		FN	
16		FN		A				FN		A
16-R			A			FN			FN	
17									FN	
17-R		A	A							
19-R	FN	A	A	A		A			FN	
21		FN							FN	
23		A	A		FN	FN	A			
24		A	A						FN	
28		A	A	A	FN	FN				A
33	FN			A		A				
37	A	A	A		FN	A	FN--A			
38	FN	A	A			A	A			
42-R		A	A	A				FN	A	

Cont... **Tabla 13.** Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012

Pozo	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Hg	Pb	Na	Zn
44						FN				
45		A	A			A	A			
46-R		A	A			A	A			
47		A	A						FN	
47-R		A	A				A			
48		A	A		X	A	A		FN	
49			A			FN				
49-R	A	A	A				A			
50		A	A			A				
50-R		A	A			A	A			
53-R	FN	A	A	A	FN	A	FN		FN	
54-R	A	A	A		FN	FN	A			
55			A		FN					
55-R		A	A							
56							A			
56-R		FN	A							
58	A	A	A			A-FN	A			
59		A	A			FN	A			
60			A		FN	FN	A			
61-R		A	A	A		FN				
62		A	A		FN					
66GEN		A								
66		A	A		FN	FN	FN			
67		A	A			A			FN	
68		A	A			A				
68-R	A	A	A		FN	A				
70			A			A				
70-R	A	A	A	A	FN	A	A-FN			
71-R		A	A	A		A				
72-R		A	A	A	FN	A	A			
73-R		A	A							
74	A	A	A		FN-A		A			
75-R	A	A	A		FN	A				
76		A	A			A	A			
77	FN	A	A		FN		A		FN	
79-R		FN	A						FN	
80AR	FN-A	A	A		FN					
80B		A	A		FN	A	A			
82-R		A	A	A		A	A			
84		A	A				A			

Cont... Tabla 13. Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012

Pozo	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Hg	Pb	Na	Zn
86		A	A			A	A			
87		A	A	A	FN	A	A			
89			A							
88		A	A			A-FN				
89-R			A			A				
90-R		A	A							
90-RR		A	A	A						
91		A	A		FN	FN	A			
92		A	A	A		A	A			
93-R		A	A		FN		A			
94		A	A				A			
95		A	A				A	A		
96		A	A	A			A			
97-R	A	A	A							
98						A				
98-R		A	A			A	A			
99-R		A	A	A	FN		A			
99-RR		A	A							
100		A	A		FN	A				
104		A	A				A			
106		A-FN	A		FN	A	A			
110	A	A	A				A			
111		A	A			A	A	A	FN	
112	A	A	A		FN	FN				
113		A	A			FN	A			
114		A	A	A	FN		A	FN	FN	
115		A-FN	A			A				
116		A	A			A	A-FN			
117		A	A		FN	A	FN--A			
119		A	A			A-FN	A			
120		A	A		FN	A	FN			
121	A	A	A			A	A			
122		A-FN	A				A	A		
124	A	A	A		FN	A	A			
128		A	A			FN				
129		FN	A				FN		FN-A	
130		A-FN	A				A			
131		A	A		FN	A				
133		A	A			FN				
134		A	A			A	FN-A		FN	

Cont... Tabla 13. Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012

Pozo	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Hg	Pb	Na	Zn
135	A	A	A		FN	A	A		FN	
136		A	A				A			
136-R		A	A							
138		A	A	A		A		A		A
139		A	A			FN	A			
140		A	A			A				
141		A	A	A	FN	A				
142		A	A		FN		FN			
143		A	A			A				
144		A	A	A	FN	A	FN	FN		
145	FN	A-FN	A		FN	A	A		FN	
146		A	A			FN	A			
147		A	A	A	FN	A	A			
148		A	A	A		A	A			
149		A	A				A			
150		A	A	A		A	A		A	
151		A	A				FN			
152		A	A				FN			
156	A	A	A				FN			
157		A-FN	A			A	A			
160		A	A				FN			
161	A			A				FN		
163	A	A	A			A-FN				
164		A	A			A	A		FN	
165		A	A	A		A	A			
166		A								
167		A	A	A			A			
168		A	A	A	FN	FN		A		A
169		A	A		FN		A			
170			A			A	A			
171	A	A	A				A			
172		A	A	A		A	FN	A		
174	A-FN	A	A	A	FN	A	FN	A		
176		A	A				A-FN			
177		A	A				A-FN			
178		A	A	A			A-FN			
180	FN	A	A		FN	A				
183		A	A	A	FN		FN			
184		A	A	A	FN	A	A			
185		A	A	A			FN-A			

Cont... **Tabla 13.** Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012

Pozo	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Hg	Pb	Na	Zn
187		A	A				A			
188		A	A	A			A			
190		A	A				A-FN			
191	A	A	A	A	FN	A	FN			A
193	A	A	A	A			A			
194		A	A			A	FN-A			
195		A	A				A		FN	
196	A	A	A				A			
197		A	A	A			A-FN	A		
198	A	A	A	A			A-FN			
199		A	A	A	FN		FN			
200	FN		A	A	FN	A		A		A
201	FN	A	A	A		A	A	A		
201-R							A			
202		A	A	A	FN		FN			
203		A	A							
204		A	A				FN	A		
205	A	A	A		FN					
206		A	A	A		A	FN-A			
207		A	A		FN					
208		A	A				A			
209		A	A				A			
210		A	A	A	FN				FN	
210-R	A	A	A	A	FN	A	A	FN		
212		A	A			FN-A			FN	
213		A	A		FN		A			
215		A	A	A	FN		A			
216		A	A		FN		A	A		
217	A	A	A	A	FN	A	A	A		
218		A	A							
219		A	A	A			A			
221	A-FN		A	A	FN	A	FN	A-FN	FN-A	
222	A	A	A	A		A-FN	A		FN	
223		A	A	A						A
1-ANAPRA		A	A	A		A		A	FN	
2-ANAPRA		A	A				A	A	FN	
3-ANAPRA		A	A		FN	A	A-FN	A	FN	
4-ANAPRA		A	A			A	A		FN	
2-ZARA	A	A	A	A	FN	A	A	A-FN		
3-ZARA		A	A			A	A		FN	

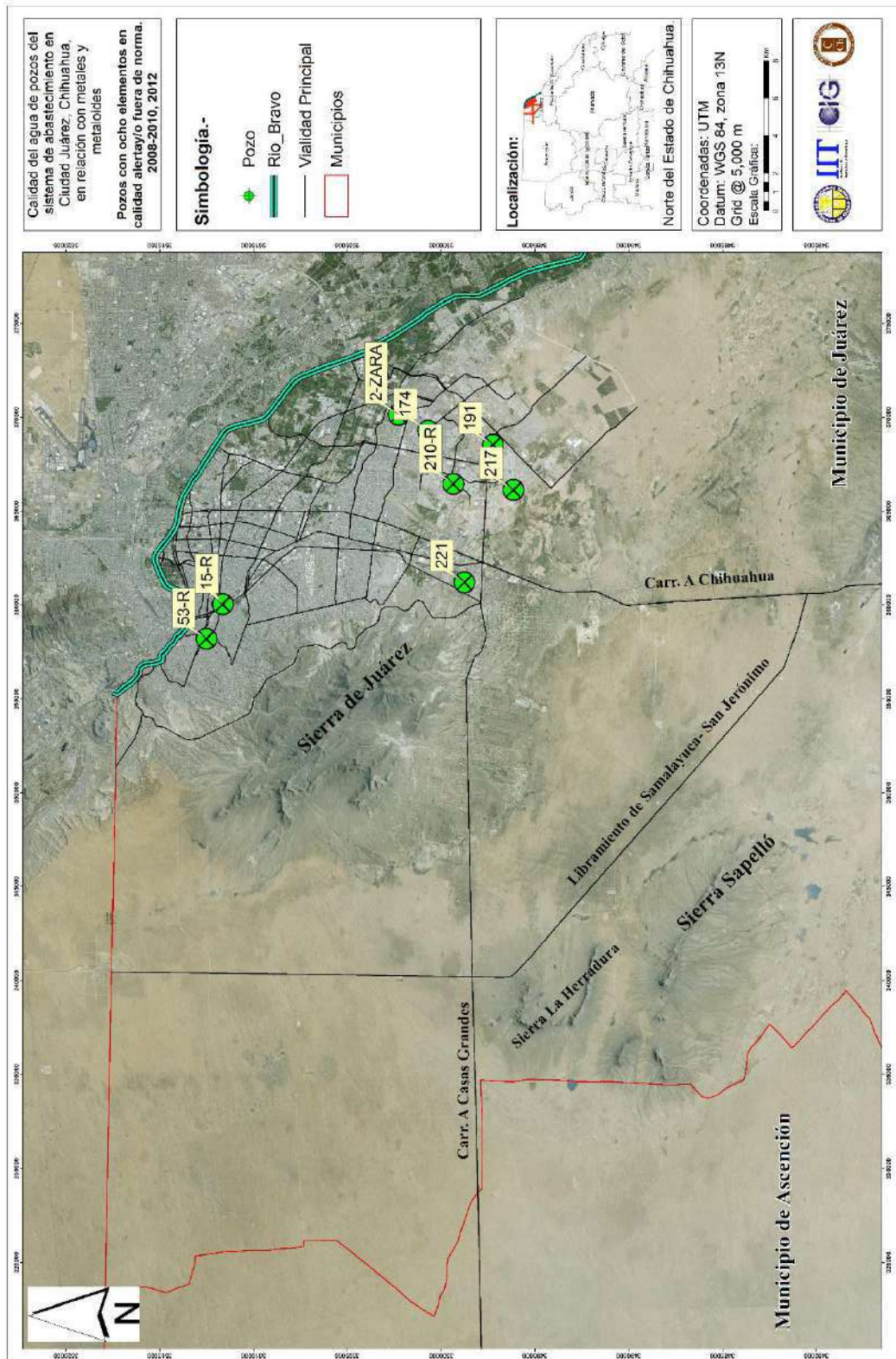
Cont... **Tabla 13.** Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012

Pozo	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Hg	Pb	Na	Zn
4-ZARA		A	A	A					A	
5-ZARA	A	A	A			A	A			
6-ZARA		A	A				A			
7-ZARA		A	A			A	A			
8-ZARA		A	A							
1CM	FN	A	A		FN		A	FN	FN	
2CM		A-FN	A				A			
3CM		A-FN	A				A		FN	
4CM										
5CM		A-FN	A				A		FN	
6CM		A-FN	A				A		FN	
7CM		A-FN	A				A		FN	
8CM										
9CM		FN	A	A			A		FN	
10CM	A	A-FN	A	A	FN		A			
11CM	A	A	A	A			A	FN	FN	
12CM	A	A	A				A		FN	
13CM	A	A	A	A			A			
14CM	A	FN-A	A				A		FN	
15CM	A	A	A				A		FN	
16CM	A	A-FN	A				A			
17CM		A	A				A		FN	
18CM	A	A-FN	A	A			A		FN	
19CM		A	A				A		FN	
20CM										
21CM	A	A-FN	A				A		FN	
22CM	A	A-FN	A				A			
23CM	A	A-FN					A			A
24CM		A-FN	A				A		FN	
25CM		A-FN	A				A		FN	
26CM	A	A-FN	A				A		FN	A
63-R	A	A	A		FN	A	A			
64			A	A	FN	FN	FN-A	FN		
77-R		A	A	A		A			FN	
2REG CAB		A	A							
1REG										
CAB9			A							

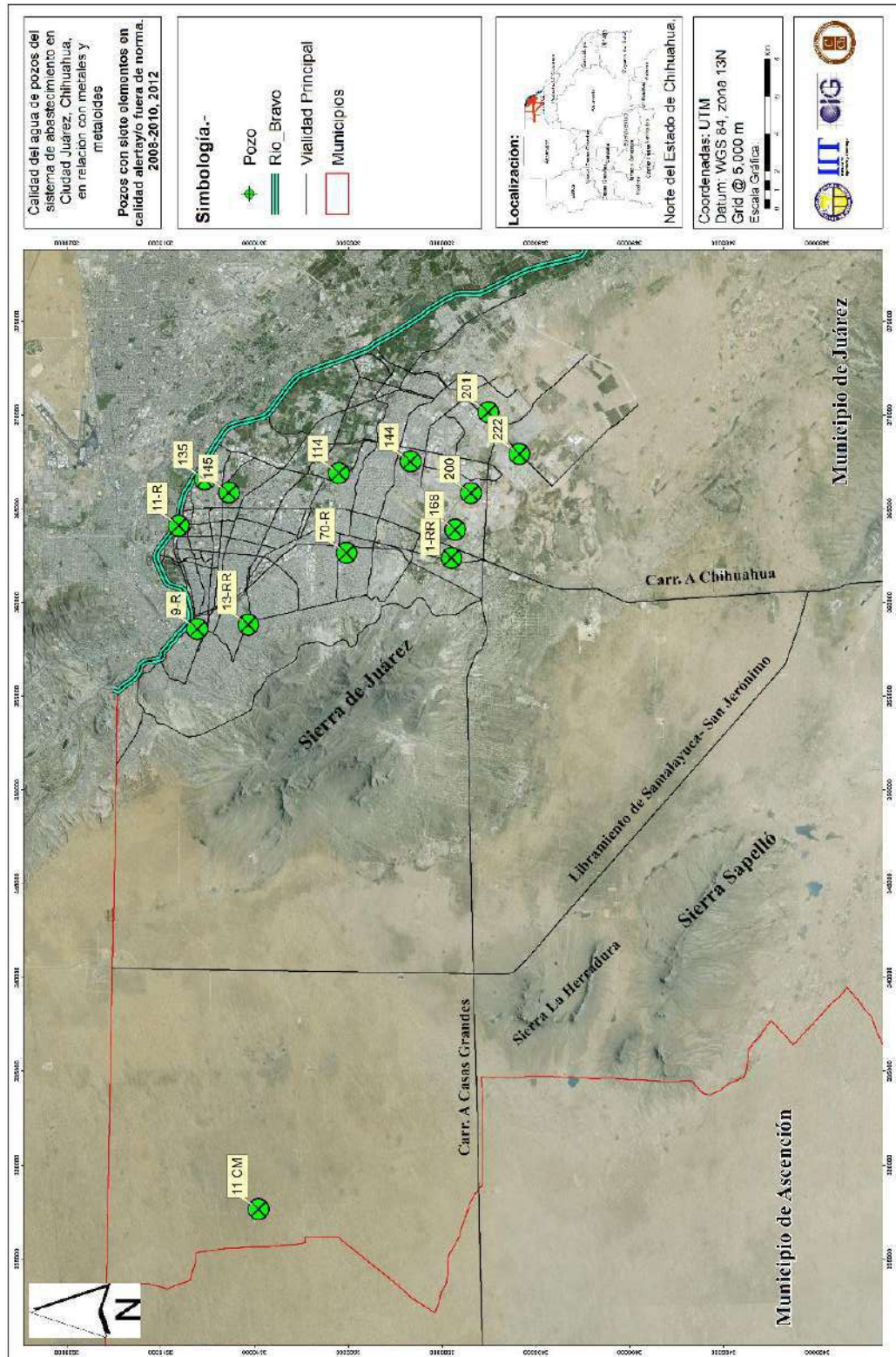
Cont... **Tabla 13.** Pozos en calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) para los diferentes componentes químicos 2008-2010, 2012

Pozo	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Hg	Pb	Na	Zn
39		A	A			A	A			
81		A	A			A	A			
132		A	A			A			FN	
182		A	A				A-FN			
233		FN	A							

Fuente: Elaboración propia con información de la JMAS, 2013.



Mapa 50. Calidad alerta (A) y fuera de norma (FN) en siete de los constituyentes químicos. 2008-2010, 2012



A continuación se muestran las gráficas de tendencia de concentración para los constituyentes con concentraciones fuera de norma (arsénico, aluminio, manganeso, mercurio, plomo, fierro y sodio). Se observa solo para el As una regresión con R^2 muy cercana al 1, con una tendencia ascendente para el año 2016 esperando una concentración de 0.2351 mg/L. El resto de los elementos muestran una mala regresión, debido a valores de concentración muy disparados (figuras 15, 16, 17, 18 y 19).

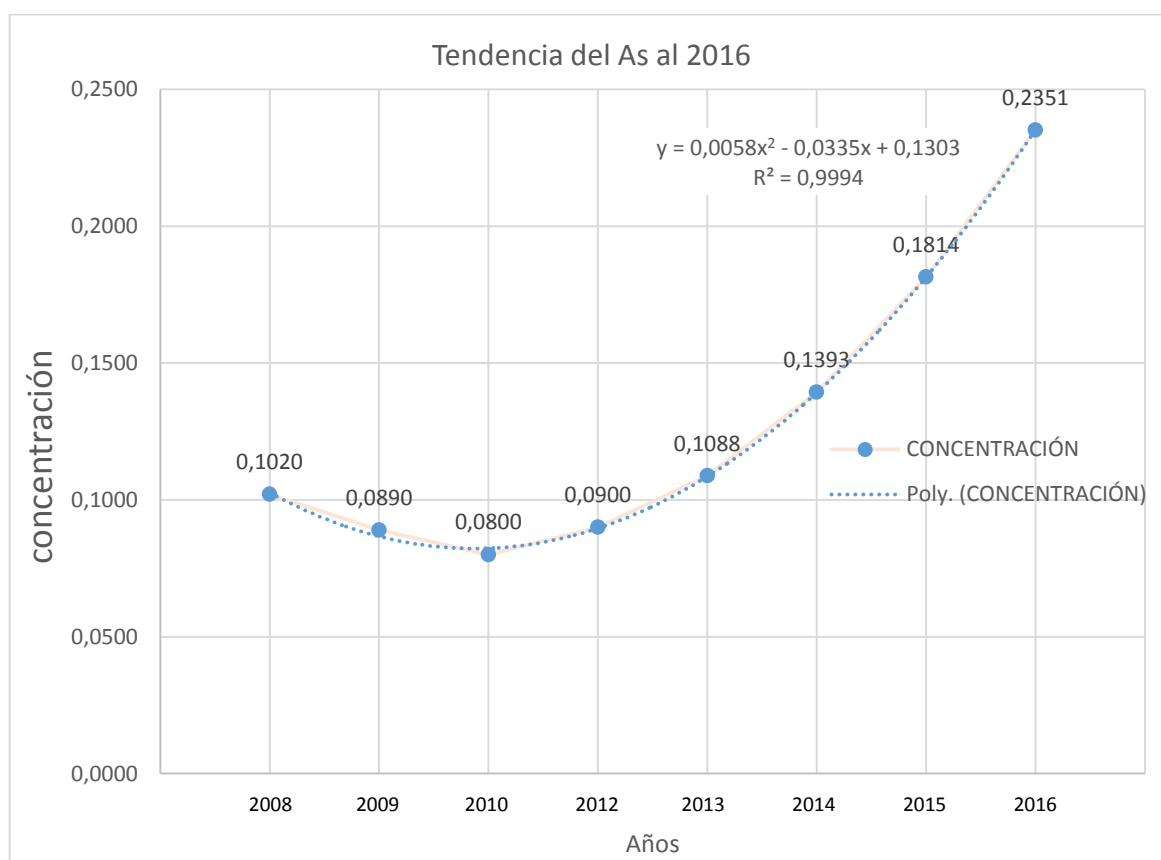


Figura 15. Tendencia del As al año 2016.

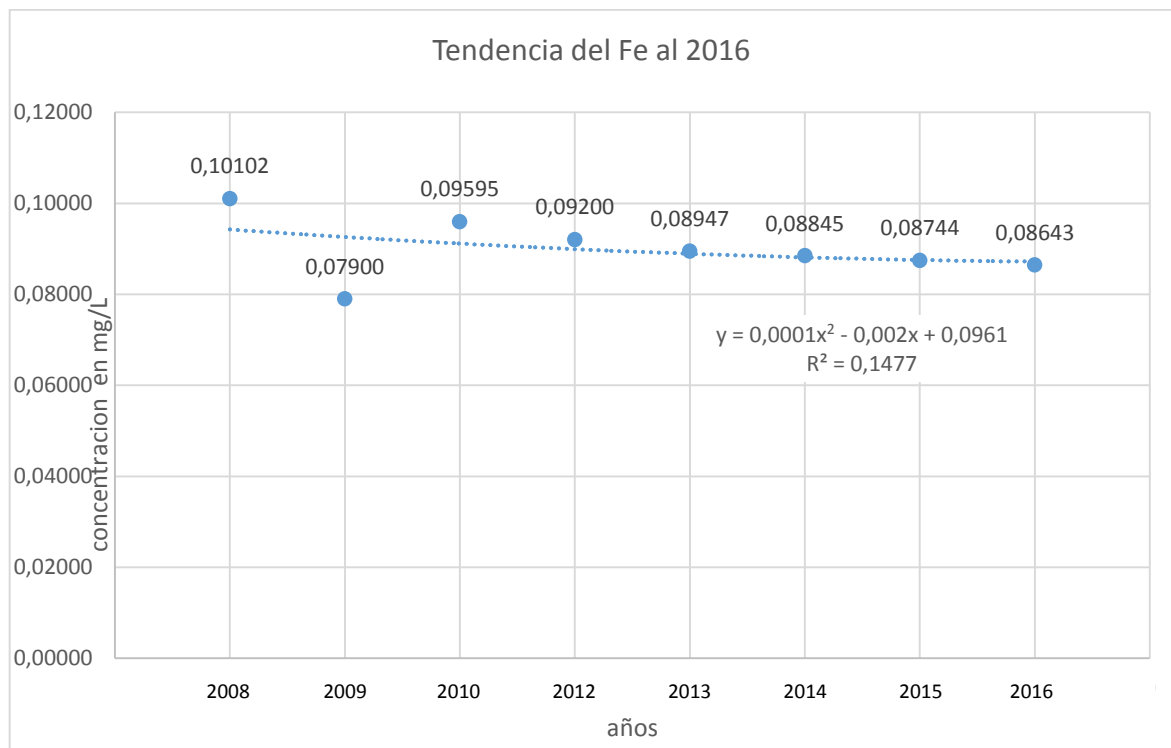


Figura 16. Tendencia del Fe al año 2016.

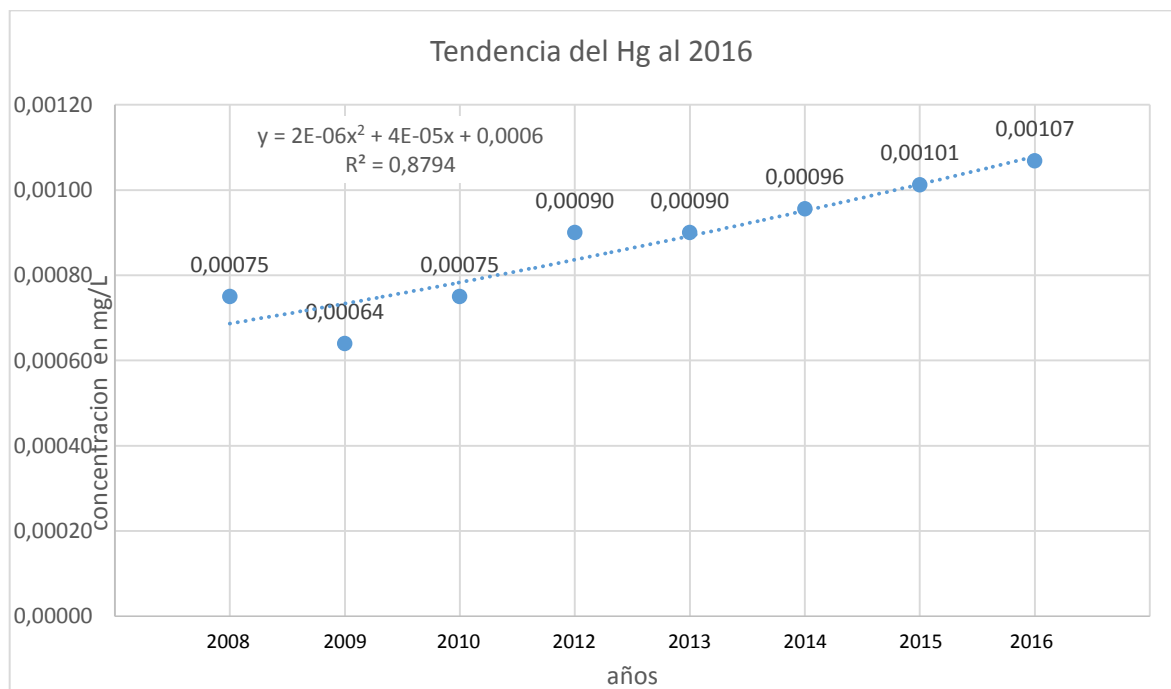


Figura 17. Tendencia del Hg al año 2016.

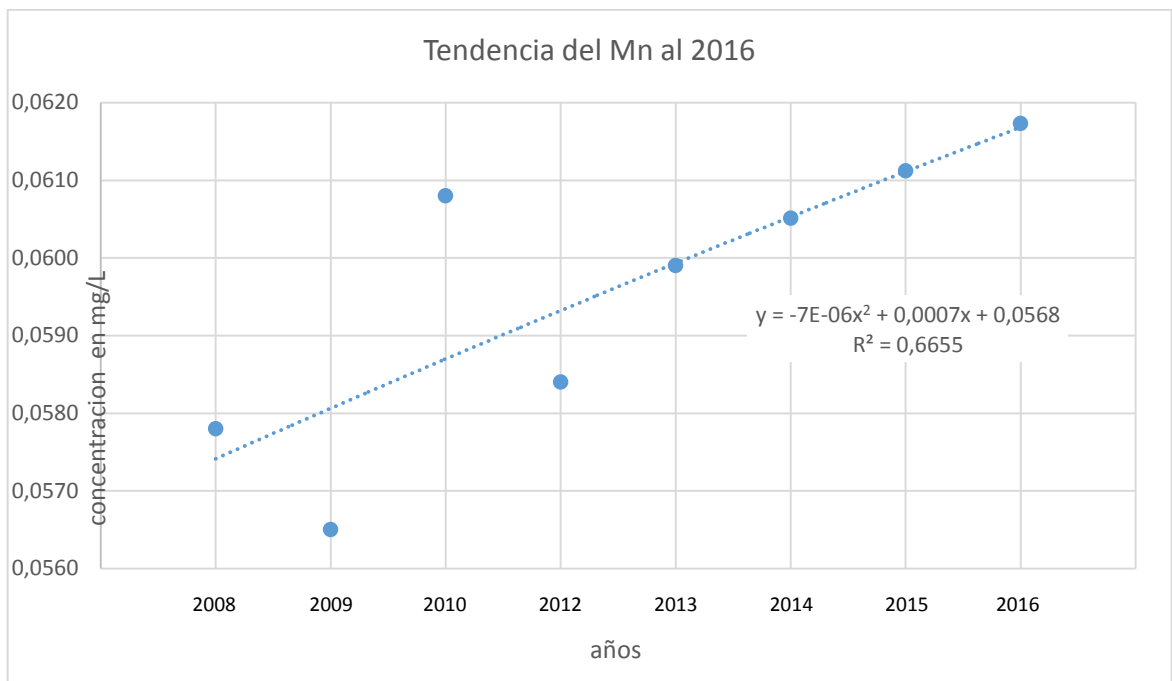


Figura 18. Tendencia del Mn al año 2016.

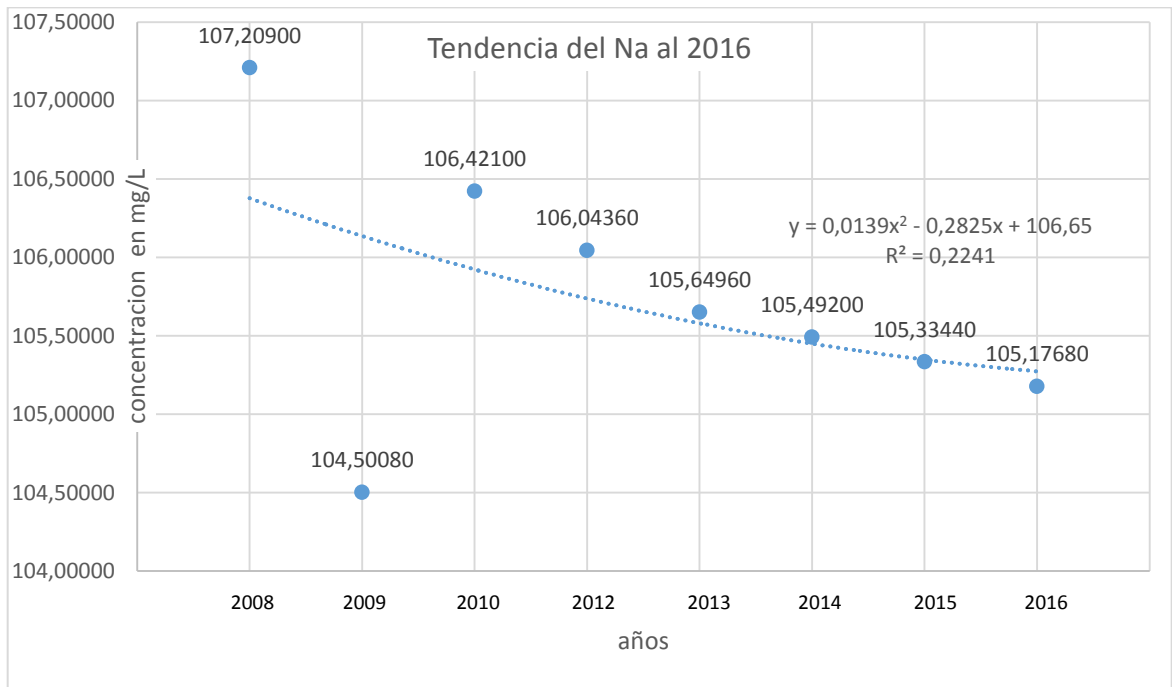


Figura 19. Tendencia del Na al año 2016.

Capítulo IV

Discusión

Dentro de las fortalezas del presente análisis destaca el hecho de ser un estudio científico con relación a la calidad del agua en Ciudad Juárez considerando a los doce metales y metaloides con mayor daño potencial a la salud pública. Hasta antes de esta investigación solo se contaba con reportes puntuales de calidad del agua por parte del organismo operador que imposibilitaban el tener una visión de conjunto de la calidad del vital líquido para toda la ciudad. Seguidamente se cuenta con un documento que será un referente para posteriores estudios de calidad del agua relacionados con evaluación de riesgo, vulnerabilidad, salud pública e ingeniería hidráulica entre otras disciplinas. Finalmente se tienen las bases para pronósticos de corto, mediano y largo plazo en materia de calidad del agua que permitan la adopción de políticas públicas para enfrentar los graves problemas de escasez, contaminación y salud pública.

La originalidad del trabajo no solo se relaciona con los hallazgos de grados de contaminación por la presencia de algunos de los elementos químicos considerados y sus efectos en la salud, sino que también utiliza una metodología sencilla pero efectiva. Esta metodología en una de cuyas partes clasifica los niveles de peligrosidad de las concentraciones de los citados elementos químicos en dentro de la norma, alerta y fuera de norma, permiten un acercamiento a la realidad de la calidad del agua en Ciudad Juárez sin tener que realizar complejos y costosos estudios acerca del tema que tienen poca posibilidad de ser financiados. Este acercamiento con la clasificación anteriormente mencionada puede retomarse como un método serio en diversos problemas de agua y salud

en el contexto de escasez de recursos presupuestales y falta de personal técnico especializado.

La presente investigación sin lugar a dudas será un parte aguas en el conocimiento histórico del agua y su calidad, en nuestra ciudad.

Por otro lado, esta tesis hace énfasis en el único metaloide en la lista de constituyentes químicos estudiados, es decir, el arsénico por ser este un carcinógeno asociado a la sobreexplotación de acuíferos como el Bolsón del Hueco. En 2010 la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), con base en los criterios de la OMS publicó un proyecto de modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, donde recomienda disminuir el límite permisible para el arsénico de 0.025 mg/L a 0.010 mg/L, sin embargo, no tuvo el impacto esperado y no se le dio seguimiento.

La presencia de altos niveles de arsénico en las aguas subterráneas para uso potable tiene importantes consecuencias para la salud humana, México lo reconoce reduciendo sus límites máximos permisibles para agua potable de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud de 0.050 mg/L en el año 2000 a 0.025 en el 2005, por lo que es urgente que sea reducida a 0.010 mg/L, para de esta forma estar acorde con los criterios recomendados por la OMS y darle continuidad al proyecto de modificación de la COFEPRIS. Sin embargo, esto no es un asunto fácil ya que tiene implicaciones logísticas y económicas con un alto grado de complejidad. Aunque un estudio económico sobre las consecuencias que tendría reducir la norma a 0.010 mg/L no ha sido instrumentado por el gobierno federal, es claro que los gastos resultantes de dicha reducción tienen que ser asumidos por la sociedad mexicana en su totalidad y antes de realizar cualquier intento a fin

de definir un nuevo límite permisible de arsénico en agua potable, es indispensable primero determinar la magnitud de los problemas por la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de México, y sobretodo tomar en cuenta que es un carcinógeno.

Con relación a la normatividad internacional se puede observar que hay constituyentes químicos no normados en algunos de los países, asimismo, una diferencia en los límites propios de cada país con respecto a las guías de la OMS ya que, de manera independiente, toman en cuenta circunstancias medioambientales, sociales, culturales, económicas y alimentarias, así como factores que afectan a la exposición potencial (OMS, 2004). Estas normas internacionales dictadas por la OMS, reconocidas como guías en la calidad del agua y la salud de las personas, son utilizadas como base para la elaboración de reglamentos y normas de países de todo el mundo, en vías de desarrollo y altamente industrializados.

Es importante mencionar que para fines de estudios más rigurosos la clasificación adoptada en este estudio de aceptable, alerta y fuera de norma no es una clasificación excluyente del todo ya que, algunos pozos aparecen de un año a otro con cambio de clasificación de calidad, esto puede ser debido no a que el agua haya mejorado o empeorado, sino las imprecisiones en el muestreo, procedimiento y reporte de análisis.

Durante la realización del presente estudio se dio a conocer por diferentes medios que el organismo operador, supuestamente lleva a cabo una mejora en la calidad del agua mediante la mezcla de los flujos de agua de diferentes pozos. En efecto la JMAS cuenta con tanques de almacenamiento o regularización de flujo donde se mezcla el agua de diferentes pozos, sin embargo, la práctica anterior no garantiza del todo la mejora de la calidad del agua porque dicha mezcla se lleva a cabo sin contar con información precisa sobre la

calidad del agua de los pozos y sin determinar las concentraciones finales para los diferentes constituyentes.

Dos situaciones que plantearon un reto a la presente investigación fueron los registros irregulares y el incumplimiento a la frecuencia de análisis establecida en la normatividad. Con respecto al primer punto, durante el presente estudio, se detectó una cantidad importante de registros irregulares como las muestras que no fueron analizadas, que tienen un término genérico LMP, o bien como en el caso del Na cuyo reporte se limita a un valor de 1.789 mg/L cuando el promedio de los años de estudio en la calidad de alerta fue 106.44 y en fuera de norma 296.54 mg/L, entre otras. A la par de estos registros irregulares no se da seguimiento a la normatividad en cuanto a la periodicidad de los análisis, ya que se establece el análisis de una muestra con una frecuencia semestral en la Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-1998, Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público, en su Apéndice Normativo A, relativo a determinaciones de análisis fisicoquímico y examen microbiológico de acuerdo al sitio de muestreo en fuente de abastecimiento subterránea, inclusive, cuando el sitio de muestreo es una mezcla de dos o más tipos de fuentes y/o tanque de almacenamiento y regulación.

En Argentina se tiene conocimiento de que hace más de 100 años se consume agua contaminada con As y a la fecha el problema continua sin solución (Villaamil, E.C., 2015), en Ciudad Juárez debe revisarse el problema para evitar se agudice con repercusiones en la salud. En el estado de Chihuahua se han hecho estudios que indican la presencia del arsénico en el agua subterránea (Espino, M.S., 2009), por lo que se coincide con los

hallazgos de esta investigación. Asimismo, se incluye a México entre los países de América Latina que consumen agua subterránea con niveles de As que ponen en riesgo la salud pública, y en ese estudio se incluye a los Estados Unidos (Castro, M.L., 2006).

Vale la pena mencionar la propuesta de modificaciones a la Ley del Agua y a la Ley de Salud planteada por el Diputado Luis Rodríguez Ginner argumentando que diversas zonas en el Estado de Chihuahua, donde la población se abastece de agua potable proveniente de pozos y norias que superan los LMP para el As, la salud pública está en riesgo (El Tiempo, 2014).

Conclusiones y recomendaciones

El acceso al agua potable es fundamental para la salud y es uno de los derechos humanos básicos, además de ser un componente importante en el diseño de las políticas públicas eficaces para la protección de la salud de la población. La cobertura de este servicio está supeditada a la disponibilidad y aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos. Esto quiere decir que el organismo operador de agua potable y saneamiento debe contar con información completa y precisa sobre la concentración de los constituyentes químicos que requieren un tratamiento para evitar daños a la salud pública.

El presente estudio describió brevemente la situación en relación a la calidad del agua de los pozos de Ciudad Juárez, donde los resultados para algunos de los constituyentes químicos estudiados aunque sean menores al LMP, es preocupante su presencia y plantean la necesidad de identificar y jerarquizar intervenciones en la generación e implementación de nuevas políticas, las cuales seguramente significan desafíos y retos, estos últimos de manera importante en cuanto a recursos económicos. Asimismo, se expone la problemática generada por la sobreexplotación de los acuíferos en una ciudad donde las sequías son constantes y de larga duración por lo que es necesaria una eficiente planeación y administración del agua.

Debido a la importancia que representa el abastecimiento de agua para Ciudad Juárez y los problemas de contaminación asociados a la sobreexplotación, por lo que los programas de muestreo y análisis deben estar sistematizados, lo que facilitaría la recolección de datos y su exploración. La información confiable y sustentada permite la implementación y seguimiento de los programas de vigilancia epidemiológica de carácter centinela que permiten sugerir intervenciones preventivas de manera especial en situaciones

de alarma, de tal forma que esta vigilancia epidemiológica sea clave para la toma de decisiones.

La ciudad está en riesgo de impactos negativos a la salud pública por lo que se requiere la intervención de las autoridades de salud, JMAS y la comunidad, para implementar políticas públicas que incluyan tratamientos *ad hoc* de las aguas.

Las gráficas de tendencias para todos los constituyentes en este estudio están elaboradas con cuatro años de registros, por lo que es recomendable construirlas cada año posterior al último año de estudio, y en general los posteriores para ir calculando las tendencias de acuerdo a las concentraciones encontradas para cada uno de los constituyentes químicos estudiados.

Es importante tomar en cuenta el deterioro de la calidad del agua asociada a la sobreexplotación, además de tener incidencia sobre la salud pública y el medio ambiente, puede representar una disminución efectiva de su disponibilidad, agravándose el problema por los costos y la dificultad, que muchas veces se transforma en imposibilidad, de la limpieza o eliminación de los constituyentes químicos en los acuíferos. Asimismo, es necesaria la investigación en cuanto a entender la manera en cómo se originan ciertos contaminantes, ponderando los encontrados en este estudio en la clasificación de alerta y sobrepasando la normatividad, asimismo, como penetran, migran y se dispersan en los sistemas de agua subterránea, sobretodo, si la intención y la problemática está dirigida a la recuperación del acuífero, sin dejar de lado lo anteriormente mencionado en cuanto a lo costoso y que es además, un proceso de largo plazo.

Es inexcusable dar seguimiento a la normatividad mexicana aplicable en cuanto a la periodicidad de muestreo y análisis, asimismo, los resultados de análisis deberán contener

la concentración encontrada y no simplemente que se encuentra por debajo del límite máximo permisible normado y lo mismo en cuanto a la definición del límite de detección.

Referencias

- ACSA. (2014). La EFSA evalúa el riesgo para la salud de la presencia de cromo en los alimentos y el agua de consumo. Agencia Catalana de Seguridad Alimentaria. Recuperado de <http://www.gencat.cat/salut/acsa/html/es/dir3697/doc36064.html>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2006). Atlanta, GA: United States Department of Health and Human Services, Public Health Service. Recuperado de <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.pdf>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2007). *Toxicological profile for arsenic*. Atlanta, GA: United States Department of Health and Human Services, Public Health Service. Recuperado de <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2012). *Toxicological profile for manganese*. Atlanta, GA: United States Department of Health and Human Services, Public Health Service. Recuperado de <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp151.pdf>
- Albert, L. (1997). Los plaguicidas, el ambiente y la salud. SEMARNAP, México. 162 pp. Centro de Ecodesarrollo, México.
- Arlien, P. & Simonsen, L. (1999). Sistema Nervioso. Agentes químicos neurotóxicos. En J.M. Stellman (Ed.), *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (pp. 7.9-7.14). España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Subdirección General de Publicaciones. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Textos-Online/EnciclopediaOIT/tomo1/7.pdf>
- Arreguín, F.I., Chávez, R., Soto, P. R. & Smedley, P. L. (2012). An overview of arsenic occurrence in the groundwater of México. En J. C. Ng, B. N. Noller, R. Naidu, J.

- Bundschuh & P. Bhattacharya (Eds.), *Understanding the geological and medical interface of arsenic as 2012* (pp. 91-92). Boca Raton, Fl: CRC Press.
- Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie (AEA). (s.f.). *Aluminio y salud: Compuestos de aluminio en tratamientos de aguas*. Recuperado de <http://www.asoc-aluminio.es/support/pdf/aluminio-agua-potable.pdf>
- ATSDR. (2014). *Resumen de Salud Pública: cromo (chromium)*. Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. Recuperado de <http://www.atsdr.cdc.gov/phs.asp?id=60&tid=17>
- Auge, M. (2004). *Vulnerabilidad de acuíferos. Conceptos y métodos*. Recuperado de www.semarnat.gob.mx/...gtz/l-vulnerabilidad-conceptos-auge.pdf
- Auge, M. (2006). Agua subterránea. Deterioro de calidad y reserva. Perfil hidrogeológico La Plata-Argentina. Cátedra de hidrogeología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, Ar. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/...documento_completo.pdf
- Bianchini, F. (2008). *Calidad de agua de Río Tz'alá (municipio de Sipakapa; departamento de San Marcos)* (Estudio técnico). San Marcos, Guatemala: COPAE.
- Breckle, S. W. & Kahle, H. (1992). *Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (Fagussylvatica L.)*. *Vegetatio*, 101, 43-53.
- Bouchard, M. F., Sauvé, S., Barbeau, B., Legrand, M., Brodeur, M. È., Bouffard, T., ... Mergler, D. (2011). Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 119, 138-43. doi: 10.1289/ehp.1002321

- Bouchard, T. J., Jr., & McGue, M. (2003). Genetic and Environmental Influences on Human Psychological Differences, *Journal of Neurobiology*, 54, 4–45. doi: 10.1002/neu.10160
- Buenfil, M., & Flores, N. (2007, Junio). *Determinación de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) presentes en el Río Hondo, Quintana Roo*. VI Congreso Internacional y XII Nacional de Ciencias Ambientales, Chihuahua, México (pp. 435-439).
- Calne, D. B., Chu, N. S., Huang, C. C., Lu, C. S., & Olanow, W. (1994). *Manganism and idiopathic parkinsonism: similarities and differences*. *Neurology*, 44, 1583-1586. doi: 10.1212/WNL.44.9.1583
- Catalán, J., (1999). Contaminación del río grande de celendín por aguas residuales. Metodología Ambiental. Recuperado de http://www.academia.edu/7030942/contaminaci%C3%93n_del_r%C3%83o_grande_de_celend%C3%83n_por_aguas_residuales.
- CCA. (2014). Documento marco: Caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación en América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental. Montreal, Canadá. 58pp.
- Cejudo, R. (2003). *Complejos metálicos de cobre y manganeso con ligandos biológicamente activos* (Tesis doctoral, Universidad de Valencia, España). Recuperado de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10275/cejudo.pdf>
- Chediack, R. (1986). Vigilancia sistemática del ambiente, de los trabajadores y de los ciudadanos en relación a los plaguicidas. En L. A. Albert (Ed.), *Los plaguicidas, el ambiente y la Salud* (pp. 143-165). Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/eco/003106/003106.htm>

- CONAGUA. (2008). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) - Estadísticas del Agua en México, 2008. Glosario de términos. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=89>
- Collaborative on Health and the Environment (CHE). (2002). *Our health and the health of the environment: How are they connected? What can we do to improve both?* Recuperado de <http://www.healthandenvironment.org/articles/doc/109>
- De Sole, P., Rossi, C., Chiarpotto, M., Ciasca, G., Bocca, B., Alimonti, A., ...&Masullo, C. (2013). Possible relationship between Al/ferritin complex and Alzheimer's disease. *Clinical biochemistry*, 46, 89-93. doi:10.1016/j.clinbiochem.2012.10.023
- Dubois, S. (2013). *Niveles de sodio y consumo de agua*. Dieta y Nutrición. Livestrong.com. Recuperado de http://www.livestrong.com/es/niveles-sodio-consumo-info_3555/
- El Tiempo. (2014). Periódico digital. Página local. Chihuahua, Chih. Recuperado de http://www.tiempo.com.mx/_notas/1958280
- Exley, C., & Esiri, M. M. (2006). Severe cerebral congophilicangiopathy coincident with increased brain aluminium in a resident of Camelford, Cornwall, UK. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 77, 877-879. doi:10.1136/jnnp.2005.086553
- Espino, M.S., Y. Barrera & E. Herrera. (2009). *Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México*. Medio ambiente y desarrollo sustentable. Tecnociencia Chihuahua. Vol. III, No. 1. Enero-abril 2009.
- Fagundo, J. R., Monteagudo, V., Rodríguez, M., Leonarte, T., González, P., Suárez, M., & Abraham, A. (2007). *Geoquímica de las aguas subterráneas que drenan carbonatos del intervalo jurásico-Paleógeno*. VII Congreso de Geología. Geomorfología, Carso

- e Hidrogeología. Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Recuperado de <http://www.fagundojr.com/documentos/Articulo%20GEOMIN%20Fagundo.pdf>
- Franco, R. (2012). *Abastecimiento de agua: El caso de Ciudad Juárez, Chihuahua*. Cumbre Binacional de Recursos Hídricos en la Frontera; pasado, presente y futuro.
- Gaceta Innovación (2014). Relacionan arsénico con Diabetes tipo 2. No. 59, Nov.-Dic., 2014. Recuperado de <http://www.foroconsultivo.org.mx/innovacion.gaceta/component/content/article/60-innovadores/77-relacionan-arsenico-con-diabetes-tipo-2>
- Galicia, L., Molina, N., Oropeza, A., Gaona, E., & Juárez, L. (2011). Análisis de la concentración de fluoruro en agua potable de la delegación Tláhuac, Ciudad de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27, 283-289. Recuperado de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rica/article/view/28236>
- Geología. Metales, no metales y metaloides. Recuperado de <https://www.windows2universe.org/earth/geology/metals.html&lang=sp>
- González, M.E., Hernández, C. & Kaehler, J.C. (1994). Determinación de aluminio en el agua potable de Valencia y localidades cercanas. *Ingeniería UC*, 1(3), Recuperado de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a1n3/1-3-4.pdf>
- Herrera, J.M. (2014). Abastecimiento de agua potable, alcantarillado y saneamiento de Ciudad Juárez. Conferencia. Seminario del Agua primer semestre 2014 de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ciudad Juárez, Chihuahua. 28 de febrero de 2014.
- Hick, A. S., Paczkowski, M. G., Gadano, A. B., & Carballo, M. A. (2007). Biomarcadores de genotoxicidad en individuos expuestos al arsénico. *Latin American Journal of*

Pharmacy, 26, 691-699. Recuperado de http://www.latamjpharm.org/resumenes/26/5/LAJOP_26_5-_1_7.pdf

Higueras, P. & Oyarzun, R. (s.f.). *Mineralogía y geoquímica ambiental: Introducción al curso*. Universidad de Castilla-La Mancha. Recuperado de http://www.uclm.es/users-/higueras-/MGA/Tema00_Intro.htm

IGME. (1985). *La composición química de las aguas subterráneas naturales*. Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf

IGME. (2002). *Isotopos ambientales en el ciclo hidrológico: Principios y aplicaciones*.

Guías y manuales. Sección 3: Procesos isotópicos estables en el ciclo del agua. Instituto geológico y minero de España. Ed. W. G. Mook

INE (1998). Instituto Nacional de Ecología. Programa de Gestión de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez. SEMARNAT-INE. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/233/cap3.html>

INECC. (2009). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas>/763-aqre-metales>.

INEGI. (2010). Clave geoestadística 08037. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Juárez, Chihuahua.

JCAS. (2005). *Análisis sobre el uso y manejo de los recursos hidráulicos en el estado de Chihuahua*. Reporte de la Dirección Técnica de la Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (Subdirección Estudios y Proyectos). 17 de octubre de 2005. Recuperado de:

- http://www.tceq.texas.gov/.../chihuahua/presen_ana_l_sobre_usoymanej_recursos_hidr...pdf
- JMAS (2015). Página web: <http://www.jmasjuarez.com/index.php>
- Kuprat, M. (2013). Página web. <http://marionkuprat.com/aluminio-en-el-agua/>
- Lenntech (2014). Hierro en las aguas subterráneas. Recuperado de <http://www.lenntech.es/agua-subterranea/hierro.htm#ixzz3RNOgwDeE>
- Lenntech (2015). Water Treatment Solutions. Recuperado de <http://www.lenntech.es/periodic a/elementos/cr.htm#ixzz3Ww0nYKXC>
- Lenntech. (s.f.). *Tabla Periódica: Manganeso*. Recuperado de <http://www.lenntech.es/-periodica/elementos/mn.htm>
- Luján, J.C. (2009, Noviembre). Ingesta de aluminio al cocinar alimentos y hervir agua con utensilios domésticos. *Tecnológica, Universidad & Empresa*, (32). Recuperado de <http://www.utn.edu.ar/download.aspx?idFile=15291>
- Meza, J., A. Bravo, J. Morales, L. Sánchez, P. Valle, E. Gutiérrez y H. Ledo. (2007). Contenido de metales traza en aguas subterráneas de la región occidental del Lago de Maracaibo, Venezuela. *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, Maracaibo. 30, n especial, disponible en http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254
- Miranda, M. & Caballero L. (2001). Encefalopatía hepática crónica: rol de niveles sanguíneos elevados de manganeso y su relación con lesiones en ganglios basales en la resonancia magnética nuclear de cerebro. *Revista médica de Chile*, 129, 1051-1055. doi: 10.4067/S0034-98872001000900011
- Mora, D., Sánchez, L. C., Del Razo, L. M., González, C. A., Medina, I. M., Robledo, M. L., & Rojas, A. E. (2012). Presencia de arsénico y coliformes en agua potable del

- municipio de Tecuala, Nayarit, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28, 127-135.
- Moyano, A., Mayorga, P., & García-Sánchez, A. (2003). *Contaminación de arsénico en aguas subterráneas de Castilla y León*. III Congreso Iberoamericano De Física Y Química Ambiental, Tlaxcala, México. Recuperado de <http://digitalcsic.es/bitstream/10261/37318-1/CS2-01.pdf>
- Mukherjee, A., Fryar, A. E., & Howell, P. D. (2007). Regional hydrostratigraphy and groundwater flow modeling in the arsenic-affected areas of the western Bengal basin, West Bengal, India. *Hydrogeology Journal*, 15, 1397-1418. doi: 10.1007/s10040-007-0208-7
- Nava-Ruíz, C., & Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 16, 140-47. Recuperado de http://www.archneurocien.org.mx/acervo/pdf/archivos_neurociencias/6Efectosneurotoxicos.pdf
- Navarro, A., Carmona, J.M., & Font, X. (1996). *Contaminación de suelos y aguas subterráneas por vertidos industriales*. Acta Geológica Hispánica. V. 30 n^{os} 1-3, p.49-62.
- Nordberg, G. (1999). Metales: propiedades químicas y toxicidad. En: J.M. Stellman (Ed.), *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (pp. 63.1-63.51). España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Subdirección General de Publicaciones. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>
- Olivas Martín. (2013). Comunicación personal.

- Peter Arlien-Seborg & Leif Simonsen (2001). Agentes químicos neurotóxicos. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. OIT. Cap. 7. Sistema Nervioso.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1995). *Criterio de Salud Ambiental 107: Bario. Guía para la salud y la seguridad*. Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. División Salud y Ambiente. OPS-OMS. Metepec, Estado de México, México.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2003). *Manganese in drinking water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs/quimicos/manganese.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2004). *Informe sobre la salud en el mundo: Cambiemos el rumbo de la historia*. Recuperado de http://www.who.int/entity/whr/2004/-en/report04_es.pdf?ua=1
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2011). *Manganese in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality*. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/manganese.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2012). [http:// www.who.int/workforcealliance/media/news/2012/en/](http://www.who.int/workforcealliance/media/news/2012/en/)
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2014). Temas de salud: Arsénico. Recuperado de <http://www.who.int/topics/arsenic/es>
- Pérez, R. (2011). Efecto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes

de Oca”. Pinar del Río. Cuba. Recuperado de [http://www.ecured.cu/index.php/anexo:efecto de los metales_pesados_en_la_salud_humana](http://www.ecured.cu/index.php/anexo:efecto_de_los_metales_pesados_en_la_salud_humana).

Prestifilippo, J.P. & Rettori, V. (2008). Efectos del Manganeso sobre el eje hipotálamo-hipófiso reproductivo. *Revista de la Sociedad Argentina de Endocrinología Ginecológica y Reproductiva*, 15, 24-29. Recuperada de <http://www.saegre.org.ar/revista/numeros/-2008/n2/3.pdf>

Química del agua. (2014). Recuperado de <http://www.quimicadelagua.com/Quimico.Sodio.html>

Regmi, R., Milne, B.F. & Feldmann, J. (2007). Hydride generation activity of arsenosugars and thioarsenicals. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 388, 775–782. doi: 10.1007/s00216-006-1076-z

Reynolds, K., (2013). La calamidad del Cromo VI. *Agua Latinoamerica*. V13, N5. Recuperado de <http://www.agualatinoamerica.com/column.cfm?T=T&ID=909&AT=T>

Rubio, C., Rodríguez, M.N., Gutiérrez, A., Hardisson A., Ojeda, M.I. (2006). Legislación sobre contaminación por metales pesados en productos pesqueros y en acuicultura. *Alimentaria Revista de tecnología e higiene de los alimentos*, 370, 60-64.

Rondeau, V., Jacqmin-Gadda, H., Commenges, D., Helmer, C., & Dartigues, J. F. (2009). Aluminum and silica in drinking water and the risk of Alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID cohort. *American journal of epidemiology*, 169, 489-496. doi: 10.1093/aje/kwn348

- Salas Plata M., J.A. (2006) Problemática del agua y crecimiento urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. CULCYT, Año 3, No 14-25. Mayo-agosto 2006.
- Salcedo, M.T., Quinte, A., & Zavaleta, D.I. (2014). Concentración de metales pesados en el agua de consumo del Distrito de Huacho, Bing Bang Fautiniano. *Revista Indizada de Investigación Científica de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carreón*. Huacho, Perú. 3 (4). Recuperado de www.huachoenlínea.com
- Sahuquillo, A. (2009). LA importancia de las aguas subterráneas. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Esp. 103 (1), 97-114.
- Sanín, L. H., González, T., Romieu, I., & Hernández, M. (1998). Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud. *Salud pública de México*, 40, 359-368. 47
- Sarabia, R. (2002). Toxicidad y acumulación de cadmio en poblaciones de diferentes especies de Artemia (Tesis doctoral, Universidad de Valencia, España). Recuperado de <http://www.tesisenxarxa.net/bitstream/handle/10803/9485/TesisRaquel.pdf?sequence=1>
- Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J. & Chorus, I. (Eds.). (2006). Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources. World Health Organization. London UK: IWA Publishing. Recuperado en [http://www.who.int/water_sanitation-health/publications/protecting_groundwater/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/protecting_groundwater/en/)
- Secretaría de Salud (SSA). (2001). *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su*

- potabilización. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.-html>
- Secretaría de Salud (SSA). (1998). NOM-179-SSA1-1998. *Vigilancia, evaluación y control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuída por sistemas de abastecimiento público*. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m179ssa18.-html>
- SEMARNAT. 2007. *¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo*. Semarnat. México.Taringa.Net. Recuperado de <http://www.taringa.net/posts/apuntesmonografia/s/definiciondecadaelementodelatablaperiodica.html>
- Trejo, R., & Hernández, V. (2004). Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable. *Revista Conciencia Tecnológica*, 25. Recuperado de <http://www.redalyc.org/-/articulo.oa?id=94402508>
- Uriarte, N.I. (1999). Contaminación del rio grande de celendín por aguas residuales. Metodología ambiental UNC. Recuperado en http://www.academia.edu/7030942/-CONTAMINACION_DEL_RIO_GRANDE_DE_CELENDIN_PO_R_AGUAS_RESIDUALES_I
- Urrea, E. (2002). La neurología ocupacional y la importancia de los factores laborales como causa de patología neurológica. *Acta Neurológica Colombiana*, 18, 94-97. Recuperado de http://www.acnweb.org/acta/2002_18_2_94.pdf
- UHU, (s/f). Los metales como contaminantes. Universidad de Huelva. Area de Biología Celular. Departamento de Biología Ambiental y Salud Pública. Facultad de Ciencias

- experimentales de la Universidad de Huelva, Es. Recuperado de www.uhu.es/francisco.cordoba/asignaturas/postgrado/.../metales.pdf
- UPC, (2014) Catedra Unesco de sostenibilidad. Recuperado de https://portalsostenibilidad.upc.edu/detall_02.php?numapartat=2&id=18&numopcn=2#dalt
- Valdivia, C.A. (2013). Sobreexplotación del agua subterránea en la ciudad e México: Perspectivas y política pública. F F y L- Colegio de Geografía- UNAM. Noviembre de 2013.
- Velázquez, M.A., Pimentel, J.L., (2008). Plomo y metales tóxicos en las aguas subterráneas de la cuenca del Río Duero. Recuperado de www.crim.unam.mx/drupal/crimArchivos/.../45_Pimentel_Equihua.pdf
- Vega, S. (2002). Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México. *En Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; AIDIS. Memorias. México, D.F, FEMISCA.* pp. 1-15. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/104.pdf>
- Vicente, J. (2010). Biodisponibilidad de metales pesados en dos ecosistemas acuáticos de la costa suratlántica andaluza afectadas por contaminación difusa. Tesis Doctoral. Universidad de Cadiz.
- Villaamil, E. C. (2015). Hidroarsenicismo crónico regional endémico en Argentina. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana.* Vol 49. No.1. La Plata.
- WHO, News 2012. World Health Organization. Articles and news reports.
- WHO, 2006. World Health Organization. Protecting Groundwater for Health. Managing the Quality of Drinking- water sources. IWA Publishing, London, UK,

