



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ÁREA: INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS
EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR NITRATOS
Y NITRITOS, ASÍ COMO ALGUNOS METALES, EN LA
SUBCUENCA CENTRAL DEL RÍO SONORA, MÉXICO.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA

ING. DAGOBERTO BURGOS FLORES

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	5
General.....	5
Específicos.....	5
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
Antecedentes.....	7
Cuenca.....	7
Características fisiográficas.....	8
Comportamiento hidrológico.....	8
Subcuenca.....	9
Características fisiográficas.....	9
Comportamiento hidrológico.....	9
Cauce principal.....	10
Tramo del cauce de la subcuenca en estudio.....	10
Evaluación de zonas con mayor riesgo ambiental en Sonora.....	11
Actividades antropogénicas.....	11
Actividades mineras en Sonora.....	12
Actividades ganaderas en Sonora.....	13
Actividades agrícolas.....	13
Características y clasificación de los metales.....	13
Propiedades químicas.....	14
Origen y abundancia en la tierra.....	15
Toxicidad y comportamiento de los metales pesados.....	15
Físicas y fisicoquímicas.....	16
Biológicas.....	16

TABLA DE CONTENIDO (Continuación)

	Página
Transporte y distribución en medios acuosos.....	17
Características y clasificación de los nitratos.....	18
Origen de los nitratos.....	19
Abundancia de los nitratos.....	20
Transporte y distribución en medios acuosos.....	20
Contaminación del medio ambiente por nitratos.....	21
Aspectos tóxicos de los nitratos.....	22
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
Justificación y descripción del trabajo.....	23
Propuesta de actividades para este trabajo.....	24
Descripción del área de estudio.....	25
Topografía general de la cuenca.....	25
Geología y vegetación general de la cuenca.....	27
Descripción hidrográfica general de la cuenca.....	28
Procedimiento.....	30
Selección del área de estudio (subcuenca).....	30
Ubicación y cantidad de los puntos de muestreo.....	32
Procedimiento de colecta de muestras.....	33
Técnicas Analíticas.....	37
Parámetros seleccionados para ser evaluados.....	38
Análisis de laboratorio.....	38
Control de calidad.....	40
Diseño de experimentos y análisis estadístico.....	43
Hipótesis nula y alternativa.....	43
Elección de la prueba estadística para el análisis.....	44
Análisis Multivariado; Método de Componentes Principales.	44

TABLA DE CONTENIDO (Continuación)

	Página
RESULTADOS; ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	56
Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial.....	57
Parámetros físicos.....	57
Parámetros químicos.....	59
Nutrientes.....	66
Parámetros químicos (metales) del agua superficial.....	68
Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua subterránea...	72
Parámetros físicos.....	72
Parámetros químicos.....	77
Nutrientes.....	81
Parámetros químicos (metales) del agua subterránea.....	82
Control de calidad.....	84
Limpieza de los equipos de muestreo.....	84
Procedimiento de calibración y frecuencia.....	87
Indicadores de calidad de datos.....	88
Balance de aniones-cationes.....	89
Caracterización de las aguas.....	94
Agua superficial.....	94
Agua subterránea.....	101
Comparación entre los cuerpos de agua superficial y subterránea.....	101
Análisis estadístico.....	104
Primer muestreo del agua superficial.....	106
Segundo muestreo del agua superficial.....	127
Tercer muestreo del agua superficial.....	139
Cuarto muestreo del agua superficial.....	151
Primer muestreo del agua subterránea.....	162
Segundo muestreo del agua subterránea.....	173

TABLA DE CONTENIDO (Continuación)

	Página
Análisis comparativo de los resultados de los metales con otros estudios.....	182
Resultados de estudios anteriores.....	183
Resultados de las comparaciones.....	187
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	188
Conclusiones.....	188
Recomendaciones.....	194
BIBLIOGRAFÍA.....	196
ANEXO A: Bitácora fotográfica de los muestreos.....	204

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Muestra la ubicación del Estado de Sonora, así como el área general de la cuenca del río Sonora, San Miguel y Zanjón.....	26
2	Muestra la cuenca general del río Sonora, desde su nacimiento hasta la desembocadura en las presas “El Molinito” y Abelardo L. Rodríguez, así mismo se aprecian las subcuencas de los ríos San Miguel y Zanjón.....	29
3	Se delimita la subcuenca, objeto de este estudio, la cual se encuentra ubicada en la parte central de la cuenca general del Río Sonora.....	31
4	Se especifica la ubicación de los puntos de muestreo: Puntos azules, desde Arizpe (estaciones 1 y 2), hasta Ures (estación 8)...	35
5	Clasificación del agua basada en los porcentajes relativos de equivalentes por millón. El punto A representa una agua cálcico-bicarbonatada. El punto B, representa una agua cálcico-sódico-clorurada. El punto C un agua Sódico-cálcico-magnésico-clorurada-sulfatada.....	95
6	Caracterización del agua superficial del Río Sonora (primer muestreo), utilizando el diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest.....	96
7	Caracterización del agua superficial del Río Sonora (segundo Muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest.....	98

LISTA DE FIGURAS
(continuación)

Figura	Página
8 Caracterización del agua superficial del Río Sonora (tercer Muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest.....	99
9 Caracterización del agua superficial del Río Sonora (cuarto Muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y de la nomenclatura de Davis y De Wiest.....	100
10 Caracterización del agua subterránea del Río Sonora, (primer Muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest.....	102
11 Caracterización del agua subterránea del Río Sonora (segundo muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest.....	103
12 Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (primer muestreo).....	124
13 Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Primer muestreo del agua superficial.....	126

LISTA DE FIGURAS
(continuación)

Figura	Página
14	Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (segundo muestreo)..... 136
15	Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Segundo muestreo del agua superficial..... 138
16	Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (tercer muestreo)..... 148
17	Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Tercer muestreo del agua superficial..... 150
18	Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (cuarto muestreo)..... 159
19	Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Cuarto muestreo del agua superficial..... 161

LISTA DE FIGURAS
(continuación)

Figura		Página
20	Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua subterránea (primer muestreo).....	170
21	Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Primer muestreo del agua subterránea.....	171
22	Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua subterránea (segundo muestreo).....	180
23	Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Segundo muestreo del agua subterránea.....	181

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1 Ubicación geográfica y altura de las estaciones seleccionadas.....	34
2 Análisis inorgánico en el agua superficial y subterránea del Río Sonora.....	39
3 Resultados correspondientes al primer muestreo (3 de Septiembre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: Físicos, Químicos y Nutrientes.....	62
4 Resultados correspondientes al segundo muestreo (29 de octubre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: Físicos, Químicos y Nutrientes.....	63
5 Resultados correspondientes al tercer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: Físicos, Químicos y Nutrientes.....	64
6 Resultados correspondientes al cuarto muestreo (28 de abril del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: Físicos, Químicos y Nutrientes.....	65

LISTA DE TABLAS
(continuación)

Tabla	Página	
7	Resultados correspondientes al primer muestreo (3 de septiembre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales).....	73
8	Resultados correspondientes al segundo muestreo (29 de Octubre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales).....	74
9	Resultados correspondientes al tercer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales).....	75
10	Resultados correspondientes al cuarto muestreo (28 de abril del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales).....	76
11	Resultados correspondientes al primer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua subterránea del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (pozo 1) y Ures (pozo 3). Parámetros: Físicos, Químicos y Nutrientes.....	79

LISTA DE TABLAS
(continuación)

Tabla	Página
12 Resultados correspondientes al segundo muestreo (28 de abril del 2000) del agua subterránea del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (pozo 1) y Ures (pozo 3). Parámetros: Físicos, Químicos y Nutrientes.....	80
13 Resultados correspondientes al primer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua subterránea de la cuenca del Río Sonora, en los pozos de los poblados de: Arizpe (pozo 1), Aconchi (pozo 2) y Ures (pozo 3). Parámetros Químicos (metales).....	85
14 Resultados correspondientes al segundo muestreo (28 de abril del 2000) del agua subterránea de la cuenca del Río Sonora, en los pozos de los poblados de: Arizpe (pozo 1), Aconchi (pozo 2) y Ures (pozo 3). Parámetros Químicos (metales).....	86
15 Resultados del balance de cationes y aniones, correspondientes al agua superficial de los muestreos: primero y segundo.....	91
16 Resultados del balance de cationes y aniones, correspondientes al agua superficial de los muestreos: tercero y cuarto.....	92
17 Resultados del balance de cationes y aniones, correspondientes al agua subterránea de los muestreos: primero y segundo.....	93
18 Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros: físicos, químicos y nutrientes. Primer muestreo del agua superficial.....	107

LISTA DE TABLAS
(continuación)

Tabla	Página
19 Cálculo de la matriz de Covarianza (S), de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes. Primer muestreo del agua superficial.....	109
20 Valores propios y proporción de la variación explicada. Primer muestreo del agua superficial (cálculos a partir de la matriz de covarianza; S).....	110
21 Vectores propios de la matriz de Covarianza, de parámetros: físicos, químicos y nutrientes. Correspondientes al primer muestreo, del agua superficial.....	112
22 Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de covarianza correspondientes al primer muestreo, del agua superficial.....	113
23 Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes. Primer muestreo del agua superficial del Río Sonora.....	116
24 Valores propios y proporción de la variación explicada. Agua superficial, del primer muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R).....	118
25 Vectores propios de la matriz de correlación, del primer muestreo, del agua superficial	120

LISTA DE TABLAS
(continuación)

Tabla	Página
26 Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al primer muestreo del agua superficial.....	121
27 Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua superficial).....	124
28 Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua superficial).....	126
29 Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial (segundo muestreo).....	128
30 Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros; físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al segundo muestreo del agua superficial del Río Sonora.....	130
31 Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua superficial, del segundo muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R).....	131
32 Vectores propios de la matriz de correlación, del segundo muestreo, del agua superficial	133

LISTA DE TABLAS
(continuación)

Tabla	Pag.
33 Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al segundo muestreo del agua superficial.....	134
34 Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (segundo muestreo, agua superficial).....	136
35 Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (segundo muestreo, agua superficial).....	138
36 Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial (tercer muestreo).....	140
37 Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al tercer muestreo del agua superficial del Río Sonora.....	142
38 Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua superficial, del tercer muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R).....	143
39 Vectores propios de la matriz de correlación, del tercer muestreo del agua superficial	145

LISTA DE TABLAS

(continuación)

Tabla	Página
40 Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al tercer muestreo del agua superficial.....	146
41 Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (tercer muestreo, agua superficial).....	148
42 Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (tercer muestreo, agua superficial).....	150
43 Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial (cuarto muestreo).....	152
44 Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al cuarto muestreo del agua superficial del Río Sonora.....	153
45 Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua superficial, del cuarto muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R).....	155
46 Vectores propios de la matriz de correlación, del cuarto muestreo del agua superficial	156

LISTA DE TABLAS
(continuación)

Tabla	Página
47 Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al cuarto muestreo del agua superficial.....	157
48 Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (cuarto muestreo, agua superficial).....	159
49 Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes. (cuarto muestreo, agua superficial).....	161
50 Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua subterránea (primer muestreo).....	163
51 Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al primer muestreo del agua subterránea del Río Sonora.....	164
52 Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua subterránea, del primer muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R).....	166
53 Vectores propios de la matriz de correlación, del primer muestreo del agua subterránea	167

LISTA DE TABLAS

(continuación)

Tabla	Pag.
54 Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al primer muestreo del agua subterránea.....	168
55 Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua subterránea).....	170
56 Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua subterránea).....	171
57 Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua subterránea (segundo muestreo).....	172
58 Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros; físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al segundo muestreo del agua subterránea del Río Sonora.....	174
59 Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua subterránea, del segundo muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R).....	176
60 Vectores propios de la matriz de correlación, del segundo muestreo del agua subterránea.....	177

LISTA DE TABLAS

(continuación)

Tabla	Pag.
61 Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al segundo muestreo del agua subterránea.....	178
62 Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (segundo muestreo, agua subterránea).....	180
63 Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (segundo muestreo, agua subterránea).....	181
64 Concentraciones máximas y mínimas de metales, correspondientes a los muestreos, tanto de agua superficial como subterránea del Río Sonora.....	186

RESUMEN

Se llevó a cabo una serie de cuatro muestreos sistemáticos (uno por cada estación del año) en el agua superficial del Río Sonora, y dos de agua subterránea de la misma zona, para buscar indicios de un impacto ambiental negativo por la generación de nitratos y nitritos debido a las actividades ganaderas, agrícolas y domésticas, en la parte central de la cuenca de este Río (desde Arizpe hasta Ures), así como la acumulación de algunos metales en las partes bajas de cuenca, derivados de actividades industriales. Por antecedentes, se ha determinado que la ingestión de agua que contiene concentraciones altas de nitratos (> 10 mg/L: NOM-127-SSA1-1994; EPA, 1976) y nitritos (> 0.05 mg/L, NOM-127-SSA1-1994; > 1.0 mg/L EPA, 1976), puede causar afecciones a la salud humana, propiciando el origen de enfermedades como metahemoglobinemia infantil (cianosis; coloración azul negruzca o lívida de la piel), así como cáncer en niños y adultos, también se le atribuye que causa daños en los riñones e hígado (San Martín, 1975; Freeze y Cherry., 1979; Pacheco-Ávila y col., 1997).

Los resultados encontrados revelan una constante presencia de estos compuestos en los cuerpos de agua de la zona estudiada, sin embargo al comparar las concentraciones encontradas en los análisis correspondientes de las muestras, con los límites máximos permisibles señalados en las normas antes mencionadas, no hay impacto ambiental negativo por estos nutrientes: nitratos (como nitrógeno) y nitritos (como nitrógeno). En el análisis de las muestras se utilizaron los métodos de la EPA (Environmental Protection Agency, 1983), por ser los más aceptados, dado que son los más completos y validados oficialmente en el plano internacional. Sin embargo al analizar estos resultados desde un enfoque de caracterización de aguas, así como por medio de una metodología estadística, y llevar a cabo comparaciones entre los grupos de muestras tomadas, se encontró que existen diferencias significativas entre éstas, lo cual es un indicador de que estos compuestos influyen en la calidad de los cuerpos de agua y el entorno a estos.

INTRODUCCIÓN

La contaminación es la impregnación del aire, el agua o el suelo con productos que afectan la salud y la calidad de vida del hombre, así como el funcionamiento natural de los ecosistemas. Este proceso ha sido gradual y sistemático, convirtiéndose en uno de los mayores problemas de nuestros tiempos. Las principales fuentes de contaminación de la atmósfera, son causadas por; emisiones industriales, incineradoras, motores de combustión interna y otras. Por otro lado, la contaminación del agua, los ríos, los lagos, los mares y los suelos, ha sido causada por: residuos domésticos, urbanos, nucleares e industriales.

La contaminación de los medios acuáticos ha llamado poderosamente la atención de grupos ecologistas y de los gobiernos, debido a que la demanda de agua fresca y potable es cada día más apremiante en el ámbito mundial. A pesar de los esfuerzos que se han llevado a cabo, aún existe mucho por hacer en este rubro, ya que se siguen contaminando tanto los mantos de aguas superficiales (ríos, lagos, presas), así como los mantos subterráneos (acuíferos).

Las formas de contaminación del agua, en cualquiera de sus medios, se debe principalmente a las actividades relacionadas con el hombre, es decir las actividades antropogénicas, mismas que son muy variadas. Particularmente en este trabajo se le dará mayor énfasis a las relacionadas con las mineras, domésticas, ganaderas y agrícolas.

De las actividades mencionadas anteriormente, las mineras son las que han sido mayormente vigiladas y estudiadas, de las cuales se desprenden una gran cantidad de trabajos relacionados con la toxicidad de sus desechos y el deterioro de los medios acuáticos. Gracias a estos estudios se ha logrado crear una serie de procedimientos correctivos para remediar tanto los suelos como los entornos acuáticos.

Por otro lado, las actividades domésticas generan aguas residuales, que al ser desechadas en lagunas de oxidación, en el mejor de los casos, o directamente en los arroyos, origina la contaminación tanto de los cuerpos superficiales de agua, como los subterráneos. Al igual que las actividades mineras, este tipo de aguas han sido objeto de numerosos estudios, de tal forma que al ser tratadas, puedan aprovecharse de nuevo con fines de riego.

Sin embargo, se tienen otro tipo de actividades, que hasta cierto punto han pasado desapercibidas, tales como: ganaderas, porcícolas, avícolas y agrícolas, las cuales no se han relacionado directamente con la contaminación de los mantos acuíferos, tanto superficiales como subterráneos. Recientemente se han llevado a cabo estudios puntuales para determinar la capacidad de contaminación de éstas en los cuerpos de agua.

De acuerdo al INEGI (1990), y la Asociación Ganadera de Sonora, se sabe que existe una gran actividad ganadera en la región del Río Sonora, y a la fecha solo se ha llevado a cabo un estudio puntual para determinar las concentraciones de nitratos, entre otros, de las tomas domiciliarias de algunos poblados de la región central (Tiscareño-Alvarado, 1993), cuyos valores encontrados sobrepasaron las normas oficiales establecidas.

Se considera que estos nutrientes llegaron a los pozos mediante procesos de lixiviación, y que son producto de las heces fecales del ganado vacuno, bovino, porcícola, así como de granjas avícolas, entre otros, ya que estas actividades producen altas concentraciones de nitratos (Pacheco-Ávila y col., 1997).

La actividad agrícola no es de un uso preponderante en la región central del Río Sonora, pero lo suficiente para suponer, que el uso de fertilizantes sea el causante de incrementar las concentraciones de nitratos.

Los residuos animales tienen un alto contenido en nitrógeno, fósforo y materia consumidora de oxígeno, y a menudo albergan organismos patógenos. Los residuos de los criaderos industriales se eliminan en tierra por contención, lo que representa un gran peligro debido a la filtración y las escorrentías de dichos residuos.

Los nitratos son tóxicos cuando se encuentran en cantidades excesivas en el agua, causando metahemoglobinemia (síndrome de los niños azules) en lactantes alimentados con biberón; además existe la posibilidad de que en concentraciones muy elevadas de nitratos se produzcan nitrosaminas que son cancerígenas en el estómago (Albert, 1990). El valor máximo admisible para aguas de consumo humano es de 10 ppm de acuerdo con las Normas Internacionales para la calidad del agua potable (Santos-Vázquez y Ramírez-Herrera, 1997).

Las manifestaciones clínicas de la metahemoglobinemia son: cianosis (que persiste aunque se administre oxígeno), tendencia a fatigarse fácilmente, disnea y vértigo, además hay una disminución de la capacidad de la sangre para transportar el oxígeno (Boletín de la O.S.P., 1989).

Los nitratos contenidos en los alimentos y en el agua, en concentraciones bajas, no son tóxicos en el hombre ya que son absorbidos y excretados rápidamente, pero en determinadas condiciones los nitratos son reducidos por las bacterias en la boca y en el intestino produciendo nitritos, los cuales perturban procesos fisiológicos vitales como la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que conlleva a la cianosis y en algunas ocasiones a la muerte (Pacheco-Ávila y col., 1997).

Los lagos son especialmente vulnerables a la contaminación. Un problema importante es la eutrofización, que se produce cuando el agua se enriquece de modo artificial con nutrientes, lo que ocasiona un crecimiento

anormal de las plantas. Los fertilizantes químicos arrastrados por el agua desde los campos de cultivo pueden ser los responsables.

El proceso de eutrofización puede ocasionar problemas estéticos, como mal sabor y olor, y un cúmulo de algas o verdín desagradable a la vista, así como un crecimiento denso de las plantas con raíces, el agotamiento del oxígeno en las aguas más profundas y la acumulación de sedimentos en el fondo de los lagos. Así mismo suceden otros cambios químicos, tales como la precipitación del carbonato de calcio en las aguas duras.

Este estudio es de vital importancia para determinar el verdadero impacto de las actividades anteriormente expuestas, en la zona rural de Sonora, ya que los antecedentes en otras partes del país y del mundo, solo sirven para especular lo que sucede en el área propuesta. Se estima que el problema generado por estos nutrientes, es mucho mayor en el área rural que en las zonas urbanas, debido a que las primeras se abastecen directamente de los pozos, con poco control de calidad en el tratamiento, mientras que en las segundas, se supone que se tiene todo un esquema de potabilización para el consumo humano.

OBJETIVOS

General

Evaluar el riesgo ambiental de los mantos acuosos por contaminación debido a nitratos y nitritos, derivados de las actividades ganaderas, agrícolas, y domésticas (descargas de aguas residuales en los lechos de los ríos y mantos de agua subterránea). Proponer métodos para la remediación de los sitios contaminados.

Secundarios

Determinar las concentraciones de algunos metales en las muestras de agua superficial y subterránea, y comparar éstas con las Normas Ambientales vigentes, tanto nacionales como internacionales. Así mismo se llevará a cabo una comparación con otros estudios realizados en la misma zona.

Específicos

Seleccionar un punto de muestreo en la parte alta de la cuenca (aguas arriba del poblado de Arizpe), y otro en la parte baja de la misma (aguas abajo del poblado de Ures), de tal forma que se pueda conocer con precisión las características del agua antes de ingresar a la cuenca y como sale de ésta.

Seleccionar los sitios más susceptibles de ser contaminados en las áreas rurales de la cuenca del Río Sonora, con mayor índice de las actividades antes mencionadas; Arizpe (aguas abajo del poblado), Aconchi, Sinoquipe, Baviácora Mazocahui y Ures.

Seleccionar otros puntos de muestreo con nulas posibilidades de ser impactados por este tipo de actividades, es decir, que en los alrededores de estos puntos no se tengan las actividades antes mencionadas, de tal forma que sean áreas de bajas probabilidades de riesgo ambiental; Arizpe (aguas arriba del poblado) y Tetuachi.

Se tomarán muestras de agua superficial y subterránea. La colecta de muestras se realizará en cuatro ocasiones para el agua superficial, preferentemente una por cada estación del año, y al menos un monitoreo puntual de aguas subterráneas (pozos). Llevar a cabo los análisis inorgánicos correspondientes: físicos, químicos, nitratos y nitritos, de las muestras, y conocer de esta forma los rangos y concentraciones de estos parámetros.

Para detectar las diferencias significativas en los resultados de los distintos muestreos (variación entre las estaciones del año) y los cambios espaciales (variación entre los puntos de muestreo), se realizará un análisis estadístico.

Tomar los resultados de los parámetros y compararlos con los especificados por las normas oficiales, para de esta forma llegar a las conclusiones y emitir las recomendaciones pertinentes. Finalmente proponer una metodología para la remediación de los sitios contaminados.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Antecedentes

La contaminación a los ríos, lagos, y en general a mantos de aguas tanto superficiales como subterráneos, debido a las actividades mineras ha sido estudiada y documentada en diversas ocasiones en el ámbito estatal, nacional y mundial. Aquí se pone de manifiesto los problemas de salud de la población humana causado por los altos contenidos, en el agua para consumo humano y animal, de algunos metales pesados tales como: cobre, manganeso, cadmio, zinc, hierro, plomo, entre otros (Gibbs, 1977; Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987; Elder, 1988; Förstner y Muller, 1973).

Las actividades propias del ser humano también son un detonante en el deterioro del medio ambiente, específicamente en el rubro de desechos de aguas negras, ya que una gran cantidad de poblaciones; tanto rurales como urbanas, de nuestro estado, direccionan las descargas de estas aguas a los lechos de los ríos y presas (Varela-Romero, 1992). Aunado a esto existen algunas lagunas de oxidación que no tienen la preparación impermeable suficiente para evitar la contaminación de los mantos acuíferos (Franco-Martínez, 1995).

Las actividades agrícolas y ganaderas tanto de la zona de estudio como las áreas que se utilizan para estos fines en el plano nacional, tienden a generar condiciones de riesgo de salud para el humano, motivado por el uso de herbicidas, fertilizantes y las excretas del ganado bovino, porcino, entre otros, ya que estos contienen altos contenidos de nitratos (Freeze y Cherry, 1979).

Cuenca

La cuenca es el área que contribuye al escurrimiento pluvial de las partes topográficamente altas hacia las bajas, y estas características físicas determinan

la influencia sobre la respuesta hidrológica de la misma (Linsley y col., 1984; Hjalmarson, 1987). La dispersión de contaminantes en una cuenca sigue el mismo principio que los escurrimientos pluviales, pero con la introducción de ciertos factores de solubilidad y de flujo, de tal forma que es posible el monitoreo del arrastre de estos contaminantes hacia los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos (Rainwater, 1988), así como la contaminación del suelo y subsuelo en este proceso de transporte (Burnett y Frind, 1987).

Características fisiográficas

Dentro del análisis hidrológico se han propuesto muchas formas numéricas para describir las diferentes características de una cuenca hidrográficas, tales como: número de orden del cauce, densidad de drenaje, relaciones de área, forma de la cuenca, pendiente del cauce, pendiente de la cuenca, entre otros, lo cual en forma conjunta proporciona información sobre la capacidad de respuesta en cuanto a la relación tiempo-espacio de la cuenca (Linsley y col., 1984; Hjalmarson, 1987; Remenieras, 1974).

Comportamiento hidrológico

El comportamiento hidrológico de una cuenca se rige, además de las características fisiográficas, por algunos procesos del ciclo hidrológico del agua, tales como: la evapotranspiración, tipos de suelo y subsuelo y vegetación, entre otros (Davis y De Wiest, 1971). Por medio de esta metodología es posible cuantificar los volúmenes generados por una precipitación en un punto determinado de la cuenca (Burges, 1986; Burgos-Flores, 1988 y 1995; Hjalmarson, 1987; Sortillón-Valenzuela, 1987). De igual forma es posible cuantificar el arrastre de los contaminantes hacia los cuerpos de aguas superficiales, subterráneos y suelos (Burnett y Frind, 1987; Rainwater, 1988).

Subcuenca

La mayoría de las teorías sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas se han aplicado en áreas grandes. Un ejemplo es la cuenca del Río Sonora, San Miguel y Zanjón que tienen en su conjunto una superficie de 21,000 km² (Sortillón-Valenzuela, 1987), y la cuenca del Río Mayo es de 13,000 km² (Burgos-Flores, 1988). Sin embargo, la respuesta hidrológica tanto pluvial como la de dispersión de los contaminantes (Rainwater, 1988) se torna más compleja cuanto mayor es el área. Razón por la cual es aconsejable fragmentar una superficie en subcuencas, de tal forma que los resultados sean más confiables. Una vez que se han analizado todas y cada una de ellas, se elabora una sumatoria de los volúmenes para así conocer el escurrimiento total en la salida de la cuenca o en cualquier parte de la misma (Burnett y Frind, 1987; Linsley, 1986; Sortillón-Valenzuela, 1987; Burgos-Flores, 1988).

Características fisiográficas

Las formas numéricas utilizadas en una cuenca no fragmentada se aplican en el caso de una porción de dicha cuenca, es decir una subcuenca, pero los resultados que se obtienen en la variación tiempo-espacio son más rápidos y confiables (Ditmars y col., 1987). Esto da pauta a que se analice con mayor profundidad, ya que para ello se proponen hidrogramas unitarios (Aparicio-Montes, 1989; Linsley y col., 1984; Remenieras, 1974), en el cual se introducen los parámetros con las características particulares de cada superficie, los cuales pudieran ser muy distintos de los parámetros generales de la cuenca (Linsley y col., 1984; Linsley, 1986).

Comportamiento hidrológico

Con el advenimiento de nuevas tecnologías aplicadas a la computación, se ha logrado realizar programas de cómputo denominados simuladores

(Ditmars y col., 1987) los cuales han cobrado un gran auge, debido a lo confiable y rápido de la información resultante. Por lo tanto, actualmente es posible manejar mucha mayor sofisticación en los programas, que en décadas anteriores. En la rama de la hidrología se puede simular con más eficacia los complejos fenómenos que lleva a cabo la naturaleza; ciclo hidrológico (Davis y De Wiest, 1971), pero de una forma más específica que es la subcuenca o un área determinada de una región (Linsley y col., 1984; Sortillón-Valenzuela, 1987). Si en un momento dado se desea un procedimiento menos complejo que pueda llevarse a cabo sin simuladores sofisticados ni equipo de vanguardia, pero con el sacrificio de un porcentaje de confiabilidad (para anteproyectos), existe una metodología para ello (Band, 1986).

Cauce principal

Los cauces de los ríos captan las escorrentías de las precipitaciones que ocurren dentro de la cuenca, por lo tanto es aquí en donde se colocan obras de control para monitoreo del caudal derivado de una lluvia (Hjalmarson, 1987). Cabe recalcar que éstos no captan la totalidad de la escorrentía, ya que una parte se consume antes de llegar a ellos, debido a que una porción es retenida por la vegetación, otra se percola al subsuelo alimentando los acuíferos y otro tanto evapora. Debido a este proceso los cauces solamente reciben los excedentes de las escorrentías superficiales (Davis y De Wiest., 1971; Linsley y col., 1984; Remenieras, 1974).

Tramo del cauce de la subcuenca en estudio

Se han llevado a cabo algunos estudios para determinar si la respuesta hidrológica de la cuenca hacia el cauce principal es distinta de la que se tendría si se fragmenta éste en partes. De esta forma se tiene la respuesta hidrológica de una subcuenca hacia el tramo correspondiente, y en definitiva, en la mayoría

de los estudios se concuerda que los resultados son mucho más confiables en los tramos, que en la totalidad del cauce (Aparicio-Montes, 1989; Burgos-Flores, 1995). Cuando se habla de un tramo, también se refiere a un tributario del cauce principal, o un tributario del tributario (orden de corriente), y de esta forma se obtienen resultados tan detallados como sea necesario (Band, 1986; Burgos-Flores, 1988 y 1995; Davis y De Wiest, 1971; Linsley, 1986; Sortillón-Valenzuela, 1987).

Evaluación de zonas con mayor riesgo ambiental en Sonora

“La tierra no debe ser un desierto inerte y silencioso, el jardín negro de nuestras peores fantasías. El hombre, animal racional y conciencia moral, debe defender el derecho a la existencia de las otras criaturas, y no ser su verdugo... En este mundo hay espacio para todas las formas de vida que en él se han manifestado. El hombre cada día se multiplica y quiere más sitio para sus ambiciones y necesidades, de manera que arrasa con selvas y bosques, contamina y depreda ríos, lagos y mares, y al hacerlo acaba con aquello que anda, nada, vuela y reptá..., es un desarrollo negativo, un progreso hacia la muerte...” (Homero Aridjis. Poeta y novelista mexicano). De la descripción anterior, se capta en forma muy elocuente la capacidad destructiva del hombre para con la naturaleza, afortunadamente con la normatividad que se ha creado en años recientes, se ha intentado frenar el avance de la contaminación en todos los ámbitos. Este trabajo es reflejo de esa necesidad de ayudar a la restauración del medio ambiente, y el enfoque se dirigirá hacia las actividades antropogénicas: mineras, ganaderas y agrícolas.

Actividades antropogénicas

Estas actividades se atribuyen directamente al ser humano, cuya dinámica; productiva, no productiva, procesos sociales y las alteraciones en el

patrón cultural, son causantes de contaminación. Dentro de las primeras se engloban las siguientes: explotación de los recursos renovables y no renovables, la agricultura, la industria, entre otras. Por otro lado, se tienen las no productivas tales como; el transporte, actividades domésticas y los servicios (Albert, 1990).

Dentro de las actividades domésticas se tienen las aguas residuales, que al ser depositadas en mantos de aguas superficiales; tales como las lagunas de oxidación, o directamente en los arroyos, origina la contaminación tanto de los cuerpos superficiales de agua, como los subterráneos (Dix, 1981). Por otro lado, se tienen las aguas industriales que al modificarse sus propiedades mediante los procesos propios de las industrias, son desechadas en condiciones similares a las aguas residuales domésticas (S.E.D.U.E., 1988).

Actividades mineras en Sonora

El Estado de Sonora, rico en yacimientos cupríferos, tiene una gran actividad minera, sobresaliendo las explotaciones de Nacozari y Minera de Cananea. Éstas se ubican en el nacimiento de los ríos; San Pedro, que desemboca en el Río Gila en Estados Unidos (Burgos-Flores, 1998; Kulatilake y col., 1994; Meza-Lopez, 1994); y Río Sonora, cuyo escurrimiento se capta en las presas El Molinito Y Abelardo L. Rodríguez (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987). De igual forma se tiene el Río Yaqui, cuyas aguas descargan en la presa El Novillo.

Estos tres ríos abastecen agua a más de la mitad del territorio sonorense, razón por la cual cobra importancia el monitoreo constante de la calidad de las aguas, sedimento y suelos. A la fecha se han llevado a cabo algunos proyectos tendientes a conocer las concentraciones de metales pesados en ellos. El Río Sonora, el cual es el objeto del presente trabajo, se ha monitoreado en la parte norte, muy cerca a la minera de Cananea y ha resultado con concentraciones

altas de metales tales como: cobre, plomo, zinc, hierro, manganeso, sulfatos (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987).

Actividades ganaderas en Sonora

Debido a la información estadística emitida por el INEGI (1990), y la Asociación Ganadera de Sonora, se sabe que existe una gran actividad ganadera en la región del Río Sonora. A la fecha solo se ha llevado a cabo un estudio puntual para determinar el grado de contaminación, que se tiene en la región central, producto de las heces fecales del ganado; vacuno, bovino, porcícola, así como de granjas avícolas, entre otros. Este tipo de actividades produce altas concentraciones de nitratos (Tiscareño-Alvarado, 1993). Sin embargo se tienen antecedentes de estudios llevados a cabo en otras regiones del país y del extranjero, con actividades preponderantemente ganaderas, en los cuales se concluye la alta incidencia de enfermedades derivados del nitrato (Davis y De Wiest., 1971; Pacheco-Ávila y col., 1997; Santos-Vázquez y Ramírez-Herrera, 1997).

Actividades agrícolas

La actividad agrícola no es de un uso preponderante en la región del río Sonora, pero lo suficiente para suponer que el uso de fertilizantes sea el causante de incrementar las concentraciones de nitratos (Freeze Cherry, 1979; Pacheco-Ávila y col., 1997; Tiscareño-Alvarado, 1993).

Características y clasificación de los metales

Debido a la gran variedad de metales que existen en forma natural en la tierra, y a los generados por actividades antropogénicas, se requiere agruparlos

para fines prácticos de acuerdo a sus características, las cuales son: químicas, por abundancia, por densidad y por origen (Pérez-Tello, 1991).

Las particularidades en la estructura de los metales predeterminan sus propiedades físicas características tales como: ductilidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, transparencia y el brillo metálico. Por otro lado, la estructura de los átomos de los metales predetermina no solamente las propiedades físicas sino sus propiedades químicas generales (Jodakov y col., 1986).

Propiedades químicas

Las propiedades químicas de un elemento pueden explicarse por su configuración electrónica, de este modo se distribuyen en la tabla periódica los metales y el resto de los elementos. Por lo tanto esta clasificación divide a los metales en alcalinos, lantánidos y actínidos (Pérez-Tello, 1991).

A pesar de su gran diversidad todas las reacciones químicas de los metales pertenecen a las de oxidación-reducción y pueden ser tan solo dos tipos: de combinación y sustitución. En las reacciones químicas los metales son capaces de ceder electrones; es decir, intervenir como reductores, presentando en los compuestos formados únicamente el grado positivo de oxidación (Colín, 1980; Jodakov y col., 1986; Tiburcio-Munive, 1999).

Un complejo metálico o un compuesto de coordinación es formado por la asociación de un átomo metálico o ion y cualquier otra especie química, llamada ligando, el cuál puede ser un anión o una molécula polar (Moore y Ramamoorthy, 1984). Algunos complejos son estructuras bastante estables y pueden permanecer no cargados en una secuencia de reacciones químicas o físicas.

Los ligandos pueden ser unidentados, los cuales proveen solamente un par de electrones, por ejemplo simples aniones como cloruros o amonios. Por otro lado los ligandos multidentados contienen más de un átomo donador, por ejemplo la Etilendiamina que actúa como ligando bidentado (Colín, 1980; Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987; Moore y Ramamoorthy, 1984).

Origen y abundancia en la tierra

De acuerdo al criterio de abundancia se tienen dos tipos de elementos: traza y abundantes. Los correspondientes al primer grupo son aquellos metales cuya concentración en la corteza terrestre es menor a 0.1 % (1000 ppm), mientras que los metales del segundo superan al 0.1%. Entre los metales traza se encuentran: el plomo, cadmio, zinc, manganeso, níquel y cobre, mientras que los elementos abundantes son: sodio, potasio, magnesio y calcio (Gómez-Alvarez, 1993).

En función de la clasificación anterior, los metales traza se dividen, de acuerdo a su origen, en litogénicos o geoquímicos y antropogénicos o sintetizados por el hombre (Förstner y Salomons, 1980). Entre los primeros se encuentran el zirconio, rubidio, y cesio, mientras que los antropogénicos son; cromo, cobalto, níquel, cobre, cadmio, zinc, mercurio y plomo (Pérez-Tello, 1991).

Toxicidad de los metales pesados

La contaminación ambiental tiene lugar de muchas formas: plaguicidas, detergentes, partículas, entre otros. Más recientemente, los metales tóxicos se han identificado como una nueva clase de contaminantes, quizá más peligrosa para el ambiente y medios acuáticos (Stoker y Seager, 1981)

Físicas y fisicoquímicas

Entre las variantes físicas que tienden a modificar el grado de toxicidad de los elementos, se encuentra la luz, temperatura y disponibilidad. La disponibilidad está dada por la abundancia (proveniente de fuentes naturales y antropogénicas) del elemento y por su forma química (Pérez-Tello, 1991). Por otro lado, se ha encontrado que la temperatura influye en el metabolismo de los organismos, lo que origina una probable aceleración de la actividad metabólica, y, por último, el efecto de la luz ocasiona que algunos elementos sufran reacciones fotoquímicas que puedan transformarlos en especies con mayor o menor toxicidad (Péres, 1980).

Debido a que las propiedades químicas de un elemento dependen de su configuración electrónica, la toxicidad de un metal dado será diferente según su estado de oxidación. A este respecto, numerosos estudios han demostrado que los iones metálicos libres son las especies más tóxicas, en tanto que los complejos fuertes y los metales asociados a partículas coloidales se consideran no tóxicos. Por otro lado, el pH del medio circundante altera el número de oxidación de un elemento, debido a la presencia de iones hidrógeno, mismos que causan una interacción entre estos y los electrones del ion metálico, lo cual afecta indirectamente el poder tóxico de un metal (Nieboer y Richardson, 1980).

Biológicas

Los metales son esenciales para la operación de numerosos procesos biológicos fundamentales. Los metales biológicamente importantes van desde los muy abundantes tales como: Na, K, Mg y Ca, mismos que constituyen más del 99% del contenido total de iones metálicos en los organismos vivos (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987; Stoker y Seager, 1981). Por otro lado, se tienen los metales "traza": Mn, Co, Mo, Fe y Zn, los cuales se asocian a

las estructuras proteínicas en numerosas moléculas (Moore y Ramamoorthy, 1984; Pérez-Tello, 1991; Stoker y Seager, 1981).

En un sistema viviente, las concentraciones de los iones metálicos y sus complejos son controlados dentro de límites muy reducidos. La deficiencia de cualquier ion metálico trastorna el funcionamiento de un sistema biológico, por ejemplo, la deficiencia de zinc origina una actividad enzimática limitada con el consiguiente trastorno de los procesos metabólicos normales (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987). Por el contrario, algunos organismos no pueden tolerar concentraciones extraordinarias de metales, por ejemplo, si se da un envenenamiento por hierro ocasiona un afección llamada Siderosis. En cambio, otros como el plomo, arsénico y el mercurio, que aparentemente no tiene ninguna actividad biológica benéfica, producen efectos tóxicos (Stoker y Seager, 1981).

Hoy en día existe una gran cantidad de información sobre los efectos dañinos de los metales en los mamíferos, especialmente el hombre. Se tiene documentado, con suficiente detalle, cada uno de estos elementos y los efectos que producen sobre los órganos internos del cuerpo humano, y el listado de las enfermedades que causan es interminable.

Transporte y distribución en medios acuosos

Los metales pesados pueden estar presentes en la naturaleza de diversas formas, sin embargo, solo pueden ser absorbidos por los vegetales si se encuentran disueltos en el agua. De aquí parte la cadena alimenticia del medio acuático (Pérez-Tello, 1991).

De lo anterior se desprende que el agua es el principal medio de transporte de los metales, los cuales pueden encontrarse solubles como iones

libres, complejos, pares iónicos o como iones inorgánicos (Stoker y Seager, 1981).

La solubilidad de una sustancia depende principalmente de dos factores: la energía reticular del sólido y la energía de hidratación de los iones (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987; Rainwater, 1988). La energía reticular es una medida de la atracción eléctrica entre los iones con carga opuesta; cuanto más pequeños sean los iones y la distancia entre ellos, mayor será su carga, entonces la energía reticular es mayor, originado con esto una mayor estabilidad en el cristal. La energía de hidratación es una medida de atracción de los iones hacia las moléculas polares del agua, por lo tanto esta atracción depende de la carga y de las dimensiones de los iones (Colín, 1980).

Características y clasificación de los nitratos

Los nitratos son caracterizados en su mayoría por el ácido nítrico, el cual se obtiene comercialmente por la acción del ácido sulfúrico sobre nitrato de sodio. También se puede preparar por oxidación catalítica del amoníaco. Es un ácido fuerte y un agente oxidante poderoso. Sobre la piel produce una coloración amarillenta al reaccionar con ciertas proteínas y formar ácido xantoproteico amarillo. Se emplean en síntesis químicas, en la nitración de materiales orgánicos para formar compuestos nitrogenados (compuestos que tienen un grupo NO_2) y en la fabricación de tintes y explosivos (Enciclopedia Encarta, 1998).

Las sales del ácido nítrico se denominan nitratos. El nitrato de potasio, o salitre, y el nitrato de sodio son los nitratos más importantes comercialmente. Casi todos los nitratos son solubles en agua. Una de las excepciones es el subnitrato de bismuto ($\text{BiONO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) utilizado en medicina para el tratamiento de trastornos intestinales. El amito!, un potente explosivo, es una mezcla de nitrato

de amonio y trinitrotolueno (TNT). La reacción del ácido nítrico con compuestos orgánicos produce importantes nitratos, como la nitroglicerina y la nitrocelulosa. Los nitratos de calcio, sodio, potasio y amonio se emplean como fertilizantes que proporcionan nitrógeno para el crecimiento de las plantas (Enciclopedia Encarta, 1998).

Origen de los nitratos

Aunque las rocas ígneas contienen pequeñas cantidades de nitrato soluble, o de amoníaco, la mayor parte del ion nitrato presente en las aguas naturales tiene un origen orgánico o procede de elementos químicos de origen agrícola o industrial (Davis y De Wiest, 1971).

Algunas plantas, como la alfalfa y los guisantes, poseen una fauna bacteriana que habita en los nódulos de sus raíces y que fija el nitrógeno gaseoso de la atmósfera, de tal forma que los nitratos originados por este proceso exceden generalmente las necesidades de las plantas. De esta manera se tiene siempre, una existencia de nitrato en exceso disponible para el lavado edafológico de las aguas infiltradas, que descienden hacia las formaciones acuíferas (Davis y De Wiest, 1971).

La agricultura, la ganadería comercial y las granjas avícolas, son la fuente de muchos contaminantes orgánicos e inorgánicos de las aguas superficiales y subterráneas. Estos contaminantes incluyen tanto sedimentos procedentes de la erosión de las tierras de cultivo como compuestos de fósforo y nitrógeno que, en parte, proceden de los residuos animales y los fertilizantes comerciales (Santos-Vázquez y Ramírez-Herrera, 1997).

Los residuos animales tienen un alto contenido en nitrógeno, fósforo y materia consumidora de oxígeno, y a menudo albergan organismos patógenos. Los residuos de los criaderos industriales se eliminan en tierra por contención,

por lo que el principal peligro que representan es el de la filtración y las escorrentías (Pacheco-Ávila y col., 1997).

Una fuente importante de nitratos, son las excretas de los animales agrícolas; por ejemplo un novillo de 450 Kg. excreta alrededor de 43 kg/nitrógeno/año, por lo tanto un hato de 3200 cabezas producirá 1400 ton. anuales, equivalente a 260,000 personas (Pacheco-Ávila, 1999).

Abundancia de los nitratos

Las concentraciones más frecuentes de ion nitrato oscilan en un rango de 0.1 a 0.3 ppm en el caso de las aguas de lluvia, y hasta un máximo de unos 600 ppm en el caso de aguas subterráneas que han atravesado zonas donde se utilizan en abundancia los abonos nitrogenados, o zonas donde existen acumulaciones de estiércol y demás desechos orgánicos animales. Las aguas subterráneas normales contienen entre 0.1 y 10.0 ppm (Davis y De Wiest, 1971).

Transporte y distribución en medios acuosos

Los nitratos son altamente solubles. Únicamente pueden ser movilizados de las aguas naturales a través de la actividad orgánica o mediante los procesos de evaporación (Davis y De Wiest, 1971).

El nitrógeno es un constituyente fundamental de las proteínas de todos los organismos vivos. Cuando la materia orgánica se descompone por la acción bacteriana las proteínas se transforman sucesivamente en aminoácidos, amoníaco, nitritos y, finalmente en nitratos. Algunos de los nitratos así originados pueden ser posteriormente lavados por el agua que percola a través del suelo, llegando de este modo a alcanzar las aguas subterráneas (Davis y De Wiest, 1971).

Contaminación del medio ambiente por nitratos

Los efectos que se derivan de los procesos involucrados en las actividades ganadera y porcícola, entre otros, se clasifican en términos de la contaminación del aire, del suelo y del agua (Pacheco-Ávila y col., 1997).

En la contaminación del aire, el polvo es un factor detonante, ya que la gran densidad de animales en los criaderos y los residuos de forraje de plantas generan cierta cantidad de polvo en las instalaciones, el cual puede contener concentraciones de proteínas, materia fecal, endotoxinas bacterianas y hongos (Pacheco y Ávila y col., 1997).

Con respecto a la contaminación del suelo y agua, la aplicación del estiércol a la tierra, aunque es una práctica antigua, es todavía satisfactoria, si se aplica adecuadamente. Este procedimiento, que aumenta la fertilidad del suelo, es también dañino al aplicarse volúmenes en exceso de éste, mismo que produce la acumulación de nutrientes en el suelo. Esto provoca, por un lado, consecuencias negativas en la producción de cultivos; y por el otro, la contaminación consiguiente, que incluye la alteración del pH del suelo por NH_3 , el lixiviado de nitratos y fosfatos a las aguas freáticas y la contaminación de las aguas superficiales con amonio, sulfatos y amoníaco, así como la volatilización del óxido de nitrógeno (Pacheco-Ávila y col., 1997).

Aspectos tóxicos de los nitratos

Aún no se tiene conocimiento cabal del metabolismo del nitrato que se ingiere; parece que la absorción ocurre en la parte superior del intestino delgado, y que la excreción es fundamentalmente, separar en forma exclusiva, a través de los riñones (Freeze y Cherry, 1979).

La presencia de nitratos en los sistemas públicos de abastecimiento constituye un peligro para la salud, ya que producen nitrosaminas que son cancerígenas en el estómago (Freeze y Cherry, 1979; Pacheco-Ávila y col., 1997), y un problema respiratorio en lactantes denominado metahemoglobinemia, conocida como síndrome de los niños azules (Freeze y Cherry, 1979; San Martín, 1975).

Los nitratos contenidos en los alimentos y el agua no son tóxicos para el hombre ya que son absorbidos y excretados rápidamente, pero en determinadas condiciones del pH intestinal, los nitratos son reducidos por las bacterias en la boca y en intestino, produciendo nitritos, los cuales perturban procesos fisiológicos vitales, como la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que conlleva a la cianosis y en algunas ocasiones a la muerte (Freeze y Cherry, 1979; Pacheco-Ávila y col., 1997).

Entre 1945 y 1965, se notificaron 3000 casos de cianosis en países industrializados, la mayor parte de ellos corresponden a regiones cuyos pozos están situados en las proximidades de áreas ganaderas donde existía una elevada concentración de nitratos (Pacheco-Ávila, 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

Justificación y descripción del trabajo

En este trabajo se pretende, primeramente, buscar los sitios más susceptibles de riesgo ambiental por contaminación de los mantos acuíferos tanto superficiales como subterráneas, en el área rural de la cuenca. Una vez determinados los puntos con mayor incidencia, y otros con posibilidades bajas de riesgo ambiental, de tal forma que se puedan hacer comparaciones entre ellas, se realizará una serie de muestreos y análisis de las muestras para conocer si las concentraciones de los contaminantes exceden a los especificados por las normas oficiales.

A la fecha se han llevado a cabo algunos estudios sobre concentraciones de metales; cobre, plomo, zinc, hierro, manganeso así como de sulfatos, en los lechos de algunos ríos tales como; la parte norte del Río Sonora y de su afluente el Río Bacanuchi. En las conclusiones de estos trabajos se pone de manifiesto que los valores reportados presentan valores muy altos, en comparación con otros ríos, especialmente por cobre, hierro y manganeso. Estos valores disminuyen en los puntos de muestreo que se encuentran más alejados de la Cd. de Cananea, pues es ahí donde nacen estos ríos, justo en los repesos "jales" No. 1, 2 y 3 de la Compañía Minera de Cananea (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987).

En otro estudio realizado en la cuenca, se evaluó la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua de consumo de seis municipios del Río Sonora, el cual consistió en la obtención de muestras en las tomas domiciliarias de los municipios; Bacoachi, Arizpe, Banámichi, Huépac, Aconchi y Baviácora, los cuales están ubicados un poco más al centro de la cuenca. Las conclusiones que arroja este estudio sobre los 20 parámetros químicos evaluados, son que tres de ellos se comportaron por arriba de la norma; dureza, sulfatos y nitratos.

Los sulfatos se encontraron en Banámichi y Baviácora; los nitratos en altas concentraciones se obtuvieron en Baviácora, por lo tanto estos dos municipios son los que presentan los más altos riesgos de contaminación ambiental por nitratos y sulfatos (Tiscareño-Alvarado, 1993).

De los estudios antes mencionados se desprende las siguientes hipótesis; las industrias mineras contaminan los mantos acuíferos con metales pesados y sulfatos, y por otro lado, las áreas con actividades agrícolas, ganaderas y avícolas, generan contaminación por nitratos y nitritos. La primera de ellas, ya ha sido probada mediante varios trabajos en la cuenca en estudio, mientras que la segunda, no ha sido probada aún en ésta, pero existen estudios de otras partes del país, en los cuales se ha determinado cierta incidencia.

Propuesta de actividades para este trabajo

Por todo lo anteriormente expuesto se justifica la realización de este trabajo. Las actividades que se proponen en este estudio son las siguientes:

- a. Definir la zona de estudio, englobando en ella zonas agrícolas, ganaderas, avícolas, y su cercanía con poblados, y delimitar el área de acuerdo a su cuenca hidrográfica, por medio del parteaguas.
- b. Ubicar la cantidad y separación de los puntos de muestreo, utilizando para ello un análisis de los antecedentes que se tengan a la fecha, de tal forma que las muestras tomadas tengan una representación adecuada en su área de influencia. Se determinarán puntos con pocas o nulas posibilidades de riesgo ambiental, es decir que se encuentren alejadas de cualquier actividad antropogénica, de tal forma que pueda realizarse comparaciones entre los diferentes puntos con este tipo de actividades y sin ellas.

- c. Especificar la cantidad de muestras que se tomarán por cada sitio, y las épocas de año en que se realizarán. Se propone tomar muestras en aguas superficiales (río), subterráneas (pozos).
- d. Analizar las muestras y aplicar una metodología para probar la hipótesis, y comparar los resultados con los estándares oficiales.
- e. Emitir las conclusiones y recomendaciones pertinentes de acuerdo a los resultados obtenidos.

Descripción del área de estudio

El Río Sonora se encuentra localizado en el Estado de Sonora, México, entre las coordenadas 29° y 31° de Latitud Norte y 110° y 111° de Longitud Oeste; ocupa el tercer lugar en la región hidrológica No. 9 (INEGI, 1998), en cuanto a extensión y magnitud de aportaciones se refiere (en la figura 1, se aprecia la ubicación del Estado de Sonora, con respecto al plano nacional).

Topografía general de la cuenca.

La topografía de la cuenca es de forma irregular y accidentada, tanto en su parte media como alta, lo cual es característico de las zonas montañosas de la Sierra Madre Occidental. En la parte baja es ondulada con planicies de relativa extensión, hasta llegar al embalse de la presa "El Molinito" y Abelardo L. Rodríguez. La cuenca está situada entre las elevaciones 1540 y 204 msnm, y posee una superficie de 21,179.23 Km² (Sortillón-Valenzuela, 1987). En la figura 1, se aprecia la topografía general de la cuenca, así como su extensión.

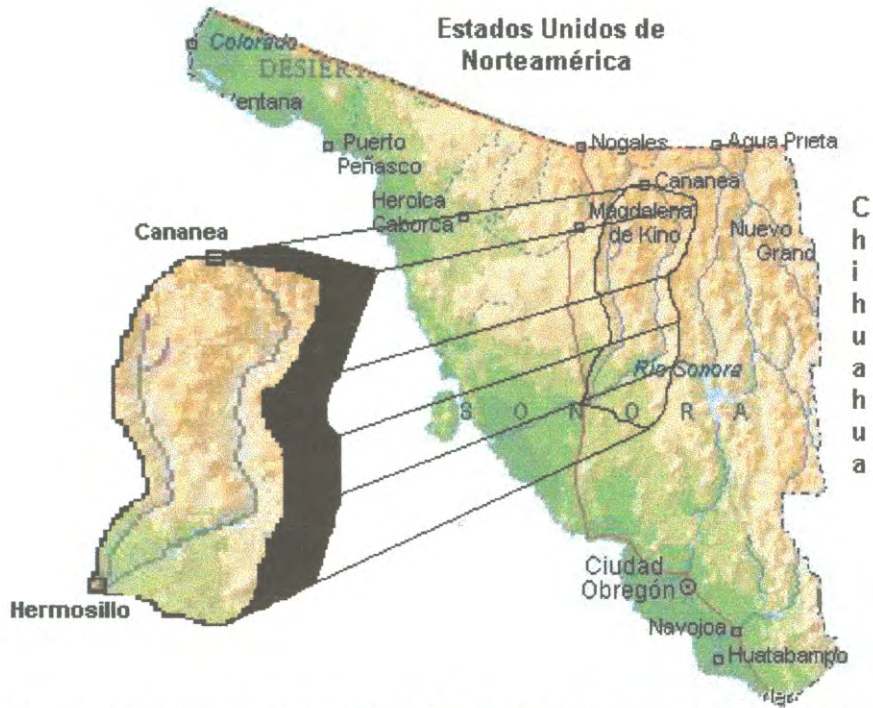


Figura 1. Muestra la ubicación del Estado de Sonora, así como el área general de la cuenca del Río Sonora, San Miguel y Zanjón (Atlas Mundial, Microsoft Encarta).

Geología y vegetación general de la cuenca

Geología

La geología que se tiene en esta cuenca es muy variada, predominando en su parte Norte (extremo Norte del Río Sonora) y Oeste (en casi toda la cuenca del Río Zanjón), así como en los valles centrales de los ríos, formaciones de suelos residuales del período Cuaternario. En su parte central (cuenca del Río San Miguel y parte central de la subcuenca del Río Sonora), predominan formaciones de rocas ígneas extrusivas del Terciario volcánico e intrusivas de la era Cenozóica y Mesosóica, como: granitos, granodiorita, pórfidos riolíticos y cuarcitas. En toda la cuenca se presentan aisladamente pequeñas formaciones del Paleozoico, como: lutitas, cuarcitas y calizas (INEGI, 1998).

Su cuenca alta es rica en yacimientos de minerales y la principal explotación se localiza cerca de su origen, en la zona de Cananea, Sonora, donde se extrae cobre principalmente. Dichos yacimientos se prolongan hacia el sur a lo largo de la sierra del Manzanal que divide el Río Sonora de su tributario el Río Bacanuchi. En ella existen yacimientos de oro, plata, cobre y zinc, en ambos márgenes de éste último, así como a la izquierda del Río Sonora, hasta las cercanías del poblado de Sinoquipe, Sonora.

Vegetación

En la parte media de la cuenca del Río Sonora predomina el matorral alto espinoso y el matorral micrófilo crasicalescente como el mezquite, ocotillo, uña de gato y palo verde, con pequeñas áreas de pino y encino; en la parte norte pastizal mediano abierto con zacates navajita, velluda y araña; en la parte Este, existe pastizal amacollado arbosufrutescente, con zacates banderilla y colorado, combinado con mezquite y encino. En la parte Oeste (subcuenca del Río Zanjón), la vegetación predominante es de tipo matorral arbosufrutescente, existiendo mezquite, palo verde, palo fierro, ocotillo, torotes y acacias (INEGI, 1998).

Descripción hidrográfica general de la cuenca

El Río Sonora tiene sus orígenes en el parteaguas con el Río Bavispe en la sierra de Magallanes a 5 km al oriente de la ciudad de Cananea, Sonora. En su cuenca alta, su trayectoria general es hacia el sur, donde recibe como único afluente de importancia el Río Bacanuchi, el cual se origina en el parteaguas con el arroyo Cocóspera de la cuenca del Río Magdalena, a una elevación de 2480 msnm y que confluyen por la margen derecha del Río Sonora, aguas abajo de Taguichopa, Sonora, a 780 msnm. Antes de llegar a Ures se unen por el margen derecho e izquierdo los arroyos Zolobiate y la Salada, respectivamente. Aguas abajo y a una elevación de 270 msnm, se une por el margen izquierdo el arroyo La Junta, mismo que tiene su origen a una elevación de 1700 msnm en el parteaguas con el Río Moctezuma de la cuenca del Río Yaqui. Sigue su rumbo general hacia el Sudoeste y a 3.5 km aproximadamente, se encuentra la estación hidrométrica El Orégano (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987; Sortillón-Valenzuela, 1987). En la figura 2, se aprecian las características hidrográficas y topográficas de la subcuenca.

A la altura de la presa Abelardo L. Rodríguez, se une por su margen derecha su afluente de mayor extensión, el Río San Miguel, cuya cuenca tiene una área de 8427 km² que representa el 40% del área drenada hasta esta presa. Tiene sus orígenes en el parteaguas con el arroyo Cocóspera, en la Sierra Azul, a una elevación de 1200 msnm; y su curso general es hacia el sur, recibiendo por su margen derecha al Río Zanjón (la subcuenca del Río Zanjón tiene una superficie de 5920 km²), 22 km antes de su confluencia con el Río Sonora y la presa Orégano (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987; Sortillón-Valenzuela, 1987). En la figura 2, se muestra el área de influencia de cada uno de los tributarios.



Figura 2. Muestra la cuenca general del Río Sonora, desde su nacimiento hasta la desembocadura en las presas “El Molinito” y Abelardo L. Rodríguez, así mismo se aprecian las subcuencas de los Ríos San Miguel y Zanjón (Atlas Mundial, Microsoft Encarta)

Esta presa fue construida en el período de 1945 a 1948 por la Secretaría de Recursos Hidráulicos a través de la Comisión de Irrigación y operada actualmente por el gobierno del Estado a través de la Comisión Nacional del Agua, con fines de riego y abastecimiento de agua potable. Posee una capacidad total de 287,561,000 m³, pero debido a la cantidad de azolve, es imposible determinar la capacidad real (en términos de embalse de agua).

Procedimiento

Tomando en consideración los antecedentes antes mencionados, y las conclusiones de éstos, se propone que las estaciones de muestreo sean ubicadas en zonas con alto riesgo de contaminación debido a actividades ganaderas, agrícolas y avícolas. Estas áreas se encuentran ubicadas en las cercanías de los poblados, cuyos asentamientos están en las márgenes de los ríos, y que a su vez éstos contribuyen a la contaminación debido a las descargas de aguas residuales que desembocan a los arroyos (tributarios de los cauces principales en estudio). De igual forma, las estaciones en donde se supone no debe existir contaminación por carecer de cualquier tipo de actividad antropogénica, en forma extensiva, deberán estar ubicados entre los puntos que, de acuerdo con los antecedentes, tienen problemas de contaminación.

Selección del área de estudio (subcuenca).

La subcuenca que cumple con las consideraciones antes mencionadas, es la que se ubica en la parte central de la cuenca del Río Sonora, desde el poblado de Ures hasta Arizpe, con una longitud aproximada de 120 km y una superficie de 5383.34 km² en su cauce principal. En la figura 3, se aprecia la ubicación de la subcuenca de estudio.

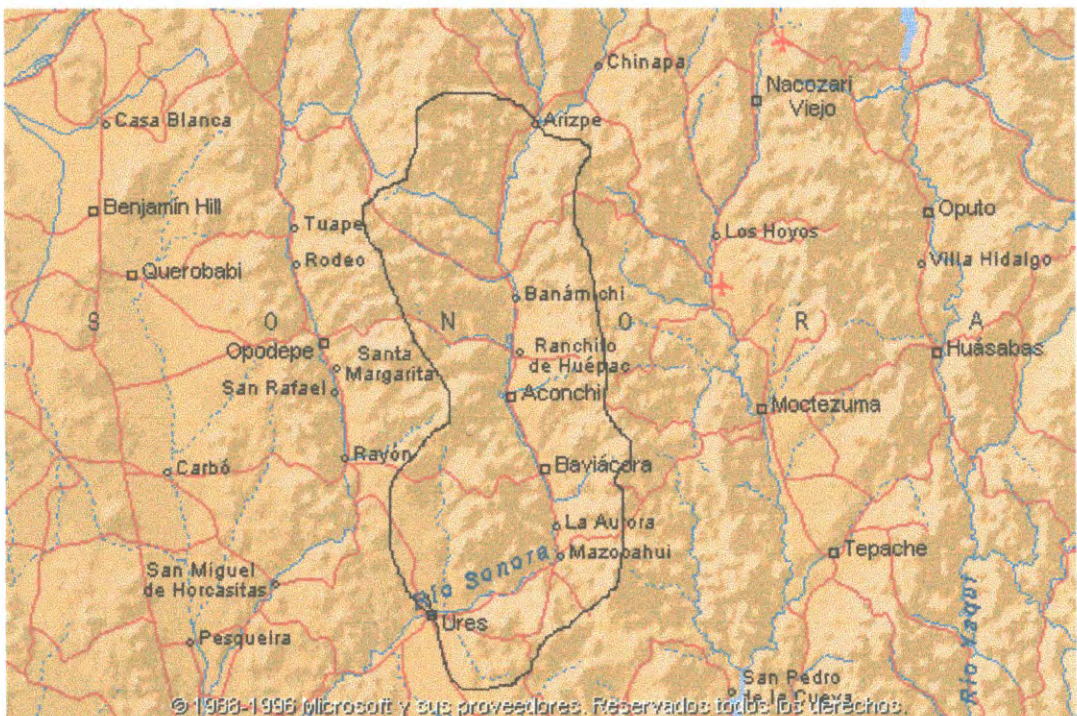


Figura 3. Se delimita la subcuenca, objeto de este estudio, la cual se encuentra ubicada en la parte central de la cuenca general del Río Sonora (Atlas Mundial, Microsoft Encarta)

Ubicación y cantidad de los puntos de muestreo

Una vez determinada el área de estudio, se requiere definir la cantidad de puntos de muestreo y la ubicación de éstos, para lo cual se tomará en cuenta los antecedentes que a la fecha se tienen. Por lo tanto se proponen 8 puntos, los cuales se distribuirán de la siguiente forma (en la figura 4, se aprecia la ubicación de los puntos de muestreos seleccionados):

- a. Al menos 3 de ellos deberán estar lo más cercano posible a los poblados con actividades ganaderas, agrícolas y avícolas, con fines comerciales en cantidades importantes, evitando que estas fuentes sean influenciadas por las descargas de aguas negras del drenaje sanitario de las poblaciones.
- b. Por otro lado, se propone que al menos 2 sitios de monitoreo se encuentren en lugares en donde las actividades antes mencionadas no sean el giro principal de éstos, pero buscando que las descargas del drenaje sanitario tengan influencia en un cierto perímetro alrededor del punto seleccionado.
- c. Para tener puntos de comparación entre éstos, se propone el muestreo en tres puntos, ubicados entre los anteriores, en los cuales no se tenga ninguna de las actividades mencionadas en los primeros; es decir, sitios en los que supuestamente no se tenga ningún tipo de contaminantes de los propuestos en este trabajo.
- d. Realizar los muestreos 4 veces al año, uno en cada estación del año, con respecto al agua superficial, y al menos un muestreo del agua subterránea.

Con lo anterior se pretende determinar el riesgo ambiental por contaminación de nitratos y nitritos, debido a las actividades ganaderas, agrícolas, avícolas y de las actividades derivadas de las necesidades fisiológicas del hombre, descargas de aguas residuales en los lechos de los ríos. De igual

forma se pretende conocer la influencia en esta parte de la cuenca de actividades mineras localizadas en el norte de la cuenca, por lo cual se tomará en cuenta el estudio antecedente (Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987), del cual se concluye que hay concentraciones muy altas de ciertos metales y sulfatos.

La ubicación geográfica y altura (con respecto al nivel del mar) de los puntos de muestreo seleccionados, se exponen en la tabla 1, de tal manera que se pueda apreciar la pendiente que existe entre ellos, y que eventualmente se pudiese determinar el comportamiento hidrológico de la subcuenca y con esto, el transporte de contaminantes.

Procedimiento de colecta de muestras

El procedimiento para la colecta de las muestras de agua (superficial y subterránea), fueron obtenidos de: Manual de Aseguramiento de Calidad (CNA, 1993) y Field Manual for Water Quality Sampling (ADEQ, 1995).

Análisis preliminar.- El material utilizado para la colecta de las muestras de agua (recipientes de plástico) incluyendo la cristalería utilizada durante la digestión de las muestras de agua y sedimento, se somete a un control estricto para evitar una posible contaminación. Para esto, el material de muestreo y la cristalería se someten a un remojo en ácido nítrico diluido (6N) durante 3 días; posteriormente se enjuaga con agua deionizada, se seca y se guarda en bolsas de plástico para su posterior utilización (CNA, 1993; ADEQ, 1995). De igual manera, los equipos muestreadores son lavados cuidadosamente antes de llevar a cabo el muestreo.

Tabla 1. Ubicación geográfica y altura de las estaciones seleccionadas

Estación de Muestreo: (Agua Superficial)		Elevación(*)	Ubicación(*)	
No.	Nombre	(msnm)	Latitud	Longitud
(1)	Arizpe	850	30°20'47" Norte	110°11'54" Oeste
(2)	Arizpe	802	30°19'25" Norte	110°10'30" Oeste
(3)	Tetuachi	700	30°14'15" Norte	110°13'45" Oeste
(4)	Sinoquipe	681	30°09'12" Norte	110°14'34" Oeste
(5)	Aconchi	595	29°49'02" Norte	110°13'52" Oeste
(6)	Baviácora	560	29°41'48" Norte	110°10'02" Oeste
(7)	Mazocahui	475	29°31'59" Norte	110°07'15" Oeste
(8)	Ures	425	29°23'35" Norte	110°27'26" Oeste
Pozo de Muestreo: (Agua Subterránea)				
(1)	Arizpe ¹	890	30°20'53" Norte	110°09'31" Oeste
(2)	Aconchi ²	598	29°49'30" Norte	110°13'53" Oeste
(3)	Ures ³	430	29°25'51" Norte	110°23'30" Oeste

(*) Tomados de posicionador GPS digital (elevación y ubicación aproximadas)

Arizpe¹: Profundidad promedio del nivel dinámico; 2-5 metros.

Aconchi²: Rango promedio del nivel dinámico; 3-6 metros

Ures³: Rango promedio del nivel dinámico; 4-7 metros



Figura 4. Se especifica la ubicación de los puntos de muestreo: Puntos azules, desde Arizpe (estaciones 1 y 2), hasta Ures (estación 8) (Atlas Mundial, Microsoft Encarta).

Muestreo de campo.- Para el muestreo de campo se propone una serie de pasos, de tal forma que se cumplan con todas las especificaciones que al respecto se proponen.

- a. Colecta de muestras de agua superficial; se colectan de la parte media de la columna de agua, utilizando los recipientes de plástico, mismos que previamente se limpiaron y descontaminaron. En cada una de las estaciones de muestreo se colectan muestras en 3 recipientes de plástico de un litro, para llevar a cabo los análisis de los parámetros pertinentes.
- b. Análisis de metales totales; se colecta un litro de muestra de agua y es preservada con ácido nítrico concentrado hasta un valor de $\text{pH} < 2$.
- c. Análisis de nitratos y nitritos; NO_3 , NO_2 , el recipiente con la muestra para el análisis de nutrientes se preserva con ácido sulfúrico (H_2SO_4) hasta un valor de $\text{pH} < 2$.
- d. Al recipiente restante, no se les añade ningún preservador químico. Éstos se van a utilizar para el análisis de sulfatos y sólidos disueltos totales.

Colecta de muestras de agua subterránea.- Las muestras de agua subterránea serán colectadas de los pozos que estén equipados y funcionando; en caso contrario, se tomarán las muestras de la descarga de la tubería más cercana al pozo.

Las muestras serán colectadas una vez que se haya purgado el pozo por un tiempo mínimo de diez minutos y los parámetros analizados como temperatura, pH y conductividad eléctrica se hayan estabilizado. Las muestras de agua subterránea serán por los mismos parámetros contemplados para las aguas superficiales.

Transporte de las muestras.- Las muestras de agua superficial y subterránea serán guardadas en hieleras portátiles y conservadas en hielo, a una temperatura de 4°C, inmediatamente después de la colecta de la muestra hasta que sean transportadas al laboratorio dentro de las 24 horas de muestreo.

Técnicas Analíticas

Las técnicas analíticas es una de las actividades de suma importancia de un estudio, debido a que en este apartado se seleccionan los métodos que servirán para realizar los análisis de las muestras. La validez de los resultados en todo trabajo puede ser severamente cuestionado si no se siguen los procesos recomendados por los estándares nacionales e internacionales.

Los métodos que se utilizarán en este trabajo se tomarán de la Environmental Protection Agency (EPA, 1983), la cual es la máxima autoridad en cuestiones ambientales en Estados Unidos. En México se tienen algunas dependencias que regulan y norman la protección al medio ambiente en el país; como la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) y el INE (Instituto Nacional de Ecología). Por lo general estas dos dependencias se guían en algunos conceptos de la normatividad del EPA, debido a que ésta es una de las más completas al respecto.

Debido a la aceptación de los métodos de la EPA, se optó por utilizarlos en este trabajo, ya que la validación de los resultados cuentan con un respaldo oficial.

Parámetros seleccionados para ser evaluados en este trabajo

Uno de los objetivos de este estudio, es el de encontrar las concentraciones de los nitritos y nitratos del agua superficial y subterránea, por

los tanto, los parámetros principales son éstos. En forma adicional, se contempla incluir algunos físicos y químicos, que servirán para complementar e interpretar el comportamiento de los primeros. En la tabla 2 se detallan la totalidad de tales parámetros, así como el método que se utilizará para el análisis de las muestras.

Análisis de laboratorio

En el laboratorio se emplean un conjunto de técnicas y procedimientos empleados para identificar y cuantificar la composición química de una sustancia. Cuando se lleva a cabo un análisis cualitativo, se pretende identificar las sustancias de una muestra. En el análisis cuantitativo lo que se busca es determinar la cantidad o concentración en que se encuentra una sustancia específica en una muestra. Por ejemplo, averiguar si una muestra de sal contiene el elemento yodo sería un análisis cualitativo, y medir el porcentaje en masa de yodo de esa muestra constituiría un análisis cuantitativo. En este trabajo se harán ambos tipos de análisis, ya que primeramente se requiere conocer los tipos de elementos de la muestra, y es seguida la concentración de los mismos, cuando menos en los parámetros de este trabajo.

Otro proceso previo para el análisis cualitativo y cuantitativo es la calibración. La respuesta del método analítico y la sensibilidad del equipo mecánico y electrónico empleado respecto al componente deseado debe calibrarse usando un componente puro o una muestra que contenga una cantidad conocida de ese componente.

Análisis de agua superficial y subterránea.- La metodología utilizada para el análisis de los parámetros químicos (incluyendo metales pesados; tabla 2) y nutrientes, son los que recomiendan el Manual de Métodos de Análisis (CNA, 1995) y el Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes (EPA, 1983).

Tabla 2. Análisis inorgánico en el agua superficial y subterránea del Río Sonora

PARÁMETRO	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN (mg/l)
Físicos:		
Temperatura	170.1 (*)	
Conductividad Eléctrica	120.1 (*)	
Potencial de Hidrógeno	150.1 (*)	
Sólidos Totales (SDT=ST-SST)	ST; 160.3 (*) SST; 160.2 (*)	10
Químicos:		
Oxígeno Disuelto	360.2 (*)	
Sulfatos	375.3 (*)	5
Cloruros	325.3 (*)	2
Cobre	220.1 (*)	0.02
Hierro	236.1 (*)	0.04
Manganeso	243.1 (*)	0.02
Plomo	239.1 (*)	0.07
Zinc	289.1 (*)	0.01
Cadmio	213.1 (*)	0.01
Calcio	215.1 (*)	0.01
Magnesio	242.1 (*)	0.005
Potasio	258.1 (*)	0.01
Sodio	273.1 (*)	0.06
Bicarbonatos	D 513-71 (**)	
Nutrientes:		
Nitratos	352.1 (*)	0.1
Nitritos	354.1 (*)	0.01
Fósforo Total	365.2 (*)	0.01
Nitrógeno Amoniacal	350.1 (*)	0.01

Fuente: (*) EPA (1983); (**) ANSI/ASTM (1977)

En lo referente a los parámetros químicos como oxígeno disuelto y bicarbonatos, se determinan durante el muestreo de campo; mientras que los sulfatos son analizados a través de métodos denominados espectrofotométricos. En lo que respecta a los nutrientes, al igual que los sulfatos, son analizados por métodos espectrofotométricos, utilizando un Espectrofotómetro Ultravioleta-Visible Perkin-Elmer, modelo Lambda 2S.

En el análisis de metales se utiliza el método de Espectroscopia de Absorción Atómica por Flama. El método consiste en lo siguiente: se toma un volumen conocido de muestra de agua (superficial o subterránea) y se somete a un proceso de digestión utilizando ácido nítrico concentrado. Se diluye a un volumen conocido y se determina el contenido de metales utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer, modelo 3100 (DICTUS) y Perkin-Elmer, modelo 3110 (Laboratorio de Metalurgia). Se analizaron las muestras en ambos laboratorios.

Control de calidad

Con el objeto de obtener datos confiables de campo así como resultados precisos y exactos que manifiesten el estado actual del sitio de la toma de muestras, se llevará a cabo un procedimiento de control de calidad tanto en la fase de muestreo de campo como en los métodos analíticos utilizados en el laboratorio al momento de llevar a cabo el análisis de agua superficial y subterránea. Para esto, se seguirá la metodología de control de calidad recomendada en el Manual de Aseguramiento de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1993), el Field Manual for Water Quality Sampling (ADEQ, 1995) y el Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods; SW-846 (EPA, 1992).

Limpieza de los equipos de muestreo.- Todos los equipos que tienen contacto con una muestra de calidad de agua (botellas de muestreo) deben ser

limpiadas cuidadosamente antes del muestreo. La limpieza consiste en lavarlos con una solución sin fosfatos, enjuagándolos con agua corriente y con agua destilada/deionizada. Cuando existe la posibilidad de contaminación por metales, se enjuagan con una solución al 10% de ácido nítrico o con ácido clorhídrico al 5% y enjuagándolos con agua destilada/deionizada.

Procedimiento de calibración y frecuencia.- Se realiza con el fin de llevar a cabo el análisis correspondiente de las muestras.

- a. **Parámetros de campo:** El equipo que es utilizado en campo (potenciómetro, conductímetro y medidor de oxígeno) son calibrados siguiendo las indicaciones de los fabricantes. El equipo es calibrado antes de las actividades de muestreo y durante su operación, anotando los datos de calibración en la libreta de campo.
- b. **Parámetros Analíticos:** El equipo analítico de laboratorio (espectrofotómetro UV-VIS) utilizado en el análisis de nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-), nitrógeno de nitritos (N-NO_2^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_3^-), sulfatos (SO_4) y fósforo total, es calibrado de acuerdo al manual del fabricante. Se utilizarán reactivos de alta pureza analítica y se elaborará una curva de calibración utilizándose un mínimo de 6 estándares, y obtener un coeficiente de regresión con un valor no menor a 0.995 ($r > 0.995$), para que sea satisfactorio y continuar así con la determinación de las concentraciones de las muestras problema.
- c. **Blancos de Campo:** Son envases de agua deionizada que se llenan en la estación de muestreo, se etiquetan y se envían al laboratorio con las demás muestras. Los blancos de campo se utilizan para investigar la contaminación durante la colecta y traslado de las muestras.

- d. **Blanco de Viaje:** Son envases de agua deionizada preparados en el laboratorio. Se mantienen en la misma hielera donde se colocan las otras muestras en cada fase del proceso de colecta, manejo y envío. Los blancos de viaje se utilizan para investigar si existe contaminación durante el transporte de la muestra o en el almacenaje en el laboratorio.

Indicadores de calidad de datos. Todo resultado que se tenga de un análisis de muestras, deberá tener una certidumbre dentro de un rango adecuado, y para tener esa certeza, se debe contemplar en todo estudio, algunos indicadores de calidad, dentro de los cuales se tienen los siguientes:

- a) **Precisión (muestras duplicadas).** Expresado como RPD. Se debe de contemplar que por cada 10 puntos de muestreos, se tome al menos en uno de ellos una muestra por duplicado. Al comparar los valores de ambos, no deben de tener una discrepancia mayor al 35%.
- b) **Exactitud (porcentaje de recuperación).** Al momento de llevar a cabo el análisis de cierto compuesto, se deberá también contemplar la utilización de muestras fortificadas del mismo compuesto de la cual se conozca su concentración (se recomiendan estándares de alta pureza, y al menos tres concentraciones conocidas: baja, media y alta). El valor obtenido se compara con el conocido, de tal manera que la discrepancia se encuentre dentro del rango de 70% - 130%.
- c) **Balance de Cationes / Aniones.** Se recomienda llevar a cabo un balance de cationes-aniones mayores, de cada uno de los puntos de muestreo, teniéndose en cuenta que la discrepancia en el resultado de ambos no deberá ser mayor al 10%.

Diseño de experimentos y análisis estadístico

Cuando hay varias pruebas estadísticas disponibles para un diseño de investigación, como es el caso de este trabajo, es necesario emplear un criterio de elección, por ejemplo, se considera que una prueba estadística es buena si es pequeña la probabilidad de rechazar la hipótesis nula (H_0) siendo verdadera y grande la probabilidad de rechazar H_0 siendo falsa.

Dentro de las pruebas estadísticas se desprenden dos que prácticamente engloban a la mayoría; las pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas. Las primeras se aplican en aquellos casos en donde la variación de la muestra se considere constante; es decir, que los grupos de muestras deben de tener la misma varianza (o en casos especiales deben de tener una proporción de varianzas conocidas). En el caso de las segundas, se aplican en situaciones de discontinuidad de las muestras; es decir, que prueban hipótesis referentes a la forma, la dispersión o la posición (mediana) de las muestras (Siegel, 1990).

Hipótesis nula y alternativa.

La prueba de hipótesis sobre una media poblacional sirve para saber si un parámetro está fuera de un valor establecido, y la diferencia que hay entre una muestra y otra de distintas poblaciones.

Hipótesis Nula (H_0).- Las actividades antropogénicas (ganadería, agricultura, avicultura y descargas de aguas residuales), contaminan los medios acuáticos y sobrepasan las normas establecidas de nitritos y nitratos, por lo tanto constituyen un riesgo de impacto ambiental en la zona de estudio.

Hipótesis Alternativa (H_1).- Los resultados de las concentraciones de las muestras no sobrepasan las normas establecidas, y sus rangos son muy similares a los puntos de muestreo en donde no se tiene este tipo de actividades, por lo tanto no constituyen un riesgo ambiental en la zona de estudio.

Elección de la prueba estadística para el análisis

Para detectar las diferencias significativas entre los valores promedio mensuales y los cambios espaciales; horizontales y verticales, se utilizará el Análisis Multivariado; Método de Componentes Principales (Pia, 1986), el cual se detalla a continuación.

Análisis Multivariado; Método de Componentes Principales (Pia, 1986)

Según Kendall (1980), en el estudio propio del campo multivariado pueden utilizarse diferentes enfoques, tanto por los distintos tipos de situaciones que se presentan al obtener los datos como por el objetivo específico del análisis. Los más importantes son:

1. Simplificación de la estructura de los datos.- El objetivo es encontrar una manera de representar el universo de estudio. Esto puede lograrse mediante la transformación (combinación lineal o no lineal) de un conjunto de variables interdependientes en otro conjunto de menor dimensión.
2. Clasificación.- Este tipo de análisis permite ubicar las observaciones dentro de grupos o bien concluir que los individuos están dispuestos aleatoriamente en el multiespacio. También pueden agruparse variables.
3. Análisis de la interdependencia.- El objetivo es examinar la interdependencia entre las variables, la cual abarca desde la independencia total hasta la colinealidad cuando una de ellas es combinación lineal de algunas de las otras o, en términos aun más generales, es una función $f(x)$ cualquiera de las otras.

4. Análisis de la dependencia.- Para ello se seleccionan del conjunto, ciertas variables (una o más) y se estudia su dependencia de las restantes, como en el análisis de regresión múltiple o en el análisis de correlación canónica.
5. Formulación y prueba de hipótesis.- A partir de un conjunto de datos es posible encontrar modelos que permitan formular hipótesis en función de parámetros estimables. La prueba de este nuevo modelo requiere una nueva recopilación de datos a fin de garantizar la necesaria independencia y validez de las conclusiones.

En los casos de poblaciones univariadas, casi siempre es posible caracterizar completamente la distribución de probabilidades a partir de dos parámetros: la media y la varianza. La inferencia estadística exige, entonces, tomar una muestra aleatoria y calcular los mejores estimadores de estos dos parámetros. El análisis termina con la interpretación de las dos estimaciones.

Sin embargo, para el caso multivariado en que se estudia una población p variada, es decir un conjunto de individuos donde se han observado o medido p características o propiedades, se dispondrá de p medias, p varianzas y $(1/2)p(p-1)$ covarianzas, que no sólo deben ser estimadas, lo cual no es difícil con las computadoras, sino que deben ser interpretadas.

Si se logra una transformación que genere nuevas variables no correlacionadas se eliminan $(1/2)p(p-1)$ parámetros, y si se reducen las dimensiones de p a $(p-1)$, se pasa de $(1/2)p(p+3)$ parámetros poblacionales a ser estimados e interpretados a $(1/2)p(p+3) - (1/2)(p-1)(p+2) = (p+1)$ parámetros a ser estimados e interpretados.

Si bien puede no existir interés en todos los parámetros y, por lo tanto, no es necesario estimarlos, cuanto más sencillo sea el modelo poblacional, más

cerca estará el investigador de encontrar una interpretación comprensible de la estructura original mediante la muestra efectivamente observada.

Habiendo explicado qué se entiende por universo multivariado, se comprenderá por qué los métodos estadísticos multivariados pueden agruparse en dos conjuntos: los que permiten extraer información acerca de la interdependencia entre las variables que caracterizan a cada uno de los individuos y los que permiten extraer información acerca de la dependencia entre una (o varias) variables(s) con otra (u otras).

Algunos conceptos unificadores

En el caso multivariado, así como en el univariado, se dispone de ciertos estadísticos que permiten caracterizar una población y estudiar su comportamiento probabilístico. Algunos de ellos son una extensión directa de la noción univariada equivalente y otros son propios de las poblaciones y muestras multivariadas. Para reforzar los conceptos se ilustrarán algunas de las definiciones más importantes del campo multivariado.

- Se dice que un conjunto de datos constituye una muestra aleatoria multivariada si cada individuo ha sido extraído al azar de una población de individuos y en él se han medido u observado una serie de características. Sean $x(ij)$ la observación de la j -ésima variable en el i -ésimo individuo, $\mathbf{X}(i)$ el vector fila que contiene las observaciones de todas las variables en el i -ésimo individuo, y $\mathbf{X}(j)$ el vector columna que contiene todas las observaciones de la j -ésima variable. Se define una matriz de datos multivariados como el siguiente arreglo de dimensión ($n \times p$):

$$X = (x(ij)) = \begin{bmatrix} x(11) & \dots & \dots & x(1p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & x(ij) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(n1) & \dots & \dots & x(np) \end{bmatrix} \quad (1)$$

que también puede expresarse como:

$$X = [X(1) \dots X(p)] = \begin{bmatrix} X(1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ X(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

A partir de esta matriz que contiene toda la información estadística de la muestra es posible calcular algunas funciones que, al igual que en el caso univariado, permitan extraer conclusiones de los datos. En el caso univariado se calcula la media para tener una estimación de la tendencia central de las observaciones y se calcula la varianza que informa acerca del grado de dispersión de los datos alrededor de esa media. La extensión al caso multivariado es posible; de ello resulta la media: un vector y la varianza: una matriz.

- Dada una matriz de datos como la señalada en la definición 1, se define la media muestral de la j -ésima variable por:

$$\bar{x}(j) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(ij) \quad (3)$$

y el vector formado por los $\bar{x}(j)$ será el vector promedio:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}(1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{x}(p) \end{bmatrix} \quad (4)$$

- Dada una matriz de datos como la señalada en la definición 1, se define la varianza muestral de la j -ésima variable por:

$$s(jj) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(ij) - \bar{x}(j))^2 \quad (5)$$

y se define la covarianza entre la j -ésima y la k -ésima variable por:

$$s(jk) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(ij) - \bar{x}(j)) ((x(ik) - \bar{x}(k))) \quad (j, k) = 1, \dots, p \quad (6)$$

La matriz formada por el arreglo de los $s(jk)$ y los $s(jj)$ será la matriz de varianza-covarianza muestral:

$$S = \begin{bmatrix} s(11) & \cdot & \cdot & \cdot & s(1p) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & s(jk) & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s(pl) & \cdot & \cdot & \cdot & s(pp) \end{bmatrix} \quad (7)$$

- A partir de los elementos de la matriz S es posible calcular la matriz R , de igual dimensión que S , y cuyos elementos sean los coeficientes de correlación entre la j -ésima y la k -ésima variables.

$$r(jk) := \frac{s(jk)}{\sqrt{s(jj) s(kk)}} = \frac{s(jk)}{s(j) s(k)} \quad (8)$$

También podrán ser arreglados en una matriz de correlación muestral cuya diagonal principal estará formada por números uno y será simétrica como la matriz de covarianza, por ser $r(jk) = r(kj)$. Y la matriz R quedará estructurada de la siguiente forma:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & . & . & . & r(lp) \\ . & . & . & . & . \\ . & . & 1 & . & . \\ . & . & . & . & . \\ r(pl) & . & r(pk) & . & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

La matriz **S** de covarianza es una manera de expresar la dispersión de los datos alrededor de la media. Sin embargo, a veces es necesario disponer de un escalar que sintetice esta dispersión. Puede encontrarse un número que exprese la variabilidad multivariada a partir de la información contenida en la matriz **S**.

Vectores y valores propios

El análisis por componentes principales se basa en una transformación lineal de las observaciones lineales. Esta transformación lineal es conocida en el álgebra vectorial como generación de vectores y valores propios, o también vectores o valores característicos (el vocablo original de raíz anglosajona es "eigen", y por eso, se le ha traducido como "eigen valores" o "eigen vectores").

- Sea **B** una matriz cuadrada de dimensión (**p x p**); es posible encontrar una escala λ (lamda) y un vector **x** de dimensión (**p x 1**), no nulo tal que: $\mathbf{BX} = \lambda\mathbf{X}$, lo que implica; $\mathbf{BX} - \lambda\mathbf{X} = \mathbf{0} = (\mathbf{B} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{X} = \mathbf{0}$, y sacando el vector **X** como factor común a la derecha, de forma que la operación matricial sea comfortable.

Por ejemplo, si **B** es una matriz de dimensión (**2 x 2**) deberá encontrarse la solución de la siguiente ecuación matricial:

$$\left| \begin{bmatrix} 6 & 3 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \right| \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{matrix} \left| \begin{bmatrix} 6-\lambda & 3 \\ 3 & 4-\lambda \end{bmatrix} \right| \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (6-\lambda)x(1) + 3x(2) \\ 3x(1) + (4-\lambda)x(2) \end{bmatrix} \\ (2 \times 2) \quad (2 \times 1) \quad (2 \times 1) \quad (2 \times 1) \end{matrix}$$

De donde debe de resolverse el sistema de ecuaciones siguientes:

$$(6 - \lambda) x(1) + 3 x(2) = 0 \quad (11)$$

De las cuales, y mediante todo un procedimiento, se obtienen tanto los vectores como los valores propios. En todos los casos, el polinomio característico de una matriz será del mismo orden que la dimensión de dicha matriz y tendrá tantas soluciones como dimensiones, y por lo tanto, existirán tantos valores propios como soluciones de la ecuación característica. Y cada valor propio podrá generar una solución X y por esto existirán tantos vectores propios como valores propios.

El método de análisis por componentes principales

Este es uno de los métodos de análisis que permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados obtenidos de una población, cuya distribución de probabilidades no necesita ser conocida.

Se trata de una técnica matemática que no requiere un modelo estadístico para explicar la estructura probabilística de los errores. Sin embargo, si puede suponerse que la población muestreada tiene distribución multinormal, podrá estudiarse la significación estadística y será posible utilizar la muestra efectivamente observada para efectuar pruebas de hipótesis que contribuyan a conocer la estructura de la población original con cierto grado de confiabilidad, fijado *a priori* o *a posteriori*.

Los objetivos más importantes de todo análisis por componentes principales son:

- Generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto original de datos.

- Reducir la dimensionalidad del problema que se está estudiando, como paso previo para futuros análisis.
- Eliminar, cuando sea posible, algunas de las variables originales si ellas aportan poca información.

Las nuevas variables generadas se denominan componentes principales y poseen algunas características deseables, tales como independencia (cuando se asume multinormalidad) y en todos los casos no correlación. Esto significa que si las variables originales no están correlacionadas, el análisis por componentes principales no ofrece ventaja alguna. Por lo tanto el Análisis por componentes principales deberá ser aplicado cuando se desee conocer la relación entre los elementos de una población y se sospeche que en dicha relación influye de manera desconocida un conjunto de variables o propiedades de los elementos.

A continuación se explicará de una manera general cómo se generan los componentes principales. Se ha dicho que los componentes principales tienen ciertas características que son “deseables”:

- Los componentes principales no están correlacionados, y sí además, puede suponerse multinormalidad en los datos originales, son independientes.
- Cada componente principal sintetiza la máxima variabilidad residual contenida en los datos.

Al estudiar un conjunto de n individuos mediante p -variables es posible encontrar nuevas variables denominadas $Y(k)$, $k= 1, \dots, p$ que sean combinaciones lineales de las variables originales $X(j)$, e imponer a este sistema ciertas condiciones que permitan satisfacer los objetivos del análisis por componentes principales.

Lo anterior implica encontrar ($p \times p$) constantes tales que:

$$Y(k) = \sum_{j=1}^p 1(jk) \quad k = 1, \dots, p \quad (12)$$

donde $1(jk)$ es cada una de esas constantes. Obsérvese que debido a la sumatoria, en cada nueva variable $Y(k)$ intervienen todos los valores de las variables originales $X(j)$. El valor numérico de $1(jk)$ indicará el grado de contribución que cada variable original aporta a la nueva variable definida por la transformación lineal. Es posible que $1(jk)$ tenga en algún caso particular el valor cero, o muy cercano a cero, lo cual indica que esa variable no influye en el valor de la nueva variable $Y(k)$.

Cada punto en el multiespacio p -dimensional es el extremo de un vector X tal que cada uno de sus elementos $X(j)$, para $j = 1, \dots, p$, es una medida de la j -ésima en un individuo dado. Si se miden n individuos, se obtienen n vectores X y n puntos en el espacio de p dimensiones.

Es posible expresar la condición anterior en forma matricial si se define una matriz L como el arreglo de la ($p \times p$) constantes $1(jk)$:

$$L = \begin{bmatrix} 1(11) & \dots & \dots & \dots & 1(1p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1(jk) & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1(pl) & \dots & \dots & \dots & 1(pp) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Pero entre las restricciones que se tienen al momento de aplicar la transformación es que las nuevas variables originales sean ortogonales, y para satisfacer esta condición de ortogonalidad es preciso que:

$$LL' = L'L = L^{-1}L = I \quad (14)$$

y se dice, entonces que L es una matriz ortogonal. Puede expresarse la transformación lineal de componentes principales en términos de esta matriz:

$$\begin{matrix} Y & = & X & L \\ (n \times p) & & (n \times p) & (p \times p) \end{matrix} \quad (15)$$

En la ecuación anterior se ha expresado la matriz original completa, es decir una matriz de datos como la de la primer definición, a la que se le aplica la transformación ortogonal L y se obtiene una nueva matriz original ($n \times p$). Para cada uno de los individuos (n en total), se calcularon nuevos valores correspondientes a las variables no correlacionadas. Esta nueva matriz Y tendrá también una matriz de covarianza que será diagonal, ya que las variables (combinaciones) lineales originadas por la transformación ortogonal L no estarán correlacionadas.

Por otro lado, sea A una matriz diagonal, ya que las covarianzas muestrales de las variables transformadas deben ser nulas. Esta matriz A tendrá en la diagonal principal los valores de las varianzas de las nuevas variables o componentes principales. Por lo tanto la matriz A puede expresarse como:

$$A = \begin{bmatrix} \lambda(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda(2) & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \lambda(k) & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \lambda(p-1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda(p) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Correlación entre variables originales y componentes principales

En el caso bivariado, por ejemplo al estudiar un modelo lineal de relación entre dos variables X e Y , como en la relación lineal simple, la correlación se calcula así:

$$r = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{\text{var}(x) \text{var}(y)}} \quad (17)$$

El cuadrado de la expresión anterior, conocido como coeficiente de determinación, constituye una medida de la asociación entre las dos variables. Esta medida podrá ser contrastada por una prueba de hipótesis para valores cercanos a cero cuando se supone binormalidad; de efectuarse una prueba para valores absolutos elevados del coeficiente de correlación (varía entre -1 y +1), deberá disponerse de una muestra grande y aplicarse la conocida distribución asintótica del estadístico z de Fisher calculado a partir de r .

Para estudiar la correlación entre las variables originales y los componentes principales habrá que calcular todas las correlaciones de cada variable original con cada nueva variable.

Para calcular la correlación deberá dividirse por la raíz de las varianzas de las variables, es decir por $s(\mathbf{j})$ y por $\lambda(\mathbf{k})$, y se obtendrá:

$$r = \frac{1(\mathbf{jk}) \lambda(\mathbf{k})}{\sqrt{s(\mathbf{j})} \lambda(\mathbf{k})} \quad (18)$$

Si se utiliza la matriz de correlación de los datos originales R , las varianzas $s(\mathbf{j})$ serán unitarias y la ecuación anterior se reduce a:

$$r(\mathbf{jk}) = 1(\mathbf{jk}) \sqrt{\lambda(\mathbf{k})} \quad (19)$$

donde la ecuación anterior representa la correlación entre la variable original $\mathbf{x}(\mathbf{j})$ y el k -ésimo componente principal. El cuadrado del coeficiente de correlación es una medida de la asociación entre ellos y una manera de cuantificar la proporción de la variación total de una variable original explicada por el componente k .

Por último, si se efectúa una sumatoria en k , es decir se suman las proporciones de la varianza explicada por los p componentes principales para la variable $X(j)$, se obtendrá el valor 1. Puede efectuarse la sumatoria para los m primeros componentes incluidos luego de la selección destinada a reducir la dimensión de un conjunto de datos y determinar cual es la proporción de la varianza de cada variable original en el nuevo subconjunto. Esto es posible ya que los componentes principales no están correlacionados entre sí; de lo contrario, no se aplicaría lo anterior por no tomar en cuenta las covarianzas. Así, en términos de la matriz de covarianza será:

$$r^2(jk) = \frac{\lambda(k) l^2(jk)}{s(jj)} \quad j, k = 1, \dots, p \quad (20)$$

Para el k -ésimo componente, y sumando para los primeros m :

$$\sum_{k=1}^m r^2(jk) = \frac{1}{s(jj)} \sum_{k=1}^m \lambda(k) l^2(jk) \quad (21)$$

De esta manera del análisis detallado de estas proporciones y de los elementos de cada vector propio podrán inferirse las conclusiones necesarias para explicar la estructuración de un conjunto de datos multivariados.

RESULTADOS; ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La fundamentación técnica y analítica, es de suma importancia para la validez de los resultados en toda investigación. En este trabajo se emplearon criterios de calidad avalados internacionalmente, tanto en la colecta de las muestras, como los análisis realizados en el laboratorio. Todos las digestiones, y los análisis correspondientes se llevaron a cabo en el laboratorio del DICTUS, de la Universidad de Sonora, por P.Q.B. Ana María Pérez Villalba. Las lecturas de las muestras para detectar metales se realizaron por medio de absorción atómica por investigadores de esta Institución: DICTUS; M.C. Lorena Bringas Alvarado, así como Metalurgia (Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia); M.C. Guillermo Tiburcio Munive.

Tales criterios se señalaron en el capítulo de Materiales y Métodos, sin embargo, a manera de resumen, los procedimientos para la colecta de muestras de agua superficial y subterránea, incluyendo los métodos de análisis y garantía de calidad utilizados, fueron obtenidos del Manual de Aseguramiento de Calidad (CNA, 1993) y del Manual de Métodos de Análisis (CNA, 1995). De igual forma, se emplearon el *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastewater* (EPA, 1983), así como el *Field Manual for Water Quality Sampling* (ADEQ, 1995) y el *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods; SW-846* (EPA, 1992).

En cada una de las tablas de resultados que se mostrarán a lo largo de este capítulo, se incluyeron los valores de todos los indicadores de control de calidad citados en el capítulo anterior, tales como; limpieza de equipos, control de calidad interna e indicadores de calidad de los datos. El análisis correspondiente del control de calidad se realizará en cada uno de los apartados subsecuentes.

Con la finalidad de lograr una mejor comprensión del trabajo realizado con el análisis de la información obtenida de campo, se manejará este capítulo en tres áreas; análisis de la información de campo, caracterización de las aguas (balance geoquímico) y análisis estadístico de la información. Además, para una discusión más concreta, se separarán dentro de estas áreas, los conceptos de agua superficial y subterránea, así como parámetros físico-químicos y metales.

Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial

En las tablas 3, 4, 5 y 6 se exponen los resultados de los parámetros físicos (temperatura ambiente, temperatura del agua, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales), así como algunos parámetros químicos (oxígeno disuelto, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y por último los nutrientes (nitrógeno de nitratos, nitrógeno de nitritos, fósforo total y nitrógeno amoniacal).

Parámetros físicos

Los parámetros físicos definen las características físicas del agua en su conjunto y no representan de manera directa problemas graves a la salud humana ó para uso agrícola; para reforzar lo anterior se expondrán las características en forma general, de cada uno de ellos.

Potencial de Hidrógeno (pH); Es una medida del grado de acidez o alcalinidad. El pH interviene en el cálculo de carbonatos, bicarbonatos y bióxido de carbono. La escala es del 0 (muy ácido) al 14 (muy alcalino), mientras que el valor de 7 se considera neutro, el cual es el indicado para cualquier actividad o uso, sin embargo el rango que se establece como adecuado para consumo humano es de 6.5 a 8.5 (NOM-127-SSA1-1994) y de 5-10 tanto para uso agrícola como para consumo humano (NOM-001-ECOL-1996).

Los valores encontrados de pH en el Río Sonora durante los muestreos, son en su mayoría ligeramente básicos, ya que para el primer muestreo (tabla 3) el rango es de 7.17-7.52, mientras que el segundo muestreo (tabla 4); 7.34-8.06, y el tercer muestreo (tabla 5) varía de 6.52 -7.38, mientras que la tabla 6 (cuarto muestreo) indica que la fluctuación es de 7.63 a 8.24. Sin embargo ninguno de estos rangos está fuera de lo permitido por las normas citadas.

De acuerdo a la bibliografía revisada y citada en el tercer capítulo de este trabajo se establece que en lugares cercanos a actividades mineras por lo general se esperan valores ácidos en los cuerpos de agua, sin embargo, en la subcuenca de estudio no se reporta este tipo de comportamiento, excepto aguas arriba de Arizpe, en donde se ubica Cananea, Sonora.

Conductividad Eléctrica (C.E.). Es una medida de la capacidad del agua para transmitir la corriente eléctrica y esta propiedad está relacionada con la concentración total de sustancias ionizadas en un agua y la temperatura con la que se hace la medición. Una alta conductividad eléctrica afecta a las plantas, animales y al hombre, ya que es un indicador de la presencia de altas concentraciones de sales en solución, mismas que son dañinas.

Los valores encontrados durante los muestreos de este estudio fluctuaron desde 587 $\mu\text{mhos/cm}$ (tabla 3; primer muestreo) hasta 972 $\mu\text{mhos/cm}$ (tabla 6; cuarto muestreo). De acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua (CE-CCA-001/89) establece como máximo permisible 1000 $\mu\text{mhos/cm}$ en aguas para uso de riego, no encontrándose norma alguna que se refiera al valor máximo permisible para consumo humano. Sin embargo cualquiera que sea éste, no deberá ser mayor al de uso de riego. Por lo tanto en el área estudiada no se tiene problema alguno con este parámetro.

Sólidos disueltos totales (SDT). Los sólidos disueltos pueden afectar negativamente a la calidad del agua o a su suministro de varias maneras. Las

aguas con abundantes sólidos disueltos suelen ser de inferior potabilidad y pueden inducir una reacción fisiológica al consumidor (CNA: MA-FQ-30). Los principales iones que contribuyen a los SDT son carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio (EPA, 1976).

Los valores encontrados en las aguas del Río Sonora durante este trabajo, estuvieron dentro de los siguientes rangos: 400-498 mg/l (tabla 3); 448-586 (tabla 4); 348-568 (tabla 5) y 414-572 (tabla 6). El valor máximo permisible para consumo humano es de 1000 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), y 500 mg/l (CE-CCA-001/89). Por lo tanto, de acuerdo con la primer norma, no se tiene problema alguno, mientras que con la segunda norma, algunos valores están ligeramente por encima del valor máximo permisible, y si se considerara un promedio de ambas normas, los rangos encontrados quedarían dentro de lo tolerable.

Temperatura del agua. En las características de la mayoría de los parámetros físico-químicos, la temperatura del agua juega un papel preponderante, y aunque no existe norma alguna que especifique algún valor máximo ó mínimo permisible, este parámetro incide en el aumento o decremento de las concentraciones con respecto a otros.

Sin embargo, los rangos encontrados durante los muestreos (tablas 3, 4, 5 y 6), están dentro de la media en cada una de las estaciones del año.

Parámetros químicos

Los elementos contenidos en estos parámetros, pueden modificar las características químicas del agua, pudiendo ocasionar con esto graves daños a la salud humana, flora y fauna. La definición y valores encontrados se describen a continuación.

Oxígeno Disuelto (O.D.). El oxígeno disuelto es una necesidad fundamental para la vida de las poblaciones animales y vegetales en cualquier cuerpo de agua. Su supervivencia depende de la capacidad del agua para mantener ciertas concentraciones mínimas de éste. Uno de los efectos perjudiciales de la eliminación del oxígeno dentro del agua, es la desaparición de vida (Stocker y Seager, 1981). La contaminación del agua a través de las descargas de desechos orgánicos producidos por las actividades domésticas, municipales e industriales pueden reducir sustancialmente el contenido de oxígeno disuelto en el agua (Connell y Miller, 1984).

Los valores encontrados en los muestreos respectivos a cada estación del año, fluctúan de la siguiente manera; 5.2-7.4 mg/l (tabla 3), 6.6-9.6 mg/l (tabla 4), 5.6-9.8 mg/l (tabla 5) y 5.6 –15 mg/l (tabla 6). La CE-CCA-001/89 establece como fuente de abastecimiento un valor mínimo permisible de 4 mg/l de OD, aunque hace mención de que el valor deseable como mínimo pudiera ser de 6 mg/l. Por lo tanto, en los rangos descritos, ningún punto de muestreo está por debajo de la tolerancia permisible.

Bicarbonatos (HCO_3^-). La alcalinidad de las aguas es debida casi exclusivamente a la presencia de los iones de carbonato y bicarbonato. La disociación de los iones bicarbonato en carbonato, comienza a tener efecto a partir de un pH claramente superior a 8.2; por debajo de este valor de pH, la mayoría de los iones carbonato se unen al hidrógeno para dar lugar a los iones bicarbonato (Davis y De Wiest, 1971).

Los resultados de los muestreos del Río Sonora, fluctuaron entre los siguientes rangos; 256.4128-333.3367mg/l (tabla 3), 211.1575-321.7638 mg/l (tabla 4), 155.1732-340.3799 mg/l (tabla 5) y 242.3717-316.4297 mg/l (tabla 6). De acuerdo a una norma emitida por la SSA, de agua para consumo humano, establece que el promedio adecuado para evitar trastornos en la salud humana, deberá ser de los 300 mg/l (SSA, 1988). En base a esta norma, los rangos

encontrados se encuentran dentro del límite promedio, por lo tanto este parámetro no ofrece problema alguno.

Cloruros (Cl^-). Son aniones que están presentes en diversas concentraciones, y normalmente se incrementan con el contenido mineral. El agua disuelve los cloruros de los suelos y de las formaciones subterráneas, además en pozos sobreexplotados se genera una intrusión salina de agua de mar, si éstos se encuentran cerca de la costa (Davis y De Wiest, 1971).

En proporciones razonables no son dañinos a la salud, pero en concentraciones mayores a 250 mg/l, dan un sabor salino al agua, siendo de esta forma desagradable para el consumo humano. En este estudio, los valores resultantes de los muestreos están muy por debajo del límite máximo permisible, ya que el valor mínimo encontrado fue de 9.3798 mg/l (tabla 5), mientras que el máximo fue de 27.0367 mg/l (tabla 3).

Sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$). El ion sulfato es uno de los que se encuentra en mayor cantidad en las aguas naturales, debido al poder de disolución que tiene el agua sobre los minerales contenidos en la corteza terrestre. Todas las precipitaciones atmosféricas contienen sulfatos, que aunque en concentraciones inferiores a 2 ppm, constituyen, no obstante, uno de los mayores componentes del total de sólidos disueltos contenidos en las aguas de lluvia y nieve (Davis y De Wiest, 1971; Kolthoff, 1984). El exceso de sales de sulfato produce un efecto laxante sobre las personas que las ingieren.

El valor mínimo encontrado en los resultados de los muestreos fue de 110.828 mg/l (tabla 3), mientras que el máximo encontrado fue de 203.130 mg/l (tabla 5). Estos valores no causan daño alguno a la salud humana, ya se encuentran muy por debajo del límite máximo permitido, el cual es de 400 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable.

Tabla 3. Resultados correspondientes al primer muestreo (3 de septiembre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: **Físicos, Químicos y Nutrientes**

Estación de Muestreo de la (1) a la (8) y Control de Calidad	Temp. Ambiente °C	Temp. del Agua °C	pH	C.E. $\mu\text{mhos/cm}$	SDT mg/l	O.D. mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	N-NO ₃ ⁻ mg/l	N-NO ₂ ⁻ mg/l	P total mg/l	N-NH ₃ mg/l
(1) Arizpe	29	25	7.50	669	474	7.4	271.7976	9.7632	151.401	0.54169	ND<0.01	0.38445	0.03025 [▲]
(2) Arizpe	31	25	7.35	669	474	6.2	276.9259	10.7646	146.893	0.66706	ND<0.01	0.2558	0.01001 [▲]
(3) Tetuachi	35	27	7.26	663	487	6.9	271.7976	11.2653	146.893	0.5500	ND<0.01	0.73109	0.0706
(4) Sinoquipe	33	29	7.41	671	494	6.9	276.9259	11.0149	135.623	0.4414	ND<0.01	0.7870	0.0605
(5A) Aconchi	38	32	7.17	590	400	5.2	256.4128	10.2639	110.828	0.8008	0.01777	2.12127	0.3025
(5B) Aconchi *	38	32	7.17	587	418	5.2	256.4128	10.5143	110.828	0.77572	0.01777	2.1770	0.2722
(6) Baviácora	38	32	7.35	712	488	6.0	307.6954	13.0177	180.513	0.98467	ND<0.01	2.2750	0.12099
(7) Mazocahui	34	33	7.36	719	498	6.4	333.3367	14.0190	168.116	0.8509	ND<0.01	3.65548	0.211746
(8) Ures	36	33	7.52	672	466	6.0	287.1824	27.0367	135.623	0.98467	0.025	16.2774	0.5243
Blanco de Viale					ND<10			ND<2	ND<5	ND<0.1	ND<0.01	ND<0.01	0.03035 [▲]
Blanco de Campo					ND<10			ND<2	ND<5	ND<0.1	ND<0.01	ND<0.01	0.01008 [▲]
Recuperación (CC1) Concentración Baja **					496 99.20%			2.0027 100.1%	4.77 95.43%	0.093 93.11%	0.0209 104.89%	0.1999 99.99%	0.10076 100.76%
Recuperación (CC2) Concentración Media **								49.32 98.6%	24.832 99.33%	0.619 103.28%	0.1010 101.00%	0.636 106.00%	0.48895 97.79%
Recuperación (CC3) Concentración Alta **					4976 99.52%			100.88 100.8%	94.859 94.86%	0.988 98.83%	0.2009 100.48%	0.960 96.03%	1.0066 100.66%
Curva de Calibración (r)									0.99566	0.9984530	0.9997424	0.999563	0.999522
Límite de Detección					10			2	5	0.1	0.01	0.01	0.01
NOM-127-SSA1-1994			6.5-8.5 ⁽¹⁾		1000 ⁽¹⁾			250 ⁽¹⁾	400 ⁽¹⁾	10 ⁽¹⁾	0.05 ⁽¹⁾		0.5 ⁽¹⁾
NOM-001-ECOL-1996			5-10 ^{(1) v 2}										
CE-CCA-001/89			5-9 ⁽¹⁾ , 4-9 ⁽²⁾	1000 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	6.0 ⁽¹⁾		250 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	5.0 ⁽¹⁾	0.05 ⁽¹⁾		

* Muestra Duplicada; ** Este valor conocido varía en función del elemento o compuesto analizado, debido a la técnica utilizada; (r) = Coeficiente de Regresión
 (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola. ▲ Blancos cuyos valores exceden a los de las muestras y al límite de detección.
 C.E. = Conductividad Eléctrica; O.D. = Oxígeno Disuelto; SDT = Sólidos Disueltos Totales; N.D. = No Detectable

Tabla 4. Resultados correspondientes al segundo muestreo (29 de octubre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: **Físicos, Químicos y Nutrientes**

Estación de Muestreo de la (1) a la (8) y Control de Calidad	Temp. Ambiente °C	Temp. del Agua °C	pH	C.E. $\mu\text{mhos/cm}$	SDT mg/l	O.D. mg/l	HCO_3^- mg/l	Cl^- mg/l	SO_4^{2-} mg/l	N-NO_3^- mg/l	N-NO_2^- mg/l	P total mg/l	N-NH ₃ mg/l
(1) Arizpe													
(2) Arizpe	30	28	7.34	700	454	7.2	261.4331	13.2963	168.2752	0.816993	ND<0.01	0.2008	0.10083
(3) Tetuachi	32	27	8.06	686	450	8.0	246.3504	12.3114	178.5738	0.42483	ND<0.01	0.11974	0.06278
(4) Sinoquiye	29	28	7.82	637	448	9.4	211.1575	11.8189	168.2752	0.07189	0.014319	0.08191	0.14021
(5A) Aconchi	29	26	7.56	788	546	9.6	291.5985	14.2812	187.7280	1.25817	0.01620	1.1776	0.09132
(5B) Aconchi *	29	26	7.56	788	528	9.6	291.5985	14.2812	186.5839	1.20915	0.014319	1.1100	0.09132
(6) Baviácora	23	23	7.58	815	552	6.6	321.7638	17.7284	179.7180	0.53268	0.02373	1.35323	0.129113
(7) Mazocahui	24	17	7.70	868	586	8.2	306.6812	20.6832	171.7744	0.68954	0.014319	0.1089	0.06278
(8) Ures													
Blanco de Vial					ND<10			ND<2	ND<5	ND<0.1	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01
Blanco de Campo					ND<10			ND<2	ND<5	ND<0.1	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01
Recuperación (CC1) Concentración Baja **					502 100.4%			1.9698 98.49%	3.675 73.50%	0.1928 96.40%	0.019342 96.71%	0.2024 101.21%	0.01150 115.62%
Recuperación (CC2) Concentración Media **								48.999 97.99%	18.32 91.608%	1.050 105.06%	0.10034 100.34%	0.6270 104.50%	0.04985 99.70%
Recuperación (CC3) Concentración Alta **					5026 100.5%			99.969 99.97%	26.33 105.32%	1.940 97.22%	0.1989 99.46%	0.948 94.81%	0.10034 100.34%
Curva de Calibración (r)									0.995605	0.999452	0.9998375	0.99676	0.999861
Límite de Detección					10			2	5	0.1	0.01	0.01	0.01
NOM-127-SSA1-1994			6.5-8.5 ¹		1000 ¹			250 ¹	400 ¹	10 ¹	0.05 ¹		0.5 ¹
NOM-001-ECOL-1996			5-10 ¹ y 2									10 ¹	
CE-CCA-001/89			5-9 ¹ , 4-9 ²	1000 ¹	500 ¹	6.0 ¹		250 ¹	500 ¹	5.0 ¹	0.05 ¹		

* Muestra Duplicada; ** Este valor conocido varía en función del elemento o compuesto analizado, debido a la técnica utilizada; (r) = Coeficiente de Regresión
(¹) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (²) Para uso de riego agrícola.

C.E. = Conductividad Eléctrica; SDT= Sólidos Disueltos Totales; O.D. = Oxígeno Disuelto; N.D. = No Detectable

Tabla 5. Resultados correspondientes al tercer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: **Físicos, Químicos y Nutrientes**

Estación de Muestreo de la (1) a la (8) y Control de Calidad	Temp. Ambiente °C	Temp. del Agua °C	pH	C.E. $\mu\text{mhos/cm}$	SDT mg/l	O.D. mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l	N-NO ₃ ⁻ mg/l	N-NO ₂ ⁻ mg/l	P total mg/l	N-NH ₃ mg/l
(1) Arizpe	25	22	6.52	625	412	8.3	225.2514	9.3798	158.433	0.19130	ND<0.01	0.2088	0.108326
(2) Arizpe	26	22	7.13	640	380	7.8	265.2961	12.5687	120.7926	0.67350	0.0105	0.1420	0.23832
(3) Tetuachi	26	21	6.97	666	414	6.2	270.3017	11.8482	132.555	0.31670	ND<0.01	0.080	0.072218
(4) Sinoquipe	26	24	7.15	559	348	7.2	155.1732	12.0950	137.2602	0.30090	ND<0.01	0.184	0.11555
(5A) Aconchi	27	22	7.38	587	368	9.8	175.1955	13.0824	125.4976	0.3360	0.0111	0.0296	0.08666
(5B) Aconchi *	27	22	7.38	587	366	9.8	175.1955	13.3290	123.1451	0.3360	0.0111	0.0296	0.09388
(6) Baviácora	7	15	6.94	779	472	7.0	340.3799	16.2913	144.3178	0.9338	0.02634	0.0520	0.151657
(7) Mazocahui	10.5	12	7.14	847	522	9.0	335.3743	21.2280	184.3105	0.47095	ND<0.01	0.1248	0.101105
(8) Ures	28	23	7.15	891	568	5.6	325.3631	21.7213	203.1306	0.50950	0.01555	ND<0.01	0.05977
Blanco de Viaje					ND<10			ND< 2	ND< 5	ND< 0.10	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01
Blanco de Campo					ND<10			ND< 2	ND< 5	ND< 0.10	ND<0.01	ND<0.01	0.02166 [^]
Recuperación (CC1) Concentración Baja **					***			1.9746 98.73%	5.257 105.14%	0.09565 95.65%	0.01936 96.80%	0.1976 98.80%	0.0976 97.60%
Recuperación (CC2) Concentración Media **					***			48.380 96.76%	20.077 100.40%	0.9779 97.79%	0.1005 100.55%	0.63438 105.73%	0.5078 101.56%
Recuperación (CC3) Concentración Alta **					***			98.610 98.61%	26.429 105.72%	1.9728 98.64%	0.19696 98.78%	0.9536 95.36%	1.0046 100.46%
Curva de Calibración (U)							0.997234			0.9965625	0.999945	0.99675	0.99985
Límite de Detección					10			2	5	0.1	0.01	0.01	0.01
NOM-127-SSA1-1994			6.5-8.5 ¹		1000 ¹			250 ¹	400 ¹	10 ¹	0.05 ¹		0.5 ¹
NOM-001-ECOL-1996			5-10 ¹ y 2										10 ¹
CE-CCA-001/89			5-9 ¹ ; 4-9 ²	1000 ¹	500 ¹	6.0 ¹		250 ¹	500 ¹	5.0 ¹	0.05 ¹		

* Muestra Duplicada; ** Este valor conocido varía en función del elemento o compuesto analizado, debido a la técnica utilizada; (r) = Coeficiente de Regresión

*** No se realizó recuperación por no contar con un estándar de alta pureza; (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola.

C.E. = Conductividad Eléctrica; O.D. = Oxígeno Disuelto; SDT = Sólidos Disueltos Totales; N.D. = No Detectable. [^] Blanco de campo que excede al límite de detección

Tabla 6. Resultados correspondientes al cuarto muestreo (28 de abril del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros: **Físicos, Químicos y Nutrientes**

Estación de Muestreo de la (1) a la (8) y Control de calidad	Temp. Ambiente °C	Temp. del Agua °C	pH	C.E. $\mu\text{mhos/cm}$	SDT mg/l	O.D. mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l	N-NO ₃ ⁻ mg/l	N-NO ₂ ⁻ mg/l	P total mg/l	N-NH ₃ mg/l
(1) Arizpe													
(2) Arizpe	32	28	8.03	722	456	9.5	269.3019	14.6774	119.723	0.5664	0.03084	0.67325	0.790607
(3) Tetuachi	32	27	8.24	972	414	9.6	242.3717	11.2527	137.895	0.20896	ND<0.01	0.07056	0.09030
(4) Sinoquipe	36	27	7.80	672	414	9.2	242.3717	12.2312	148.7978	0.14928	ND<0.01	0.16456	0.1172
(5A) Aconchi	38	30	8.12	693	420	15.0	282.767	13.6989	130.6262	0.5022	0.01714	0.07056	0.1312
(5B) Aconchi *	38	30	8.12	693	422	15.0	282.767	13.6989	132.4434	0.5373	0.01774	0.0650	0.1253
(6) Baviácora	38	32	7.95	812	520	9.4	302.9646	17.6129	152.4322	0.15112	0.02488	0.14244	0.1640
(7) Mazocahui	37	32	7.98	843	528	9.3	269.3019	22.5054	194.227	ND<0.1	ND<0.01	0.10374	0.0858
(8) Ures	30	27	7.63	900	572	5.6	316.4297	21.5269	181.5068	0.8954	ND<0.01	0.03740	0.0840
Blanco de Viaje					ND<10			ND<2	ND< 5	ND< 0.1	ND<0.01	ND<0.01	0.6397 [▲]
Blanco de Campo					ND<10			ND<2	ND< 5	ND< 0.1	ND<0.01	ND<0.01	0.02366 [▲]
Recuperación (CC1)					***			2.079	4.70	0.1029	0.021	0.1977	0.10173
Concentración Baja **								103.9%	94.07%	102.885%	100.61%	98.87%	101.73%
Recuperación (CC2)					***			49.1894	18.87	0.9779	0.1005	0.634	0.47326
Concentración Media **								98.34%	94.38%	97.79%	100.52%	105.76%	94.65%
Recuperación (CC3)					***			98.34	24.875	1.9729	0.1994	0.9718	0.9922
Concentración Alta **								98.34%	99.50%	98.64%	99.70%	97.18%	99.22%
Curva de Calibración (L)									0.9995529	0.9963355	0.9998725	0.99698	0.9998413
Límite de Detección					10			2	5	0.1	0.01	0.01	0.01
NOM-127-SSA1-1994			6.5-8.5 ¹		1000 ¹			250 ¹	400 ¹	10 ¹	0.05 ¹		0.5 ¹
NOM-001-ECOL-1996			5-10 ¹ y ²									10 ¹	
CE-CCA-001/89			5-9 ¹ ,4-9 ²	1000 ¹	500 ¹	6.0 ¹		250 ¹	500 ¹	5.0 ¹	0.05 ¹		

* Muestra Duplicada; ** Este valor conocido varia en función del elemento o compuesto analizado, debido a la técnica utilizada; (r) = Coeficiente de Regresión

*** No se realizó recuperación por no contar con un estándar de alta pureza; (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola. C.E. = Conductividad Eléctrica; SDT= Sólidos Disueltos Totales; O.D. = Oxígeno Disuelto; N.D. = No Detectable. ▲ Blancos que exceden al límite de detección

Nutrientes

Los nutrientes reciben esta apelación debido a que son ampliamente utilizados como abonos para la tierra y fertilizantes para los cultivos, los cuales son en su mayoría especies del nitrógeno, tales como nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y el amonio (NH_4^+), así como del fósforo. El nitrógeno ocurre en el agua como aniones de nitrato y nitrito, y en forma catiónica como amonio. Las especies aniónicas como los nitratos, son fácilmente transportadas en el agua y son estables en un amplio rango de condiciones (Hem, 1992).

Aunque las rocas ígneas contienen pequeñas cantidades de nitrato soluble o de amoníaco, la mayor parte del ion nitrato presente en las aguas naturales tiene un origen orgánico o procede de elementos químicos de origen agrícola o industrial (Davis y De Wiest, 1971).

El nitrógeno es un constituyente fundamental de las proteínas de todos los organismos vivos. Cuando la materia se descompone por la acción bacteriana, las proteínas se transforman sucesivamente en aminoácidos, amoníaco, nitritos y finalmente en nitratos (Davis y De Wiest, 1971). Los valores que resultaron de los muestreos para cada uno de estos compuestos son como sigue:

Nitrógeno de Nitratos (N-NO_3^-). El valor mínimo que se encontró fue en el segundo muestreo (tabla 4), y fue de $\text{ND}<0.1$ mg/l (estación 4; Sinoquipe), mientras que el valor máximo se tuvo también en la tabla 4, mismo que fue de 1.25817 mg/l (estación 5; Aconchi), los cuales no ofrecen riesgo para la salud humana, ya que el límite máximo permitido es de 10 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable.

Nitrógeno de Nitritos (N-NO_2^-). Para este parámetro el valor mínimo fue de $\text{ND}<0.01$ mg/l en varios de los puntos de muestreos de las tablas 3, 4, 5 y 6. Mientras que el valor máximo encontrado fue de 0.03084 mg/l; tabla 6 (estación

1; Arizpe). Estos valores no ofrecen riesgo alguno para la salud humana, ya que el límite máximo permitido es de 0.05 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable.

Nitrógeno Amoniacal (N-NH_3^-). El valor mínimo es de 0.01001 mg/l (tabla 3; estación 2, Arizpe) y el valor máximo de 0.5243 mg/l (tabla 3; estación 8, Ures), de los cuales es último de ellos ofrece riesgo para la salud humana, ya que el límite máximo permitido es de 0.5 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable. Sin embargo de los cuatro muestreos éste es el único que excede el valor máximo, ya que el inmediato inferior, fue de solo 0.3025 mg/l también del primer muestreo (tabla 3). Como se puede observar sólo un dato es el que excede el máximo permisible, por lo tanto este compuesto no ocasiona daños a la salud humana. Particularmente en el caso del nitrógeno amoniacal, los blancos de campo y viaje que ocasionalmente están al nivel o mayor de la concentración reportada de las muestras estudiadas. Esto puede implicar una contaminación de las muestras por nitrógeno amoniacal, sin embargo, la no consideración de este parámetro no tiene implicaciones en el contexto de los objetivos y conclusiones de la presente investigación.

Fósforo total (P_{total}). De acuerdo a la norma; NOM-001-ECOL-1996, para fuente de abastecimiento de agua potable, el límite máximo permisible par evitar daños a la salud humana es de 10 mg/l.

Los resultados de los cuatro muestreos de campo son como sigue; el valor de la estación 8 (Ures) del primer muestreo (tabla 3), resultó ser el único que excedió el valor máximo permisible, ya que fue de 18.2774 mg/l. Sin embargo el rango del resto de los resultados se encuentra entre; 0.0296 mg/l en la estación 5 (Aconchi) de la tabla 5, hasta 3.655 mg/l de la estación 7 (Mazocahui) de la tabla 3. Por lo tanto fuera de ese valor extraordinario, no existe riesgo de contaminación al ambiente y a la salud humana debido a éste elemento.

Parámetros químicos (metales) del agua superficial

La presencia de metales en el agua constituye un problema serio debido a que su toxicidad afecta adversamente a los seres vivos que consumen agua, así como a los sistemas ecológicos. Los metales tienen diferentes clasificaciones, de las cuales predominan dos: los denominados metales pesados cuya densidad es mayor a 5 g/cm³ (cobre, hierro, plomo, entre otros), y los metales ligeros, que presentan una densidad inferior a 5 g/cm³ (calcio, magnesio, potasio, entre otros) (Stocker y Seager, 1981). Las formas físicas y químicas de los metales en las aguas naturales son controladas por las variables del medio ambiente (pH, salinidad, potencial redox, entre otros) y las actividades propias del metal (Förstner, 1979).

Los metales pesados pueden estar presentes en la naturaleza de diversas formas, sin embargo, solo pueden ser absorbidos por los vegetales si se encuentran disueltos en el agua. De aquí parte la cadena alimenticia del medio acuático (Pérez-Tello, 1991).

En las tablas 7, 8, 9 y 10 se muestran los resultados de los cuatro muestreos llevados a cabo en el agua superficial del Río Sonora. En éstas se puede observar que algunos valores máximos permisibles establecidos por NOM-127-SSA1-1994 están por debajo de límites de detección, lo cual es un indicador de que este marco de referencia no siempre es aplicable para definir si existe o no daños a la salud. El análisis correspondiente se expone a continuación.

Cobre (Cu). El rango de valores encontrados en el primer muestreo es de; 0.02-2.77 mg/l (tabla 7), mientras que para el segundo, tercer y cuarto muestreo (tablas 8, 9 y 10 respectivamente); no se detectó concentración alguna en ninguna estación de muestreo. De acuerdo a las normas: NOM-127-SSA1-1994 y a CE-CCA-001/89, para uso y consumo humano, el valor que ofrece riesgos es el encontrado en la estación 8 (Ures), que fue de 2.77 mg/l. Por otro lado la

norma CE-CCA-001/89 para uso de riego agrícola, establece un valor máximo permisible de 0.2 mg/l, y los valores encontrados en el primer muestreo, en las estaciones 6 (Baviácora) y 7 (Mazocahui) fueron de 0.38 mg/l y 0.54 mg/l, los cuales sobrepasan el valor máximo de la citada norma. Sin embargo éstos son solo datos puntuales ya que en el resto no se tienen problemas con este elemento.

Hierro (Fe). Los valores encontrados fueron los siguientes: tabla 7, 3.29-46.00 mg/l; tabla 8, 0.13-0.76 mg/l; tabla 9, 0.06-0.18 mg/l y tabla 10, 0.06-0.27 mg/l, respectivamente para los muestreos 1, 2, 3 y 4. Las normas que establecen valores máximos permisibles son: NOM-127-SSA1-1994, con 0.30 mg/l para aguas utilizadas en el consumo humano, mientras que la CE-CCA-001/89 especifica un valor de 5.0 mg/l para aguas de uso de riego agrícola. Como puede observarse, los valores encontrados en los muestreos de octubre del 99, febrero del 2000 y abril del 2000, no representan riesgo en ninguno de los dos casos. Mientras que la totalidad de las estaciones del primer muestreo; tabla 7 (realizado en septiembre del 99) exceden de sobremanera el valor máximo permisible para consumo humano, y en cuanto al agua para uso de riego agrícola, las estaciones 4 (9.24 mg/l), 5(28.17 mg/l), 6 (33.10 mg/l), 7 (36.10 mg/l) y 8 (46.00mg/l), presentaron altas concentraciones de este metal excediendo de esta manera el valor de la citada norma.

Manganeso (Mn). Para este elemento, los valores encontrados durante los muestreos fueron los siguientes: tabla 7, 0.08-22.90 mg/l; tabla 8, <0.02-0.10 mg/l; tabla 9, <0.02-0.11 mg/l y tabla 10, <0.02-0.10 mg/l, respectivamente para los muestreos 1, 2, 3 y 4. Las normas que establecen valores máximos permisibles son: NOM-127-SSA1-1994, con 0.15 mg/l y CE-CCA-001/89 con 0.10 mg/l para aguas utilizadas en el consumo humano. Como puede observarse, los valores encontrados en los muestreos de octubre del 99 (segundo muestreo), febrero del 2000 (tercer muestreo) y abril del 2000 (cuarto muestreo), no presentan riesgo en ninguno de los dos casos, mientras que las estaciones; 3 (0.21 mg/l), 4 (0.37 mg/l), 5 (1.95 mg/l), 6 (3.03 mg/l), 7(4.55 mg/l) y

8 (22.90 mg/l) del primer muestreo; tabla 6 (realizado en septiembre del 99) sobrepasa los valores máximos permisibles de ambas normas, especialmente en la estación 8 (Ures).

Plomo (Pb). Los valores encontrados durante los muestreos fueron los siguientes: tabla 7, <0.07-1.5887 mg/l; tabla 8, 9 y 10; no detectable (<0.07 mg/l), respectivamente para los muestreos 1, 2, 3 y 4. Las normas que establecen valores máximos permisibles son: NOM-127-SSA1-1994, con 0.025 mg/l, CE-CCA-001/89 con 0.05 mg/l y NOM-001-ECOL-1996 con 0.2 mg/l para aguas utilizadas en el consumo humano. Mientras que las normas; CE-CCA-001/89 con 5.0 mg/l y NOM-001-ECOL-1996 con 0.5 mg/l para aguas utilizadas para riego agrícola. Como puede observarse, los valores encontrados en el segundo (tabla 8), tercer (tabla 9) y cuarto (tabla 10) muestreos, no presentan riesgo en cuanto a estas dos últimas normas, mientras que las estaciones: 5 (0.1467 mg/l), 6 (0.2387mg/l), 7 (0.3287 mg/l) y 8 (1.5887 mg/l) del primer muestreo (tabla 6) sobrepasan los valores máximos permisibles de las tres normas en cuanto a agua para consumo humano, sin embargo solo en la estación 8 (Ures) se sobrepasa el valor máximo de la norma CE-CCA-001/89 para uso de riego agrícola. Sin embargo en cuanto a la NOM-127-SSA1-1994, no es posible determinar si existe riesgo para la salud humana, ya que el límite de detección es mayor al máximo permisible de la norma.

Zinc (Zn). La variación total de los cuatro muestreos fue de <0.01 mg/l hasta 1.5887 mg/l en la estación 8 del primer muestreo. Tanto la NOM-127-SSA1-1994 como la CE-CCA-001/89, establecen como valor máximo 5 mg/l para uso y consumo humano, mientras que esta última además especifica un valor de 2 mg/l para uso en riego agrícola. Para este elemento la NOM-001-ECOL-1996 señala que el promedio mensual deberá ser de 10 mg/l para ambos usos. Sin embargo, tomando en cuenta una posible contaminación de las muestras (obsérvese que los blancos de laboratorio presentaron valores similares a los de las muestras), no es se puede aseverar si existe riesgo alguno debido al Zinc en la subcuenca analizada.

Cadmio (Cd). En la mayoría de las estaciones de muestreo no se lograron lecturas (no detectables: $ND < 0.01$ mg/l), excepto en la estación 8 del primer muestreo, el cual fue de 0.05 mg/l. Este valor solo excede al que se especifica en la norma CE-CCA-001/89 el cual es de 0.01 mg/l tanto para uso de consumo humano, como para uso de riego agrícola. Las normas NOM-127-SSA1-1994 contempla un valor máximo permisible de 0.005 mg/l para uso y consumo humano, por lo tanto no es posible determinar si existe daño a la salud humana, ya que el límite de detección es superior a éste. La NOM-001-ECOL-1995 contempla valores más altos para ambos usos, por lo tanto para esta norma no se tendría problema. Por otro lado, los valores detectados en los blancos de laboratorio en el primer y segundo muestreo (tablas 7 y 8 respectivamente), presentan la interrogante de la veracidad de los resultados en las muestras, lo cual impide determinar la correcta valoración del impacto de éste sobre la zona.

Calcio (Ca). Los valores más altos encontrados en cada uno de los muestreos son como sigue: primer muestreo (tabla 7), 460 mg/l en la estación 8 (Ures); segundo muestreo (tabla 8), 118 mg/l en la estación 6 (Baviácora); tercer muestreo (tabla 9), 100.0 mg/l en la estación 8 (Ures) y cuarto muestreo (tabla 10), 21.0 mg/l en la estación 6 (Baviácora). El promedio general de los cuatro muestreo es de aproximadamente 80 mg/l, por lo que se tienen dos extremos uno de ellos en la estación 8 del primer muestreo y el otro en el cuarto muestreo. Este parámetro no se reporta en ninguna de las normas mexicanas, por lo tanto no se tiene un punto de referencia de cual es el valor máximo permisible.

Magnesio (Mg). Al igual que el calcio, este elemento no se incluye en las normas mexicanas, por lo tanto sólo se especificarán los valores más altos encontrados en cada uno de los muestreos, y son los siguientes: primer muestreo (tabla 7), 257 mg/l en la estación 8 (Ures); segundo muestreo (tabla 8), 20.25 mg/l en la estación 7 (Mazocahui); tercer muestreo (tabla 9), 22.50 mg/l en la estación 8 (Ures) y cuarto muestreo (tabla 10), 21.0 mg/l en la estación 6 (Baviácora). Los extremos se tienen en la estación 8 del primer muestreo y el otro en el tercer muestreo en de la misma estación.

Potasio (K). Para este elemento tampoco existe un parámetro de comparación en las normas mexicanas, por lo tanto los valores máximos encontrados son los siguientes: primer muestreo (tabla 7), 78 mg/l en la estación 8 (Ures); segundo muestreo (tabla 8), 5.5 mg/l en la estación 7 (Mazocahui); tercer muestreo (tabla 9), 4.0 mg/l en las estaciones 5 y 6 (Aconchi y Baviácora) y cuarto muestreo (tabla 10), 5.5 mg/l en la estación 4 (Sinoquipe). Siendo el más alto en la estación 8 del primer muestreo.

Sodio (Na). Para este parámetro, solo la NOM-127-SSA1-1994, establece como valor máximo permisible 200 mg/l para el uso y consumo humano. Los rangos encontrados en cada uno de los muestreos son como sigue: primer muestreo (tabla 7), 26.17-39.34 mg/l; segundo muestreo (tabla 8), 32.50-51.50 mg/l; tercer muestreo (tabla 9), 29.835-56.835 mg/l y cuarto muestreo (tabla 10), 28.0-50.5 mg/l. Como puede observarse, ninguno de estos valores excede el máximo especificado en la citada norma, por lo tanto no se tiene problema alguno con este parámetro.

Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua subterránea

Las características de los parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua expuestos en el apartado del agua superficial, prevalen para el agua subterránea (tablas 11 y 12).

Parámetros físicos

Potencial de Hidrógeno (pH); Los valores que se especifican en las normas son; para uso de agua potable de 6.5 a 8.5; NOM-127-SSA1-1994 y de 5-10 tanto para uso agrícola como para consumo humano; NOM-001-ECOL-1996. Los valores encontrados de pH en el Río Sonora en los dos muestreos del agua subterránea, son en su mayoría ligeramente ácidos, ya que para el primer muestreo (tabla 11), se tiene un rango de 6.56-6.80. Mientras que el segundo muestreo (tabla 12) el rango fue de; 6.96-7.36. Sin embargo ninguno de estos rangos está fuera de los permitidos por las normas citadas.

Tabla 7. Resultados correspondientes al primer muestreo (3 de septiembre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales)

Estación de Muestreo De la (1) a la (8) Y Control de Calidad	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	Pb ppm	Zn ppm	Cd ppm	Ca ppm	Mg ppm	K ppm	Na ppm
(1) Arizpe	0.03	4.74	0.13	ND<0.07	0.0467	0.01	91.00	17.0	5.0	26.17
(2) Arizpe	ND<0.02	5.25	0.08	ND<0.07	0.0267	ND<0.01	90.00	16.0	5.0	27.67
(3) Tetuachi	0.03	5.79	0.21	ND<0.07	0.0467	ND<0.01	93.50	17.5	5.5	30.17
(4) Sinoquipe	0.05	5.24	0.37	ND<0.07	0.0767	0.01	91.80	18.5	6.0	28.67
(5A) Aconchi	0.02	26.17	1.95	0.1467	0.2667	0.01	100.00	30.0	13.5	27.17
(5B) Aconchi *	0.02	28.06	1.96	0.1387	0.2667	0.01	99.50	31.5	13.5	26.67
(6) Baviácora	0.38	33.10	3.03	0.2387	0.4067	0.01	128.00	41.5	16.0	34.17
(7) Mazocahui	0.54	56.10	4.55	0.3287	0.5767	0.01	145.00	52.0	19.5	36.67
(8) Ures	2.71	66.00	22.90	1.5887	0.2167	0.05	460.00	257.0	78.0	39.34
Blanco de Viaje	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	0.05	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Campo	0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	0.05	ND<0.01	0.0734
Blanco de Laboratorio: B1	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.02	0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.06
Blanco de Laboratorio: B2	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.01	0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.06
Blanco de Laboratorio: B3	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.01	0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.06
Recuperación: CC1 (5 ppm)	5.1 102.00%	4.89 97.80%	5.0 100%	4.87 97.4%	4.75 95.0%	5.00 100.0%	5.00 100.0%	4.75 95.0%	5.0 100.0%	5.365 107.3%
Recuperación: CC2 (10 ppm)	10.06 100.60%	11.40 114.0%	10.13 101.30%	10.13 101.30%	9.70 97.00%	9.95 99.50%	10.7 107.0%	9.62 96.2%	10.25 102.5%	11.017 110.17%
Límite de Detección	0.02	0.04	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.06
NOM-127-SSA1-1994	2.0 ¹	0.3 ¹	0.15 ¹	0.025 ¹	5.0 ¹	0.005 ¹				200.0 ¹
NOM-001-ECOL-1996	4.0 ¹ ; 6.0 ²			0.2 ¹ ; 0.5 ²	10 ¹ y 2	0.1 ¹ ; 0.2 ²				
CE-CCA-001/89	1.0 ¹ ; 0.2 ²	5.0 ²	0-1 ¹	0.5 ¹ ; 5.0 ²	5 ¹ ; 2 ²	0.01 ¹ y 2				

* Muestra Duplicada; (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola.; N.D. = No Detectable

Tabla 8. Resultados correspondientes al segundo muestreo (29 de octubre de 1999) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales)

Estación de Muestreo de la (1) a la (8) y Control de calidad	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Cd	Ca	Mg	K	Na
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
(1) Arizpe	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
(2) Arizpe	ND<0.02	ND<0.04	0.07	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	96.75	14.25	3.5	33.00
(3) Tetuachi	ND<0.02	0.32	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	95.00	16.50	4.0	34.50
(4) Sinoquipe	ND<0.02	0.35	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	77.75	15.50	4.5	32.50
(5A) Aconchi	ND<0.02	0.34	0.05	ND<0.07	0.01	ND<0.01	106.00	16.25	4.5	40.00
(5B) Aconchi *	ND<0.02	0.36	0.05	ND<0.07	0.01	ND<0.01	105.75	16.25	4.5	37.50
(6) Baviácora	ND<0.02	0.13	0.10	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	118.00	17.00	5.0	43.00
(7) Mazocahui	ND<0.02	0.76	0.05	ND<0.07	0.01	ND<0.01	108.00	20.25	5.5	51.50
(8) Ures	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Blanco de Viaje	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	0.74	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Campo	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Laboratorio: B1	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.02	0.01	0.05	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Laboratorio: B2	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.02	0.01	0.14	ND<0.005	ND<0.01	0.06
Blanco de Laboratorio: B3	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.02	0.02	0.14	ND<0.005	ND<0.01	0.06
Recuperación: CC1 (5 ppm)	5.14 102.80%	5.01 99.80%	5.5 101.0%	4.85 97.0%	5.00 100.00%	4.8335 96.67%	4.65 93.0%	5.0 100.0%	4.65 93.0%	4.70 94.0%
Recuperación: CC2 (10 ppm)	9.69 96.9%	10.10 101.0%	10.15 101.50%	9.95 99.50%	10.00 100.00%	9.7835 97.84%	11.85 118.5%	9.85 98.5%	9.2 92.0%	9.45 94.5%
Límite de Detección	0.02	0.04	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.06
NOM-127-SSA1-1994	2.0 ¹	0.3 ¹	0.15 ¹	0.025 ¹	5.0 ¹	0.005 ¹				200.0 ¹
NOM-001-ECOL-1996	4.0 ¹ ; 6.0 ²			0.2 ¹ ; 0.5 ²	10 ¹ ; 2	0.1 ¹ ; 0.2 ²				
CE-CCA-001/89	1.0 ¹ ; 0.2 ²	5.0 ²	0-1 ¹	0.5 ¹ ; 5.0 ²	5 ¹ ; 2 ²	0.01 ¹ ; 2				

* Muestra Duplicada; (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola; N.D. = No Detectable

Tabla 9. Resultados correspondientes al tercer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales)

Estación de Muestreo de la (1) a la (8)	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Cd	Ca	Mg	K	Na
Control de Calidad y	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
(1) Arizpe	ND<0.02	0.09	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	73.00	18.50	2.5	36.335
(2) Arizpe	ND<0.02	0.08	0.04	ND<0.07	0.0134	ND<0.01	80.00	19.00	3.0	30.335
(3) Tetuachi	ND<0.02	0.16	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	78.50	18.50	3.5	29.835
(4) Sinoquipe	ND<0.02	0.06	0.02	ND<0.07	0.0134	ND<0.01	49.50	16.00	3.0	36.335
(5A) Aconchi	ND<0.02	0.10	0.04	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	51.50	16.00	4.0	39.335
(5B) Aconchi *	ND<0.02	0.11	0.04	ND<0.07	0.0134	ND<0.01	49.50	15.50	3.5	39.835
(6) Baviácora	ND<0.02	0.18	0.11	ND<0.07	0.0234	ND<0.01	92.00	19.00	4.0	45.335
(7) Mazocahui	ND<0.02	0.16	0.03	ND<0.07	0.0134	ND<0.01	95.00	22.00	3.5	55.835
(8) Ures	ND<0.02	0.10	ND<0.02	ND<0.07	0.0134	ND<0.01	100.00	22.50	3.5	56.835
Blanco de Viaje	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Campo	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Laboratorio: B1	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Laboratorio: B2	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Laboratorio: B3	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Recuperación: CC1 (5 ppm)	5.25 105.00%	5.18 103.6%	5.225 104.5%	5.025 100.5%	5.50 110.06%	5.025 100.5%	4.925 98.5%	5.225 104.5%	4.95 99.0%	4.99 99.84%
Recuperación: CC2 (10 ppm)	9.97 99.75%	10.30 103.0%	10.32 103.20%	10.025 100.25%	10.32 103.20%	10.32 103.2%	10.15 101.5%	9.875 98.75%	10.1 101.0%	10.19 101.92%
Límite de Detección	0.02	0.04	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.06
NOM-127-SSA1-1994	2.0 ¹	0.3 ¹	0.15 ¹	0.025 ¹	5.0 ¹	0.005 ¹				200.0 ¹
NOM-001-ECOL-1996	4.0 ¹ ; 6.0 ²			0.2 ¹ ; 0.5 ²	10 ¹ ; 2	0.1 ¹ ; 0.2 ²				
CE-CCA-001/89	1.0 ¹ ; 0.2 ²	5.0 ²	0-1 ¹	0.5 ¹ ; 5.0 ²	5 ¹ ; 2 ²	0.01 ¹ ; 2				

* Muestra Duplicada; (¹) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (²) Para uso de riego agrícola. ; N.D. = No Detectable

Tabla 10. Resultados correspondientes al cuarto muestreo (28 de abril del 2000) del agua superficial del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (estación 1) y Ures (estación 8). Parámetros Químicos (metales)

Estación de Muestreo de la (1) a la (8) y Control de calidad	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Cd	Ca	Mg	K	Na
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
(1) Arizpe	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
(2) Arizpe	ND<0.02	0.12	0.10	ND<0.07	0.01	ND<0.01	19.50	19.50	4.5	32.5
(3) Tetuachi	ND<0.02	0.18	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	19.00	19.00	4.0	29.5
(4) Sinoquipe	ND<0.02	0.17	0.03	ND<0.07	0.01	ND<0.01	19.00	19.00	5.5	28.0
(5A) Aconchi	ND<0.02	0.27	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	17.00	17.00	3.5	33.0
(5B) Aconchi *	ND<0.02	0.20	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	15.50	15.50	3.5	34.5
(6) Baviácora	ND<0.02	0.22	0.06	ND<0.07	0.01	ND<0.01	21.00	21.00	4.0	48.5
(7) Mazocahui	ND<0.02	0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.02	ND<0.01	20.50	20.50	5.0	48.5
(8) Ures	ND<0.02	0.06	0.02	ND<0.07	0.02	ND<0.01	19.00	19.00	4.5	50.5
Blanco de Vial	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.3
Blanco de Campo	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
Blanco de Laboratorio: B1	ND<0.02	0.07	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.06
Blanco de Laboratorio: B2	ND<0.02	0.06	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.06
Blanco de Laboratorio: B3	ND<0.02	0.06	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.07
Recuperación: CC1 (5 ppm)	4.92 98.40%	4.70 94.0%	4.65 93.0%	4.75 95.5%	4.95 99.0%	5.0 100.0%	4.85 97.0%	4.85 97.0%	4.60 92.0%	4.55 91.0%
Recuperación: CC2 (10 ppm)	9.80 98.00%	9.47 94.7%	9.45 94.5%	9.45 94.5%	9.75 97.5%	10.0 100.0%	9.70 97.0%	9.70 97.0%	9.35 93.5%	9.55 95.5%
Límite de Detección	0.02	0.04	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.06
NOM-127-SSA1-1994	2.0 ¹	0.3 ¹	0.15 ¹	0.025 ¹	5.0 ¹	0.005 ¹				200.0 ¹
NOM-001-ECOL-1996	4.0 ¹ ; 6.0 ²			0.2 ¹ ; 0.5 ²	10 ¹ y 2	0.1 ¹ ; 0.2 ²				
CE-CCA-001/89	1.0 ¹ ; 0.2 ²	5.0 ²	0.1 ¹	0.5 ¹ ; 5.0 ²	5 ¹ ; 2 ²	0.01 ¹ y 2				

* Muestra Duplicada; (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola.; N.D. = No Detectable

Conductividad Eléctrica (C.E.). Los valores encontrados durante los muestreos de este estudio fluctuaron desde 801 $\mu\text{mhos/cm}$ hasta 1092 $\mu\text{mhos/cm}$ en el primer muestreo (tabla 11), mientras que para el segundo muestreo (tabla 12), fue de 811 $\mu\text{mhos/cm}$ a 1070 $\mu\text{mhos/cm}$.

De acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua (CE-CCA-001/89) se establece como máximo permisible 1000 $\mu\text{mhos/cm}$ en aguas para uso de riego, no encontrándose norma alguna que se refiera al valor máximo permisible para consumo humano. Sin embargo cualquiera que sea éste, no deberá ser mayor al de uso de riego. Por lo tanto en el área estudiada solo se tiene problema con el agua del pozo ubicado en Aconchi, ya que en ambos muestreos, el resultado excedió del máximo permisible.

Sólidos disueltos totales (SDT). Los valores encontrados en las aguas del Río Sonora durante este trabajo, estuvieron dentro de los siguientes rangos: 496-676 mg/l (tabla 11) y 524-254 (tabla 12). El valor máximo permisible para consumo humano es de 1000 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), y 500 mg/l (CE-CCA-001/89). Por lo tanto de acuerdo con la primer norma no se tiene problema alguno, mientras que con la segunda norma, algunos valores están ligeramente por encima del valor máximo permisible, y si se considerara un promedio de ambas normas, los rangos encontrados quedarían dentro de lo tolerable.

Temperatura del agua. Los rangos encontrados durante los muestreos (tablas 11 y 12), están dentro de la media de acuerdo a cada una de las estaciones del año.

Parámetros químicos

Estos parámetros tienen las mismas características y definiciones tanto en agua superficial como subterránea, por lo tanto, lo planteado en el apartado

anterior sigue teniendo validez, y solo se presentaran los resultados y los así como el análisis correspondiente.

Bicarbonatos (HCO_3^-). Los resultados de los muestreos fluctuaron entre los siguientes rangos: 310.3464-350.3910 mg/l (tabla 11) y 276.0315-390.4877 mg/l (tabla 12). De acuerdo a la (SSA, 1988) el agua deberá tener un promedio de 300 mg/l, para evitar que el exceso de este compuesto en el agua ocasione trastornos en la salud. Por lo tanto, la mayoría de los valores encontrados se encuentran por encima del límite promedio, pudiendo esto traer consecuencias de riesgo para la salud humana.

Cloruros (Cl_2^-). En proporciones razonables no son dañinos a la salud, pero en concentraciones mayores a 250 mg/l (NOM-127-SSA1-1994 y CE-CCA-001/89), dan un sabor salino al agua, siendo de esta forma desagradable para el consumo humano. En este estudio, los valores resultantes de los muestreos están muy por debajo del límite máximo permisible, ya que el valor mínimo encontrado fue de 10.8608 mg/l (tabla 11), mientras que el máximo fue de 26.1648 mg/l (tabla 11).

Sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$). El valor mínimo encontrado en los resultados de los muestreos fue de 137.2602 mg/l (tabla 11), mientras que el máximo encontrado fue de 268.730 mg/l (tabla 12). Estos valores no causan daño alguno a la salud humana, ya que se encuentran muy por debajo del límite máximo permitido, el cual es de 400 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable.

Tabla 11. Resultados correspondientes al primer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua subterránea del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (pozo 1) y Ures (pozo 3). Parámetros: **Físicos, Químicos y Nutrientes**

Pozo de Muestreo Y Control de Calidad	Temp. Ambiente °C	Temp. del Agua °C	pH	C.E. µmhos/cm	SDT mg/l	O.D. mg/l	HCO ₃ ⁼ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l	N-NO ₃ ⁻ mg/l	N-NO ₂ ⁻ mg/l	P total mg/l	N-NH ₃ mg/l
(1) Arizpe	24	18	6.64	820	510	---	350.3910	20.2407	170.1954	0.81809	0.00096	0.0464	0.01444 ^Δ
(2) Aconchi	25	23	6.56	1092	676	---	376.9207	26.1648	175.7148	3.78090	0.0016	0.024	0.01444 ^Δ
(3) Ures	20	24	6.80	801	496	---	310.3464	10.8608	137.2602	1.95600	0.0035	0.0016	0.02888
<u>Blanco de Viaje</u>					ND<10			ND< 2	ND< 5	ND< 0.10	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01
<u>Blanco de Campo</u>					ND<10			ND< 2	ND< 5	ND< 0.10	ND<0.01	ND<0.01	0.02166 ^Δ
<u>Recuperación (CC1) Concentración Baja **</u>					***			1.9746 98.73%	5.257 105.14%	0.09565 95.65%	0.01936 98.80%	0.1976 98.80%	0.0976 97.60%
<u>Recuperación (CC2) Concentración Media **</u>					***			48.380 98.76%	20.077 100.40%	0.9779 97.79%	0.1005 100.55%	0.63438 105.73%	0.5078 101.56%
<u>Recuperación (CC3) Concentración Alta **</u>					***			98.610 98.61%	26.429 105.72%	1.9728 98.64%	0.19696 98.78%	0.9536 95.36%	1.0046 100.46%
<u>Curva de Calibración (t)</u>									0.997234	0.9965625	0.999945	0.99675	0.99985
Límite de Detección					10			2	5	0.1	0.01	0.01	0.01
NOM-127-SSA1-1994			6.5-8.5 ¹		1000 ¹			250 ¹	400 ¹	10 ¹	0.05 ¹		0.5 ¹
NOM-001-ECOL-1996			5-10 ^{1/2}									10 ¹	
CE-CCA-001/89			5-9 ¹ ; 4-9 ²	1000 ¹	500 ¹	6.0 ¹	250 ¹	250 ¹	500 ¹	5.0 ¹	0.05 ¹		

** Este valor conocido varía en función del elemento o compuesto analizado, debido a la técnica utilizada. ^Δ Blanco cuyo valor excede a las muestras y límite de detección

*** No se realizó recuperación por no contar con un estándar de alta pureza; (¹) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (²) Para uso de riego agrícola.
C.E. = Conductividad Eléctrica; O.D. = Oxígeno Disuelto; SDT = Sólidos Disueltos Totales; N.D. = No Detectable.

Tabla 12. Resultados correspondientes al segundo muestreo (28 de abril del 2000) del agua subterránea del Río Sonora, en el tramo comprendido entre Arizpe (pozo 1) y Ures (pozo 3). Parámetros: **Físicos, Químicos y Nutrientes**

Pozo de Muestreo Y Control de Calidad	Temp. Ambiente °C	Temp. del Agua °C	pH	C.E. µmhos/cm	SDT mg/l	O.D. mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	N-NO ₃ ⁻ mg/l	N-NO ₂ ⁻ mg/l	P total mg/l	N-NH ₃ mg/l
(1) Arizpe	22	23	6.96	811	524	---	302.9646	20.5484	186.958	0.4480	ND<0.01	0.10374	0.0365
(2) Aconchi	37	23	7.30	1070	654	---	390.4877	22.5054	268.730	3.3795	ND<0.01	0.16456	ND<0.01
(3) Ures	32	23	7.36	828	524	---	276.0315	20.5484	166.969	1.9346	0.00166	0.0650	ND<0.01
Blanco de Viaje					ND<10			ND<2	ND<5	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	0.0387
Blanco de Campo					ND<10			ND<2	ND<5	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	0.0336
Recuperación (CC1) Concentración Baja **					***			2.079 103.9%	4.70 94.07%	0.1029 102.885%	0.021 100.61%	0.1977 98.87%	0.10173 101.73%
Recuperación (CC2) Concentración Media **					***			49.1694 98.34%	18.87 94.38%	0.9779 97.79%	0.1005 100.52%	0.634 105.76%	0.47326 94.65%
Recuperación (CC3) Concentración Alta **					***			98.34 98.34%	24.875 99.50%	1.9729 98.64%	0.1994 99.70%	0.9718 97.18%	0.9922 99.22%
Curva de Calibración (r)									0.995529	0.9963355	0.9998725	0.99698	0.9998413
Límite de Detección					10			2	5	0.1	0.01	0.01	0.01
NOM-127-SSA1-1994			6.5-8.5 ¹		1000 ¹			250 ¹	400 ¹	10 ¹	0.05 ¹		0.5 ¹
NOM-001-ECOL-1996			5-10 ¹ y 2										
CE-CCA-001/89			5-9 ¹ , 4-9 ²	1000 ¹	500 ¹	6.0 ¹		250 ¹	500 ¹	5.0 ¹	0.05 ¹		

** Este valor conocido varía en función del elemento o compuesto analizado, debido a la técnica utilizada; (r) = Coeficiente de Regresión

*** No se realizó recuperación por no contar con un estándar de alta pureza; (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola.
C.E. = Conductividad Eléctrica; SDT = Sólidos Disueltos Totales; O.D. = Oxígeno Disuelto; N.D. = No Detectable. [▲] Blancos que exceden a muestras y límite de detección

Nutrientes

Nitrógeno de Nitratos ($N-NO_3^-$). Variación encontrada en ambos muestreos del agua subterránea: tabla 11 (primer muestreo; 4 de febrero del 2000), de 0.81809 mg/l [Arizpe] a 3.7809 mg/l (Aconchi); tabla 12 (segundo muestreo; 28 de abril del 2000), de 0.4480 mg/l (Arizpe) a 3.3795 mg/l (Aconchi), los cuales a pesar de ser superiores a los valores encontrados en el agua superficial, no ofrecen riesgo para la salud humana, ya que el límite máximo permitido es de 10 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable.

Nitrógeno de Nitritos ($N-NO_2^-$). Tabla 11, de 0.0009 mg/l (Arizpe) a 0.0035 mg/l (Ures); tabla 12, de <0.01 mg/l (Arizpe y Aconchi) a 0.00166 mg/l (Ures), los cuales no ofrecen riesgo alguno para la salud humana, debido a que están muy por debajo del límite máximo permitido que es de 0.05 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable.

Nitrógeno Amoniacal ($N-NH_3^-$). Tabla 11, de 0.01444 mg/l (Arizpe y Aconchi) a 0.02888 mg/l (Ures); tabla 12, de <0.01 mg/l (Aconchi y Ures) a 0.0365 mg/l (Arizpe). El límite máximo permitido es de 0.05 mg/l (NOM-127-SSA1-1994), para fuente de abastecimiento de agua potable. Sin embargo no es posible aseverar que exista un impacto ambiental por la presencia de éste, debido a los valores encontrados en los blancos de viaje y campo, así como el que sobrepasen los valores de las muestras, pudiera indicar que los resultados de las muestras pudieran estar incorrectas (posible contaminación).

Fósforo total (P_{total}). De acuerdo a la norma NOM-001-ECOL-1996, para fuente de abastecimiento de agua potable, el valor máximo permisible para evitar daños a la salud es de 10 mg/l. Los resultados en los muestreos son como sigue: tabla 11, de 0.0016 - 0.0464 mg/l; tabla 12, 0.0650 - 0.16456 mg/l. Por lo tanto los valores encontrados, no ofrecen riesgo de contaminación al ambiente y a la salud humana.

Parámetros químicos (metales) del agua subterránea

En las tablas 13 y 14 se muestran los resultados de los dos muestreos llevados a cabo mediante el monitoreo de pozos destinados al abastecimiento de agua potable para tres poblaciones (Arizpe, Aconchi y Ures) de la subcuenca estudiada, cuyo análisis se expone a continuación.

Cobre (Cu). En ambos muestreos, tablas 13 y 14, no se detectó concentración alguna mediante el equipo de absorción atómica, por lo tanto el valor reportado es $ND < 0.02$. De acuerdo a las normas NOM-127-SSA1-1994, CE-CCA-001/89 y NOM-001-ECOL-1996, tanto para uso y consumo humano como para uso de riego agrícola, estos valores no ofrecen riesgos.

Hierro (Fe). Al igual que el elemento anterior, en ambos muestreos, tablas 13 y 14, no se detectó concentración alguna mediante el equipo de absorción atómica, por lo tanto el valor reportado es $ND < 0.04$, y de acuerdo a las normas NOM-127-SSA1-1994 y CE-CCA-001/89, tanto para uso y consumo humano como para uso de riego agrícola, estos valores no ofrecen riesgos.

Manganeso (Mn). De este elemento tampoco se detectó concentración alguna mediante el equipo de absorción atómica, tablas 13 y 14, por lo tanto el valor reportado es $ND < 0.02$, y de acuerdo a las normas NOM-127-SSA1-1994 y CE-CCA-001/89, tanto para uso y consumo humano como para uso de riego agrícola, estos valores no ofrecen riesgos.

Plomo (Pb). Al igual que los elementos anteriores, éste tampoco se detectó concentración alguna, tablas 13 y 14, por lo tanto el valor reportado es $ND < 0.07$, y de acuerdo a las normas NOM-001-ECOL-1996 y CE-CCA-001/89, tanto para uso y consumo humano como para uso de riego agrícola, estos valores no ofrecen riesgos, Sin Embargo de acuerdo a la norma NOM-127-SSA1-1994, no es posible hacer esta aseveración pues el límite de detección es mayor al límite máximo permisible.

Zinc (Zn). La variación encontrada en ambos muestreos fue la siguiente: primer muestreo (tabla 13), de ND<0.01 mg/l (Aconchi y Ures) a 0.0734 mg/l (Arizpe); segundo muestreo (tabla 14), de 0.01 mg/l (Ures) a 0.29 mg/l (Arizpe). Tanto la NOM-127-SSA1-1994 como la CE-CCA-001/89, establecen como valor máximo 5 mg/l para uso y consumo humano, mientras que esta última además especifica un valor de 2 mg/l para uso en riego agrícola. Para este elemento la NOM-001-ECOL-1996 señala que el promedio mensual deberá ser de 10 mg/l para ambos usos, por lo tanto, y de acuerdo a los valores planteados, no se tiene riesgo alguno debido al zinc en el agua subterránea de la subcuenca analizada.

Cadmio (Cd). De este elemento tampoco se detectó concentración alguna mediante el equipo de absorción atómica, tablas 13 y 14, por lo tanto el valor reportado es ND< 0.01, y de acuerdo a las normas NOM-001-ECOL-1995 y CE-CCA-001/89, tanto para uso y consumo humano como para uso de riego agrícola, estos valores no ofrecen riesgos. Sin embargo de acuerdo a la norma NOM-127-SSA1-1994, no es posible hacer esta aseveración pues el límite de detección es mayor al límite máximo permisible.

Calcio (Ca). La variación encontrada en los muestreos fue la siguiente: tabla 13, de 83.0 mg/l (Ures) a 120.0 mg/l (Aconchi); tabla 14, de 100.5 mg/l (Ures) a 143.0 mg/l (Aconchi). Este parámetro no se encuentra reportado en alguna de las normas mexicanas, por lo tanto no se tiene un punto de referencia con respecto al valor máximo permisible.

Magnesio (Mg). Al igual que el calcio, este elemento no se registra en las normas mexicanas, por lo tanto sólo se especificaran los valores encontrados en cada uno de los muestreos, y son los siguientes: tabla 13, 22.0 mg/l (Arizpe, Aconchi y Ures); tabla 14, de 23.0 mg/l (Arizpe y Ures) a 24 mg/l (Aconchi).

Potasio (K). Para este elemento tampoco existe un parámetro de comparación en las normas mexicanas, por lo tanto los valores reportados son los siguientes:

tabla 13, de 2.5 mg/l (Arizpe) a 4.5 mg/l (Ures); tabla 14, de 3.5 mg/l (Arizpe) a 4.5 mg/l (Aconchi y Ures).

Sodio (Na). Para este parámetro, solo la NOM-127-SSA1-1994, establece como valor máximo permisible 200 mg/l para el uso y consumo humano. Los rangos encontrados en cada uno de los muestreos son como sigue; tabla 13 (primer muestreo del agua subterránea), de 44.335 mg/l (Ures) a 82.335 mg/l (Arizpe); tabla 14 (segundo muestreo del agua subterránea), de 28.5 mg/l (Arizpe) a 67.5 mg/l (Aconchi). Como puede observarse, ninguno de estos valores excede el máximo especificado en la citada norma, por lo tanto no se tiene problema alguno con este parámetro.

Control de calidad

Tal y como se dio a conocer anteriormente, el objeto de obtener datos confiables de campo, así como resultados precisos y exactos que manifiesten el estado actual del sitio de la toma de muestras, se llevó a cabo un procedimiento de control de calidad tanto en la fase de muestreo de campo como en los métodos analíticos utilizados en el laboratorio al momento de llevar a cabo el análisis de agua superficial y subterránea, así como del sedimento. Para lograr esta meta, se siguió la metodología de control de calidad recomendada en el Manual de Aseguramiento de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1993), el Field Manual for Water Quality Sampling (ADEQ, 1995) y el Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods; SW-846 (Epa, 1992).

Limpieza de los equipos de muestreo.- Se llevo acabo la limpieza de las botellas, que tienen contacto con las muestras de. La limpieza consistió en lavarlos con una solución sin fosfatos, enjuagándolos con agua de la llave y con agua destilada/deionizada. Además, se dejaron por al menos 3 días sumergidos en una solución con ácido clorhídrico al 5% y enjuagándolos posteriormente con agua destilada/deionizada.

Tabla 13. Resultados correspondientes al primer muestreo (4 de febrero del 2000) del agua subterránea de la cuenca del Río Sonora, en los pozos de los poblados de: Arizpe (pozo 1), Aconchi (pozo 2) y Ures (pozo 3). Parámetros Químicos (metales)

Pozos de Muestreo Y Control de Calidad	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	Pb ppm	Zn ppm	Cd ppm	Ca ppm	Mg ppm	K ppm	Na ppm
(1) Arizpe	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.0734	ND<0.01	101.50	22.00	2.5	82.335
(2) Aconchi	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	120.00	22.00	3.0	73.335
(3) Ures	0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	83.00	22.00	4.5	44.335
<u>Blanco de Vialle</u>	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
<u>Blanco de Campo</u>	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
<u>Blanco de Laboratorio: B1</u>	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
<u>Blanco de Laboratorio: B2</u>	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
<u>Blanco de Laboratorio: B3</u>	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
<u>Recuperación: CC1</u> (5 ppm)	5.25 105.00%	5.18 103.6%	5.225 104.5%	5.025 100.5%	5.50 110.06%	5.025 100.5%	4.925 98.5%	5.225 104.5%	4.95 99.0%	4.99 99.84%
<u>Recuperación: CC2</u> (10 ppm)	9.97 99.75%	10.30 103.0%	10.32 103.20%	10.025 100.25%	10.32 103.20%	10.32 103.2%	10.15 101.5%	9.875 98.75%	10.1 101.0%	10.19 101.92%
Límite de Detección	0.02	0.04	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.06
NOM-127-SSA1-1994	2.0 ¹	0.3 ¹	0.15 ¹	0.025 ¹	5.0 ¹	0.005 ¹	0.005 ¹	0.005 ¹	0.01	200.0 ¹
NOM-001-ECOL-1996	4.0 ¹ ; 6.0 ²			0.2 ¹ ; 0.5 ²	10 ¹ y 2	0.1 ¹ ; 0.2 ²				
CE-CCA-001/89	1.0 ¹ ; 0.2 ²	5.0 ²	0.1 ¹	0.5 ¹ ; 5.0 ²	5 ¹ ; 2 ²	0.01 ¹ y 2				

(¹) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (²) Para uso de riego agrícola.; N.D. = No Detectable

Tabla 14. Resultados correspondientes al segundo muestreo (28 de abril del 2000) del agua subterránea de la cuenca del Río Sonora, en los pozos de los poblados de; Arizpe (pozo 1), Aconchi (pozo 2) y Ures (pozo 3). Parámetros Químicos (metales)

Pozo de Muestreo y Control de Calidad	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Cd	Ca	Mg	K	Na
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
(1) Arizpe	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.29	ND<0.01	121.50	23.00	3.5	28.5
(2) Aconchi	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.02	ND<0.01	143.00	24.00	4.5	67.5
(3) Ures	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	100.50	23.00	4.5	42.5
<u>Blanco de Viaje</u>	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.3
<u>Blanco de Campo</u>	ND<0.02	ND<0.04	ND<0.02	ND<0.07	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	ND<0.06
<u>Blanco de Laboratorio: B1</u>	ND<0.02	0.07	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.04
<u>Blanco de Laboratorio: B2</u>	ND<0.02	0.05	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.06
<u>Blanco de Laboratorio: B3</u>	ND<0.02	0.06	ND<0.02	ND<0.07	0.01	ND<0.01	ND<0.01	ND<0.005	ND<0.01	0.07
<u>Recuperación: CC1</u> (5 ppm)	4.92 96.40%	4.70 94.0%	4.65 93.0%	4.75 95.5%	4.95 99.0%	5.0 100.0%	4.85 97.0%	4.85 97.0%	4.60 92.0%	4.55 91.0%
<u>Recuperación: CC2</u> (10 ppm)	9.80 98.00%	9.47 94.7%	9.45 94.5%	9.45 94.5%	9.75 97.5%	10.0 100.0%	9.70 97.0%	9.70 97.0%	9.35 93.5%	9.55 95.5%
Límite de Detección	0.02	0.04	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.06
NOM-127-SSA1-1994	2.0 ¹	0.3 ¹	0.15 ¹	0.025 ¹	5.0 ¹	0.005 ¹				200.0 ¹
NOM-001-ECOL-1996	4.0 ¹ ; 6.0 ²			0.2 ¹ ; 0.5 ²	10 ¹ ; 2 ²	0.1 ¹ ; 0.2 ²				
CE-CCA-001/89	1.0 ¹ ; 0.2 ²	5.0 ²	0-1 ¹	0.5 ¹ ; 5.0 ²	5 ¹ ; 2 ²	0.01 ¹ ; 2 ²				

(¹) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (²) Para uso de riego agrícola.; N.D. = No Detectable

Procedimiento de calibración y frecuencia

Parámetros de campo. Los equipos utilizados en campo fueron potenciómetro, conductímetro y medidor de oxígeno. Éstos fueron calibrados siguiendo las indicaciones de los fabricantes, antes y durante las actividades de muestreo.

Parámetros Analíticos. El equipo analítico de laboratorio espectrofotómetro UV-VIS, se calibró de acuerdo al manual del fabricante. Se utilizaron reactivos de alta pureza analítica y se elaboró una curva de calibración utilizándose un mínimo de 6 estándares, y los coeficientes de regresión obtenidos, fueron todos superiores a 0.995 (tablas 3, 4, 5, 6, 11 y 12), por lo tanto las concentraciones obtenidas para los nutrientes son enteramente confiables.

Blancos de Campo y Blancos de Viaje. Los blancos de campo se utilizan para investigar la contaminación en el laboratorio, y durante la colecta y envío de las muestras. Mientras que los blancos de viaje se utilizan para investigar la si existe contaminación durante el transporte de la muestra o en el almacenaje en el laboratorio. Como podrá observarse en las tablas de la 3 a la 12, la mayoría de los datos se reportaron como ND (no detectable), por lo tanto se puede deducir que si éstos no tuvieron incidencia en su manejo, entonces las muestras colectadas tampoco fueron impactados tanto en campo como en el laboratorio.

Sin embargo algunos metales como el zinc, plomo y cobre presentaron valores igual o superior al límite de detección. Por ejemplo en las tablas 7, 8 y 10 se observa que en los blancos de laboratorio se detectaron concentraciones de 0.01 mg/l (límite de detección) y 0.02 mg/l para el zinc, mientras que en las tablas 7 y 8, se observaron valores de 0.01 mg/l (límite de detección) y 0.02 mg/l para el cadmio, con respecto al cobre, se detectó solamente un solo dato igual al límite de detección (0.02 mg/l), y éste se observa en la tabla 7 (primer muestreo del agua superficial; 3 de septiembre de 1999). Con respecto a los blancos de y viaje, en el nitrógeno amoniacal, se detectaron concentraciones de igual magnitud al límite de detección (0.01 mg/l) y superiores (0.03025, 0.059, entre otros), tablas 2, 4, 5 y 6.

Lo anteriormente expuesto es un indicador que los resultados de los muestreos con concentraciones iguales o superiores a los límites de detección correspondientes de los elementos y compuestos mencionados (cobre, zinc, plomo y nitrógeno amoniacal), pudieran no ser correctos. Sin embargo al llevar a cabo una revisión a detalle de las bitácoras tanto de viaje como del laboratorio, no se encontraron indicios de contaminación por recipientes (el lavado y almacenaje de los mismos se realiza de acuerdo a las manuales). Pudiera manejarse la opción de que el agua deionizada pudiera estar contaminada, con ciertos elementos, pero de ser así entonces tanto los blancos de campo, de viaje (que provienen del mismo recipiente) deberían reflejar el mismo comportamiento en todas las lecturas, lo cual no es así, mientras que los blancos de laboratorio en algunas ocasiones se utiliza el agua del mismo recipiente, y una que se agota, se llena de nuevo de la misma fuente del tratamiento respectivo. Por último pudiera suceder que al momento de estar llevando a cabo las lecturas en el equipo de absorción atómica, el agua con el que se limpia el capilar no se cambie hasta que se agotan todas las lecturas, y esto ocasiona que tanto los blancos como las últimas muestras que se lean presenten concentraciones ligeramente superiores a las que deberían tener.

Indicadores de calidad de datos

Precisión (muestras duplicadas). Tal y como se expuso anteriormente, se debe de contemplar que por cada 10 puntos de muestreos, se tome al menos en uno de ellos una muestra por duplicado, que al ser comparadas entre sí, no deben de tener una discrepancia mayor al 35%. La estación de muestreo en el poblado de Aconchi (5), se seleccionó para tomar en ella dos muestras, denominándolas 5A y 5B. Como podrá observarse los resultados de ambos, (tablas de la 3 a la 10), en su totalidad se encuentra muy por debajo del 35% de diferencia.

Exactitud (porcentaje de recuperación). Al momento de realizar los análisis correspondientes de cada muestreo, se llevaron a cabo análisis de muestras fortificadas. Estas consisten en medios del mismo compuesto cuya concentración es previamente conocida. Para esto se utilizan estándares de alta pureza, a tres diferentes concentraciones: CC₁ (baja), CC₂ (media) y CC₃ (alta). Este proceso se llevó a cabo para los parámetros físicos, químicos y nutrientes. Para el caso de los metales se utilizaron solo dos concentraciones conocidas: CC₁ y CC₂. En las tablas de la 3 a la 12, se exponen los resultados del porcentaje de recuperación, los cuales en su totalidad se encuentran dentro del rango de 70% - 130%. Por lo tanto los resultados de las muestras estudiadas se encuentran también confiables desde el punto de vista exactitud.

Balance de Cationes / Aniones. Es recomendable que al llevar a cabo un balance de cationes/aniones, la discrepancia entre ambos grupos iónicos no deba ser mayor al 10%. Una vez realizadas las lecturas y análisis de la totalidad de las muestras de cada punto de muestreo en este estudio, se procedió a calcular un balance de cationes-aniones mayores. Los resultados correspondientes al agua superficial se exponen en las tablas 15 y 16, de igual forma en la tabla 17 se exponen los resultados del agua subterránea.

Como puede observarse, la diferencia entre los cationes/aniones de los muestreos del agua superficial correspondientes al segundo (tabla 15), tercer y cuarto (tabla 16), así como al primero y segundo muestreos del agua subterránea (tabla 17), no exceden del 10% recomendado. Sin embargo, en algunas estaciones del primer muestreo (tabla 15) se encontraron diferencias que exceden esta referencia, tales puntos son: estación 2 (Arizpe), 10.60%; estación 5 (Aconchi), 5A = 26.96% y 5B = 27.71%; estación 6 (Baviácora), 23.56%; estación 7 (Mazocahui), 36.45% y por último la estación 8 (Ures), 140.48%.

Dado que los controles de calidad protegen a la colecta de muestras, transporte y manejo en laboratorio, no protegen un mal manejo del equipo, por lo tanto si estos controles no indican ningún problema es estos procesos, entonces se podrá pensar que estas discrepancias se puedan deber a las lecturas, situación que también puede ser aplicable en el caso de los blancos de campo y viaje.

La justificación a estas discrepancias se encuentra en los sólidos totales de las muestras, ya que los resultados del primer muestreo de éstos en las distintas estaciones son como sigue: 1 (626 mg/l), 2 (608 mg/l), 3 (723 mg/l), 4 (854 mg/l), 5A (2000 mg/l), 5B (1998 mg/l), 6 (2728 mg/l), 7 (3818 mg/l) y 8 (18886 mg/l).

Los resultados de las primeras cuatro estaciones son muy similares a las encontradas en los demás muestreos, es decir que están dentro del promedio general, sin embargo en este muestreo en particular se aprecia que a partir de la estación 5 los valores encontrados son mucho más altos, y se incrementan conforme se avanza aguas abajo. Esto puede deberse a la cantidad extra de Fe, Mn y Pb ya que es muy probable que se encontraron en solución (ya que se analizó por metales totales)., Por lo tanto, la razón de que cationes fueron mayores que los aniones se debe a las cantidades extras de estos metales en el agua, ya que los balances se refieren únicamente a lo que encuentran disueltos.

En el Anexo A (bitácora fotográfica de campo), se anexa una fotografía de las muestras colectadas, y en ella se advierte una tendencia de cambio de coloración del agua, clara en los primeros puntos y turbia en los últimos.

Tabla 15. Resultados del balance de cationes y aniones, correspondientes al agua superficial de los muestreos: primero y segundo.

Primer Muestreo: 3 de septiembre de 1999				
Estación	Nombre	Σ Cationes (meq/q/lt)	Σ Aniones (meq/q/lt)	Diferencia (%)
1	Arizpe	7.21477	7.9236	9.36
2	Arizpe	7.14774	7.9508	10.60
3	Tetuachi	7.56740	7.8725	3.95
4	Sinoquipe	7.49757	7.7070	2.76
5 ^a	Aconchi	8.99570	6.8587	26.96
5B	Aconchi (*)	9.07230	6.8639	27.71
6	Baviácora	11.71045	9.2418	23.56
7	Mazocahui	13.62280	9.4226	36.45
8	Ures	47.85760	8.3653	140.48
Segundo Muestreo: 29 de octubre de 1999				
1	Arizpe	---	---	---
2	Arizpe	7.53463	8.2244	4.38
3	Tetuachi	7.71030	8.1359	2.69
4	Sinoquipe	6.69129	7.3053	4.39
5 ^a	Aconchi	8.49158	9.1834	3.91
5B	Aconchi (*)	8.37038	9.1556	4.48
6	Baviácora	9.29643	9.5562	1.38
7	Mazocahui	9.44636	9.2378	1.12
8	Ures	---	---	---

Tabla 16. Resultados del balance de cationes y aniones, correspondientes Al agua superficial de los muestreos: tercero y cuarto.

Tercer Muestreo: 4 de febrero del 2000				
Estación	Nombre	Σ Cationes (meq/q/lt)	Σ Aniones (meq/q/lt)	Diferencia (%)
1	Arizpe	6.81634	7.2712	6.47
2	Arizpe	6.95943	7.2683	4.34
3	Tetuachi	6.83428	7.5491	9.93
4	Sinoquipe	5.44831	5.7584	5.51
5 ^a	Aconchi	5.70440	5.8791	3.01
5B	Aconchi (*)	5.57250	5.8370	2.32
6	Baviácora	8.23740	9.1122	10.08
7	Mazocahui	9.07780	9.9694	9.36
8	Ures	9.41240	10.2139	4.08
Cuarto Muestreo: 28 de abril del 2000				
1	Arizpe	---	---	---
2	Arizpe	7.95803	7.3628	3.88
3	Tetuachi	7.32370	7.1138	1.45
4	Sinoquipe	7.39686	7.4284	0.21
5 ^a	Aconchi	7.94840	7.7787	1.08
5B	Aconchi (*)	7.69020	7.8189	0.83
6	Baviácora	8.86440	8.6491	1.23
7	Mazocahui	9.67380	9.1017	3.05
8	Ures	9.47454	9.6393	0.86

Tabla 17. Resultados del balance de cationes y aniones, correspondientes al agua subterránea de los muestreos: primero y segundo.

Primer Muestreo: 4 de febrero del 2000				
Pozo	Nombre	Σ Cationes (meq/q/lit)	Σ Aniones (meq/q/lit)	Diferencia (%)
1	Arizpe	10.52944	9.9184	5.97
2	Aconchi	11.08870	10.8468	2.20
3	Ures	8.0034	8.3928	4.75
Segundo Muestreo: 28 de abril del 2000				
1	Arizpe	9.29664	9.4724	0.94
2	Aconchi	12.17520	12.8753	2.79
3	Ures	8.88090	8.7207	0.91

Caracterización de las aguas.

Este concepto es también conocido como clasificación de las aguas. Normalmente se manejan dos formas de llevarlo a cabo, en función del total de sólidos disueltos y en función de los iones dominantes. El primero de ellos es el más sencillo ya que sólo basta conocer la concentración del total de sólidos disueltos (en ppm), y se clasificará en: agua dulce (de 0 a 1,000 ppm), agua salobre (de 1,000 a 10,000 ppm), agua salada (de 10,000 a 100,000 ppm) y salmuera (más de 100,000 ppm) (Gorrell, 1958; Davis y De Wiest, 1971). Por lo tanto la clasificación de las muestras de este estudio recae en agua dulce.

Por otro lado el concepto de iones dominantes utiliza los porcentajes de equivalentes por millón en aniones y cationes. Davis y De Wiest, proponen un posible sistema de nomenclatura. En la figura 5 se muestra la esquematización propuesta por estos investigadores, en la cual cada muestra de agua está representada por un punto. Por ejemplo, un agua representada por el punto A podría ser denominada cálcico-bicarbonatada; si se ubica en el punto B, entonces sería un agua cálcico-sódico-clorurada, si es en C sonde se ubique el punto, entonces representaría un agua sódico-cálcico-magnésico-clorurada y sulfatada (Davis y De Wiest, 1971).

Agua superficial

Primer muestreo. Tomando en consideración la representación anterior, el agua superficial de este muestreo se esquematiza en la figura 6, y su clasificación sería de la siguiente manera: las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, están dentro de la representación A; cálcico-bicarbonatada, Así mismo la estación 8 también estaría en esta misma clasificación pero con cierta tendencia hacia la región magnésica, por lo tanto podría representarse como cálcico-bicarbonatada-magnésica.

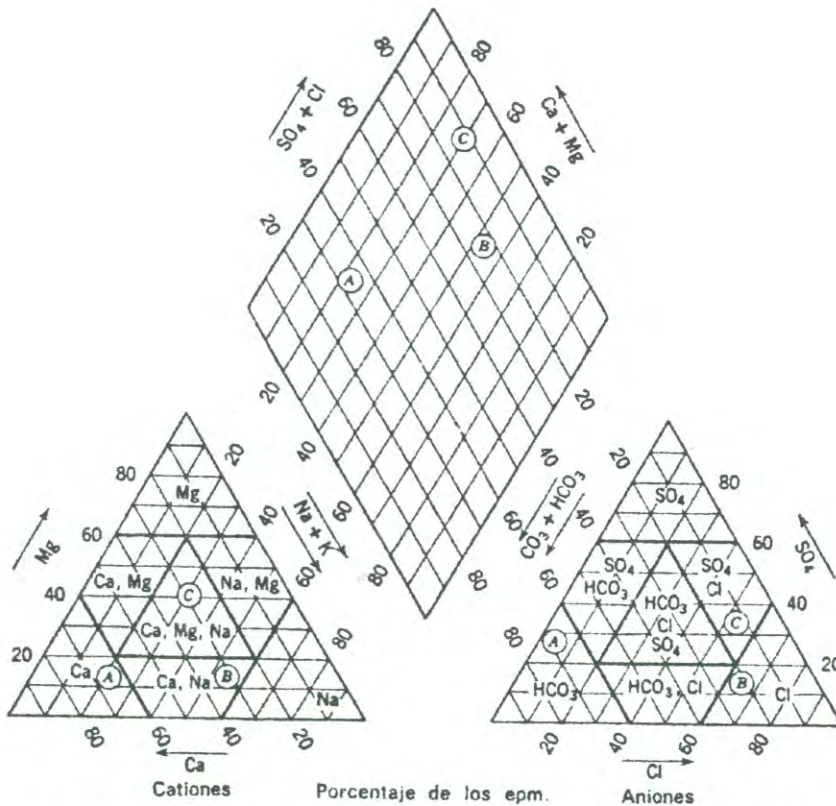


Figura 5. Clasificación del agua basada en los porcentajes relativos de equivalentes por millón.

El punto A representa una agua cálcico-bicarbonatada.

El punto B, representa una agua cálcico-sódico-clorurada.

El punto C un agua Sódico-cálcico-magnésico-clorurada-sulfatada.

Agua Superficial del Río Sonora
Primer Muestreo; 3 de septiembre de 1999

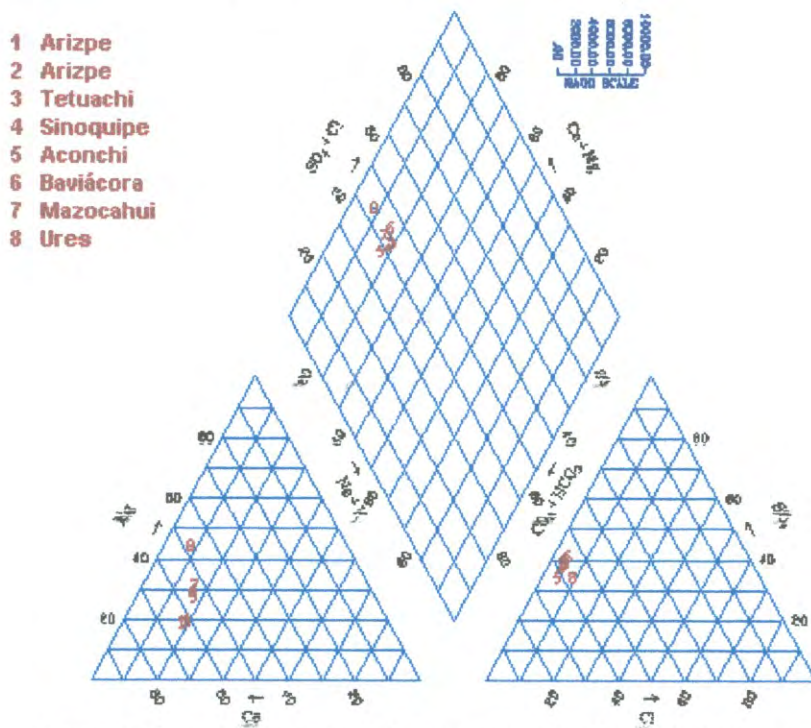


Figura 6. Caracterización del agua superficial del Río Sonora (primer muestreo), utilizando el diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest

Segundo muestreo. Tomando en consideración la representación expuesta con anterioridad, el agua superficial de este muestreo se ilustra en la figura 7, y su clasificación sería de la siguiente manera: las estaciones 2, 3, 4 y 5, se ubican dentro de la representación de cálcico-bicarbonatada, pero con cierta tendencia hacia la condición sulfatada, por lo tanto se podría definir la clasificación de estas estaciones como cálcico-bicarbonatada-sulfatada. Por otro lado, las estaciones 6 y 7 se clasificarían como cálcico-bicarbonatada. Las estaciones 1 y 8 no están representadas debido a que el lecho del río agua superficial el día del muestreo.

Tercer muestreo. La clasificación del agua superficial de este muestreo se muestra en la figura 8, y su caracterización sería de la siguiente manera: las estaciones 1, 5 y 8 recaen dentro de la representación de cálcico-bicarbonatada, pero con cierta tendencia de estar en la representación sulfatada, por lo tanto se podría definir la clasificación de estas estaciones como cálcico-bicarbonatada-sulfatada. Mientras que las estaciones 2, 3, 6 y 7 podrían clasificarse como cálcico-bicarbonatada. Por otro lado, la estación 4, además de estar en la región cálcico-bicarbonatada, tiene una tendencia hacia la sulfatada-clorurada, por lo que se le agregaría éste a su clasificación.

Cuarto muestreo. La clasificación del agua superficial de este muestreo se expone en la figura 9, y su caracterización sería de la siguiente manera: las estaciones 2, 3, 4, 5, 6 y 8 se ubican dentro de la representación de cálcico-bicarbonatada, sin embargo las estaciones 3 y 4 tienen una ligera tendencia hacia la región sulfatada. Por otro lado, la estación 7 podría clasificarse como cálcico-bicarbonatada-sulfatada. La estación 1, no aparece en ninguna representación, pues no se muestreó este punto del río por estar completamente seco.

**Agua Superficial del Río Sonora
Segundo Muestreo; 29 de octubre de 1999**

- 1 Arizpe (lecho seco)**
- 2 Arizpe**
- 3 Tetuachi**
- 4 Sinoquipe**
- 5 Aconchi**
- 6 Baviácora**
- 7 Mazocahui**
- 8 Ures (lecho seco)**

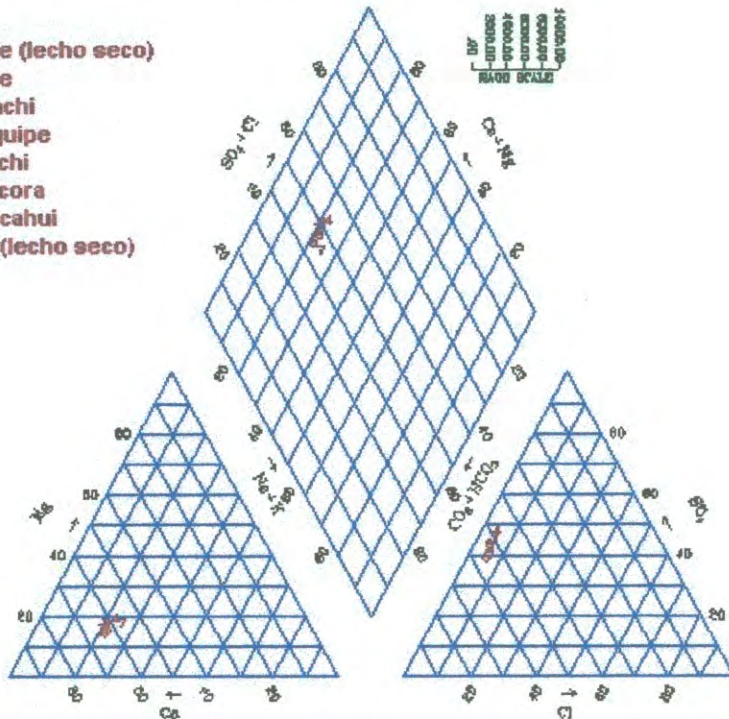


Figura 7. Caracterización del agua superficial del Río Sonora (segundo muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest

Agua Superficial del Río Sonora
Tercer Muestreo; 4 de febrero del 2000

- 1 Arizpe
- 2 Arizpe
- 3 Tetuachi
- 4 Sinoquipe
- 5 Aconchi
- 6 Baviácora
- 7 Mazocahui
- 8 Ures

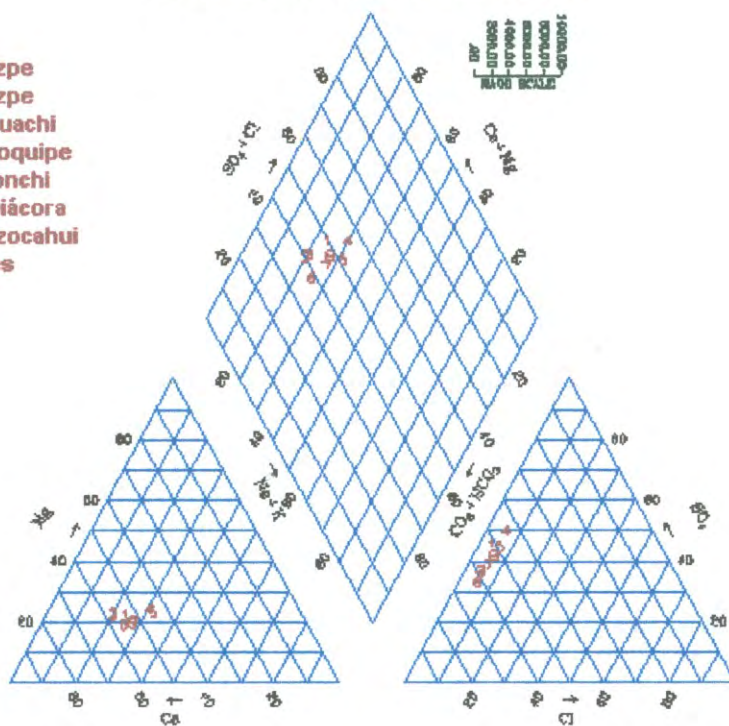


Figura 8. Caracterización del agua superficial del Río Sonora (tercer muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest

**Agua Superficial del Río Sonora
Cuarto Muestreo; 28 de abril del 2000**

- 1 Arizpe (lecho seco)
- 2 Arizpe
- 3 Tetuachi
- 4 Sinoquipe
- 5 Aconchi
- 6 Baviácora
- 7 Mazocahui
- 8 Ures

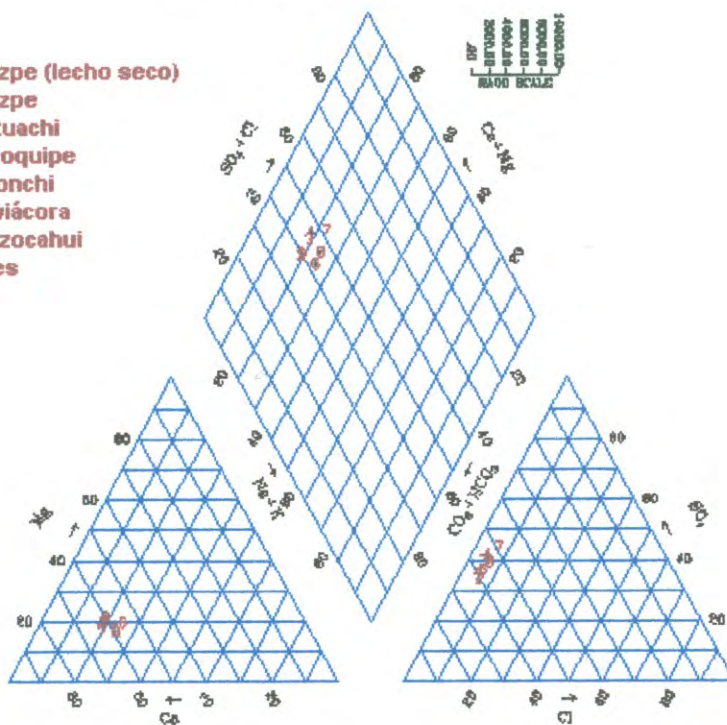


Figura 9. Caracterización del agua superficial del Río Sonora (cuarto muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest

Agua subterránea

Primer muestreo. Tomando en consideración la representación expuesta con anterioridad, el agua subterránea de este muestreo se ilustra en la figura 10, y su clasificación sería de la siguiente manera: las estaciones 1, 2 y 3 recaen dentro de la representación de cálcico-bicarbonatada, pero con cierta tendencia a la representación sulfatada, por lo tanto se podría definir la clasificación de estas estaciones como cálcico-bicarbonatada-sulfatada. Sin embargo, las estaciones 2 y 3, tienden a ser más cálcica y sulfatada que la estación 1.

Segundo muestreo. La representación del agua subterránea de este muestreo se ilustra en la figura 11, y su clasificación sería de la siguiente manera: las estaciones 1, 2 y 3 recaen dentro de la representación de cálcico-bicarbonatada, pero con cierta tendencia a la representación sulfatada, por lo tanto se podría definir la clasificación de estas estaciones como cálcico-bicarbonatada-sulfatada, aunque la estación 1 sería ligeramente más cálcica y más sulfatada que la 2 y 3.

Análisis comparativo entre los mantos de agua superficial y subterránea

Considerando esta metodología, y tomando en consideración las fechas en las que se coincidió en los muestreos de ambos cuerpos de agua: 4 de febrero del 2000; tercer muestreo del agua superficial y primero del agua subterránea, 28 de abril del 2000; cuarto muestreo del agua superficial y segundo del agua subterránea, se tiene lo siguiente:

- En la figura 8 se representa la caracterización del agua superficial, y en la figura 10, la correspondiente del agua subterránea de la misma fecha. Obsérvese las ubicaciones de las estaciones: Arizpe, Aconchi y Ures en ambas gráficas, y se podrá notar que la caracterización para estos tres puntos es muy similar, lo cual es un indicador de que el agua superficial es en realidad subsuperficial en épocas de escasa precipitación, como este caso.

Agua Subterránea del Río Sonora
Primer Muestreo; 4 de febrero del 2000

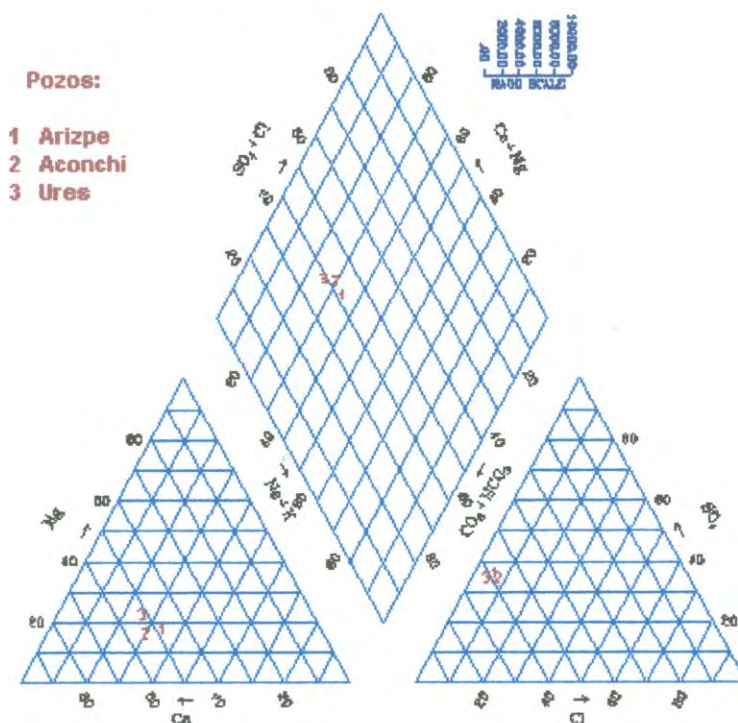


Figura 10. Caracterización del agua subterránea del Río Sonora (primer muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest

Agua Subterránea del Río Sonora
Segundo Muestreo; 28 de abril del 2000

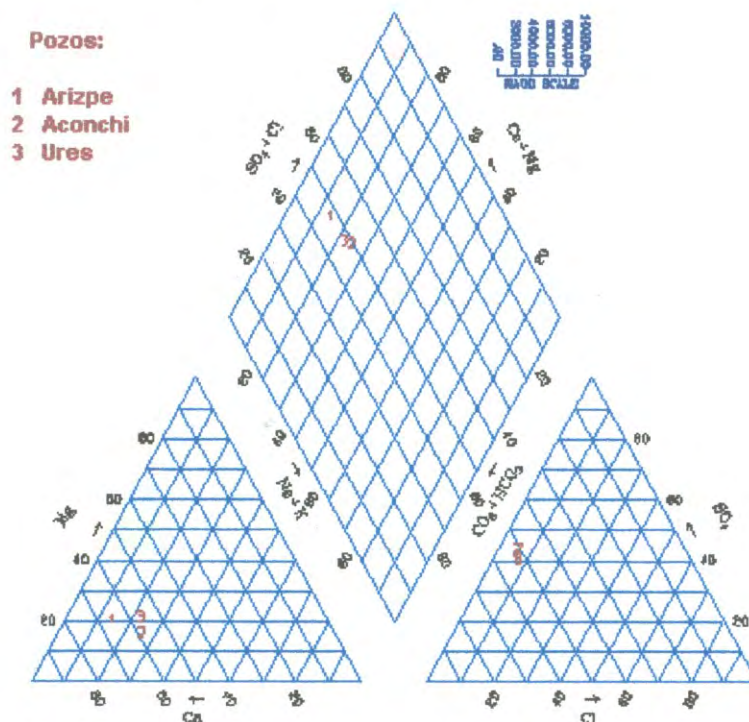


Figura 11. Caracterización del agua subterránea del Río Sonora (segundo muestreo), de acuerdo al diagrama de Piper, y la nomenclatura de Davis y De Wiest

Análisis Estadístico

En el capítulo de materiales y métodos de este documento, se expone de una manera muy general, el método estadístico que se utilizará en este trabajo, el cual se denomina "Análisis Multivariado; Método de Componentes Principales", mediante el cual se dispone de ciertos estadísticos que permiten caracterizar una población y estudiar su comportamiento probabilístico. Algunos de ellos son una extensión directa de la noción univariada equivalente y otros son propios de las poblaciones y muestras multivariadas. Sin embargo, la secuencia del procedimiento, a manera de resumen, se presenta a continuación.

A lo largo de este análisis se utilizarán varias matrices, las cuales tienen una definición y nomenclatura para su identificación, y cada una de ellas explica un comportamiento específico de las variables y componentes en cuestión. Para iniciar el estudio de parte de la matriz \mathbf{X} [ecuaciones (1 y 2)], la cual en términos de este estudio corresponde a las tablas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, es decir los resultados directos de los muestreos de campo. Y a partir de ésta se continúa con la matriz de covarianza \mathbf{S} [ecuaciones (6 y 7)] (no estandarizada), la cual se obtiene al aplicar la ecuación de covarianza a la matriz \mathbf{X} :

$$\text{Cov}(x,y) = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (i)$$

El concepto de covarianza se utiliza cuando dos variables aleatorias x e y no son independientes y sea de interés medir cuan relacionadas están entre sí. Supóngase que x e y tiene una fuerte relación positiva entre sí, por lo cual queremos decir que grandes valores de x tienden a ocurrir con grandes valores de y , y pequeños valores de x con pequeños valores de y . Entonces, la mayor parte de la densidad o probabilidad de masa estará asociada con $(x_i - \bar{x})$ y $(y_i - \bar{y})$, ambas positivas (tanto x como y arriba de sus respectivas medias) o ambas negativas de modo que el producto $(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ tenderá ser positivo. Si x e y no

están fuertemente relacionadas, los productos positivos o negativos tenderán a cancelarse entre sí, dando una covarianza cercana a 0.

Si se encuentra que la relación entre las distintas variables no es muy contundente, entonces se procede a llevar a cabo una correlación a los resultados de la matriz de covarianza **S**, es decir estandarizar los mismos mediante los coeficientes de correlación, dando lugar de esta manera a la matriz de correlación **R** [ecuaciones (8 y 9)]. Y de esta manera se lleva a cabo un análisis de la relación que guardan las variables. $r(x,y) = \{Cov(x,y) / S_x S_y\}$ (ii).

Sin embargo, es posible que algunos componentes tengan una variación de la proporción total con más incidencia que otras, se tendría entonces una simplificación del análisis de esta información, a esto se le denomina vectores o valores característicos (el vocablo original de raíz anglosajona es "eigen", por lo tanto se ha traducido como "eigen valores" o "eigen vectores"), generando de esta manera la matriz **B** [ecuaciones (10 y 11)]. Y éstos se obtienen tanto de la matriz **S** como de la matriz **R**, dependiendo de cual se esté utilizando.

Lo anterior nos encamina a encontrar los componentes principales, el cual es uno de los métodos de análisis que permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados obtenidos de una población cuya distribución de probabilidades no necesita ser conocida, a esta nueva matriz que se genera se le denomina matriz de los vectores propios **L** [ecuaciones (13 y 14)]. Y ésta se obtiene tanto de la matriz de covarianza como la de correlación, según sea el caso. Al realizar un análisis de ésta, se puede encontrar cuáles de las variables son las que más inciden en cada vector.

Pero para encontrar la variación original explicada por cada componente, se lleva a cabo una operación entre matrices mediante la ecuación (20), ya que solo se necesita conocer las matrices **S** y **L**, dando lugar de esta manera a la matriz $r^2(jk)$, la cual nos proporciona las variables de los componentes con mayor

incidencia del total de la matriz original. Pudiéndose graficar éstos, para una mejor visualización del comportamiento de ellas.

Finalmente, se lleva a cabo una operación mediante la ecuación (15), la cual consiste en multiplicar la matriz X por la L , generando de esta manera la matriz Y , de la cual se obtiene cuales son las variables que afectan espacialmente a un punto de muestreo con respecto a otro, es decir se lleva a cabo un contraste de los puntos de muestreo con respecto a las variables de mayor incidencia.

Primer muestreo del agua superficial

Para la caracterización de las variables de los parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial se partirá de los resultados de la tabla 3, y primeramente se harán los cálculos y análisis correspondientes utilizando la matriz de covarianza S , y posteriormente se realizará exactamente lo mismo, pero utilizando la matriz de correlación X , de tal manera que se pueda llevar a cabo una comparación del tipo de resultados de ambos procedimientos.

La mayor parte del procedimiento explicado anteriormente se puede llevar a cabo mediante la utilización del programa de computación denominado "STATGRAPHICS", sin embargo este programa esta muy limitado en cuanto a la cantidad de variables a trabajar, además hay ciertas matrices que no las calcula, y éstas se pueden calcular manualmente con el uso de una calculadora de bolsillo, o también se puede utilizar otro programa denominado "MatLab" (Nakamura, 1997).

De la gran gama de variables estadísticas que se pueden aplicar a cualquier población, en este caso solo nos interesa conocer solo tres de ellos, por lo tanto en la tabla 18 se exponen las variables utilizadas por el análisis de componentes principales, obtenidos de la tabla 3.

Tabla 18. Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial

Nombre de la Variable	Nomenclatura	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura Ambiente	Temp. Amb.	34.6667	3.24037	9.347
Temperatura del Agua	Temp. Agua	29.7778	3.34581	11.235
Potencial de Hidrógeno	pH	7.3433	0.12629	1.719
Conductividad Eléctrica	C.E.	663.556	46.4438	6.999
Sólidos Disueltos Totales	SDT	466.556	34.4932	7.393
Oxígeno Disuelto	O.D.	6.244	0.75185	12.040
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁼	282.054	24.7281	8.767
Cloruros	Cl ₂	13.073	5.4095	41.378
Sulfatos	SO ₄ ⁼	142.969	23.2321	16.249
Nitrógeno de Nitratos	N-NO ₃	0.732	0.1957	26.702
Nitrógeno de Nitritos	N-NO ₂	0.0107	0.00742	69.130
Fósforo Total	P total	3.4071	5.6869	166.911
Nitrógeno Amoniacal	N-NH ₃	0.17812	0.1673	93.958

Los altos valores de los coeficientes de variación indican una gran heterogeneidad entre las variables del muestreo, lo que hace necesario estudiar cuál o cuales variables influyen en las distintas estaciones de muestreo, con esto se da un paso para comprobar la hipótesis nula planteada al inicio del trabajo.

Cálculo de los valores y vectores propios de la matriz de covarianza.

Primeramente se calculó la matriz de covarianza [ecuación (i)], con las trece variables, utilizando los datos originales de la tabla 3. La matriz resultante se expone en la tabla 19. De esta matriz se pueden hacer ciertas deducciones, ya que como se dijo anteriormente ésta nos indica la relación entre las variables.

Por ejemplo, tomemos el caso de los nitratos y el nitrógeno amoniacal para ver su relación. De ellos se obtiene un valor de 0.02281, y debido a que éste es positivo indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumenta el nitrógeno amoniacal, entonces también lo harán los nitratos. Los valores pequeños, como el del ejemplo (0.02281) es indicativo de que los valores originales (tabla 3) también lo son, es decir que los datos de la matriz de covarianza no son estandarizados.

Por otro lado, los valores de las varianzas de la conductividad eléctrica, los sulfatos y bicarbonatos son altos porque sus magnitudes absolutas también lo son (véase los promedios de la tabla 18), y esto se debe a que las covarianzas asumen valores del mismo orden de magnitud que las varianzas, lo cual indica una dependencia entre los valores.

Sin embargo la información resultante no es de mucha utilidad, ya que no se conoce la proporción de la dependencia de una con respecto a la otra, sin embargo, se continuará con el procedimiento descrito hasta agotar la matriz de covarianza, para lo cual se calcularon los valores propios y la proporción de la variación total explicada por cada uno de los componentes, y los resultados se muestran en la tabla 20.

Tabla 19. Cálculo de la matriz de Covarianza (S), de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial, del primer muestreo

	Temp. Amb.	Temp. Agua	pH	C.E.	SDT	O.D	HCO ₃ ⁻	Cl ₂	SO ₄ ⁼	N-NO ₃	N-NO ₂	P total	N-NH ₃
Temp. Amb.	10.50000	8.66667	-0.24500	-52.6667	-55.2917	-1.93333	-3.84641	3.74473	-20.5380	0.40189	0.01340	4.95742	0.32393
Temp. Agua	8.66667	11.19440	-0.09167	-16.4861	-32.2361	-1.63889	28.8472	8.68196	-8.28496	0.49499	0.01408	9.94725	0.43527
pH	-0.24500	-0.09167	0.01595	3.56542	2.73292	0.06121	1.21156	0.36153	1.38053	-0.00071	-0.00009	0.32669	0.00004
C.E.	-52.66670	-16.48610	3.56452	2157.03	1509.15	21.8972	957.076	61.1420	1008.08	0.68336	-0.19607	21.0122	-2.37722
SDT	-55.29170	-32.23610	2.73292	1509.15	1189.78	19.9597	580.784	24.5923	658.789	-1.41020	-0.17387	-6.49992	-2.62311
O.D	-1.93333	-1.63889	0.06121	21.8972	19.9597	0.56528	4.03855	-0.48783	8.87437	-0.09367	-0.00385	-0.93956	-0.07557
HCO ₃ ⁼	-3.84641	28.84720	1.21156	957.076	580.784	4.03855	611.478	41.4031	469.219	2.07863	-0.06024	26.5657	0.06475
Cl ₂	3.74473	8.68196	0.36153	61.1420	24.5923	-0.48783	41.4031	29.2635	7.84012	0.62856	0.02537	30.2763	0.69909
SO ₄ ⁼	-20.53800	-8.28496	0.38053	1008.08	658.789	8.87437	469.219	7.84012	539.729	0.82058	-0.10407	-11.7170	-1.54103
N-NO ₃	0.40189	0.49499	-0.00071	0.68336	-1.41020	-0.09367	2.07863	0.62856	0.82058	0.03831	0.00086	0.67335	0.02281
N-NO ₂	0.01340	0.01408	-0.00009	-0.19607	-0.17387	-0.00385	-0.06024	0.02537	-0.10407	0.00086	0.00006	0.03163	0.00114
P total	4.95742	9.94725	0.32669	21.0122	-6.49992	-0.93956	26.5657	30.2763	-11.7170	0.67335	0.03163	32.3411	0.81472
N-NH ₃	0.32393	0.43527	0.00004	-2.37722	-2.62311	-0.07557	0.06475	0.69909	-1.54103	0.02281	0.00114	0.81472	0.02801

Tabla 20. Valores propios y proporción de la variación explicada, del primer muestreo, del agua superficial (cálculos a partir de la matriz de covarianza; S)

Componentes	Valor Propio	Proporción de la Varianza Total Explicada	
		Absoluta (%)	Acumulada (%)
1°	4133.320	90.20857	90.20857
2°	277.377	6.05367	96.26223
3°	100.697	2.19767	98.45991
4°	54.2657	1.18433	99.64424
5°	8.82718	.19265	99.83689
6°	7.05116	.15389	99.99078
7°	0.391295	.00854	99.99932
8°	0.0310389	.00068	100.00000
9°	2.68299E-5	.00000	100.00000
10°	1.11078E-6	.00000	100.00000
11°	6.36714E-7	.00000	100.00000
12°	9.72224E-8	.00000	100.00000
13°	5.88393E-8	.00000	100.00000

En la tabla 20, se observa que el primer componente resume el 90.21% de la variabilidad total, mientras que el segundo componente resume solo el 6.05%. Esto significa que la combinación lineal de las variables originales representada por el primero y segundo componentes sintetizan casi el 96% de la variación total del conjunto de datos. Esta situación puede ser muy ventajosa, ya que solo se trabajarían con los dos primeros componentes, facilitando de esta manera los análisis posteriores. Sin embargo, para fines ilustrativos, se utilizarán todos los componentes, para visualizar el porqué no es necesario trabajar con todos.

Seguidamente se calcularon los vectores propios y los coeficientes de correlación de las nuevas variables con las originales, y las tablas 21 y 22 muestran los valores que se obtienen utilizando la matriz de covarianza S . El cálculo de éstos se realizó mediante la ecuación (16) y (21) respectivamente. Utilizando, como se mencionó anteriormente, la totalidad de los valores propios de la tabla 20.

La información que proporciona la matriz de vectores propios (tabla 21), radica en que se pueden seleccionar las variables de cada componente debido al vector propio, es decir, que si se analiza la tabla 21, se determina que el primer componente tiene los siguientes coeficientes: 0.720538 para la variable C.E., 0.509861 para la variable SDT, 0.338214 para la variable $SO_4^{=}$ y 0.325175 para la variable $HCO_3^{=}$. Para el resto de las variables, los valores son pequeños, es decir que si se desechan no afectan los resultados. Por lo tanto, para el primer componente solo se tomarán en cuenta 4 variables de 13 que se tienen originalmente.

Lo mismo se va haciendo con el resto de los componentes, tomando en cuenta sólo las dos variables con más alto valor por componente, tal y como se ilustra en la tabla 21 (se encerraron en un rectángulo dichos valores).

Tabla 21. Vectores propios de la matriz de Covarianza, de parámetros, físicos, químicos y nutrientes correspondientes al primer muestreo, del agua superficial

Vectores Propios

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	-0.018024	0.107015	-0.026175	0.064414	0.595952	-0.5928	0.42397	0.29994	-0.016302	-0.02156	-0.01321	-5.545E-5	0.07867
Temp. Agua	-0.002667	0.157595	-0.135836	0.001025	0.426924	0.26708	-0.75466	-0.35331	0.045988	0.00977	0.01097	-1.215E-4	-0.08007
pH	0.001170	-0.001610	-0.003665	0.006012	-0.005439	-0.02395	-0.06518	-0.11095	-0.012849	0.00763	-0.00313	-1.039E-5	0.99123
C.E.	0.720538	-0.004152	0.001050	0.398404	-0.378354	0.41733	-0.05738	-0.03265	-0.019322	0.00093	0.00432	1.108E-4	-0.00934
SDT	0.509861	-0.593299	-0.290216	-0.38053	0.334517	-0.21413	0.03096	0.01326	-0.010418	0.00179	0.00257	6.068E-5	-0.00029
O.D	0.007331	-0.028366	0.006393	-0.003984	-0.061774	-0.03307	-0.37026	0.73455	0.552385	-0.06388	0.06441	1.779E-5	0.06456
HCO ₃	0.325175	0.74504	-0.28272	-0.475265	-0.055020	-0.13095	0.09880	0.05633	0.008230	-0.00472	-0.00428	2.116E-5	0.01213
Cl ₂	0.017718	0.090774	-0.36678	0.45706	0.16965	-0.26972	0.26945	-0.30857	0.613298	0.01942	-0.04233	-5.191E-4	-0.01874
SO ₄	0.338214	0.189661	0.727459	0.155537	0.38365	-0.38552	-0.01280	0.00246	0.011586	0.00219	-0.00940	-1.156E-4	-0.00601
N-NO ₃	0.000176	0.010063	-0.001518	0.010856	0.015847	-0.00401	0.05199	0.05878	-0.000435	0.00529	0.99665	-1.450E-5	-1.166E-4
N-NO ₂	-0.000068	0.000017	-0.000321	0.000520	0.000329	-0.00034	2.109E-8	-2.214E-8	-1.606E-8	-2.37E-9	4.36E-9	1.00000	3.668E-8
P total	0.004118	0.107019	-0.39096	0.482792	0.156171	-0.34207	-0.13997	0.35214	-0.5617	0.01724	0.01724	-5.644E-4	0.01168
N-NH ₃	-0.000857	0.005692	-0.010166	0.009502	0.006412	-0.00016	-0.01739	0.07883	-0.000084	-1.91E-5	-1.91E-5	-1.121E-5	-5.575E-5

Tabla 22. Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de covarianza correspondientes al primer muestreo, del agua superficial.

Componentes

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	0.12788	0.302531	0.00657	0.0214436	0.298576	0.235986	0.006698	0.000265	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Temp. Agua	0.010242	0.615395	0.165976	0.00000509	0.1437216	0.044932	0.019907	0.000346	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
pH	0.354806	0.045128	0.084826	0.1229836	0.016372	0.253666	0.104255	0.023956	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000003
C.E.	0.994847	0.00000221	0.00000005	0.003993	0.0005858	0.000569	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SDT	0.903100	0.082063	0.0071284	0.0066044	0.000830	0.000271	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
O.D.	0.393048	0.394843	0.0023593	0.0015237	0.059590	0.013643	0.094900	0.029627	0.000014	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
HCO ₃	0.714747	0.251795	0.013162	0.020045	0.0000437	0.000197	0.000006	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Cl ₂	0.044341	0.078103	0.4629153	0.387387	0.0086816	0.017529	0.000970	0.000100	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SO ₄	0.876004	0.018486	0.098731	0.0024322	0.0024072	0.001941	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
N-NO ₃	0.003353	0.733286	0.006062	0.1669494	0.057865	0.002968	0.027617	0.002800	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
N-NO ₂	0.326326	0.143148	0.1736335	0.245384	0.015993	0.013794	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.001620	0.000000
P total	0.002167	0.098228	0.475911	0.391102	0.0066568	0.025511	0.000237	0.000119	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
N-NH ₃	0.108439	0.320869	0.371560	0.174945	0.012956	0.000006	0.004228	0.006887	0.000000	0.000039	0.000000	0.000000	0.000000

Tomando en cuenta que la tabla 22, se obtiene a partir de las tablas 19, 20 y 21 mediante la ecuación (21), se muestra en forma conjunta la proporción de la variación original explicada por cada componente principal, considerando que aún se está utilizando la matriz de covarianza. Las interpretaciones finales se exponen a continuación.

Al examinar los valores de la correlación entre las variables y los componentes principales, el 99.48% de la variación total de la variable CE, queda explicada por el primer componente, por lo tanto para esta variable solo es necesario considerar únicamente este componente, lo mismo sucede para las variables SDT (90.31%) y SO_4^{2-} (87.60%).

Por otro lado, al tomar en cuenta otras variables como los HCO_3^{-} , para el cual el primer componente explica la variación total en un 71.47%, mientras que el segundo componente tiene un 25.18%, de tal forma que al tomar en cuenta ambos componentes, se conocerá el 99.65% de la variación total de dicha variable. Lo mismo sucede con el O.D. y los nitratos. Sin embargo en otras variables se requiere considerar tres o más componentes para conocer la variación total, como por ejemplo la temperatura del agua y el nitrógeno amoniacal (3 primeros componentes) y cloruros, nitratos y fósforo total (4 primeros componentes), y así sucesivamente con el resto de las variables.

Al finalizar este análisis, se llega a la conclusión que los dos primeros componentes explican un porcentaje mayor de las variables CE, SDT, HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , N-NO_3 y OD. En menor proporción, el segundo, tercer y cuarto componente explican las variables Temp.Agua, Cl_2 y Ptotal. Por consiguiente, el mayor porcentaje de la variación total se reparte entre los primeros cuatro componentes. Aquí es cuando el investigador debe aplicar el criterio para determinar cuantos componentes utilizar para la interpretación final de los resultados. Para este caso en particular se utilizaron los dos primeros.

Cálculo de los valores y vectores propios de la matriz de correlación

Tal y como se explicó anteriormente, a partir de la matriz de covarianza **S** es posible efectuar los cálculos necesarios para obtener la matriz de correlación **R**, ecuación (ii), y los resultados de ésta se exponen en la tabla 23.

De esta matriz se pueden hacer una cantidad mayor de interpretaciones, ya que como se dijo anteriormente ésta indica la relación entre las variables, pero estandarizadas. Por ejemplo, tomemos el mismo caso de los nitratos y el nitrógeno amoniacal, para ver su relación, y se tiene un valor de 0.6965 (positivo) lo cual indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumenta el nitrógeno amoniacal, entonces también lo harán los nitratos; sin embargo de cómo este valor va de 0 a 1, la proporción de la variación es del 69.65%.

Además, en esta tabla se tiene una información adicional con respecto a la de covarianza, y es el dato que se encuentra entre paréntesis, el cual indica el error o confianza, por lo tanto entre más pequeño sea éste, entonces es más significativo. El caso del ejemplo que se está analizando es de 0.0371, y como corresponde a las colas de una curva normal, se divide entre dos, correspondiéndole a cada una el valor de 0.01855, el cual es significativo.

Lo mismo ocurre con cualquier pareja de variables que se desee analizar, pero debido a que el número de combinaciones son bastantes (${}_{13}C_{13}$) el estudio de éstas sería muy extenso. Por lo tanto, al considerar estas alternativas para las conclusiones del estudio, solo se tomarán en cuenta aquellas que tengan una relación directa con los objetivos del trabajo, sin embargo es factible visualizar rápidamente la relación que se requiera, de acuerdo a las necesidades del interesado por medio de la tabla 23.

Tabla 23. Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al primer muestreo del agua superficial del Río Sonora.

	Temp. Amb.	Temp. Agua	pH	C.E	SDT	O.D	HCO ₃ ⁼	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	P total	N-NH ₃
Temp. Amb.	1.0000 (0.0000)	0.7994 (0.0097)	-0.5987 (0.0885)	-0.3500 (0.3559)	-0.4947 (0.1758)	-0.7936 (0.0107)	-0.0480 (0.9024)	0.2136 (0.5810)	-0.2728 (0.4775)	0.6337 (0.0669)	0.5566 (0.1196)	0.2690 (0.4839)	0.5973 (0.0894)
Temp. Agua	0.7994 (0.0097)	1.0000 (0.0000)	-0.2169 (0.5750)	-0.1061 (0.7859)	-0.2793 (0.4667)	-0.6515 (0.0573)	0.3487 (0.3578)	0.4797 (0.1913)	-0.1066 (0.7849)	0.7559 (0.0185)	0.5665 (0.1117)	0.5228 (0.1487)	0.7773 (0.0137)
pH	-0.5987 (0.0885)	-0.2169 (0.5750)	1.0000 (0.0000)	0.6079 (0.0825)	0.6274 (0.0705)	0.6446 (0.0609)	0.3879 (0.3022)	0.5292 (0.1429)	0.4705 (0.2012)	-0.0286 (0.9418)	-0.1005 (0.7969)	0.4549 (0.2186)	0.0018 (0.9963)
C.E	-0.3500 (0.3559)	-0.1061 (0.7859)	0.6079 (0.0825)	1.0000 (0.0000)	0.9420 (0.0001)	0.6271 (0.0707)	0.8334 (0.0053)	0.2434 (0.5281)	0.9343 (0.0002)	0.0752 (0.8476)	-0.5683 (0.1104)	0.0796 (0.8388)	-0.3058 (0.4235)
SDT	-0.4947 (0.1758)	-0.2793 (0.4667)	0.6274 (0.0705)	0.9420 (0.0001)	1.0000 (0.0000)	0.7696 (0.0153)	0.6809 (0.0435)	0.1318 (0.7354)	0.8221 (0.0065)	-0.2089 (0.5896)	-0.6765 (0.0445)	-0.0331 (0.9326)	-0.4544 (0.2192)
O.D	-0.7936 (0.0107)	-0.6515 (0.0573)	0.6446 (0.0609)	0.6271 (0.0707)	1.0000 (0.0000)	1.0000 (0.0000)	0.2172 (0.5745)	-0.1199 (0.7588)	0.5081 (0.1626)	-0.6366 (0.0653)	-0.6888 (0.0402)	-0.2197 (0.5700)	-0.6006 (0.0872)
HCO₃⁼	-0.0480 (0.9024)	0.3487 (0.3578)	0.3879 (0.3022)	0.8334 (0.0053)	0.6809 (0.0435)	0.2172 (0.5745)	1.0000 (0.0000)	0.3095 (0.4177)	0.8168 (0.0072)	0.4295 (0.2486)	-0.3279 (0.3890)	0.1889 (0.6264)	0.0156 (0.9681)
Cl₂	0.2136 (0.5810)	0.4797 (0.1913)	0.5292 (0.1429)	0.2434 (0.5281)	0.1318 (0.7354)	-0.1199 (0.7588)	0.3095 (0.4177)	1.0000 (0.0000)	0.0624 (0.8753)	0.5937 (0.0919)	0.6313 (0.0682)	0.9842 (0.0000)	0.7722 (0.0148)
SO₄⁼	-0.2728 (0.4775)	-0.1066 (0.7849)	0.4705 (0.2012)	0.9343 (0.0002)	-0.8221 (0.0065)	0.5081 (0.1626)	0.8168 (0.0072)	0.0624 (0.8753)	1.0000 (0.0000)	0.1805 (0.6422)	-0.6030 (0.0856)	-0.0887 (0.8205)	-0.3963 (0.2909)
N-NO₃	0.6337 (0.0669)	0.7559 (0.0185)	-0.0286 (0.9418)	0.0752 (0.8476)	-0.2089 (0.5896)	-0.6366 (0.0653)	0.4295 (0.2486)	0.5937 (0.0919)	0.1805 (0.6422)	1.0000 (0.0000)	0.5911 (0.0937)	0.6050 (0.0844)	0.6965 (0.0371)
N-NO₂	0.5566 (0.1196)	0.5665 (0.1117)	-0.1005 (0.7969)	-0.5683 (0.1104)	-0.6785 (0.0445)	-0.6888 (0.0402)	-0.3279 (0.3890)	0.6313 (0.0682)	-0.6030 (0.0856)	0.5911 (0.0937)	1.0000 (0.0000)	0.7486 (0.0203)	0.9152 (0.0005)
P total	0.2690 (0.4839)	0.5228 (0.1487)	0.4549 (0.2186)	0.0796 (0.8388)	-0.0331 (0.9326)	-0.2197 (0.5700)	0.1889 (0.6264)	0.9842 (0.0000)	-0.0887 (0.8205)	0.6050 (0.0844)	0.6050 (0.0203)	1.0000 (0.0000)	0.8560 (0.0032)
N-NH₃	0.5973 (0.0894)	0.7773 (0.0137)	0.0018 (0.9963)	-0.3058 (0.4235)	-0.4544 (0.2192)	-0.6006 (0.0872)	0.0156 (0.9681)	0.7722 (0.0148)	-0.3963 (0.2909)	0.6965 (0.0371)	0.9152 (0.0005)	0.8560 (0.0032)	1.0000 (0.0000)

Aquellas variables en las que corresponda un signo negativo, significa que son inversamente proporcionales. Es decir mientras una aumenta, la otra disminuye. Por ejemplo el oxígeno disuelto y los nitratos, el valor resultante es -0.6366 , lo cual indica que mientras el oxígeno disuelto aumenta, entonces los nitratos disminuirán, lo cual puede deberse a varios factores; uno de ellos pudiera ser que al "correr el agua" río abajo, entre mayor sea la pendiente es mayor la velocidad (y probablemente se genere mayor turbulencia) por lo tanto hay más oxigenación del agua. Mientras que debido a la gran capacidad lixiviable de los nitratos, entonces estos se infiltran o se acarrean más fácilmente.

Como podrá observarse, el manejar la matriz de correlación es mucho más versátil que la de covarianza.

Siguiendo la metodología del análisis multivariado, el siguiente paso es encontrar los componentes principales, y para ello, en la tabla 24, se presentan los valores propios de la matriz de correlación y la proporción de la variación total explicada por cada uno de los componentes. Obsérvese que la suma de los valores propios es 13, que es el equivalente al número de variables consideradas, y a la diagonal de la matriz de correlación.

En este caso se observa que el primer componente sólo sintetiza el 46.98% de la variabilidad total, mientras que el segundo componente resume el 32.14%, el tercero sintetiza el 14.18%. Esto significa que la combinación lineal de las variables originales representada por el primero, segundo y tercer componentes sintetizan casi el 93.31% de la variación total del conjunto de datos. Esto indica que se podría considerar el utilizar ya sea los dos primeros componentes, o en su defecto los tres primeros. Sin embargo se trabajarán con todos en las próximas dos matrices, y hasta entonces se decidirá con cuantos se harán las gráficas de interpretación finales.

Tabla 24. Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua superficial, del primer muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R)

Componentes	Valor Propio	Proporción de la Varianza Total Explicada	
		Absoluta (%)	Acumulada (%)
1°	6.10792	46.9839	56.98399
2°	4.17882	32.14476	79.12876
3°	1.84375	14.18268	93.31144
4°	0.390096	3.00074	96.31218
5°	0.262973	2.02287	98.33504
6°	0.132561	1.01997	99.35474
7°	0.0763776	.5872	99.94226
8°	7.45457E-3	.00039	99.99960
9°	5.09821E-5	.00000	100.00000
10°	2.50352E-7	.00000	100.00000
11°	6.88592E-8	.00000	100.00000
12°	6.28864E-8	.00000	100.00000
13°	1.43767E-8	.00000	100.00000

Seguidamente se calcularon los vectores propios y los coeficientes de correlación de las nuevas variables con las originales. Las tablas 25 y 26 muestran los valores que se obtienen utilizando la matriz de correlación R . El cálculo de éstos se realizó mediante la ecuación (16) y (21) respectivamente, al igual que para la matriz de covarianza, ya que las ecuaciones son las mismas para ambos casos.

La información que proporciona la matriz de vectores propios (tabla 25), radica en que se pueden seleccionar las variables más significativas de cada componente debido al vector propio, es decir, que si se analiza ésta, se determina que el primer componente tiene los siguientes coeficientes: 0.355858 para la variable O.D., 0.374326 para la variable N-NO₂, 0.338214 para la variable N-NH₃, 0.317126 para la Temp.Amb y 0.315344 para los SDT. Para el resto de las variables de este componente, los valores tienden a ser menores, es decir que si no se toman en cuenta no inciden de manera importante en los resultados, y es probable que éstos sean seleccionados en el siguiente componente. Por lo tanto, para el primer componente solo se tomarán en cuenta 5 variables de 13.

Por otro lado, tomando en cuenta que la tabla 26 se obtiene a partir de las tablas 23, 24 y 25 mediante la ecuación (21), muestra en forma conjunta la proporción de la variación original explicada por cada componente principal, pero en este caso utilizando la matriz de correlación. Las interpretaciones finales se exponen a continuación:

Al examinar los valores de la correlación entre las variables y los componentes principales, el 85.58% de la variación total de la variable N-NO₂, queda explicada por el primer componente, y por consiguiente para esta variable solo es necesario considerar un solo componente, de igual forma se pudieran considerar las variables O.D. (77.35%) y N-NO₃ (75.84%).

Tabla 25. Vectores propios de la matriz de correlación, del primer muestreo, del agua superficial

Vectores Propios

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	0.317126	0.0234364	-0.366258	0.348911	-0.525327	-0.33661	-0.07561	-0.10626	0.443535	-0.06273	0.18901	-0.00734	0.01653
Temp. Agua	0.294103	0.211402	-0.289381	-0.413996	0.42417	-0.33463	-0.16093	0.05036	-0.451336	-0.01313	-0.22576	-0.00361	-0.19635
pH	-0.168253	0.320717	0.415773	0.173371	0.200495	-0.54928	-0.45248	-0.16210	0.220478	-0.02788	0.13729	0.04878	0.14953
C.E.	-0.263338	0.353312	-0.141525	-0.0602116	-0.203689	0.13143	0.09583	-0.55741	-0.320422	-0.09648	0.14541	0.51997	0.00220
SDT	-0.315344	0.275924	-0.0372918	-0.322441	-0.208556	0.2329	-0.36016	0.60247	-0.136809	0.07774	0.18343	0.05471	0.25929
O.D.	0.355858	0.077234	0.252139	0.305076	-0.0325243	-0.36258	0.62873	0.18463	-0.054270	-0.20700	0.20074	-0.16584	-0.18787
HCO ₃	-0.119518	0.388696	-0.334846	-0.0034971	0.488918	0.29313	0.11286	0.05135	0.560328	-0.17507	0.09452	0.02257	-0.16759
Cl ₂	0.172923	0.390286	0.286966	-0.094313	-0.239967	0.27140	-0.07348	-0.15772	-0.031166	-0.48858	-0.36663	-0.43601	0.02801
SO ₄	-0.256248	0.302318	-0.287157	0.313527	-0.22945	-0.26988	0.19312	0.15221	0.070920	0.27601	-0.62292	-0.00235	0.08350
N-NO ₃	0.255906	0.292071	-0.252712	0.559528	-0.0834755	-0.09238	0.08657	0.16068	-0.311201	-0.10948	0.48900	-0.27474	0.00327
N-NO ₂	0.374326	0.0670312	0.245669	0.160634	-0.0831418	-0.04397	0.09999	0.41516	0.068401	-0.32984	-0.13181	0.65308	-0.14370
P total	0.222841	0.344922	0.320979	-0.0719186	-0.132957	0.15899	0.03517	-0.02442	0.060784	0.63885	0.09905	-0.03707	0.50542
N-NH ₃	0.352384	0.203465	0.141694	-0.157772	0.192457	0.04368	0.39403	-0.05515	0.037963	0.24988	0.04073	0.05229	0.72409

Tabla 26. Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al primer muestreo del agua superficial

Componentes

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	0.614266	0.002295	0.24732	0.04748	0.007257	0.015019	0.000436	0.000084	0.000010	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Temp. Agua	0.523314	0.18678	0.15439	0.06685	0.04731	0.01483	0.001978	0.000018	0.000010	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
pH	0.172909	0.42983	0.31872	0.01172	0.010571	0.03999	0.015637	0.000195	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
C.E.	0.42355	0.521639	0.03692	0.001414	0.010910	0.002290	0.000701	0.002316	0.000005	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SDT	0.60738	0.318160	0.00256	0.04055	0.011438	0.007190	0.009907	0.002705	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
O.D	0.77347	0.024927	0.11721	0.03630	0.027818	0.01742	0.03019	0.000254	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
HCO ₃ ⁼	0.087248	0.631355	0.20672	0.0000047	0.062860	0.01139	0.000972	0.000019	0.000016	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Cl ₂	0.18284	0.638531	0.15183	0.003489	0.01514	0.009764	0.000412	0.000185	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SO ₄ ⁼	0.40106	0.381928	0.15203	0.03834	0.013844	0.009655	0.002848	0.000172	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
N-NO ₃	0.38993	0.35647	0.11774	0.12212	0.001832	0.001131	0.000572	0.000192	0.000004	0.000000	0.000016	0.000000	0.000000
N-NO ₂	0.85584	0.01877	0.11127	0.01006	0.001817	0.000256	0.000763	0.001284	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
P total	0.30276	0.497169	0.18995	0.002017	0.004648	0.003351	0.000094	0.000004	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
N-NH ₃	0.75844	0.172994	0.03701	0.00971	0.009740	0.000252	0.011858	0.000019	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Por otro lado, al analizar la variable SDT, se tiene que el primer componente explica el 60.73%, mientras que el segundo componente explica el 31.81% para la misma variable, por lo tanto al considerar sólo los dos primeros, se conocerá el 92.54% de la variación total de SDT. Lo mismo sucede con la variable C.E., ya que al considerar los dos primeros se conocerá el 94.52% de su variación total.

Sin embargo, en algunas variables se tendrá que valorar si se considera el utilizar los primeros tres componentes, tales como Temp.Agua de la cual se conocerá el 86.94%, la variable pH con el 92.14%, O.D. con 91.56%, HCO_3^- con 92.53%, Cl_2 con 97.10%, N-NO_3 con 87.41%, SO_4^- con 93.50% y Ptotal con 98.98%. El resto de los componentes explican solo una pequeña variación.

A pesar de que son mayoría, las variables quedan explicadas con porcentajes mayores de 90 (considerando los primeros tres componentes en adelante). También es cierto que esas mismas variables quedan explicadas con porcentajes de 80 o más (utilizando solo los dos primeros componentes). En estos casos se considerarán solamente los dos primeros en la interpretación de los resultados finales.

Al tomar en cuenta sólo los dos primeros componentes, se pudiera pensar que se están excluyendo ciertas variables que pudieran ser de importancia para el estudio, sin embargo no hay que perder de vista el enfoque de "componentes principales", ya que si se desea considerar todas las variables (al tomar en cuenta todos los componentes), entonces no hay necesidad de considerar este procedimiento y dejar las cosas hasta la matriz de correlación, elaborar un gráfica de ésta y relacionarla con los puntos de muestreo. La ventaja de tomar en cuenta los dos primeros componentes, es que se obtienen las variables que tienen la mayor incidencia posible del muestreo con relación a las estaciones, y por otro lado, esto optimiza y simplifica la interpretación de los resultados.

Interpretación de los resultados (primer muestreo, agua superficial)

Puede graficarse la correlación $r(jk)$ de cada variable original, con los dos primeros componentes principales. Para ello se calcula la raíz cuadrada de los dos primeros componentes de la tabla 26, respetando el signo del coeficiente correspondiente de la tabla 25.

En la tabla 27 se muestran estos resultados, y en la figura 12 se han graficado en un par de ejes ortogonales, que representan el primer componente principal 1(1) y el segundo componente principal 1(2). El círculo de radio unitario trazado con centro en el origen del par de coordenadas, permite identificar las variables cuya relación con los componentes sea mayor (los puntos que se acercan al perímetro del círculo).

Aquellas variables que se agrupen cerca del centro serán las que menos se correlacionan con los componentes principales. Como la proporción de la variación de cada variable explicada en los dos primeros componentes principales es la suma de sus correlaciones al cuadrado, las variables mejor explicadas se ubicarán cerca del círculo, y las menos explicadas, cerca del origen de coordenadas.

Dada la conceptualización anterior, en la figura 12, se aprecia que la mayoría de las variables se encuentran cerca del círculo, por lo tanto tienen una relación mayor con los componentes. Sin embargo se tienen algunas como los bicarbonatos y el potencial de hidrógeno que son ligeramente menos explicadas. Por otro lado, las que están más cerca del círculo son nitrógeno amoniacal, los nitratos y los sólidos disueltos totales, las cuales son las que tienen una mayor relación con los componentes.

Tabla 27. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua superficial)

Variable	Componentes		Variación Total Explicada por los Dos Primeros Componentes (%)
	1°	2°	
Temperatura Ambiente	0.7837	0.0479	61.65
Temperatura del Agua	0.7268	0.4321	71.50
pH	-0.4158	0.6556	60.27
C.E	-0.6508	0.7222	94.52
SDT	-0.7793	0.5640	92.55
O.D	-0.8794	0.1578	79.83
HCO ₃ ⁼	-0.2953	0.7945	71.86
Cl ₂	0.4273	0.7978	81.92
SO ₄ ⁼	-0.6332	0.6180	78.29
N-NO ₃	0.6324	0.5970	75.64
N-NO ₂	0.9251	0.1370	87.46
P total	0.5502	0.7051	80.00
N-NH ₃	0.8708	0.4159	93.14

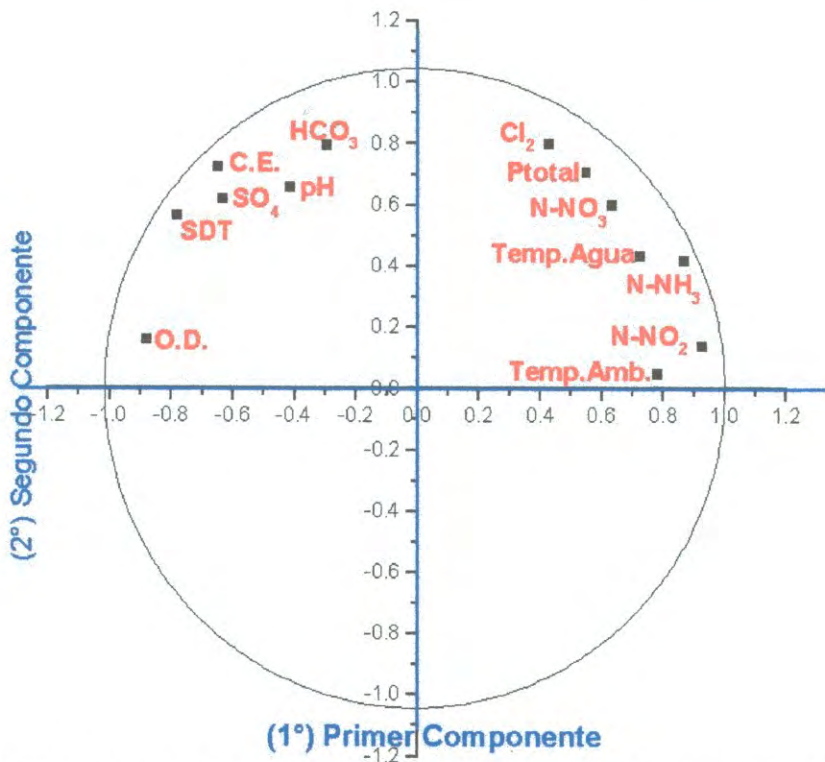


Figura 12. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (primer muestreo)

Además de graficar las variables originales en función de los dos primeros componentes, es posible graficar los valores de los dos primeros componentes principales para cada observación. Si la gráfica se superpone a la anterior (figura 12), se denomina “birrepresentación” (“biplot” en inglés). Para lograr lo anterior se deberá aplicar la ecuación (15) y obtener la matriz Y , misma que genera la correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes. Los resultados de la matriz Y se muestran en la tabla 28, y de igual forma, los resultados de estos valores se ilustran gráficamente mediante la figura 13.

Tomando en consideración un empalme entre la figura 12 (variables) y la figura 13 (estaciones de muestreo), se llega a la conclusión que las variables que resultaron correlacionadas con cada una de las estaciones, fueron la que coincidían en el mismo sector o cuadrante del círculo; bicarbonatos, pH, conductividad eléctrica, sulfatos, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto. Sin embargo, de estas variables sobresalen las que están más cerca del perímetro del círculo las cuales son: SDT y CE, mismas que tienen una fuerte incidencia en la calidad del agua en la totalidad de estaciones de muestreo (todas las estaciones quedaron ubicadas en el mismo cuadrante). En menor proporción de impacto sobre la calidad del agua se tiene al oxígeno disuelto y sulfatos (quedaron ubicadas un poco más alejadas del perímetro), y por último las que afectan aún en menor proporción son los bicarbonatos y el potencial de hidrógeno. El resto no tiene influencia alguna sobre la calidad del agua para este muestreo en particular.

Al comparar estos resultados con los de la caracterización del agua para este mismo muestreo (figura 6), se clasificaría de una manera muy similar para todas las estaciones de muestreo “bicarbonatadas-sulfatadas”, debido a que estos componentes son los que se relacionan más fuertemente con las estaciones de muestreo. Por lo tanto queda de manifiesto que ambos enfoques son adecuados para las características de este tipo de muestreos.

Tabla 28. Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua superficial)

Estaciones de Muestreo	Vector Y_1 (del componente 1°)	Vector Y_2 (del componente 2°)
(1) Arizpe	-382.3476	531.6210
(2) Arizpe	-380.5491	532.5366
(3) Tetuachi	-385.9157	539.9539
(4) Sinoquipe	-382.8227	536.5455
(5A) Aconchi	-319.5818	467.3864
(5B) Aconchi	-324.4294	471.3965
(6) Baviácora	-403.2705	577.0355
(7) Mazocahui	-408.7961	589.4847
(8) Ures	-366.0778	546.5816

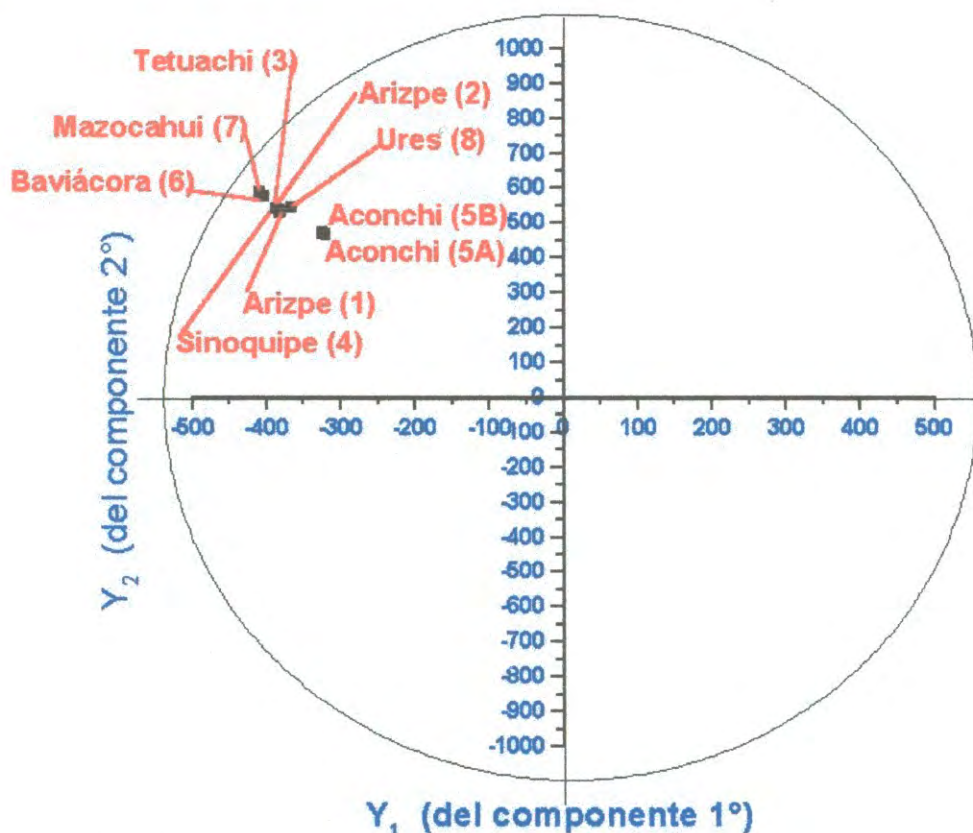


Figura 13. Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Primer muestreo del agua superficial

Segundo muestreo del agua superficial

Tal y como se observó durante el análisis de la información del primer muestreo, y dada la naturaleza de la información obtenida en campo, el utilizar la matriz de correlación para la interpretación de la interdependencia de las variables, es la que proporciona mayores ventajas, a diferencia de la matriz de covarianza. Por lo tanto, a partir de este muestreo en adelante, solo se hará uso de la matriz de correlación (R), para facilitar la comprensión de los resultados, tanto para conocer la dependencia que guardan las variables entre sí, como para determinar los componentes principales y la relación que guardan éstas con las estaciones de muestreo.

En la tabla 29, se muestran los resultados de las variables del análisis estadístico al que fueron sometidos los datos de campo de la tabla 4 (los cuales corresponden a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial del segundo muestreo). Obsérvese que el coeficiente de variación, de los nitratos es del 59.39%, lo cual da un indicio de que se pudiera presentar una diferencia significativa entre algunos de los puntos de muestreo, lo mismo sucede con el fósforo total, cuyo coeficiente es del 98.79%. Por otro lado se tienen otras variables como el potencial de hidrógeno (2.99%), los sulfatos (1.45%), cuyos valores de coeficientes indican muy poca variabilidad entre puntos de muestreo.

Continuando con este análisis, se obtuvo la matriz de correlación, cuyos resultados se exponen en la tabla 30, y tomando como ejemplo solo algunas de las variables de mayor interés para este trabajo, la interpretación correspondiente de la relación que guardan éstas, queda de la siguiente manera; tomando el mismo caso de los nitratos y el nitrógeno amoniacal, se tiene un valor de -0.3737 , en este caso en particular, el signo negativo, indica que son inversamente proporcionales, es decir que si aumentan los nitratos, entonces disminuirá el nitrógeno amoniacal, y debido a que el rango de este valor va de 0 a 1, la proporción de la variación es del 37.37%

Tabla 29. Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (segundo muestreo)

Nombre de la Variable	Nomenclatura	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura Ambiente	Temp. Amb.	24.8283	3.26559	11.6642
Temperatura del Agua	Temp. Agua	24.6913	3.91578	15.6631
Potencial de Hidrógeno	pH	7.6570	0.22949	2.9959
Conductividad Eléctrica	C.E.	750.707	81.9102	10.8552
Sólidos Disueltos Totales	SDT	506.359	57.351	11.2642
Oxígeno Disuelto	O.D.	8.29428	1.20791	14.429
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	273.375	38.3359	13.9
Cloruros	Cl ₂	14.6479	1.20491	21.3746
Sulfatos	SO ₄ ⁻	177.116	8.12239	4.58179
Nitrógeno de Nitratos	N-NO ₃	0.54313	0.42451	59.394
Nitrógeno de Nitritos	N-NO ₂	0.01323	0.0053842	38.0848
Fósforo Total	P total	0.32455	0.585997	98.791
Nitrógeno Amoniacal	N-NH ₃	0.0929612	0.0297755	30.7257

Llevando a cabo una breve comparación de este resultado con respecto al del primer muestreo, en cual se tuvo un comportamiento directamente proporcional, se puede deducir que si llegase a existir una cantidad baja de nutrientes, entonces el nitrógeno amoniacal suple esa deficiencia, pero una vez que se hubiese cubierto esta demanda, entonces se tendrá un excedente de ambos, y es cuando se tendrá el caso se que si aumenta uno, también lo hará el otro.

Al continuar con la metodología del análisis multivariado, para determinar los componentes principales, es necesario calcular los valores propios de la matriz de correlación, así como la proporción de la variación total explicada por cada uno de los componentes, los cuales se presentan en la tabla 31.

En este caso se observa que el primer componente sólo sintetiza el 48.76% de la variabilidad total, mientras que el segundo componente resume el 32.36%, el tercero sintetiza el 15.25%. Esto significa que la combinación lineal de las variables originales representada por el primero, segundo y tercer componentes sintetizan el 96.37% de la variación total del conjunto de datos. Sin embargo, independientemente del porcentaje que sintetice cada componente, se trabajarán con todos ellos, siguiendo el mismo marca de referencia utilizado en el primer muestreo.

Seguidamente se calcularon los vectores propios y los coeficientes de correlación de las nuevas variables con las originales, y en las tablas 32 y 33 se muestran los valores obtenidos. Tal y como se ilustró en el primer muestreo, la información que proporciona la matriz de vectores propios (tabla 32), radica en que se pueden seleccionar las variables de cada componente debido al vector propio, es decir, que si se analiza ésta, se determina que para el primer componente se tomaran en cuenta solo 6 variables de un total de 13; temperatura ambiente, temperatura del agua, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales bicarbonatos y cloruros.

Tabla 30. Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al segundo muestreo del agua superficial del Río Sonora

	Temp. Amb.	Temp. Agua	pH	C.E.	SDT	O.D	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	P total	N-NH ₃
Temp. Amb.	1.0000 (0.0000)	0.7950 (0.0326)	0.2579 (0.5765)	-0.7414 (0.0565)	-0.7777 (0.0395)	0.3887 (0.3889)	-0.7094 (0.0742)	-0.8829 (0.0085)	0.0487 (0.9175)	0.0542 (0.9081)	-0.7615 (0.0467)	-0.3441 (0.4498)	-0.2075 (0.6553)
Temp. Agua	0.7950 (0.0326)	1.0000 (0.0000)	-0.0074 (0.9874)	-0.8392 (0.0182)	-0.8253 (0.0223)	0.2185 (0.6379)	-0.6698 (0.0997)	-0.9665 (0.0004)	0.0392 (0.9335)	-0.0600 (0.8984)	-0.3921 (0.3843)	-0.0147 (0.9750)	0.3872 (0.3908)
pH	0.2579 (0.5765)	-0.0074 (0.9874)	1.0000 (0.0000)	-0.3171 (0.4884)	-0.2750 (0.5505)	0.1663 (0.7182)	-0.4381 (0.3255)	-0.2019 (0.6641)	-0.0386 (0.9345)	-0.5847 (0.1680)	-0.0725 (0.8772)	-0.4163 (0.3529)	-0.2635 (0.5681)
C.E.	-0.7414 (0.0565)	-0.8392 (0.0182)	-0.3171 (0.4884)	1.0000 (0.0000)	0.9730 (0.0002)	-0.1278 (0.7848)	0.9416 (0.0015)	0.9018 (0.0055)	0.4120 (0.3584)	0.5307 (0.2204)	0.5243 (0.2270)	0.4924 (0.2617)	-0.3597 (0.4281)
SDT	-0.777 (0.0395)	-0.8253 (0.0223)	-0.2750 (0.5505)	0.9730 (0.0002)	1.0000 (0.0000)	0.0073 (0.9876)	0.8877 (0.0076)	0.8762 (0.0097)	0.4338 (0.3308)	0.4821 (0.2732)	0.6398 (0.1217)	0.5333 (0.2177)	-0.2342 (0.6132)
O.D	-0.3887 (0.3889)	0.2185 (0.6379)	0.1663 (0.7182)	-0.1278 (0.7848)	0.0073 (0.9876)	1.0000 (0.0000)	-0.3117 (0.4961)	-0.3398 (0.4558)	0.3686 (0.4159)	0.3018 (0.5106)	-0.0939 (0.8413)	0.0469 (0.9205)	-0.0570 (0.9033)
HCO ₃ ⁻	-0.7094 (0.0742)	-0.6698 (0.0997)	-0.4381 (0.3255)	0.9416 (0.0015)	0.8877 (0.0076)	-0.3117 (0.4961)	1.0000 (0.0000)	0.8012 (0.0303)	0.4964 (0.2571)	0.5722 (0.1795)	0.5802 (0.1721)	0.6678 (0.1012)	-0.2337 (0.6140)
Cl ₂	-0.8829 (0.0085)	-0.9665 (0.0004)	-0.2019 (0.6641)	0.9018 (0.0055)	0.8762 (0.0097)	-0.3398 (0.4558)	0.8012 (0.0303)	1.0000 (0.0000)	0.0107 (0.9818)	0.1557 (0.7389)	0.4910 (0.2632)	0.1871 (0.6878)	-0.2647 (0.5663)
SO ₄ ⁻²	0.0487 (0.9175)	0.0392 (0.9335)	-0.0386 (0.9345)	0.4120 (0.3584)	0.4338 (0.3308)	0.3686 (0.4159)	0.4964 (0.2571)	0.0107 (0.9818)	1.0000 (0.0000)	0.6992 (0.0804)	0.3963 (0.3788)	0.8039 (0.0293)	-0.2160 (0.6419)
N-NO ₃	0.0542 (0.9081)	-0.0600 (0.8984)	-0.5847 (0.1680)	-0.0725 (0.8772)	0.4621 (0.2732)	0.3018 (0.5106)	0.5722 (0.1795)	0.1557 (0.7389)	0.0107 (0.9818)	1.0000 (0.0000)	-0.0004 (0.9993)	0.5847 (0.1679)	-0.3737 (0.4089)
N-NO ₂	-0.7615 (0.0467)	-0.3921 (0.3843)	-0.0725 (0.8772)	0.5243 (0.2270)	0.6398 (0.1217)	-0.0939 (0.8413)	0.5802 (0.1721)	0.4910 (0.2632)	0.3963 (0.3788)	1.0000 (0.0000)	1.0000 (0.0000)	0.7178 (0.0693)	0.4516 (0.3090)
P total	-0.3441 (0.4498)	-0.0147 (0.9750)	-0.4163 (0.3529)	0.4924 (0.2617)	0.5333 (0.2177)	0.0469 (0.9205)	0.0469 (0.9205)	0.1871 (0.6878)	0.8039 (0.0293)	0.5847 (0.1679)	0.5847 (0.1679)	1.0000 (0.0000)	0.2611 (0.5718)
N-NH ₃	-0.2075 (0.6553)	0.3872 (0.3908)	-0.2635 (0.5681)	-0.3597 (0.4281)	-0.2342 (0.6132)	0.0570 (0.9033)	-0.2337 (0.6140)	-0.2647 (0.5663)	-0.2160 (0.6419)	0.4516 (0.3090)	0.4516 (0.3090)	0.2611 (0.5718)	1.0000 (0.0000)

Tabla 31. Valores propios y proporción de la variación explicada del agua superficial, del segundo muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R)

Componentes	Valor Propio	Proporción de la Varianza Total Explicada	
		Absoluta (%)	Acumulada (%)
1°	6.33831	48.75625	48.75625
2°	2.64672	32.35939	69.11564
3°	1.98299	15.25374	84.36938
4°	1.29224	9.94032	94.30970
5°	0.730674	5.62057	99.93027
6°	9.06516E-3	0.06973	100.00000
7°	7.10712E-8	0.00000	100.00000
8°	4.87653E-8	0.00000	100.00000
9°	3.79883E-8	0.00000	100.00000
10°	2.47576E-8	0.00000	100.00000
11°	1.4554E-10	0.00000	100.00000
12°	6.7972E-11	0.00000	100.00000
13°	3.0553E-11	0.00000	100.00000

Para el resto de las variables de este componente, los valores tienden a ser menores, es decir que si no se toman en cuenta no afectan en los resultados, y es probable que éstos sean seleccionados en el siguiente componente, o incluso es probable que una variable sea de relevancia, de tal forma que se repita en cada uno de los componentes, indicando de esta forma que podría tener un fuerte impacto con en algunas de las estaciones de muestreo. Este procedimiento se realiza para el resto de los vectores, y en la tabla 32 se ilustra la incidencia de cada variable con respecto al vector (se encerraron en un rectángulo).

Por otro lado, tomando en cuenta que la proporción de la variación original explicada por cada componente principal, se obtiene a partir de las tablas 30, 31 y 32 mediante la ecuación (21), el resultado es la matriz que se muestra en la tabla 33, cuya interpretación se sintetiza de la siguiente manera.

Al examinar los valores de la correlación entre las variables y los componentes principales, el 94.94% de la variación total de la variable denominada conductividad eléctrica (C.E) queda explicada por el primer componente, y por consiguiente para esta variable solo es necesario considerar un solo componente. De igual forma las variables SDT (94.14%) y HCO_3^- (92.53%), quedan explicadas por este mismo componente.

Sin embargo, se tienen otras variables que quedan explicadas por la suma de los dos primeros componentes, tales como: temperatura ambiente (88.81%), temperatura del agua (86.39%), cloruros $[\text{Cl}_2]$ (96.71%), sulfatos $[\text{SO}_4^-]$ (82.97%), nitrógeno de nitratos $[\text{N-NO}_3]$ (79.05%) y fósforo total (76.49%). Sin embargo en algunas variables se tendrá que valorar si se considera el utilizar los primeros tres componentes, tales como; nitrógeno de nitritos $[\text{N-NO}_2]$ (82.52%), nitrógeno amoniacal $[\text{N-NH}_3]$ (94.88%). Pero independientemente de estos valores, se conservará el mismo marco de referencia, y se utilizarán solo los dos primeros.

Tabla 32. Vectores propios de la matriz de correlación, del segundo muestreo, del agua superficial

Vectores Propios

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	0.325496	0.286024	-0.221312	-0.03612	0.131241	0.243464	0.549929	-0.01401	0.250251	0.076664	0.286173	-0.48076	-0.03622
Temp. Agua	0.308981	0.31272	0.226625	-0.114806	0.153026	0.086555	-0.63305	-0.07411	0.227924	-0.29705	0.317512	-0.05798	-0.24631
pH	0.147021	-0.168372	-0.19325	0.704104	0.316482	-0.09387	-0.29176	0.302454	0.053226	0.268188	-0.05651	-0.23102	-0.00548
C.E.	-0.387019	-0.010236	-0.156169	-0.01322	-0.038988	-0.26720	0.090626	0.066595	0.339343	-0.15071	-0.20052	-0.15089	-0.73425
SDT	-0.385394	0.004325	-0.082483	0.108813	-0.190685	0.592853	-0.27488	-0.43339	-0.065614	0.160643	-0.12944	-0.36681	-0.01275
O.D.	0.073441	0.344316	-0.15154	0.401816	-0.737423	-0.23919	-0.02846	-0.06845	0.176967	-0.11854	0.092794	0.057005	0.167029
HCO ₃	-0.382817	0.055525	-0.024622	-0.131372	0.230088	-0.29251	-0.09601	0.037084	0.267857	-0.33884	-0.05450	-0.39216	0.583169
Cl ₂	-0.346781	-0.2722	-0.114893	-0.023808	-0.089424	-0.11165	-0.04368	0.086003	-0.174318	0.095448	0.845847	-0.04420	-0.06178
SO ₄	-0.173177	0.491581	-0.043298	0.282466	0.294547	-0.11510	0.136793	-0.15766	0.63116	-0.29975	0.023081	0.003536	-0.11981
N-NO ₃	-0.19083	0.459877	-0.218347	-0.287464	-0.103216	0.189837	-0.18519	0.675651	-0.120971	0.247487	-0.08171	0.028514	0.030357
N-NO ₂	-0.270963	-0.004904	0.42597	0.364216	0.043374	0.464478	0.240685	0.320965	0.256635	-0.30845	0.103716	0.246604	0.036134
P total	-0.247244	0.37765	0.313942	0.057043	0.218835	-0.21662	0.045335	-0.27008	0.287185	0.62003	0.091795	0.218151	0.041123
N-NH ₃	0.064105	-0.020318	0.681758	-0.011245	-0.263451	-0.18534	0.054716	0.199464	-0.261436	0.129492	-0.06083	-0.53533	-0.09279

Interpretación de los resultados (segundo muestreo, agua superficial)

Al obtener la raíz cuadrada de los dos primeros componentes de la tabla 33, y respetando el signo del coeficiente correspondiente de la tabla 32, se obtiene los resultados de la relación de datos $r(jk)$, cuyos valores se muestran en la tabla 34, mientras que en la figura 14 se ilustran gráficamente éstos mediante un par de ejes ortogonales, que representan el primer componente principal 1(1), así como el segundo componente principal 1(2).

El círculo de radio unitario trazado con centro en el origen del par de coordenadas, permite identificar las variables cuya relación con los componentes sea de mayor relevancia, y estas son las que se acerquen más al perímetro del círculo, sin importar el cuadrante en el que se ubiquen, algunas de las cuales son: conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, bicarbonatos y cloruros, así como sulfatos, temperatura del agua y temperatura ambiente. Sin embargo, los nitratos y fósforo total se encuentran ubicados un poco más hacia el interior del círculo, pero podrían considerarse como significativos.

Por otro lado, aquellas variables que se agrupen cerca del centro serán las que menos se correlacionan con los componentes principales debido a que la proporción de la variación de cada variable explicada en los dos primeros componentes principales es la suma de sus correlaciones al cuadrado, las variables mejor explicadas se ubicarán cerca del círculo, y las menos explicadas, cerca del origen de coordenadas, tale como; nitritos, nitrógeno amoniacal, potencial de hidrógeno y oxígeno disuelto.

Es posible llevar a cabo un procedimiento similar al anterior, y utilizando los valores de los dos primeros componentes principales de la matriz L para cada observación de la tabla 4, y mediante la ecuación (15) se obtiene la matriz Y , misma que genera la correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes.

Tabla 34. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (segundo muestreo, agua superficial)

Variable	Componentes		Variación Total Explicada por los Dos Primeros Componentes (%)
	1°	2°	
Temperatura Ambiente	0.8195	0.4653	88.81
Temperatura del Agua	0.7778	0.5088	86.39
pH	0.3701	-0.2739	21.20
C.E	-0.9743	-0.0167	94.97
SDT	-0.9703	0.0071	94.15
O.D	0.1849	0.5602	34.80
HCO ₃ ⁼	-0.9638	0.0903	93.70
Cl ₂	-0.8781	-0.4428	96.71
SO ₄ ⁼	-0.4360	0.7997	82.97
N-NO ₃	-0.4804	0.7482	79.06
N-NO ₂	-0.6822	-0.0080	46.54
P total	-0.6225	0.6144	76.49
N-NH ₃	0.1614	-0.0331	2.71

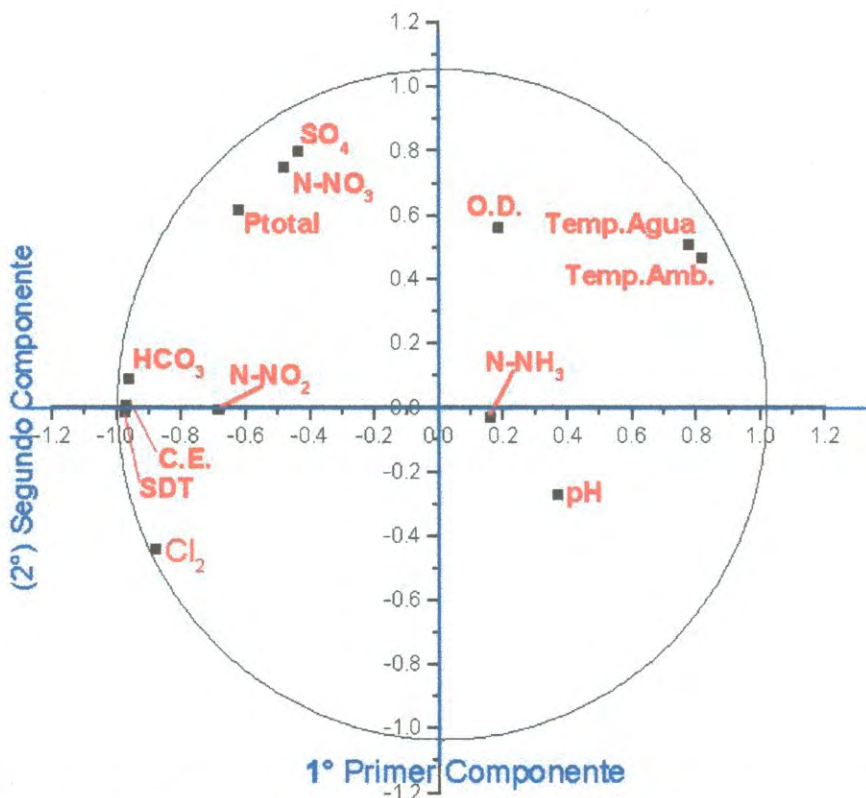


Figura 14. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (segundo muestreo)

Los resultados de la matriz Y se muestran en la tabla 35, mismos que se ilustran gráficamente mediante la figura 15, en la cual se puede visualizar que la totalidad de las estaciones se encuentran ubicadas en el mismo cuadrante (superior izquierdo).

Al llevar a cabo el empalme entre las figuras 14 (variables) y 15 (estaciones de muestreo), se llega a la conclusión que de la totalidad de variables, las que resultaron correlacionadas con cada una de las estaciones, fueron las siguientes; conductividad eléctrica, bicarbonatos, sulfatos, sólidos disueltos totales, nitratos y fósforo total. Y de éstas, los bicarbonatos son los que influyen fuertemente en la calidad del agua, y en una proporción menor los nitratos (como nitrógeno), sulfatos y fósforo total. Dado que la totalidad de las estaciones quedaron ubicadas en el mismo cuadrante, entonces el impacto de estas variables es sobre todas ellas, es decir que independientemente de las actividades preponderantes en cada punto de muestreo, la influencia sobre la calidad del agua sigue recayendo en las mismas variables. El resto de las variables que no quedaron ubicadas en el cuadrante correspondiente a las estaciones, no tienen impacto alguno con la calidad del agua de este muestreo.

Al comparar estos resultados con los de la caracterización del agua para este mismo muestreo (figura 7), se clasificaría de una manera muy similar para todas las estaciones de muestreo "bicarbonatadas-sulfatadas". De hecho la clasificación del agua por medio de Piper, recae dentro de la representación "cálcico-bicarbonatada-sulfatada", sin embargo la variable "calcio" no se contempló dentro de los muestreos, por esta razón se tiene esta diferencia.

Tabla 35. Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (segundo muestreo, agua superficial)

Estaciones de Muestreo	Vector Y_1 (del componente 1°)	Vector Y_2 (del componente 2°)
(1) Arizpe		
(2) Arizpe	-559.9188	107.4456
(3) Tetuachi	-548.0266	112.2682
(4) Sinoquipe	-513.3839	105.6774
(5 ^a) Aconchi	-645.7565	118.3620
(5B) Aconchi	-638.5947	117.6737
(6) Baviácora	-672.8833	110.9519
(7) Mazocahui	-701.4969	103.5538
(8) Ures		

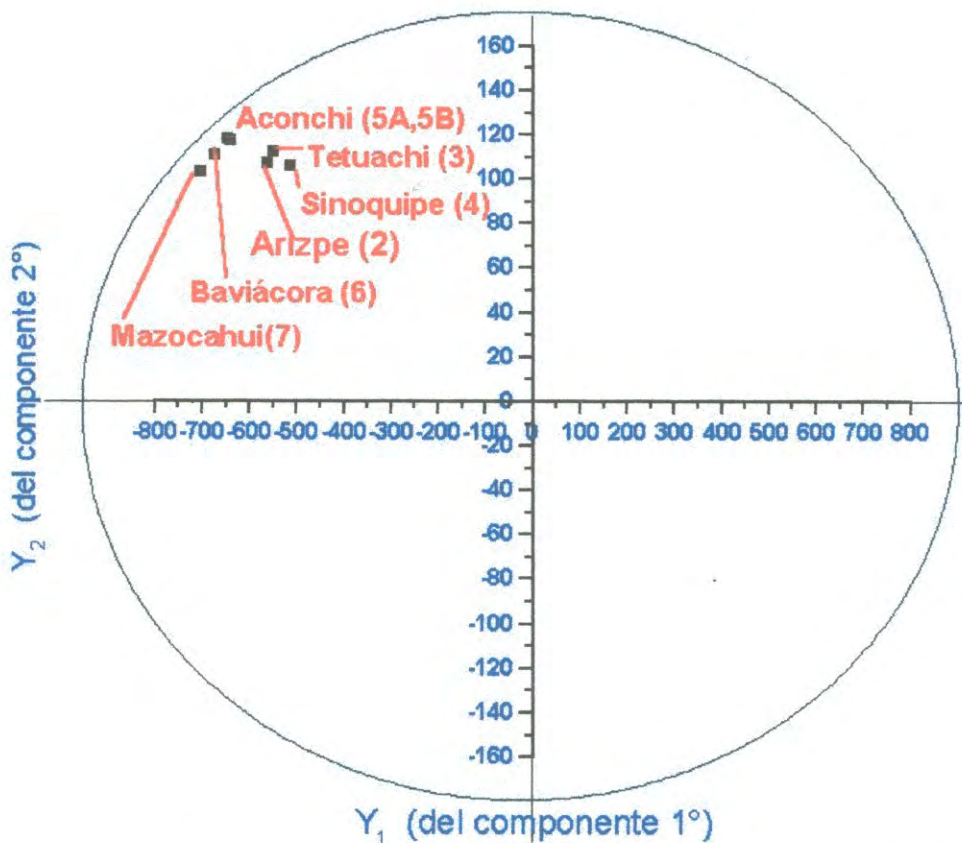


Figura 15. Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Segundo muestreo del agua superficial

Tercer muestreo del agua superficial

En la tabla 36, se muestran los resultados de las variables del análisis estadístico al que fueron sometidos los datos de campo de la tabla 5 (los cuales corresponden a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial del tercer muestreo), de la cual se puede observar que los que los nitratos tienen un coeficiente de variación del 50.74%, lo cual da un indicio de que se pudiera presentar una diferencia significativa entre algunos de los puntos de muestreo, lo mismo sucede con los nitritos, cuyo coeficiente es del 64.11%.

Por otro lado se tienen otras variables como el potencial de hidrógeno (3.67%), cuyos valores de coeficientes indican muy poca variabilidad entre puntos de muestreo. Sin embargo, en este muestreo en particular, en la mayoría de los parámetros se observan variabilidades con valores altos, por lo tanto es posible que existan diferencias significativas entre los distintos puntos de muestreo.

En la tabla 37 se exponen los resultados de la matriz de correlación, por medio de la cual se tienen algunas observaciones de variables con relación directa con los objetivos del curso. Por lo tanto, analizando el caso de los nitratos y nitritos, la interpretación pertinente queda como sigue.

- ✓ Relación entre nitratos y nitritos; se tiene un valor de 0.8490, lo cual indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumentan nitritos, aumentarán también los nitratos en una proporción del 84.90%%, con un error o confianza de 0.0019 para cada cola, lo cual es bastante significativo.
- ✓ Relación entre nitratos y el nitrógeno amoniacal; se tiene un valor de 0.5572, lo cual indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumentan el nitrógeno amoniacal, entonces aumentarán los nitratos en una proporción del 55.72%, con un error o confianza de 0.05955 para cada cola, lo cual no es significativo.

Tabla 36. Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua superficial (tercer muestreo)

Nombre de la Variable	Nomenclatura	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura Ambiente	Temp. Amb.	20.5696	7.88987	35.0661
Temperatura del Agua	Temp. Agua	19.8972	4.03113	19.5252
Potencial de Hidrógeno	pH	7.0801	0.260053	3.67077
Conductividad Eléctrica	C.E.	677.732	121.736	17.7257
Sólidos Disueltos Totales	SDT	422.080	76.6254	17.9124
Oxígeno Disuelto	O.D.	7.72459	1.50259	19.1277
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	242.101	72.9254	28.9446
Cloruros	Cl ₂	14.1097	4.28023	29.2801
Sulfatos	SO ₄ ⁼	145.4170	28.9348	19.5881
Nitrógeno de Nitratos	N-NO ₃	0.407607	0.229367	50.7367
Nitrógeno de Nitritos	N-NO ₂	0.0091142	0.0069164	64.1133
Fósforo Total	P total	0.0614029	0.0730554	76.8285
Nitrógeno Amoniacal	N-NH ₃	0.105407	0.0535176	46.8774

- ✓ Se tomará cualquier otra variable, la cual se desconozca como se relaciona con los nitratos, por ejemplo los sulfatos; se tiene un valor de 0.0479, con signo positivo, es decir que si aumentan los sulfatos también lo harán los nitratos en 4.79%, y con un error o confianza de 0.4513 para cada cola, lo cual indica que existe muy poca relación entre ambos, es decir no es significativo, y con poco o nulo impacto de uno con respecto al otro.

Siguiendo con la metodología propuesta, el siguiente paso es determinar los componentes principales dentro del método del análisis multivariado, y para llegar a ellos, se deberá primeramente encontrar los valores propios de la matriz de correlación, así como la proporción de la variación total explicada por cada uno de los componentes, mismos que se presentan en la tabla 38.

En este caso se observa que el primer componente sólo sintetiza el 46.6376% de la variabilidad total, mientras que el segundo componente resume el 18.13%, el tercero sintetiza el 15.72%. Esto significa que la combinación lineal de las variables originales representada por el primero, segundo y tercer componentes sintetizan el 80.37% de la variación total del conjunto de datos. Sin embargo se realizarán los cálculos subsecuentes, utilizando la totalidad de los componentes.

Seguidamente se calcularon los vectores propios y proporción de la variación original por cada componente principal, y los resultados se muestran en las tablas 39 y 40 respectivamente. De acuerdo a la metodología expuesta con anterioridad, la información que proporciona la matriz de vectores propios (tabla 39), radica en que se pueden seleccionar las variables de cada componente debido al vector propio. Por ejemplo, al analizar ésta, se determina que para el primer componente se podrían tomar en cuenta solo 4 variables de un total de 13; conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales bicarbonatos y cloruros.

Tabla 37. Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al tercer muestreo del agua superficial del Río Sonora.

	Temp. Amb.	Temp. Agua	pH	C.E.	SDT	O.D	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	P total	N-NH ₃
Temp. Amb.	1.0000 (0.0000)	0.9334 (0.0002)	0.1931 (0.6186)	-0.5160 (0.1550)	-0.4396 (0.2365)	-0.0269 (0.9453)	-0.6416 (0.0625)	-0.4354 (0.2415)	-0.2460 (0.5234)	-0.6425 (0.0620)	-0.5388 (0.1345)	-0.0145 (0.9705)	-0.1956 (0.6141)
Temp. Agua	0.9334 (0.0002)	1.0000 (0.0000)	0.0914 (0.8151)	-0.5803 (0.1014)	-0.5088 (0.1618)	-0.1520 (0.6962)	-0.6768 (0.0452)	-0.5287 (0.1433)	-0.3135 (0.4114)	-0.4962 (0.1743)	-0.3838 (0.3078)	0.0456 (0.9074)	-0.0820 (0.8339)
pH	0.1931 (0.6186)	0.0914 (0.8151)	1.0000 (0.0000)	-0.0919 (0.8141)	-0.1556 (0.6893)	0.3461 (0.3616)	-0.2733 (0.4767)	0.3113 (0.4148)	-0.2309 (0.5501)	0.0618 (0.8745)	0.0812 (0.8355)	-0.6003 (0.0874)	-0.0897 (0.8185)
C.E.	-0.5160 (0.1550)	-0.5803 (0.1014)	-0.0919 (0.8141)	1.0000 (0.0000)	0.9867 (0.0000)	-0.4448 (0.2303)	0.9130 (0.0006)	0.8983 (0.0010)	0.8440 (0.0042)	0.4934 (0.1771)	0.4895 (0.1811)	-0.3487 (0.3577)	-0.1866 (0.6307)
SDT	-0.4396 (0.2365)	-0.5088 (0.1618)	-0.1556 (0.6893)	0.9867 (0.0000)	1.0000 (0.0000)	-0.4472 (0.2275)	0.8645 (0.0026)	0.8702 (0.0023)	0.9063 (0.0008)	0.3748 (0.3202)	0.4282 (0.2502)	-0.3282 (0.3885)	-0.2949 (0.4411)
O.D	-0.0269 (0.9453)	-0.1520 (0.6962)	0.3461 (0.3616)	-0.4448 (0.2303)	-0.4472 (0.2275)	1.0000 (0.0000)	-0.4835 (0.1873)	-0.2207 (0.5682)	-0.3823 (0.3099)	-0.2816 (0.4629)	-0.1878 (0.6284)	0.0387 (0.9212)	0.0650 (0.8681)
HCO ₃ ⁻	-0.6416 (0.0625)	-0.6768 (0.0452)	-0.2733 (0.4767)	0.9130 (0.0006)	0.8645 (0.0026)	0.8645 (0.1873)	1.0000 (0.0000)	0.6983 (0.0364)	0.6220 (0.0737)	0.6597 (0.0532)	0.5508 (0.1243)	-0.2155 (0.5777)	0.0900 (0.8179)
Cl ₂	-0.4354 (0.2415)	-0.5287 (0.1433)	0.3113 (0.4148)	0.8983 (0.0010)	0.8702 (0.0023)	-0.2207 (0.5682)	0.6983 (0.0364)	1.0000 (0.0000)	0.7696 (0.0153)	0.4252 (0.2539)	0.4269 (0.2519)	-0.4813 (0.1896)	-0.2457 (0.5240)
SO ₄ ⁻	-0.2460 (0.5234)	-0.3135 (0.4114)	-0.2309 (0.5501)	0.8440 (0.0042)	0.9063 (0.0008)	-0.3823 (0.3099)	0.6220 (0.0737)	0.7696 (0.0158)	1.0000 (0.0000)	0.0479 (0.9026)	0.1204 (0.7577)	-0.0851 (0.8276)	-0.4273 (0.2513)
N-NO ₃	-0.6425 (0.0620)	-0.4962 (0.1743)	0.0618 (0.8745)	0.4934 (0.1771)	0.3748 (0.3202)	-0.2816 (0.4629)	0.6597 (0.0532)	0.4252 (0.2539)	0.0479 (0.9026)	1.0000 (0.0000)	0.8490 (0.0038)	-0.3046 (0.4255)	0.5572 (0.1191)
N-NO ₂	-0.5388 (0.1345)	-0.3838 (0.3078)	0.0812 (0.8355)	0.4895 (0.1811)	0.4282 (0.2502)	-0.1878 (0.6284)	0.5508 (0.1243)	0.4269 (0.2519)	0.1204 (0.7577)	0.8490 (0.0038)	1.0000 (0.0000)	-0.6072 (0.0829)	0.1800 (0.6431)
P total	-0.0145 (0.9705)	0.0456 (0.9074)	-0.6003 (0.0874)	-0.3487 (0.3577)	-0.3282 (0.3885)	0.0387 (0.9212)	-0.2155 (0.5777)	-0.4813 (0.1896)	-0.0851 (0.8276)	-0.3046 (0.4255)	0.5572 (0.1191)	1.0000 (0.0000)	0.3818 (0.5718)
N-NH ₃	-0.1956 (0.6141)	-0.0820 (0.8339)	-0.0897 (0.8185)	-0.1866 (0.6307)	-0.2949 (0.4411)	0.0650 (0.8681)	0.0900 (0.8179)	-0.2457 (0.5240)	-0.4273 (0.2513)	0.5572 (0.1191)	0.1800 (0.6431)	0.3818 (0.5718)	1.0000 (0.0000)

Tabla 38. Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua superficial, del tercer muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R)

Componentes	Valor Propio	Proporción de la Varianza Total Explicada	
		Absoluta (%)	Acumulada (%)
1°	6.06182	46.62936	46.62936
2°	2.3565	18.12690	64.75626
3°	2.04309	15.71609	80.47235
4°	1.35445	10.41884	90.89119
5°	0.657433	5.05718	95.94837
6°	0.327662	2.52048	98.46885
7°	0.1984	1.52615	99.99500
8°	6.42144E-4	0.00494	99.99994
9°	6.52603E-6	0.00005	99.99999
10°	5.57084E-7	0.00000	100.00000
11°	3.57065E-7	0.00000	100.00000
12°	4.22983E-9	0.00000	100.00000
13°	2.60486E-9	0.00000	100.00000

Este procedimiento se realiza para el resto de los vectores, y en la tabla 39 se ilustra la incidencia de cada variable con respecto al vector (se encerraron en un rectángulo).

Tomando en cuenta que la proporción de la variación original explicada por cada componente principal, se obtiene a partir de las tablas 37, 38 y 39 mediante la ecuación (21), el resultado es la matriz que se muestra en la tabla 40, cuyas interpretaciones finales se exponen a continuación.

Al examinar los valores de la correlación entre las variables y los componentes principales, el 93.09% de la variación total de la variable denominada conductividad eléctrica (C.E) queda explicada por el primer componente, por consiguiente para esta variable solo es necesario considerar un solo componente. De igual forma las variables SDT (85.58%), HCO_3^- (87.27%) y Cl_2 (74.58%), quedan explicadas por este mismo componente.

Por otro lado las siguientes variables quedan explicadas por la suma de los dos primeros componentes; temperatura ambiente (73.48%), sulfatos [SO_4^{2-}] (84.81%), nitrógeno de nitratos [N-NO_3] (86.63%).

Sin embargo en algunas variables se tendrá que valorar si se considera el utilizar los primeros tres componentes, tales como; potencial de hidrógeno [pH] (81.36%) nitrógeno de nitritos [N-NO_2] (74.78%) y fósforo total (87.89%). Por otro lado, el resto de las variables alcanzan un porcentaje adecuado en la proporción de la variación, al tomar en cuenta cuatro componentes o más.

Siguiendo el mismo marco de referencia, se utilizarán solo los dos primeros componentes, de tal forma que la comparación correspondiente entre estaciones de muestreo sea la correcta, de esta forma se garantiza una homogeneidad en la interpretación final de los resultados.

Tabla 39. Vectores propios de la matriz de correlación, del tercer muestreo, del agua superficial

Vectores Propios

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	0.278601	0.334898	0.113658	0.336338	-0.227174	0.277543	-0.36495	-0.14830	0.346968	-0.45920	-0.01955	-0.21680	0.147362
Temp. Agua	0.282883	0.239738	0.073404	0.489053	-0.106024	0.291455	0.215988	0.069709	-0.484136	0.44943	0.008053	-0.17041	-0.06901
pH	0.030961	0.020358	0.626952	-0.109991	-0.454421	-0.32662	0.12286	-0.28729	-0.287696	-0.21112	0.064015	0.134102	-0.18227
C.E.	-0.391876	0.145563	-0.039033	0.010286	-0.12348	0.065571	-0.15020	0.046263	-0.007222	0.007687	-0.66973	-0.18600	-0.54416
SDT	-0.375738	0.225039	-0.069544	0.003193	-0.052744	0.182977	-0.10423	-0.04172	0.099384	0.059709	0.716134	-0.02929	-0.47677
O.D	0.159802	-0.166849	0.229984	-0.632883	-0.015837	0.61461	-0.15886	-0.11025	-0.103857	0.140934	-0.01750	-0.21527	0.02246
HCO ₃ ⁻	-0.379436	-0.05638	-0.148425	0.08495	-0.032673	-0.06773	-0.56209	-0.15361	-0.573022	-0.05696	0.057202	-0.07044	0.372243
Cl ₂	-0.350777	0.172389	0.183829	-0.126669	-0.357793	-0.02496	0.209031	0.591254	0.10718	0.028334	0.056755	-0.32394	0.393747
SO ₄ ⁼	-0.291158	0.376598	-0.178854	-0.086855	-0.163189	0.329581	0.34225	-0.37288	0.036413	0.017181	-0.14948	0.483788	0.290551
N-NO ₃	-0.270149	-0.424173	0.109418	0.26946	-0.090921	-0.01527	0.164195	-0.50901	0.325308	0.297179	0.00071	-0.39214	0.141567
N-NO ₂	-0.266924	-0.275933	0.258552	0.256235	0.389753	0.368553	0.307307	0.12773	-0.195378	-0.53121	0.007856	0.01248	-0.03213
P total	0.155588	-0.1092	-0.587025	-0.158187	-0.307598	-0.03392	0.352463	-0.12991	-0.226982	-0.37842	0.069377	-0.38418	-0.10116
N-NH ₃	0.029866	-0.53626	-0.13469	0.202128	-0.549425	0.254487	-0.15490	0.2647	0.071096	0.031922	0.006515	0.422719	-0.08387

Tabla 40. Proporción de la variación original explicada por cada componente principal utilizando la matriz de correlación, correspondientes al tercer muestreo del agua superficial

Componentes

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	0.470509	0.2642971	0.0263929	0.1532197	0.0339288	0.025239	0.026424	0.000014	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Temp. Agua	0.485083	0.1354382	0.0110084	0.3239476	0.0073902	0.027833	0.009255	0.000003	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
pH	0.009512	0.0009756	0.8030749	0.0163861	0.1357588	0.034956	0.002994	0.000053	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
C.E.	0.930894	0.0499309	0.0031128	0.0001432	0.0100240	0.001408	0.004476	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SDT	0.855801	0.1193391	0.0098811	0.0000138	0.0018289	0.010903	0.002155	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
O.D	0.154798	0.0656016	0.1080644	0.5425126	0.0001648	0.123772	0.005007	0.000007	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
HCO₃⁻	0.872730	0.0074904	0.0450092	0.0097743	0.0007018	0.001503	0.062684	0.000015	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Cl₂	0.745873	0.0700303	0.0690423	0.0217321	0.0841618	0.000204	0.008668	0.000224	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SO₄⁻	0.513878	0.3342130	0.0653559	0.0102176	0.0175078	0.035591	0.023239	0.000089	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
N-NO₃	0.442394	0.4239879	0.0244604	0.0983448	0.0054347	0.000076	0.005348	0.000166	0.000000	0.000000	0.000016	0.000000	0.000000
N-NO₂	0.431895	0.1794216	0.1365788	0.0889282	0.0998689	0.044506	0.018736	0.000010	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
P total	0.146742	0.0281004	0.7040454	0.0338925	0.0622040	0.000377	0.024647	0.000010	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
N-NH₃	0.004977	0.6776699	0.0370645	0.0553370	0.1984157	0.021220	0.004760	0.000044	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Interpretación de los resultados (tercer muestreo, agua superficial)

Para determinar la correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, se obtiene la raíz cuadrada de cada una de las variables de ambos componentes (tabla 40), respetando el signo del coeficiente correspondiente de la tabla 39. De este procedimiento, se obtienen los resultados expuestos en la tabla 41, mismos que se ilustran gráficamente en la figura 16.

El círculo de radio unitario trazado con centro en el origen del par de coordenadas, permite identificar las variables que se encuentran ubicadas cerca del perímetro, cuya relación con los componentes es mayor, las cuales son: sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, temperatura del agua y temperatura ambiente. Sin embargo, aquellas variables que se agrupan cerca del centro serán las que menos se correlacionan con los componentes principales, tales como fósforo total, oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno.

Por otro lado, mediante la ecuación (15) se obtuvo la matriz Y , la cual genera la correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes. Los resultados de esta matriz, se muestran en la tabla 42, y la ilustración gráfica se expone en la figura 17, en la cual se observa que la totalidad de las estaciones quedan ubicadas en un solo cuadrante del círculo; superior izquierdo.

Tomando en consideración un empalme entre la figura 16 (variables) y la figura 17 (estaciones de muestreo), se obtienen las variables con mayor correlación con cada una de las estaciones, las cuales son las que coincidan en el mismo sector del círculo y por lo tanto, son las que tienen un fuerte impacto sobre la totalidad de las estaciones de muestreo, las cuales son: conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, en primer lugar, y los sulfatos y cloruros en segundo.

Tabla 41. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes.
(tercer muestreo, agua superficial)

Variable	Componentes		Variación Total Explicada por los Dos Primeros Componentes (%)
	1°	2°	
Temperatura Ambiente	0.6859	0.5141	73.48
Temperatura del Agua	0.6965	0.3680	62.05
pH	0.0975	0.0313	1.05
C.E	-0.9648	0.2235	98.08
SDT	-0.9251	0.3455	97.51
O.D	0.3934	-0.2561	22.04
HCO ₃ ⁼	-0.9342	-0.0865	88.02
Cl ₂	-0.8636	0.2646	81.59
SO ₄ ⁼	-0.7169	0.5781	84.81
N-NO ₃	-0.6651	-0.6511	86.64
N-NO ₂	-0.6572	-0.4236	61.13
P total	0.3831	-0.1676	17.48
N-NH ₃	0.0705	-0.8232	68.26

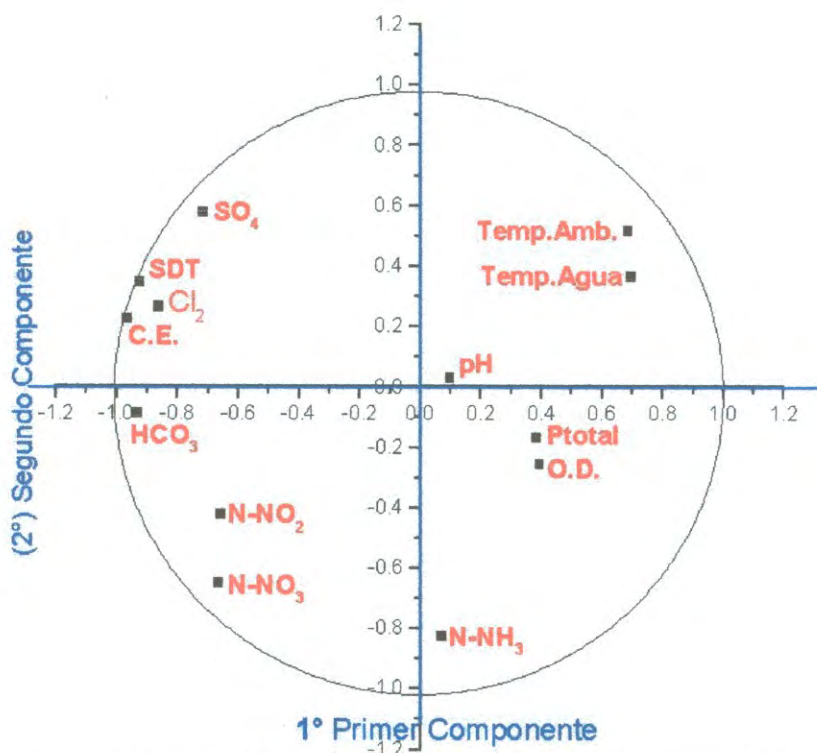


Figura 16. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes (tercer muestreo)

Si alguna estación hubiera quedado en otro cuadrante del círculo, entonces las variables que coincidan con éstas son las que hubieran tenido un impacto en la calidad del agua en esos puntos.

Dentro de este marco de referencia (el empalme de ambos círculos), también se puede utilizar la nomenclatura “diferencia significativa” para especificar las variables que tienen una fuerte correlación con las estaciones de muestreo. Por ejemplo, tomando en cuenta los resultados de este tercer muestreo, las variables: sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica son las que tienen mayor diferencia significativa, mientras que a los sulfatos y cloruros que tienen una menor diferencia significativa. El resto de las variables no tienen diferencia significativa. Es decir que las que tienen un fuerte impacto en la calidad del agua, son las que tienen mayor diferencia significativa con respecto a las otras variables.

Por otro lado, al comparar estos resultados con los de la caracterización del agua para este mismo muestreo (figura 8), se clasificaría de una manera muy similar para todas las estaciones de muestreo “sulfatada-clorurada”.

Por otro lado, al considerar los resultados tomando como marco de referencia el utilizado en la caracterización del agua (nomenclatura de acuerdo a Piper), que para este mismo muestreo (figura 8) resultó ser “sulfatada-clorurada. Para llevar a cabo una comparación de este resultado, se tomaran las variables que tienen un fuerte impacto la totalidad de las estaciones (figuras 16 y 17), se tienen: los sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, sulfatos y cloruros, y dado que los dos primeros no se contemplan dentro del balance de aniones y cationes, entonces quedan los dos últimos, por lo tanto la clasificación sería la misma “sulfatada-clorurada”.

Tabla 42. Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (tercer muestreo, agua superficial)

Estaciones de Muestreo	Vector Y_1 (del componente 1°)	Vector Y_2 (del componente 2°)
(1) Arizpe	-519.9150	244.5068
(2) Arizpe	-519.0508	223.7716
(3) Tetuachi	-547.5395	239.4998
(4) Sinoquipe	-437.5462	217.9063
(5 ^a) Aconchi	-460.4532	220.5360
(5B) Aconchi	-459.1031	219.2386
(6) Baviácora	-652.2258	262.0029
(7) Mazocahui	-708.5448	299.6915
(8) Ures	-737.5134	333.2672

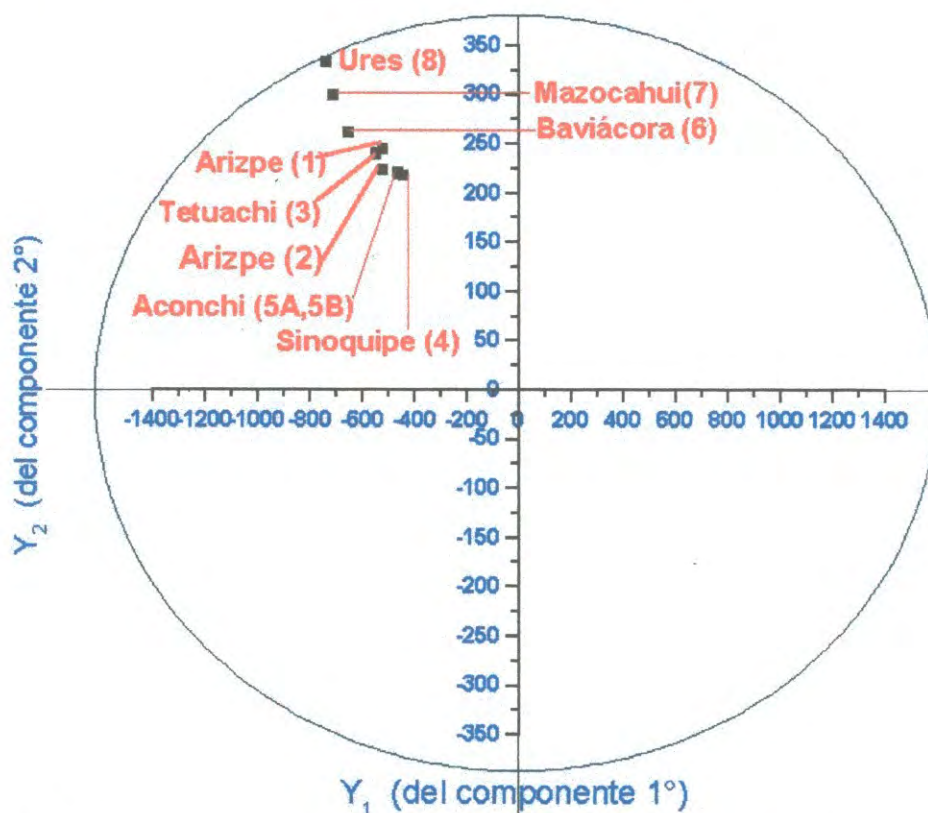


Figura 17. Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Tercer muestreo del agua superficial

Cuarto muestreo del agua superficial

En la tabla 43, se muestran los resultados de las variables del análisis estadístico al que fueron sometidos los datos de campo mostrados en la tabla 6, mismos que corresponden a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial del cuarto muestreo. En la cual se puede apreciar que los nitratos tienen un coeficiente de variación del 72.69%, lo cual da un indicio de que se pudiera presentar una diferencia significativa entre algunos de los puntos de muestreo, lo mismo sucede con los nitritos (71.92%) y especialmente el fósforo total (126.14%) y el nitrógeno amoniacal (120.18%).

La matriz de correlación resultante se muestra en la tabla 44, mediante la cual se observa la relación que guardan algunas de las variables involucradas directamente con el objetivo del estudio.

- ✓ Relación entre nitratos y nitritos: Se tiene un valor de 0.1494, lo cual indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumentan nitritos, aumentarán también los nitratos en una proporción del 14.94%, con un error del .3621 para cada cola, lo cual significa que para este muestreo, la relación entre ambas no es significativa.
- ✓ Relación entre nitratos y el nitrógeno amoniacal. Se tiene un valor de 0.2228, lo cual indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumentan el nitrógeno amoniacal, entonces aumentarán los nitratos en una proporción del 22.28%, con un error o confianza del 0.2979 para cada cola, lo cual es no es significativo.
- ✓ Se tomará cualquier otra variable, la cual se desconozca como se relaciona con los nitratos, por ejemplo los bicarbonatos. Se tiene un valor de 0.5947, con signo positivo, es decir que si aumentan los bicarbonatos, también lo harán los nitratos en un 59.47%, y con un error o confianza de 0.060 para cada cola, lo cual indica que la relación entre ambos no es significativa.

Tabla 43. Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua superficial (cuarto muestreo)

Nombre de la Variable	Nomenclatura	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura Ambiente	Temp. Amb.	34.9872	3.27054	9.31114
Temperatura del Agua	Temp. Agua	29.0552	2.16712	7.44077
Potencial de Hidrógeno	pH	7.98166	0.194565	2.43701
Conductividad Eléctrica	C.E.	781.777	110.752	14.0481
Sólidos Disueltos Totales	SDT	464.504	62.4271	13.3391
Oxígeno Disuelto	O.D.	9.90194	3.17164	30.718
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁼	274.945	26.1989	9.49117
Cloruros	Cl ₂	15.443	4.21679	26.5198
Sulfatos	SO ₄ ⁼	147.854	25.918	17.3125
Nitrógeno de Nitratos	N-NO ₃	0.296643	0.281924	72.6897
Nitrógeno de Nitritos	N-NO ₂	0.0109302	0.0101258	71.9288
Fósforo Total	P total	0.108924	0.209316	126.141
Nitrógeno Amoniacal	N-NH ₃	0.143671	0.240128	120.184

Tabla 44. Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al cuarto muestreo del agua superficial del Río Sonora

	Temp. Amb.	Temp. Agua	pH	C.E.	SDT	O.D	HCO ₃ ⁼	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	P total	N-NH ₃
Temp. Amb.	1.0000 (0.0000)	0.7634 (0.0275)	0.3112 (0.4531)	-0.5594 (0.1494)	-0.2701 (0.5177)	0.6938 (0.0563)	-0.0112 (0.9790)	-0.0938 (0.8252)	-0.0781 (0.8542)	-0.5083 (0.1984)	0.1726 (0.6827)	-0.2876 (0.4897)	-0.3078 (0.4583)
Temp. Agua	0.7634 (0.0275)	1.0000 (0.0000)	0.2291 (0.5852)	-0.1472 (0.7279)	0.2703 (0.5173)	0.3632 (0.3765)	0.3388 (0.4117)	0.4245 (0.2945)	0.2473 (0.5549)	-0.3948 (0.3341)	0.2836 (0.4961)	-0.1607 (0.7039)	-0.1476 (0.7273)
pH	0.3112 (0.4531)	0.2291 (0.5852)	1.0000 (0.0000)	-0.0074 (0.9862)	-0.6591 (0.0754)	0.6860 (0.0603)	-0.4510 (0.2621)	-0.5652 (0.1443)	-0.5866 (0.1264)	-0.3341 (0.4186)	0.3137 (0.4493)	0.0667 (0.8752)	0.1147 (0.7868)
C.E.	-0.5594 (0.1494)	-0.1472 (0.7279)	-0.0074 (0.9862)	1.0000 (0.0000)	0.4574 (0.2545)	-0.5875 (0.1257)	0.0825 (0.8459)	0.3377 (0.4133)	0.4698 (0.2402)	-0.0323 (0.9394)	-0.4166 (0.3046)	-0.3118 (0.4521)	-0.2982 (0.4731)
SDT	-0.2701 (0.5177)	0.2703 (0.5173)	-0.6591 (0.0754)	0.4574 (0.2545)	1.0000 (0.0000)	-0.6700 (0.0691)	0.7245 (0.0421)	0.9378 (0.0006)	0.7759 (0.0236)	0.2551 (0.5420)	-0.1282 (0.7622)	-0.1076 (0.7999)	-0.0947 (0.8236)
O.D	0.6938 (0.0563)	0.3632 (0.3765)	0.6860 (0.0603)	-0.5875 (0.1257)	1.0000 (0.0000)	1.0000 (0.0000)	-0.1343 (0.7513)	-0.5022 (0.2047)	-0.5804 (0.1314)	-0.0627 (0.8828)	0.3309 (0.4234)	-0.1233 (0.7712)	-0.0558 (0.8957)
HCO ₃ ⁼	-0.0112 (0.9790)	0.3388 (0.4117)	-0.4510 (0.2621)	0.0825 (0.8459)	0.7245 (0.0421)	1.0000 (0.0000)	1.0000 (0.0000)	0.6304 (0.0937)	0.3037 (0.4646)	0.5947 (0.1200)	0.2504 (0.5498)	-0.1794 (0.6708)	-0.0776 (0.8551)
Cl ₂	-0.0938 (0.8252)	0.4245 (0.2945)	-0.5652 (0.1443)	0.3377 (0.4133)	0.9378 (0.0006)	-0.5022 (0.2047)	0.6304 (0.0937)	1.0000 (0.0000)	0.8530 (0.0071)	0.1697 (0.6878)	-0.2141 (0.6107)	-0.1480 (0.7266)	-0.1404 (0.7402)
SO ₄ ⁼	-0.0781 (0.8542)	0.2473 (0.5549)	-0.5866 (0.1264)	0.4698 (0.2402)	0.7759 (0.0236)	-0.5804 (0.1314)	0.3037 (0.4646)	0.8530 (0.0071)	1.0000 (0.0000)	-0.1052 (0.8041)	-0.6574 (0.0765)	-0.4593 (0.2523)	-0.5087 (0.1980)
N-NO ₃	-0.5083 (0.1984)	-0.3948 (0.3331)	-0.3341 (0.4186)	-0.0323 (0.9394)	0.2551 (0.5420)	-0.0627 (0.8828)	0.5947 (0.1200)	0.1697 (0.6878)	-0.1052 (0.8041)	1.0000 (0.0000)	0.1494 (0.7241)	0.0971 (0.8190)	0.2228 (0.5959)
N-NO ₂	0.1726 (0.6827)	0.2836 (0.4961)	0.3137 (0.4493)	-0.4166 (0.3046)	-0.1282 (0.7622)	0.3309 (0.4234)	0.2504 (0.5498)	-0.2141 (0.6107)	0.1494 (0.0765)	1.0000 (0.0000)	1.0000 (0.0000)	0.6743 (0.0667)	0.7376 (0.0368)
P total	-0.2876 (0.4897)	-0.1607 (0.7039)	0.0667 (0.8752)	-0.3118 (0.4521)	-0.1076 (0.7999)	-0.1233 (0.7712)	-0.1794 (0.6708)	-0.1480 (0.7266)	-0.4593 (0.2523)	0.0971 (0.8190)	0.6743 (0.0667)	1.0000 (0.0000)	0.9849 (0.0000)
N-NH ₃	-0.3078 (0.4583)	-0.1476 (0.7273)	0.1147 (0.7868)	-0.2982 (0.4731)	-0.0947 (0.8236)	-0.0558 (0.8957)	-0.0776 (0.8151)	-0.1404 (0.7402)	-0.5087 (0.1980)	0.2228 (0.5959)	0.7376 (0.0368)	0.9849 (0.0000)	1.0000 (0.0000)

Este tipo de análisis se puede extender a cualquier pareja de variables que se desee estudiar, sin embargo se siguen mostrando solo ejemplos relacionados con los objetivos de este trabajo.

El siguiente paso es determinar los vectores propios de la matriz de correlación, así como la proporción de la variación total explicada por cada uno de los componentes, mismos que se presentan en la tabla 45. Para este muestreo en particular, se observa que el primer componente sólo sintetiza el 37.17% de la variabilidad total, mientras que el segundo componente resume el 23.40%, el tercero sintetiza el 18.789%, y así sucesivamente. Sin embargo, al igual que en los cálculos de los muestreos anteriores, se utilizarán todos ellos, de tal forma que se cuente con un panorama global de la influencia de éstos.

Por otro lado, en las tablas 46 y 47 se muestran los valores obtenidos tanto de los vectores propios, como de la proporción de la variación respectivamente. De la primera se puede deducir que del primer componente se podrían tomar en cuenta solo 5 variables de un total de 13, lo mismo para el segundo, 4 para el tercero, y así sucesivamente (se encerraron en un rectángulo).

Al examinar los valores de la correlación entre las variables y los componentes principales (tabla 47) se tiene la variación total de las siguientes variables, tomando en cuenta sólo el primer componente: SDT (80.29%), Cl_2 (71.14%) y SO_4^{2-} (81.16%). De igual forma, las siguientes variables quedan explicadas por la suma de los dos primeros componentes; temperatura ambiente (88.81%), temperatura del agua (86.39%), cloruros [Cl_2] (96.71%), sulfatos [SO_4^{2-}] (82.97%), nitrógeno de nitratos [N-NO_3] (79.05%) y fósforo total (76.49%). Sin embargo, para conservar el mismo marco de referencia de los muestreos anteriores, se tomarán en cuenta todos ellos.

Tabla 45. Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua superficial, del cuarto muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R)

Componentes	Valor Propio	Proporción de la Varianza Total Explicada	
		Absoluta (%)	Acumulada (%)
1°	4.83185	37.16806	37.16806
2°	3.04218	23.40135	60.56941
3°	2.44261	18.78935	79.35875
4°	1.36815	10.52420	89.88296
5°	0.970773	7.46749	97.35044
6°	0.343372	2.64133	99.99177
7°	1.05997E-3	0.00815	99.99992
8°	9.64218E-6	0.00007	100.00000
9°	1.32721E-7	0.00000	100.00000
10°	5.92967E-8	0.00000	100.00000
11°	5.79977E-8	0.00000	100.00000
12°	4.01429E-8	0.00000	100.00000
13°	2.29539E-9	0.00000	100.00000

Tabla 46. Vectores propios de la matriz de correlación, del cuarto muestreo, del agua superficial

Vectores Propios

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Temp. Amb.	0.168082	0.430642	0.318001	0.025063	-0.219502	-0.11591	0.122068	0.333783	0.354173	-0.43989	0.310898	-0.03793	0.282085
Temp. Agua	-0.010153	0.319261	0.487138	0.253202	0.144897	0.070588	0.058519	-0.49123	-0.319344	0.260784	0.364898	-0.14758	0.030307
pH	0.329351	0.158481	-0.040163	0.141495	0.587612	0.30879	0.033596	0.309605	-0.011231	-0.07987	-0.19107	-0.48590	-0.16744
C.E.	-0.269253	-0.006946	-0.263261	0.204415	0.655165	-0.13816	0.012052	-0.15902	0.204955	-0.22885	0.221063	0.351684	0.275084
SDT	-0.407654	-0.09159	0.246193	0.106905	0.078788	-0.07228	0.015125	0.550082	-0.589434	-0.18536	0.083669	0.167948	-0.14878
O.D	0.336464	0.252611	0.178424	-0.296753	0.111936	0.37593	-0.15934	-0.07016	-0.185521	-0.11561	-0.25801	0.633879	0.05487
HCO ₃	-0.24211	-0.07787	0.426953	-0.366334	0.202759	-0.29265	-0.41307	-0.16590	0.073142	-0.20256	-0.36025	-0.29414	0.176729
Cl ₂	-0.384481	0.006556	0.284695	0.146197	-0.000975	0.411995	-0.26246	0.129869	0.543152	0.218794	0.04621	0.142804	-0.35888
SO ₄	-0.411057	0.170701	0.01038	0.177227	-0.141228	0.305898	0.512909	-0.12447	0.000757	-0.10967	-0.52416	-0.06974	0.294364
N-NO ₃	-0.098862	-0.334194	0.094888	-0.621562	0.132287	0.36298	0.398608	-0.03370	0.031828	-0.07217	0.388463	-0.12339	0.039596
N-NO ₂	0.245063	-0.248382	0.415963	0.068778	0.198441	-0.39907	0.505232	0.061995	0.216493	0.219475	-0.23074	0.245164	-0.18559
P total	0.179437	-0.441697	0.142213	0.355736	-0.13799	0.169421	-0.04111	-0.32499	-0.013498	0.63917	0.006951	-0.01129	-0.24894
N-NH ₃	0.18398	-0.459928	0.180524	0.263367	-0.0241	0.227846	-0.19066	0.219399	-0.012975	0.262954	0.019629	-0.00205	0.667819

Interpretación de los resultados (agua superficial, cuarto muestreo)

En la tabla 48 se muestran los resultados, una vez que se calculó la raíz cuadrada de los dos primeros componentes de la tabla 47, respetando el signo del coeficiente correspondiente de la tabla 46. En la figura 18 se han graficado en un par de ejes ortogonales la correlación $r_{(jk)}$ de cada variable original.

De esta manera, el círculo de radio unitario trazado con centro en el origen del par de coordenadas, permite identificar las variables con una relación muy alta con los componentes, tales como: sulfatos, fósforo total, nitrógeno amoniacal y sólidos disueltos totales. De igual forma se tienen otras variables cuya relación no es tan buena como las anteriores, pero que podrían ser significativas: oxígeno disuelto, potencial de hidrógeno, cloruros, nitritos y temperatura ambiente. Aquellas variables que se agrupen cerca del centro serán las que menos se correlacionan con los componentes principales, mismas que se enlistan a continuación: conductividad eléctrica, bicarbonatos, nitratos y temperatura del agua.

Al aplicar la ecuación (15), se obtiene la matriz Y , misma que genera la correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes, cuyos resultados se muestran en la tabla 49. Por medio de éstos, se obtiene una representación gráfica, misma que se muestra en la figura 19, en la cual se observa que la totalidad de las estaciones quedaron ubicadas en un solo cuadrante, pero a diferencia de los anteriores, éste es el inferior izquierdo.

Tomando en consideración un empalme entre las figuras 18 (variables) y 19 (estaciones de muestreo), determinan sólo las variables que resultaron correlacionadas con cada una de las estaciones, mismas que son las que coincidan en el mismo sector del círculo; bicarbonatos, sólidos disueltos totales y nitratos.

Tabla 48. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (cuarto muestreo, agua superficial)

Variable	Componentes		Variación Total Explicada por los Dos Primeros Componentes (%)
	1°	2°	
Temperatura Ambiente	0.3695	0.7511	70.07
Temperatura del Agua	-0.0223	0.5569	31.06
pH	0.7240	0.2764	60.05
C.E	-0.5919	-0.0121	35.04
SDT	-0.8961	-0.1597	82.85
O.D	0.7396	0.4406	74.11
HCO ₃ ⁼	-0.5322	-0.1358	30.17
Cl ₂	-0.8451	0.0114	71.44
SO ₄ ⁼	-0.9036	0.2977	90.51
N-NO ₃	-0.2173	-0.5829	38.70
N-NO ₂	0.5387	-0.4332	47.79
P total	0.3944	-0.7704	74.91
N-NH ₃	0.4044	-0.8022	80.71

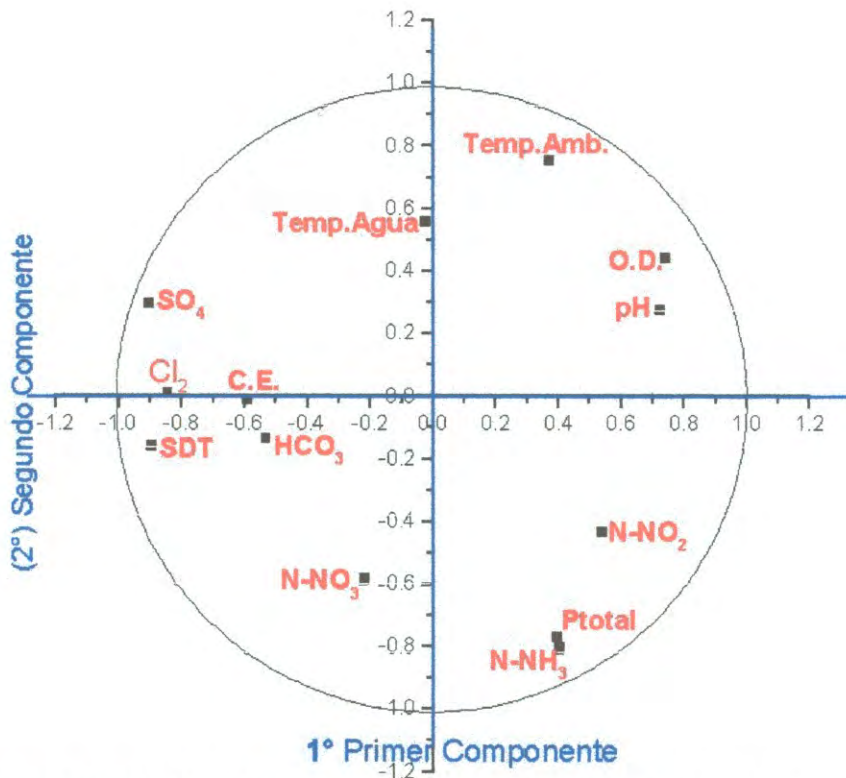


Figura 18. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes (cuarto muestreo)

Como se puede apreciar, del total de 13 variables involucradas en los análisis de este muestreo, sólo 3 son las que pueden considerarse que tienen una diferencia significativa, pues resultaron las más fuertemente relacionadas con la totalidad de las estaciones de muestreo: sólidos disueltos totales, bicarbonatos y nitratos, de las cuales sólo los sólidos disueltos totales son los que tienen un fuerte impacto en la calidad del agua de los puntos muestreados. Los nitratos (como nitrógeno) y los bicarbonatos, aunque coinciden con el cuadrante de las estaciones, su ubicación es cerca de los ejes ortogonales, lo cual es un indicador que no afectan tanto como los sólidos disueltos totales.

Al comparar estos resultados con los de la caracterización del agua para este mismo muestreo (figura 9), se clasificaría de una manera muy similar para todas las estaciones de muestreo "bicarbonatadas", ya que de acuerdo a Piper, la clasificación está representada como "cálcico-bicarbonatada-sulfatada". Debido a que el calcio no se contempló como variable, entonces queda como "bicarbonatada-sulfatada", sin embargo si se observa detenidamente la figura 9, se puede apreciar sólo una leve tendencia hacia la región sulfatada.

Tabla 49. Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (cuarto muestreo, agua superficial)

Estaciones de Muestreo	Vector Y_1 (del componente 1°)	Vector Y_2 (del componente 2°)
(1) Arizpe		
(2) Arizpe	-489.1944	-21.6829
(3) Tetuachi	-539.1137	-13.9434
(4) Sinoquipe	-462.7756	-8.4738
(5A) Aconchi	-471.4343	-12.1580
(5B) Aconchi	-473.0020	-12.0376
(6) Baviácora	-561.5042	-20.7028
(7) Mazocahui	-583.4186	-12.0581
(8) Ures	-625.9025	-28.3493

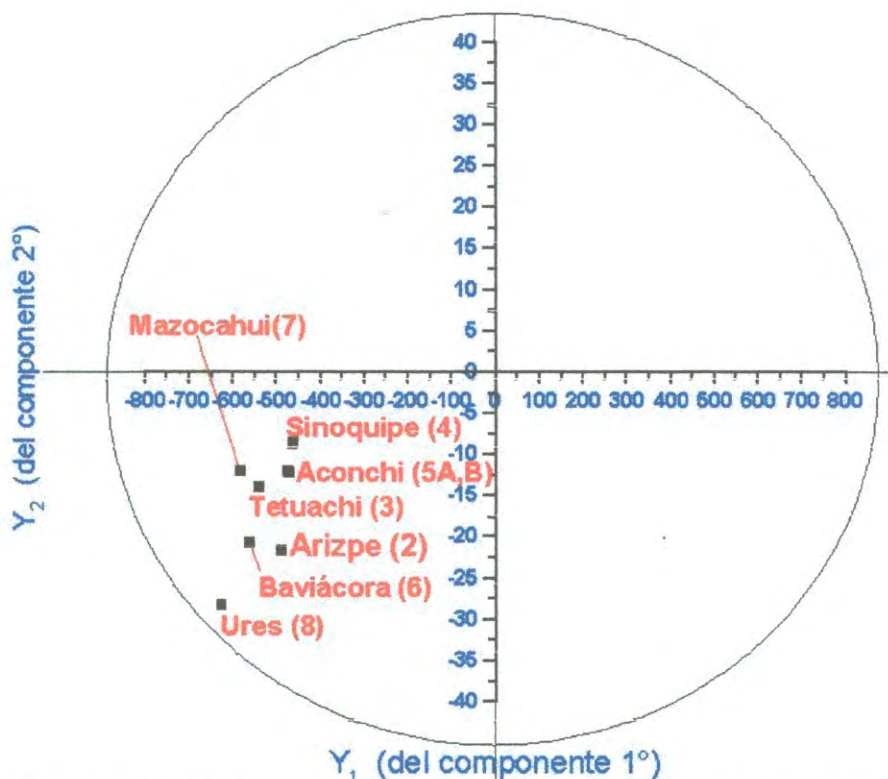


Figura 19. Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Cuarto muestreo del agua superficial

Primer muestreo del agua subterránea

En la tabla 50, se muestran los resultados de las variables del análisis estadístico al que fueron sometidos los datos de campo mostrados en la tabla 11, mismos que corresponden a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua subterránea del primer muestreo. En ésta se puede apreciar que los nitratos tienen un coeficiente de variación del 68.41%, lo cual da un indicio de que se pudiera presentar una diferencia significativa entre algunos de los puntos de muestreo, lo mismo sucede con los nitritos (65.40%) y especialmente con el fósforo total (93.33%).

La matriz de correlación resultante se muestra en la tabla 51, mediante la cual se observa la relación que guardan algunas de las variables involucradas directamente con el objetivo del estudio.

- ✓ Relación entre nitratos y nitritos: Se tiene un valor de 0.1114, lo cual indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumentan nitritos, aumentarán también los nitratos en una proporción del 11.14%, con un error del .4645 para cada cola, lo cual significa que para este muestreo, la relación entre ambas no es nada significativa.
- ✓ Relación entre nitratos y el nitrógeno amoniacal. Se tiene un valor de -0.1327, lo cual indica que son inversamente proporcionales, es decir que si aumentan los nitratos entonces disminuirá el nitrógeno amoniacal en una proporción del 13.27% (nitrificación), con un error o confianza del 0.4577 para cada cola, lo cual no es significativo.

Tal y como se ha venido insistiendo a lo largo de los distintos muestreos, este tipo de análisis se puede extender a cualquier pareja de variables que se desee estudiar, sin embargo se siguen mostrando solo ejemplos relacionados con los objetivos de este trabajo.

Tabla 50. Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua subterránea (primer muestreo)

Nombre de la Variable	Nomenclatura	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de variación (%)
Temperatura Ambiente	Temp. Amb.	22.8943	2.64575	11.5033
Temperatura del Agua	Temp. Agua	21.4983	3.21455	14.8364
Potencial de Hidrógeno	pH	6.66592	0.122202	1.83303
Conductividad Eléctrica	C.E.	895.137	162.802	18.0024
Sólidos Disueltos Totales	SDT	555.051	100.127	17.8585
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁼	344.786	33.5154	9.68971
Cloruros	Cl ₂	17.9171	7.71676	40.4256
Sulfatos	SO ₄ ⁼	160.115	20.7925	12.9101
Nitrógeno de Nitratos	N-NO ₃	1.82217	1.49462	68.4038
Nitrógeno de Nitritos	N-NO ₂	0.00175	0.00132	65.399
Fósforo Total	P total	0.01212	0.0224	93.3333
Nitrógeno Amoniacal	N-NH ₃	0.01819	0.00833	43.3013

Al calcular los vectores propios de la matriz de correlación, así como la proporción de la variación total explicada por cada uno de los componentes, mismos que se presentan en la tabla 52, se observó que el primer componente sintetiza el 71.45% de la variabilidad total, mientras que el segundo componente resume el 28.55%, cuya suma de ambos es el 100%, de tal forma que sólo se requiere utilizar ambos.

Por otro lado, en las tablas 53 y 54 se muestran los valores obtenidos tanto de los vectores propios como de la proporción de la variación, respectivamente. De la primera se puede deducir que del primer componente se podrían tomar en cuenta solo 7 variables de un total de 12, mientras que para el segundo se tendrían 5, sólo 1 para el tercero, y así sucesivamente (se encerraron en un rectángulo).

Al examinar los valores de la correlación entre las variables y los componentes principales (tabla 54) se tiene la variación total de las siguientes variables, tomando en cuenta sólo el primer componente: Cl_2 (97.99%), SO_4^{2-} (98.60%), temperatura ambiente (99.62%), N-NH_3 (93.80%) pH (99.33%) y HCO_3^- (97.61%). Para el resto la suma de los dos primeros componentes arroja el 100% de la variación total, por lo tanto no es necesario considerarlos todos.

Interpretación de los resultados (agua subterránea, primer muestreo)

El resultado final de estos procesos son las gráficas de correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, mismos que explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario, y la gráfica de correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, ya que son los que mejor explican la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación

Tabla 51. Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros; **físicos, químicos y nutrientes**, correspondientes al primer muestreo del agua subterránea del Río Sonora

	Temp. Amb.	Temp. Agua	pH	C.E.	SDT	HCO ₃ ⁼	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	P total	N-NH ₃
Temp. Amb.	1.0000 (0.0000)	-0.4703 (0.6883)	-0.9897 (0.0913)	0.6976 (0.5085)	0.7059 (0.5011)	0.9766 (0.1380)	0.9793 (0.1298)	0.9984 (0.0363)	0.3176 (0.7942)	-0.9070 (0.2768)	0.7559 (0.4544)	-0.9820 (0.1210)
Temp. Agua	-0.4703 (0.6883)	1.0000 (0.0000)	0.3394 (0.7795)	0.3041 (0.8033)	0.2931 (0.8106)	-0.2695 (0.8263)	-0.2819 (0.8180)	-0.5198 (0.6520)	0.6874 (0.5175)	0.7983 (0.4115)	-0.9333 (0.2339)	0.6286 (0.5672)
pH	-0.9897 (0.0913)	0.3394 (0.7795)	1.0000 (0.0000)	-0.7928 (0.4172)	-0.7998 (0.4098)	-0.9973 (0.0468)	-0.9982 (0.0385)	-0.9900 (0.1275)	-0.4498 (0.7030)	0.8375 (0.3681)	-0.6547 (0.5456)	0.9449 (0.2123)
C.E.	-0.6976 (0.5085)	0.3041 (0.8033)	-0.7928 (0.4172)	1.0000 (0.0000)	0.9999 (0.0074)	0.8354 (0.3704)	0.8282 (0.3787)	0.6557 (0.5447)	0.9009 (0.2858)	-0.3310 (0.7853)	0.0584 (0.9628)	-0.5497 (0.6295)
SDT	0.7059 (0.5011)	0.2931 (0.8106)	-0.7998 (0.4098)	0.9999 (0.0074)	1.0000 (0.0000)	0.8417 (0.3631)	0.8347 (0.3713)	0.6644 (0.5374)	0.8958 (0.2932)	-0.3419 (0.7779)	0.0699 (0.9555)	-0.5593 (0.6221)
HCO ₃ ⁼	0.9766 (0.1380)	-0.2695 (0.8263)	-0.9973 (0.0468)	0.8354 (0.3704)	0.8417 (0.3631)	1.0000 (0.0000)	0.9999 (0.0083)	0.9828 (0.1743)	0.5141 (0.6562)	-0.7951 (0.4148)	0.5974 (0.5924)	-0.9183 (0.2591)
Cl ₂	0.9793 (0.1298)	-0.2819 (0.8180)	-0.9982 (0.0385)	0.8282 (0.3787)	0.8347 (0.3713)	0.9999 (0.0083)	1.0000 (0.0000)	0.9662 (0.1660)	0.5030 (0.6645)	-0.8029 (0.4066)	0.6078 (0.5841)	-0.9234 (0.2508)
SO ₄ ⁼	0.9984 (0.0363)	-0.5198 (0.6520)	-0.9800 (0.1275)	0.6557 (0.5447)	0.6644 (0.5374)	0.9628 (0.1743)	0.9662 (0.1660)	1.0000 (0.0000)	0.2631 (0.8305)	-0.9295 (0.2405)	0.7920 (0.4181)	-0.9912 (0.0848)
N-NO ₃	0.3176 (0.7942)	0.6874 (0.5175)	-0.4498 (0.7030)	0.9009 (0.2858)	0.8958 (0.2932)	0.5141 (0.6562)	0.5030 (0.6645)	0.2631 (0.8305)	1.0000 (0.0000)	0.1114 (0.9290)	-0.3807 (0.7514)	-0.1327 (0.9153)
N-NO ₂	-0.9070 (0.2768)	0.7983 (0.4115)	0.8375 (0.3681)	-0.3310 (0.7853)	-0.3419 (0.7779)	-0.7951 (0.4148)	-0.8029 (0.4066)	-0.9295 (0.2405)	0.1114 (0.9290)	1.0000 (0.0000)	-0.9613 (0.1776)	0.9702 (0.1558)
P total	0.7559 (0.4544)	-0.9333 (0.2339)	-0.6547 (0.5456)	0.0584 (0.9628)	0.0699 (0.9555)	0.5974 (0.5924)	0.6078 (0.5841)	0.7920 (0.4181)	-0.3807 (0.7514)	1.0000 (0.0000)	1.0000 (0.0000)	-0.8660 (0.3333)
N-NH ₃	-0.9820 (0.1210)	0.6286 (0.5672)	0.9449 (0.2123)	-0.5497 (0.6295)	-0.5593 (0.6221)	-0.9183 (0.2591)	-0.9234 (0.2508)	-0.9912 (0.0848)	-0.1327 (0.9153)	0.9702 (0.1558)	-0.8660 (0.3333)	1.0000 (0.0000)

Tabla 52. Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua subterránea, del primer muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R)

Componentes	Valor Propio	Proporción de la Varianza Total Explicada	
		Absoluta (%)	Acumulada (%)
1°	8.57398	71.44981	71.44981
2°	3.42602	28.55019	100.00000
3°	9.73E-16	00.00000	100.00000
4°	3.68E-16	00.00000	100.00000
5°	1.94E-16	00.00000	100.00000
6°	1.65E-16	00.00000	100.00000
7°	6.55E-17	00.00000	100.00000
8°	-6.15E-18	00.00000	100.00000
9°	-3.09E-17	00.00000	100.00000
10°	-4.95E-17	00.00000	100.00000
11°	-8.70E-17	00.00000	100.00000
12°	-1.27E-16	00.00000	100.00000

Tabla 53. Vectores propios de la matriz de correlación, del primer muestreo, del agua subterránea

Vectores Propios

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°
Temp. Amb.	0.340867	-0.033256	-0.218831	0.095857	-0.33375	-0.264924	0.125068	-0.15143	-0.172693	-0.086367	0.752646	-0.041493
Temp. Agua	-0.141764	0.491517	0.188093	-0.164855	-0.59032	-0.061663	-0.33009	0.265839	0.163944	0.316698	0.073221	0.151702
pH	-0.34037	-0.044119	0.244366	-0.100303	0.448278	0.318258	-0.120363	0.156972	0.192186	0.076463	0.653353	0.037453
C.E.	0.252866	0.363131	-0.201399	0.034602	-0.039197	0.68087	-0.033459	-0.051152	-0.14975	0.079493	0.002499	-0.51461
SDT	0.255508	0.358473	-0.24214	0.054577	0.274126	0.1836	-0.0058	-0.083163	-0.182286	0.057701	0.000407	0.769572
HCO ₃ ⁻	0.337409	0.083516	0.870517	0.112283	-0.017804	0.065909	0.128724	-0.176353	-0.220259	-0.078371	-0.009142	0.041252
Cl ₂	0.338065	0.076588	0.002025	0.115597	-0.005831	0.054193	0.138568	-0.181775	0.895574	-0.089256	-0.009851	0.0339
SO ₄ ⁼	0.339116	-0.063918	0.002229	0.128907	0.057291	-0.002581	0.183026	0.898832	0.001488	-0.1394	-0.013001	-0.001728
N-NO ₃	0.128195	0.500755	0.000129	-0.000705	0.511851	-0.56574	-0.111726	-0.000551	-0.008014	0.15556	0.007889	-0.33754
N-NO ₂	-0.30029	0.257299	-0.002331	-0.137501	-0.05324	-0.00441	0.881909	0.0078	-0.004801	0.209088	0.016933	-0.000448
P total	0.243909	-0.37815	0.002303	0.137603	0.052219	0.00702	0.009748	-0.007679	0.006865	0.880473	-0.018916	0.00072
N-NH ₃	-0.33075	0.134563	-0.002385	0.932185	-0.054898	-0.001858	-0.012043	0.008015	-0.002798	0.007561	0.015155	-0.000191

De las tablas 53 y 54 se genera la tabla 55, misma que al utilizar estos datos, da origen a la figura 20, la cual permite identificar las variables, mismas que tienen una relación muy alta con los componentes. En este caso particular se tomarían todas las variables, ya que en su totalidad se encuentran muy cerca del perímetro del círculo unitario.

Al aplicar la ecuación (15), se obtiene la matriz Y , misma que genera la correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes, cuyos resultados se muestran en la tabla 56. Por medio de éstos se obtiene una representación gráfica, misma que se muestra en la figura 21, en la cual se observa que la totalidad de las estaciones quedaron todas ubicadas en el cuadrante superior derecho.

Al llevar a cabo el empalme correspondiente entre ambas figuras (20 y 21), se determinan aquellas variables que resultaron correlacionadas con cada una de las estaciones, mismas que fueron las que coincidieron en el mismo cuadrante del círculo, las cuales son: nitratos, bicarbonatos, cloruros, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. Como se puede apreciar, de las 12 variables involucradas en los análisis de este muestreo, sólo 5 son las que verdaderamente influyen en todas las estaciones, por lo tanto, son las que tienen una diferencia significativa con respecto al resto (influyen fuertemente en la calidad del agua).

Por otro lado, al comparar estos resultados con los de la caracterización del agua para este mismo muestreo (figura 10), se clasificaría de una manera muy similar para todas las estaciones de muestreo "bicarbonatadas", ya que de acuerdo a Piper, la clasificación está representada como "cálcico-bicarbonatada-sulfatada", y debido a que el calcio no se contempló como variable, entonces queda como "bicarbonatada-sulfatada", sin embargo en la figura 10, se puede apreciar sólo una leve tendencia hacia la región sulfatada.

Tabla 55. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua subterránea)

Variable	Componentes		Variación Total Explicada por los Dos Primeros Componentes (%)
	1°	2°	
Temperatura Ambiente	0.9988104	-0.0615546	100.00
Temperatura del Agua	-0.4151045	0.9097739	100.00
pH	-0.9966613	-0.0816628	100.00
C.E	0.7404260	0.6721377	99.99
SDT	0.7481621	0.6635159	100.00
HCO ₃ ⁻	0.9879794	0.1545846	99.99
Cl ₂	0.9899002	0.1417596	99.99
SO ₄ ⁻	0.9929777	-0.1183080	100.00
N-NO ₃	0.3753723	0.9268730	99.99
N-NO ₂	-0.8793104	0.4762478	99.99
P total	0.7141987	-0.6999427	99.99
N-NH ₃	-0.9684868	0.2490694	100.00

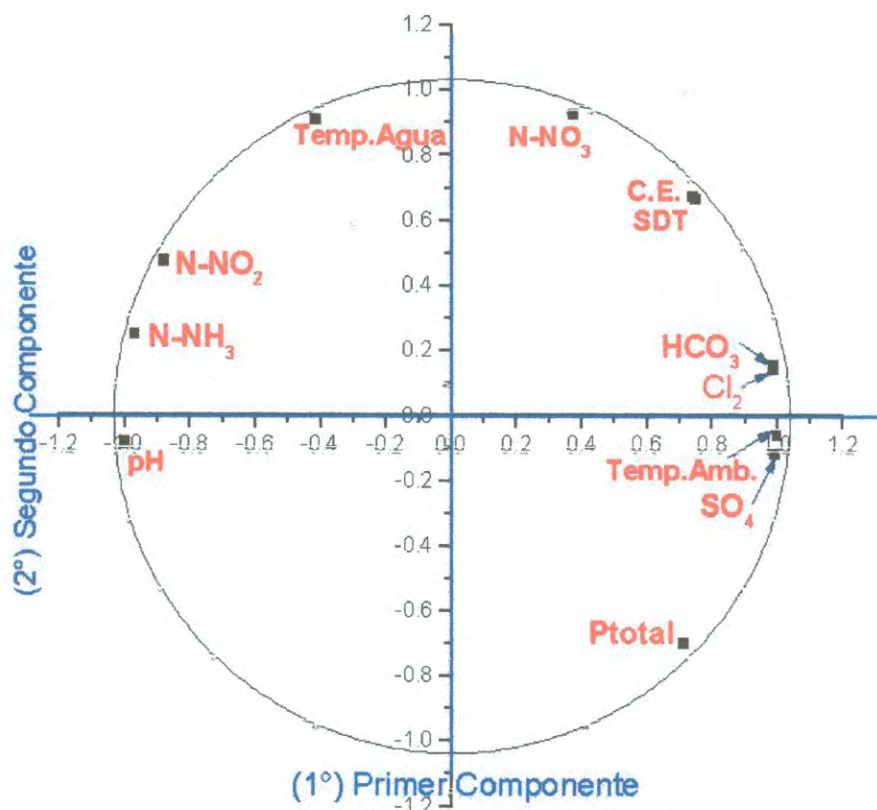


Figura 20. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua subterránea (primer muestreo)

Tabla 56. Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (primer muestreo, agua subterránea)

Pozo de Muestreo	Vector Y_1 (del componente 1°)	Vector Y_2 (del componente 2°)
(1) Arizpe	523.9230	508.6741
(2) Aconchi	647.9762	673.1889
(3) Ures	485.5511	498.4628

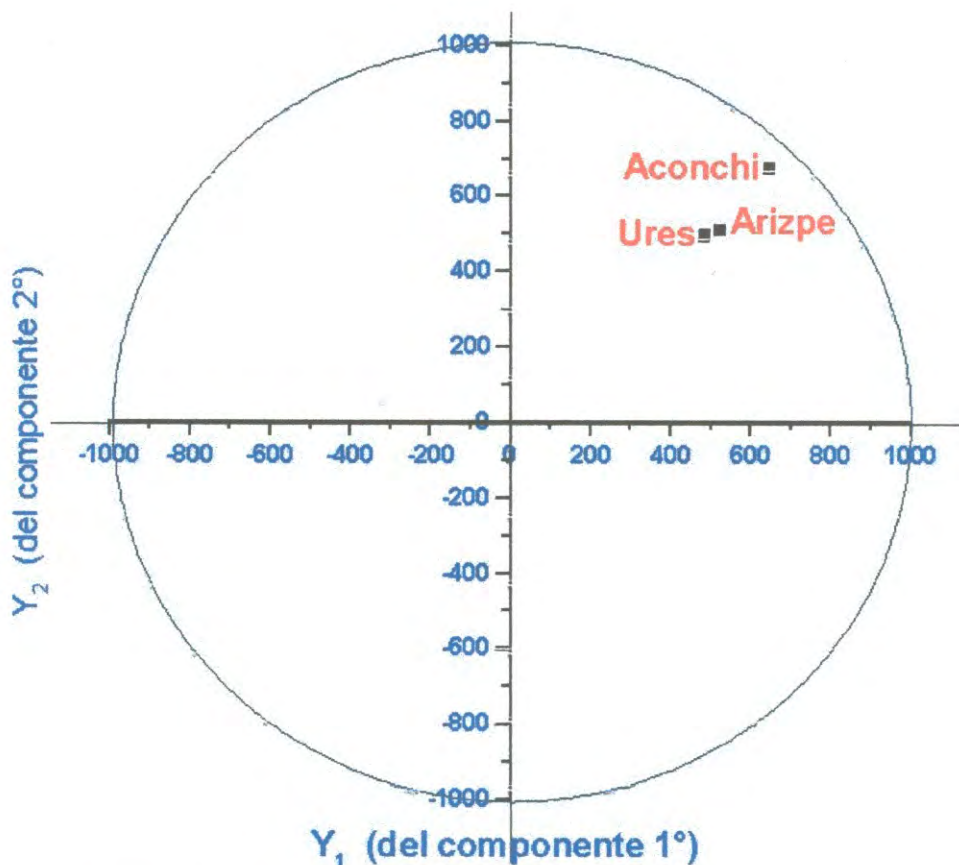


Figura 21. Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Primer muestreo del agua subterránea

Tabla 57. Variables utilizadas en el análisis por componentes principales, correspondientes a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua subterránea (segundo muestreo)

Nombre de la Variable	Nomenclatura	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura Ambiente	Temp. Amb.	29.6432	7.63763	25.179
Temperatura del Agua	Temp. Agua	23.0033	0.00577	0.02509
Potencial de Hidrógeno	pH	7.21139	0.20428	2.83208
Conductividad Eléctrica	C.E.	895.664	144.876	16.0438
Sólidos Disueltos Totales	SDT	564.174	75.0555	13.2295
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁼	319.634	59.8413	18.5175
Cloruros	Cl ₂	21.1811	1.12987	5.32941
Sulfatos	SO ₄ ⁼	203.188	53.9159	25.977
Nitrógeno de Nitratos	N-NO ₃	1.43078	1.4658	76.3159
Nitrógeno de Nitritos	N-NO ₂	0.00346	0.00192	49.6145
Fósforo Total	P total	0.10352	0.050186	45.1723
Nitrógeno Amoniacal	N-NH ₃	0.00969	0.018186	117.332

Segundo muestreo del agua subterránea

En la tabla 57, se muestran los resultados de las variables del análisis estadístico al que fueron sometidos los datos de campo mostrados en la tabla 12, mismos que corresponden a los parámetros físicos, químicos y nutrientes, del agua subterránea del segundo muestreo. En esta tabla, se puede apreciar que los nitratos tienen un coeficiente de variación del 76.32%, lo cual da un indicio de que se pudiera presentar una diferencia significativa entre algunos de los puntos de muestreo, lo mismo sucede con los nitritos (49.62%), el fósforo total (45.17%) y especialmente con el nitrógeno amoniacal (117.33%).

La matriz de correlación resultante se muestra en la tabla 58, mediante la cual se observa la relación que guardan algunas de las variables involucradas directamente con el objetivo del estudio.

- ✓ Relación entre nitratos y nitritos. Se tiene un valor de 0.0082, lo cual indica que son directamente proporcionales, es decir que si aumentan nitritos, aumentarán también los nitratos en una proporción del 0.82%, con un error del 0.4974 para cada cola, lo cual significa que para este muestreo, la relación entre ambas no es significativa.
- ✓ Relación entre nitratos y el nitrógeno amoniacal. Se tiene un valor de -0.8701, lo cual indica que son inversamente proporcionales, por lo tanto, si aumentan los nitratos, entonces disminuirá el nitrógeno amoniacal en una proporción del 87.01%, con un error o confianza del 0.1641 para cada cola, lo cual no es significativo.

Este tipo de análisis se puede extender a cualquier pareja de variables que se desee estudiar, sin embargo se siguen mostrando solo ejemplos relacionados con los objetivos de este trabajo.

Tabla 58. Resultados correspondientes al cálculo de la matriz de correlación, de los parámetros: físicos, químicos y nutrientes, correspondientes al segundo muestreo del agua subterránea del Río Sonora

	Temp. Amb.	Temp. Agua	pH	C.E.	SDT	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	P total	N-NH ₃
Temp. Amb.	1.0000 (0.0000)	0.7559 (0.4544)	0.8866 (0.3061)	0.7930 (0.4170)	0.7559 (0.4544)	0.5892 (0.5989)	0.7559 (0.4544)	0.6215 (0.5731)	0.9835 (0.1158)	-0.1890 (0.8790)	0.4447 (0.7066)	-0.9449 (0.2123)
Temp. Agua	0.7559 (0.4544)	1.0000 (0.0000)	0.3674 (0.7605)	0.9983 (0.0374)	1.0000 (0.0000)	0.9744 (0.1445)	1.0000 (0.0000)	0.9827 (0.1187)	0.8619 (0.3386)	0.5000 (0.6667)	0.9225 (0.2523)	-0.5000 (0.6667)
pH	0.8866 (0.3061)	0.3674 (0.7605)	1.0000 (0.0000)	0.4213 (0.7213)	0.3674 (0.7605)	0.1487 (0.9050)	0.3674 (0.7605)	0.1886 (0.8792)	0.7883 (0.4219)	-0.6218 (0.5728)	-0.0200 (0.9872)	-0.9892 (0.0938)
C.E.	0.7930 (0.4170)	0.9983 (0.0374)	0.4213 (0.7231)	1.0000 (0.0000)	0.9983 (0.0374)	0.9595 (0.1819)	0.9983 (0.0374)	0.9701 (0.1561)	0.8902 (0.3012)	0.4483 (0.7040)	0.8983 (0.2896)	-0.5499 (0.6293)
SDT	0.7559 (0.4544)	1.0000 (0.0000)	0.3674 (0.7605)	0.9983 (0.0374)	1.0000 (0.0000)	0.9744 (0.1445)	1.0000 (0.0000)	0.9827 (0.1187)	0.8619 (0.3386)	0.5000 (0.6667)	0.9225 (0.2523)	-0.5000 (0.6667)
HCO ₃ ⁻	0.5892 (0.5989)	0.9744 (0.1445)	0.1487 (0.9050)	0.9595 (0.1819)	0.9744 (0.1445)	1.0000 (0.0000)	0.9744 (0.1445)	0.9992 (0.0258)	0.7257 (0.4831)	0.6821 (0.5222)	0.9857 (0.1078)	-0.2923 (0.8112)
Cl ₂	0.7559 (0.4544)	1.0000 (0.0000)	0.3674 (0.7605)	0.9983 (0.0374)	1.0000 (0.0000)	0.9744 (0.1445)	1.0000 (0.0000)	0.9827 (0.1187)	0.8619 (0.3386)	0.5000 (0.6667)	0.9225 (0.2523)	-0.5000 (0.6667)
SO ₄ ⁻	0.6215 (0.5731)	0.9827 (0.1187)	0.1886 (0.8792)	0.9701 (0.1561)	0.9827 (0.1187)	0.9992 (0.0258)	0.9827 (0.1187)	1.0000 (0.0000)	0.7530 (0.4573)	0.6519 (0.5480)	0.9781 (0.1336)	-0.3308 (0.7854)
N-NO ₃	0.9835 (0.1158)	0.8619 (0.3386)	0.7883 (0.4219)	0.8902 (0.3012)	0.8619 (0.3386)	0.7257 (0.4831)	0.8619 (0.3386)	0.7530 (0.4573)	1.0000 (0.0000)	-0.0082 (0.9948)	0.5994 (0.5908)	-0.8701 (0.3281)
N-NO ₂	-0.1890 (0.8790)	0.5000 (0.6667)	-0.6218 (0.5728)	0.4483 (0.7040)	0.5000 (0.6667)	0.6821 (0.5222)	0.5000 (0.6667)	0.6519 (0.5480)	-0.0082 (0.9948)	1.0000 (0.0000)	0.7955 (0.4144)	0.5000 (0.6667)
P total	0.4447 (0.7066)	0.9225 (0.2523)	-0.0200 (0.9872)	0.8983 (0.2896)	0.9225 (0.2523)	0.9857 (0.1078)	0.9225 (0.2523)	0.9781 (0.1336)	0.5994 (0.5908)	0.7955 (0.4144)	1.0000 (0.0000)	-0.1270 (0.9189)
N-NH ₃	-0.9449 (0.2123)	-0.5000 (0.6667)	-0.9892 (0.0938)	-0.5499 (0.6293)	-0.5000 (0.6667)	-0.2923 (0.8112)	-0.5000 (0.6667)	-0.3308 (0.7854)	-0.8701 (0.3281)	0.5000 (0.6667)	-0.1270 (0.9189)	1.0000 (0.0000)

Los resultados de los vectores propios de la matriz de correlación, así como la proporción de la variación total explicada por cada uno de los componentes se presentan en la tabla 59, mediante la cual se observa que el primer componente sintetiza el 73.10% de la variabilidad total, mientras que el segundo resume 26.90%. Al considerar ambos, se sintetiza el 100% de la variabilidad total.

Por otro lado, en las tablas 60 y 61 se muestran los valores obtenidos tanto de los vectores propios, como de la proporción de la variación respectivamente. De la tabla 60 se puede deducir que del primer componente se podrían tomar en cuenta 7 variables de un total de 12, mientras que para el segundo se pudieran considerar 4, uno solo para el tercero y así sucesivamente (se encerraron en un rectángulo).

De la tabla 61 se observa que la variación total de los componentes principales recae en las siguientes variables: SDT (98.91%), HCO_3 (89.41%), SO_4^{2-} (91.78%), N-NO_3 (82.62%), C.E. (99.79%) y temperatura del agua (98.91%), todas ellas considerando solamente el primer componente. Sin embargo, si se consideran los dos primeros para el resto de las variables, la variación total es del 100%.

Interpretación de los resultados (agua subterránea, segundo muestreo)

Finalmente, los resultados finales de estos procesos recaen en las gráficas de Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, ya que éstos explican mejor las variables que se ubican cerca del círculo unitario. De igual forma, se tiene la gráfica de correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, ya que son los que mejor explican la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación

Tabla 59. Valores propios y proporción de la variación explicada, del agua subterránea, del segundo muestreo (cálculos a partir de la matriz de correlación; R)

Componentes	Valor Propio	Proporción de la Varianza Total Explicada	
		Absoluta (%)	Acumulada (%)
1°	8.77209	73.10072	73.10072
2°	3.22791	26.89928	100.00000
3°	1.02E-16	00.00000	100.00000
4°	7.29E-17	00.00000	100.00000
5°	5.56E-17	00.00000	100.00000
6°	1.99E-17	00.00000	100.00000
7°	3.07E-18	00.00000	100.00000
8°	-2.91E-17	00.00000	100.00000
9°	-3.84E-17	00.00000	100.00000
10°	-4.14E-17	00.00000	100.00000
11°	-6.72E-17	00.00000	100.00000
12°	-1.89E-16	00.00000	100.00000

Tabla 60. Vectores propios de la matriz de correlación, del segundo muestreo, del agua subterránea

Vectores Propios

Variable	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°
Temp. Amb.	0.276877	0.318537	0.016854	-0.030649	0.619553	0.148637	-0.139283	-0.016927	-0.228128	-0.095159	-0.53542	0.21736
Temp. Agua	0.335797	-0.058015	-0.118626	-0.287464	-0.62931	-0.067388	-0.38004	-0.164798	-0.078117	-0.190796	-0.41472	0.022294
pH	0.156103	0.493533	0.099969	0.205846	-0.36781	0.454883	0.09934	0.118211	-0.33138	0.00438	0.310317	0.327888
C.E.	0.337263	-0.025437	-0.107582	-0.30217	0.278614	-0.12387	-0.40354	-0.173459	-0.091704	-0.203945	0.566656	0.048504
SDT	0.335797	-0.058015	-0.120001	-0.32021	-0.003781	-0.115415	0.814156	-0.184172	-0.093448	-0.215003	0.006692	0.042774
HCO ₃ ⁻	0.319264	-0.181099	-0.157066	0.823964	-0.002639	-0.21417	0.004781	-0.231974	-0.042312	-0.244792	0.003981	-0.015719
Cl ₂	0.335797	-0.058015	-0.123215	0.013387	-0.004091	-0.112446	0.008188	-0.189693	-0.103304	0.898064	0.007343	0.05058
SO ₄ ⁼	0.323453	-0.159624	-0.154372	0.010334	-0.003152	-0.19491	0.005951	0.895741	-0.061028	0.005175	0.005106	0.002039
N-NO ₃	0.307266	0.230707	-0.019134	0.020497	-0.006267	0.137045	0.013601	0.01665	0.893614	0.009988	0.012864	0.182981
N-NO ₂	0.137421	-0.50840	-0.219345	-0.008011	0.084106	0.768419	-0.006737	-0.005258	0.003257	-0.003685	-0.007191	-0.213622
P total	0.296195	-0.267173	0.915066	0.006465	-0.00196	0.015842	0.003149	0.006255	-0.004596	0.003326	0.002321	-0.056191
N-NH ₃	-0.198376	-0.45039	-0.013007	-0.021762	0.00666	-0.025375	-0.015161	-0.017044	0.011548	-0.010493	-0.014755	0.869184

En la tabla 62 se muestran los resultados de la correlación de las variables originales, y en la figura 22 se han graficado en un par de ejes ortogonales, los datos de dicha tabla. De esta manera, por medio de la posición de éstas dentro del círculo de radio unitario, permite observar que la totalidad de las variables están fuertemente correlacionadas con los componentes, ya que se ubican muy cerca del perímetro.

La generación de la correlación de las estaciones de muestreo originales, se muestran en la tabla 63 (matriz Y), cuya representación gráfica se registra en la figura 23. Por medio de ésta se observa que la totalidad de las estaciones quedaron ubicadas en un solo cuadrante, pero a diferencia del anterior, éste es el inferior derecho.

Por último, al realizar el empalme correspondiente entre ambas gráficas (22 y 23), se determinan las variables que coincidieron en el mismo cuadrante que las estaciones, dando como resultado que son las que están fuertemente correlacionadas con cada una de las estaciones (son las que influyen fuertemente en la calidad del agua), las cuales son: cloruros, bicarbonatos, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, temperatura del agua, sulfatos, fósforo total y nitritos.

Al comparar estos resultados con los de la caracterización del agua para este mismo muestreo (figura 11), se clasificaría de una manera muy similar para todas las estaciones de muestreo: "bicarbonatadas", ya que de acuerdo a Piper, la clasificación está representada como "cálcico-bicarbonatada", y debido a que el calcio no se contempló como variable, entonces queda como "bicarbonatada".

Tabla 62. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes.
(segundo muestreo, agua subterránea)

Variable	Componentes		Variación Total Explicada por los Dos Primeros Componentes (%)
	1°	2°	
Temperatura Ambiente	0.820046	0.572295	99.99
Temperatura del Agua	0.994553	-0.10423	100.00
pH	0.462344	0.886700	99.99
C.E	0.998955	-0.045700	99.99
SDT	0.994553	-0.104231	100.00
HCO ₃ ⁻	0.945586	-0.325369	100.00
Cl ₂	0.994553	-0.104231	100.00
SO ₄ ⁻	0.957993	-0.286786	99.99
N-NO ₃	0.910051	0.414497	100.00
N-NO ₂	0.407009	-0.913423	99.99
P total	0.877261	-0.480013	100.00
N-NH ₃	-0.587544	-0.809191	99.99

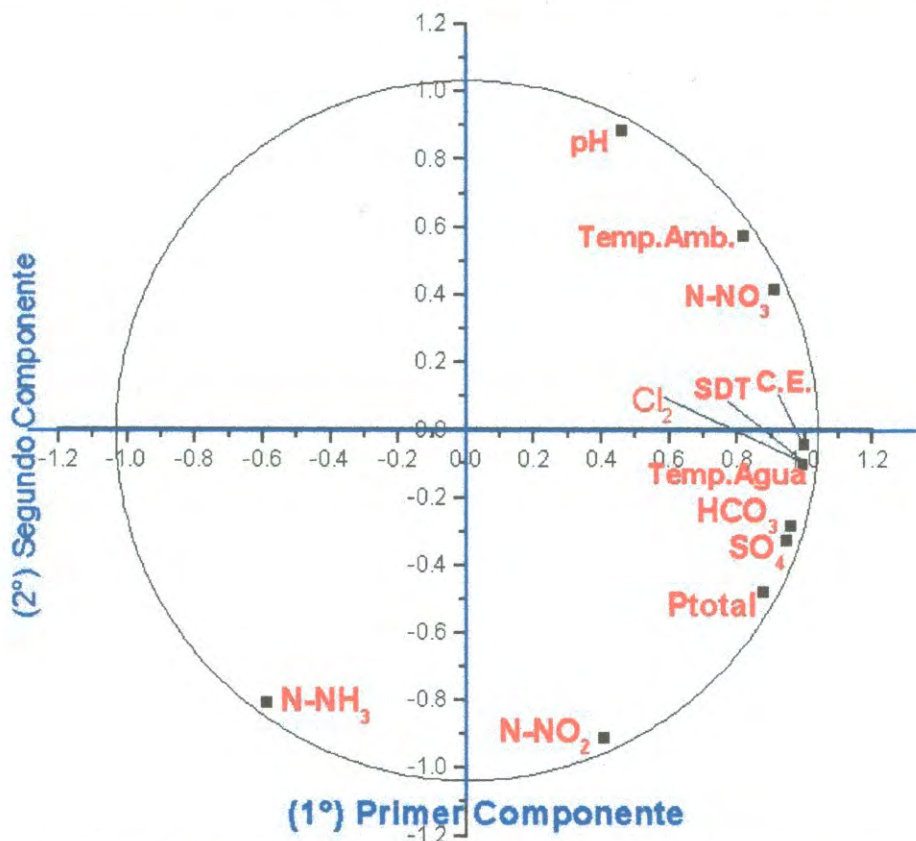


Figura 22. Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor las variables que se cerca del círculo unitario. Parámetros físicos, químicos y nutrientes del agua subterránea (segundo muestreo)

Tabla 63. Correlación de las estaciones de muestreo originales con los dos primeros componentes (segundo muestreo, agua subterránea)

Pozos de Muestreo	Vector Y_1 (del componente 1°)	Vector Y_2 (del componente 2°)
(1) Arizpe	628.6550	-127.7658
(2) Aconchi	819.8457	-165.2925
(3) Ures	622.6068	-116.3780

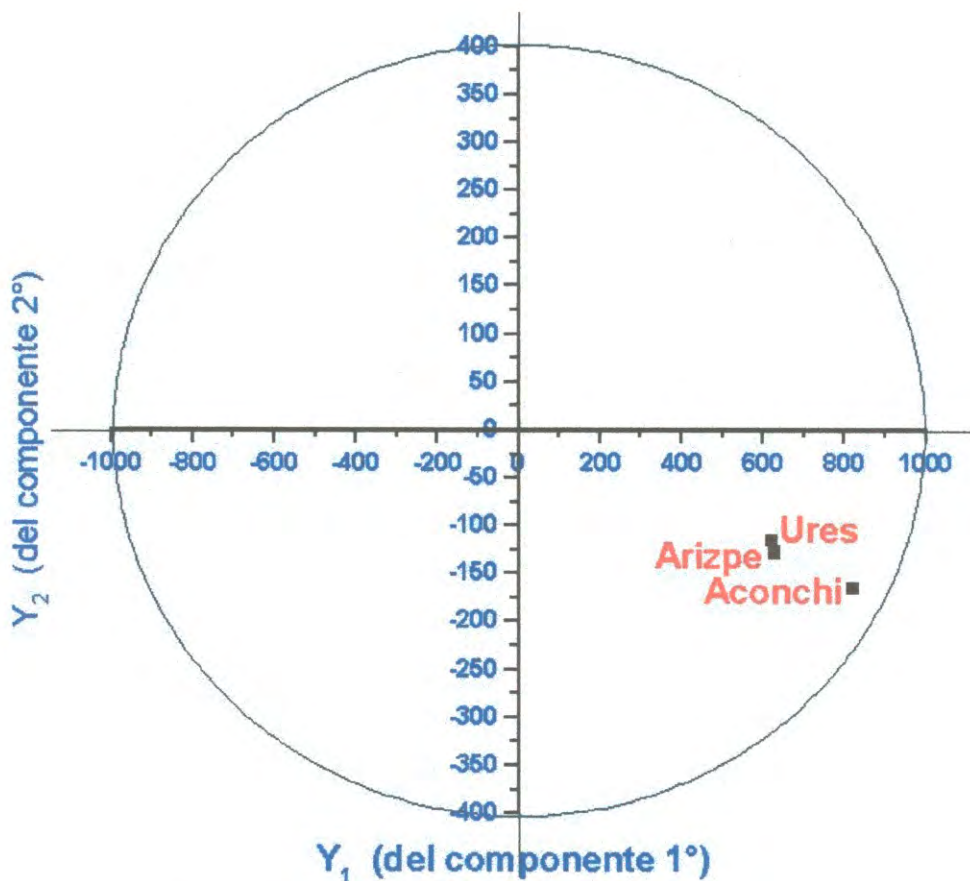


Figura 23. Correlación de las estaciones originales con los dos primeros componentes, los cuales explican mejor la variabilidad del tipo de compuestos que caracterizan a cada estación. Segundo Muestreo del agua subterránea

Análisis comparativo de los resultados de los metales con otros estudios

Como parte del objetivo secundario de esta trabajo, se llevará a cabo una comparación de los resultados que se obtuvieron de los distintos muestreos, con otros estudios realizados en este mismo río, y de preferencia se utilizarán aquellos que coincidan con el mismo tramo de la subcuenca estudiada.

Tal y como se mencionó en los capítulos de antecedentes y revisión bibliográfica de este trabajo, los metales han sido objeto de estudio en los cuerpos de agua de este río, debido a las actividades mineras que se llevan a cabo en el nacimiento de éste, mismo que se ubica en las inmediaciones de la ciudad de Cananea, Sonora.

De los estudios que destacan, se encuentran dos. El primero es un trabajo de Tesis de la Universidad de Sonora, "Estudio de la Contaminación por Metales Pesados en el Río Sonora y su Afluente el Río Bacanuchi", mismo que fue realizado por María Teresa de Jesús Yocupicio Anaya, y Agustín Gómez Alvarez. Esta investigación se realizó de los meses de septiembre de 1984 hasta mayo de 1985, llevándose a cabo un muestreo por mes, tanto de agua superficial como subterránea (pozos), y se determinó la concentración de los siguientes parámetros: cobre, plomo, zinc, hierro y manganeso, así como de sulfatos y potencial de hidrógeno.

La segunda investigación reportada es también es un trabajo de Tesis de la Universidad Autónoma de Nuevo León: "Evaluación de la Calidad Físico-Química y Bacteriológica del Agua de Consumo de Seis Municipios del Río Sonora". La cual se llevó cabo para obtener el título de Químico Bacteriólogo Parasitólogo, por José Guadalupe Tiscareño Alvarado. El período del estudio comprendió desde el mes de octubre de 1990 a agosto de 1991. Dicho estudio se llevó a cabo con periodicidad mensual en tomas domiciliarias de las siguientes poblaciones: Unamichi, Bacoachi, Chinapa, Arizpe, Sinoquipe,

Banámichi, Huépac, Aconchi y Baviácora. De los 27 parámetros que fueron analizados en este estudio, destacan algunos que cobran importancia para efectos comparativos: calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, manganeso, cobre, plomo, cadmio y zinc y nitratos, entre otros.

Dado lo extenso de estos trabajos, se hará solo comparaciones con los muestreos más representativos de cada estudio, y que coincidan tanto en ubicación como en el tipo de parámetros, de tal forma que se tenga el mismo marco de referencia espacial, para que de esta manera, el análisis comparativo quede en función del tiempo.

Resultados de estudios anteriores

Primeramente se mostrarán las tablas de las páginas 94 y 98, del estudio realizado por Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez (1987), mismas que corresponden a las concentraciones mínimas y máximas de metales pesados y sulfatos que se detectaron durante los meses de estudio, en aguas superficiales del río y pozos, respectivamente.

A continuación se expondrán los resultados de la investigación realizada por Tiscareño-Alvarado (1993). Cabe mencionar que la página en la que se muestran estos valores en el estudio citado es la 48.

Por último, se hará un resumen de los valores encontrados en este estudio, de tal forma que las tablas 7, 8, 9 y 10 (agua superficial) reflejen los máximos y mínimos de los cuatros muestreos, y de esta manera se tendrá un marco de referencia similar, y esto mismo se repetirá con las tablas 13 y 14 (agua subterránea).

Concentración de Metales Pesados y de Sulfatos en ppm, en Muestras de Agua de la Zona III

Estación	Cobre		Plomo		Zinc		Hierro		Manganeso		Sulfatos	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
14	nd	0.1	nd	0.1	nd	0.1	nd	1.4	nd	0.1	135	250
15	nd	0.02	nd	0.1	nd	0.1	nd	1.2	nd	0.1	130	215
16	nd	0.02	nd	0.1	nd	0.1	nd	1.0	nd	0.2	125	220
17	nd	0.1	nd	0.2	nd	0.1	nd	1.2	nd	0.4	125	175
18	nd	0.1	nd	0.2	nd	0.03	nd	1.4	nd	0.6	135	230
19	nd	0.2	nd	0.2	nd	0.46	nd	1.4	nd	0.7	135	280
20	nd	0.03	nd	0.1	nd		nd	0.1	nd	0.2	105	215

Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987. Pag. 94.
nd = no detectable

De acuerdo a un plano de este trabajo las estaciones de la tabla tienen las siguientes ubicaciones; 14 = Tetuachi, 15 = Vado Banámichi, 16 = Baviácora, 17 = Ures, 18 = El Gavilán, 18 = Desembocadura del Río Sonora (Presa A. L. R.) y 20 = Centro de la Presa A. L. R.

Concentración de Metales Pesados y de Sulfatos en ppm, en Muestras de Agua de los pozos localizados en los Ríos Sonora y Bacanuchi.

Nombre del Poblado	Cobre		Plomo		Zinc		Hierro		Manganeso		Sulfatos	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Bacanuchi	nd	0.1	nd		nd	0.01	nd	0.1	nd	0.02	50	150
Rancho La Cabellera	nd	0.1	nd		0.02	0.1	nd	1.2	nd		315	600
Rancho La Mexicana	nd	0.1	nd		nd	0.2	nd	0.2	nd	0.02	155	280
Unámichi	nd		nd		nd	0.1	nd	0.1	nd	0.01	410	790
Chinapa	nd		nd		nd	0.1	nd	0.1	nd		70	100
Arizpe	nd		nd		nd		nd	0.2	nd	0.01	115	170
Banámichi	nd		nd		nd	0.4	nd		nd		110	180
Baviácora	nd		nd		nd	0.04	nd	0.1	nd	0.01	330	495
Ures	nd		nd		nd	0.02	nd	0.1	nd		160	800

Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, 1987. Pag. 98.
nd = no detectable

Concentración promedio de los parámetros analizados en mg/l

Puntos de Muestreo	Arizpe	Sinoquipe	Banámichi	Huépac	Aconchi	Baviácora
Parámetro						
SDT	574.4	598.4	492.6	790.1	859.2	971.4
PH	8.13	8.07	8.10	7.90	8.01	8.04
C.E.**	709.4	726.1	650.1	961.4	1071.7	1132.3
Acidez	3.61	4.63	3.71	12.35	8.46	8.95
Alcalinidad	219.8	196.1	188.4	283.9	296.0	253.3
Bicarbonatos	212.0	186.1	180.6	259.1	278.9	235.1
Carbonatos	7.79	10.05	7.71	24.69	17.09	18.19
Dureza Total	326.0	329.1	291.3	434.9	485.5	545.6
Calcio	103.4	104.4	92.3	140.3	155.8	167.6
Magnesio	16.6	16.7	14.8	20.7	23.6	31.0
Cloruros	10.82	7.89	8.73	15.98	21.76	26.39
Sulfatos	146.5	193.7	114.2	226.7	281.5	327.5
Flúor	0.601	0.674	0.639	0.612	0.681	0.670
Nitratos	2.962	1.035	0.938	3.646	2.993	9.410
Sodio	21.7	18.9	23.3	31.5	38.6	28.8
Potasio	6.74	4.02	3.28	4.90	5.97	6.05
Hierro	0.083	0.178	0.080	0.118	0.057	0.091
Manganeso	0.014	0.020	0.010	0.010	0.018	0.025
Arsénico	3.40	2.80	3.40	2.30	3.70	2.20
Cobre	0.218	0.102	0.123	0.093	0.201	0.087
Plomo	0.003	0.013	0.005	0.008	0.026	0.016
Cadmio	0.003	0.003	0.004	0.004	0.010	0.003
Zinc	0.080	0.064	0.126	0.080	0.105	0.072

Tiscareño-Alvarado, 1993. Pag. 48.

** Las unidades de este parámetro son en ($\mu\text{mhos}/\text{cm}^2$)

Tabla 64. Concentraciones máximas y mínimas de metales, correspondientes a los muestreos, tanto de agua superficial como subterránea del Río Sonora.

Estación de Muestreo	Cu		Fe		Mn		Pb		Zn		Cd		Ca		Mg		K		Na			
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
Agua Superficial																						
(1) Arizpe	0.02*	0.03	0.09	4.74	0.02*	0.13	0.07*	0.07	0.01*	0.05	0.01*	0.01	19.0	91.0	17.0	18.5	2.5	5.0	36.3	26.2		
(2) Arizpe	0.02*	0.02	0.04*	3.29	0.04	0.10	0.07*	0.07	0.01*	0.03	0.01*	0.01	19.5	96.8	14.3	19.5	3.0	5.0	27.7	33.0		
(3) Tetuachi	0.02*	0.03	0.16	5.79	0.02*	0.21	0.07*	0.07	0.01*	0.05	0.01*	0.01	19.0	95.0	15.5	19.0	3.5	5.5	29.5	34.5		
(4) Sinoquipe	0.02*	0.05	0.06	9.24	0.02*	0.37	0.07*	0.07	0.01	0.08	0.01*	0.01	19.0	91.8	15.5	19.0	3.0	6.0	28.0	36.3		
(5A) Aconchi	0.02*	0.02	0.10	26.2	0.02*	1.96	0.07*	0.15	0.01	0.27	0.01*	0.01	17.0	106	16.3	30.0	3.5	13.5	27.2	40.0		
(5B) Aconchi **	0.02*	0.02	0.11	28.7	0.02*	1.99	0.07*	0.14	0.01	0.27	0.01*	0.01	15.5	106	15.5	31.5	3.5	13.5	26.7	39.8		
(6) Baviácora	0.02*	0.36	0.13	33.1	0.06	3.03	0.07*	0.24	0.01*	0.41	0.01*	0.01	21.0	128	17.0	41.5	4.0	16.0	34.2	48.5		
(7) Mazocahui	0.02*	0.54	0.04	58.1	0.02*	4.55	0.07*	0.33	0.01	0.58	0.01*	0.01	21.5	145	20.2	50.0	3.5	19.5	36.7	55.8		
(8) Ures	0.02*	2.77	0.06	46.0	0.02*	22.9	0.07*	1.59	0.01	0.22	0.01*	0.01	19.0	460	19.0	257	3.5	78.0	39.3	56.8		
Pozo de Muestreo																						
Agua Subterránea																						
(1) Arizpe	0.02*	0.02*	0.04*	0.04*	0.02*	0.02*	0.07*	0.07*	0.07	0.29	0.01*	0.01*	101	121	22.0	23.0	2.5	23.5	28.5	82.3		
(2) Aconchi	0.02*	0.02*	0.04*	0.04*	0.02*	0.02*	0.07*	0.07*	0.01*	0.02	0.01*	0.01*	120	143	22.0	24.0	3.0	4.5	67.5	73.3		
(3) Ures	0.02*	0.02	0.04*	0.04*	0.02*	0.02	0.07*	0.07*	0.01*	0.01	0.01*	0.01*	83	101	22.0	23.0	4.5	4.5	42.5	44.3		
NORMATIVIDAD																						
NOM-127-SSA1-1994	2.0 ¹		0.3 ¹		0.15 ¹		0.025 ¹		5.0 ¹		0.005 ¹								200.0 ¹			
NOM-001-ECOL-1996	4.0 ¹ ; 6.0 ²						0.2 ¹ ; 0.5 ²		10 ¹ ; 2 ²		0.1 ¹ ; 0.2 ²											
CE-CCA-001/89	1.0 ¹ ; 0.2 ²		5.0 ²		0.1 ¹		0.5 ¹ ; 5.0 ²		5 ¹ ; 2 ²		0.01 ¹ ; 2 ²											

** Muestra Duplicada; (1) Para fuente de abastecimiento de agua potable; (2) Para uso de riego agrícola.

* El dato reportado corresponde al límite de detección, ya que no hubo detección en la lectura de muestras (ND = No Detectable)

Resultados de las comparaciones

Las tablas anteriores sintetizan los resultados de las concentraciones de metales de los muestreos llevados a cabo durante los siguientes períodos: 1984-1985, 1990-1991 y 1999-2000, en el tramo del río comprendido entre Arizpe y Ures. En el primero y último se contemplaron cuerpos de agua superficial y subterránea, mientras que el segundo sólo se monitoreó el agua subterránea, vía tomas domiciliarias.

Si se analizan estos muestreos de acuerdo a las normas, que se exhiben en la tabla 64, tanto para consumo humano como para riego, se puede concluir que en términos generales, los promedios de las concentraciones en la mayoría de los parámetros no ofrecen un riesgo significativo para la salud humana, y por consiguiente al medio ambiente. Sin embargo, al llevar a cabo una inspección de los resultados puntuales, como los del primer muestreo de este estudio, se puede apreciar que las concentraciones del cobre, hierro y manganeso exceden por mucho las normas, para consumo humano, e incluso para riego. El plomo también se encuentra excedido, pero en menor escala, sin embargo en algunas estaciones se encontraron altas concentraciones que pueden generar problemas.

No obstante, estas observaciones no se aplican en el caso de los parámetros plomo y cadmio, ya que al comparar los límites de detección de éstos con los valores máximos permisibles de la norma NOM-127-SSA1-1994, resultaron ser mayores los primeros, por lo no es posible aseverar si existe riesgo a la salud humana.

Por otro lado, los parámetros que sí sufrieron un incremento a lo largo de estos períodos son el hierro y el manganeso principalmente, y en menor escala el sodio y el zinc. En el resto de los parámetros se observa un comportamiento muy similar en todos estos muestreos de los tres estudios.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, y al análisis realizado bajo tres perspectivas diferentes: normatividad, caracterización de las aguas y manejo estadístico, teniendo en cuenta en todo momento los objetivos generales, secundarios y específicos, se concluye lo siguiente:

- ❖ Considerando la normatividad vigente:
 - ◆ Parámetros Físicoquímicos (agua superficial y subterránea):
 - En los resultados del primer muestreo del agua superficial (3 de septiembre de 1999), se encontró que algunos parámetros como fósforo total, cobre, hierro, manganeso, y plomo, excedieron significativamente los valores máximos permisibles por las normas, tanto para consumo humano como para riego, y éstos se encontraron en su mayoría en las estaciones que se encuentran a la salida de la subcuenca: Baviácora, Mazocahui, y Ures principalmente.
 - Durante el muestreo realizado el 29 de octubre de 1999 en el agua superficial, se observaron valores altos del cobre en las estaciones de Tetuachi, Sinoquipe, Aconchi y Mazocahui, los cuales rebasaron los valores recomendados por la NOM-127-SSA1-1994 para fuente de abastecimiento de agua potable. Así mismo, se detectaron concentraciones ligeramente superiores de sólidos disueltos totales, a los límites máximos recomendados en los Criterios de Calidad de Agua para fuente de abastecimiento de agua potable, en las estaciones de Aconchi, Baviácora y Mazocahui.

- En los muestreos realizados los días 4 de febrero del 2000 y 28 de abril del 2000 en el agua superficial y subterránea, solamente en los sólidos disueltos totales se encontraron valores que exceden ligeramente los máximos permisibles recomendados en los Criterios de Calidad de Agua para fuente de abastecimiento de agua potable, en los puntos de muestreo del agua superficial: Mazocahui y Ures (4 de febrero del 2000) así como en Baviácora. Mazocahui y Ures (28 de abril del 2000), y en los pozos ubicados en Arizpe y Aconchi (4 de febrero del 2000).
 - Considerando el valor máximo permisible de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 para fuente de abastecimiento de agua potable no se puede aseverar que no existe riesgo para la salud por plomo y cadmio, debido a las concentraciones no detectadas en las lecturas por medio de absorción atómica, ya que los límites de detección de éstos son superiores a los de la norma.
 - Se observaron concentraciones por encima del límite de detección del sodio en el blanco de viaje durante el cuarto muestreo, así como del calcio en el primero y segundo muestreos. Así mismo se detectaron en el blanco de campo concentraciones de igual y ligeramente superior magnitud al límite de detección para cobre y magnesio respectivamente, ambos durante el primer muestreo.
- ◆ Nutrientes (agua superficial y subterránea):
- Considerando los valores máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 y los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua para fuente de abastecimiento de agua potable, se observaron concentraciones altas de nitrógeno amoniacal y fósforo total (como fosfatos) respectivamente, durante el primer muestreo del agua superficial en el punto ubicado en Ures.

- Se observó que los valores encontrados en los blancos de campo y viaje, excedieron las concentraciones reportadas en las muestras del nitrógeno amoniacal, lo cual es un indicador de una probable contaminación de éstas, cuyas causas pudieran ser: el agua deionizada utilizada, las impurezas contenidas en los reactivos, el uso de material contaminado (recipientes, pipetas, vasos precipitados, entre otros). Sin embargo, a pesar de esta anomalía, no se afectó el cumplimiento de los objetivos de este trabajo.
- Los valores de nitratos (como nitrógeno) más altos se observaron en las muestras del pozo que abastece al poblado de Aconchi, sin embargo éstos no exceden el valor máximo permisible de las normas para fuente de abastecimiento de agua potable.

❖ Considerando el análisis estadístico:

◆ Primer muestreo del agua superficial

- Las variables que influyen fuertemente en la calidad del agua en la totalidad de las estaciones de muestreo son conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, y en menor proporción se tienen el oxígeno disuelto y los sulfatos. El resto de las variables no tienen incidencia sobre la calidad del agua entre las estaciones de muestreo.

◆ Segundo muestreo del agua superficial

- Se observó que las únicas variables que influyen fuertemente en la calidad entre las estaciones de muestreo son los bicarbonatos, y en menor proporción los sulfatos, nitratos (como nitrógeno) y fósforo total, así mismo, el oxígeno disuelto y los sulfatos podrían tener una ligera influencia.

◆ Tercer muestreo del agua superficial

- Para este muestreo se determinó que las variables que tienen una fuerte influencia en la calidad de agua entre las estaciones de muestreo (en otras palabras son las que tienen una diferencia significativa con respecto a las otras variables en la totalidad de las estaciones de muestreo) son bicarbonatos y nitratos (como nitrógeno), mientras que los nitritos (como nitrógeno), podrían tener una menor diferencia significativa.

◆ Cuarto muestreo del agua superficial

- Las variables observadas que tienen diferencia significativa en todos los puntos de muestreo son los sólidos disueltos totales, y las que influyen en menor proporción en la calidad del agua son: conductividad eléctrica, bicarbonatos y nitratos (como nitrógeno).

◆ Primer muestreo del agua subterránea

- Las variables que tienen un impacto significativo en todos los pozos de muestreo son: nitratos (como nitrógeno), conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, bicarbonatos y cloruros.

◆ Segundo muestreo del agua subterránea

- De los resultados se observa que las variables que tienen una fuerte influencia sobre la calidad del agua subterránea en la totalidad de los pozos son nitritos (como nitrógeno), fósforo total (como fosfatos), sulfatos, bicarbonatos y temperatura del agua.

◆ Nitrógeno de Nitratos y Nitrógeno de Nitritos

- Las diferencias significativas en las concentraciones de los nitratos y nitritos en la zona se deben principalmente a la agricultura, y en menor escala a la ganadería. Sin embargo existen otras fuentes como las granjas porcícolas, que aunque tienen sus propias lagunas de desechos, no se encuentran debidamente diseñadas y una parte se infiltra al subsuelo, generando así incremento en las concentraciones de nutrientes.

❖ Considerando la caracterización de las aguas:

◆ Agua superficial y subterránea

- En épocas de escasa precipitación (estiaje) el agua superficial y subterránea suelen tener muchas similitudes en cuanto a sus características físicoquímicas, ya que a lo largo del cauce del Río Sonora, se encuentran tramos en los que no se aprecia escorrentía sin embargo, tanto aguas arriba como debajo de estos lechos secos, posible observar cuerpos de agua en movimiento. Por lo tanto lo que en realidad se monitorea en los muestreos es una agua subsuperficial, lo cual es un reflejo al comparar el tercer muestreo de agua superficial contra el primer muestreo del agua subterránea.

- En épocas de abundante precipitación sucede lo contrario, ya que primeramente éstas cubren la deficiencia de humedad del suelo (generando con esto que los acuíferos se recarguen, y que a su vez también reciban a los contaminantes más lixiviables), y una vez que se alcanza una saturación completa (en hidrología se denomina a esta condición; humedad de antecedente III), el excedente de estas lluvias genera mayormente escorrentía superficial, provocando de esta manera poca interacción entre ambos cuerpos de agua, lo cual es un reflejo del primer muestreo del agua superficial.

Recomendaciones

- Establecer un programa de muestreo sistemático en agua subterránea (pozos que abastecen a poblados para consumo humano), en las zonas que tienen un alto índice de actividades porcícolas (especialmente en Huépac, Aconchi y La Estancia), así como ganaderas (especialmente en Banámichi y Ures).
- En el caso del cadmio y plomo, se recomienda utilizar metodologías de análisis cuyos límites de detección sean menores a los de absorción atómica, de tal forma que se puedan detectar concentraciones menores que los valores máximos permisibles establecidos por normas y criterios de calidad de agua. De igual forma se propone llevar a cabo una investigación para determinar la calidad del agua para consumo humano en las zonas que resultaron con concentraciones más altas, y utilizando métodos con límites de detección menores a las normas.
- Se propone una reducción de los fertilizantes nitrogenados, a través de programas generados por las instancias correspondientes. Actualmente la SAGAR cuenta con un programa que propone a los agricultores del Río Sonora (Distrito 142) utilizar fertilizantes en una proporción de 150/60 (150 kg. de nitrogenados y 60 de fósforo total), debido a la poca movilidad de este último. Se recomienda llevar a cabo estudios en el sedimento de estos sitios para conocer el grado de saturación del suelo debido a estos compuestos, y definir si presentan riesgos de impacto ambiental.
- Existen algunos procesos que eliminan los nitratos tales como; ósmosis inversa, intercambio iónico, desnitrificación biológica y destilación, los cuales se podrían utilizar en los poblados ya sea en el ámbito municipal, o a nivel doméstico (como equipos comerciales muy sencillos y poco costosos de destilación).

- Como método de remediación y con el fin de minimizar la lixiviación de excedentes de nitrato de amonio al subsuelo, se recomienda la siembra alrededor de: campos de cultivos, lagunas de oxidación, lagunas de desechos de granjas porcícolas y ranchos ganaderos, de algunas plantas que tienen la característica de absorber los nitratos, tales como: caña de azúcar y alazor (azafrán, cártamo).

- Se recomienda a instancias estatales y municipales, hacer una revisión del funcionamiento actual de las lagunas de oxidación de los poblados asentados en las márgenes del Río Sonora, ya que en los diferentes recorridos se pudo observar un deterioro en la mayoría de ellas, ocasionando vertidos esporádicos hacia los lechos de los tributarios de este río. Además se propone la realización de un estudio sistemático de la calidad de los cuerpos de agua, en las inmediaciones de estos sitios para determinar el impacto sobre éstos. De igual forma se propone un estudio hidrológico con el objetivo de determinar los mecanismos que se dan en la movilización de los contaminantes hacia los mantos acuíferos y ríos.

BIBLIOGRAFÍA

- ADEQ and AWRRC (Arizona Department of Environmental Quality and Arizona Water Resources Research Center), 1995. Field Manual for Water Quality Sampling. The University of Arizona. Tucson, Az. 57 pp.
- Albert, L. A. 1990. Curso Básico de Toxicología ambiental: Capítulo I. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud; Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud. Editorial Limusa. Páginas 101-185.
- Aparicio-Montes, M. F. J. 1989. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México. Páginas 209-235.
- Band, L. E. 1986. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models. Water Resources Research. 22(1): 15-24.
- Burges, S. J. 1986. Trends and Directions in Hidrology. Water Resources Research. Volume 22(9): 1-5.
- Burgos-Flores, D. 1988. Simulación Hidrológica del Río Mayo, del Estado de Sonora, México. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora.
- Burgos-Flores, D. 1995. Hacia un nuevo método racional. Reporte interno de la Academia de Hidráulica. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora.
- Burgos-Flores, D. 1998. Estimación del tránsito de contaminantes en la cuenca del Río San Pedro, Estado de Sonora, México. Reporte interno de la Academia de Hidráulica. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora.

- Burnett, R.D. and Frind, E.O. 1987. Simulation of Contaminant Transport in Three Dimensions. 2 Dimensionality Effects. *Water Resources Research*. 23(4): 695-705.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1993. Manual de Aseguramiento de Calidad. Subdirección General de Administración, Reuso del Agua e Impacto Ambiental. Programa de Aseguramiento de la Calidad. México, D.F.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1995. Manual de Métodos de Análisis. Subdirección General Técnica. Gerencia de Saneamiento y Calidad de Agua. Subgerencia de Laboratorios y Monitoreo. México, D.F.
- Colín, F. B. 1980. Quelación de Metales: Principios y Aplicaciones. Serie Oxford de Química. Editorial El Manual Moderno, S.A., México. páginas 1-38 y 139-166.
- Connell, W.D. and Miller, J.G. 1984. *Chemistry and Ecotoxicology of Pollution*. John Willey & Sons, New York.
- Davis, S.N. and De Wiest, R. 1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel. Barcelona. 2:45, 2:55, 4:57.
- Ditmars, J. D.; Adams, E. E.; Bedford, K. W. y Ford, D. E. 1987. Performance Evaluation of Surface Water Transport and Dispersion Models. *Journal of Hydraulic Engineering: American Society of Civil Engineers*. Pages 961-980.
- Dix, H. M. 1981. *Environmental pollution: Atmosphere, Land, Water and Noise*. John Wiley & Sons, Inc. New York. U.S.A. 288 páginas.

- Eckhoff, J.L.A., 1997. Nitrates in Soil and Ground Water Under Irrigated Crops. Eastern Agricultural Research Center, Sidney, MT. Montana State University. Fertilizer Facts: January 1997, number 9.
- Elder, F.J. 1988. Metal biogeochemistry in surface-water systems. A review of principles and concepts. U.S. Geological Survey Circular 1°13. U.S.A. 3p.
- EPA. Environmental Protection Agency. 1976. Quality Criteria for Water. U.S. Environmental Protection Agency Washington, U.S.A, 258p.
- EPA. Environmental Protection Agency. 1983. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Report No. EPA-600/4-79-020. U.S.A.
- EPA. Environmental Protection Agency. 1992. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846), 3rd Edition. Final Update 1992.
- Förestner, U. 1979. Metal transfer between solid and aqueous phases. In: U. Förestner U. and G. T. Wittman (Ed.), Metal Pollution in the Aquatic Environment Springer. Verlag, Berlin 197-270 p.
- Förestner U. and Müller G. 1973. Heavy Metal Accumulation in River Sediments: A Response to Environment Pollution. Geoforum. 14: 53-61.
- Förestner U. y Salomons. 1980. Trace metal analysis on polluted sediments. Part I: Assessment of Sources and Intensities. Environmental Technology Letters, Vol 1, page 494.
- Freeze, A. R. y Cherry, J. A. 1979. Groundwater, Prentice Hall. Página 144.

- Franco-Martinez M.R. 1995. Evaluación de la Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (Lagunas de Oxidación). Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora.
- Gibbs, R.J. 1977. Transport Phase of Transition Metal in the Amazon and Yucon Rivers. Geological Society of American Bulletin, Vol. 88: 829-843.
- Gómez-Alvarez, A. 1993. Introducción al Estudio de Metales Pesados y sus Sales en el Medio Ambiente Acuático. Artículo de difusión interno. Departamento de Química y Metalurgia. Universidad de Sonora.
- Gorrell, H. A., 1958. Classification of formation waters based on sodium chloride content. Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., v. 42, pp. 2513.
- Hem, D.J., 1992. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Geological Water-Supply Paper, 2254. U.S.A.
- Hjalmarson, H. W. 1987. Large Basin Deterministic Hydrology: A Case Study. Journal of Hydraulic Engineering: American Society of Civil Engineers. 113(11): 1461-1465.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1990. Resultados definitivos tabulados básicos. XI Censo General de Población y Vivienda. Tomo I y II. México, D.F..
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1998. Cartas Topográficas, Aguas Subterráneas y Usos del suelo y vegetación; H12-5, H12-6 y H12-8. Escala 1:250,000. México, D.F.

- Jodakov, Y.V.; Epshteín, P.A. y Gloriózov, P.A. 1986. Química: Inorgánica. Segunda Parte. Editorial Mir, Moscú. Páginas 110-115.
- Kendall, M. G., 1980. Multivariate analysis. Griffin, Londres. 2ª ed., 210 págs.
- Kolthoff, I.M., Elving, P.J. and Strass, F.H., 1984. Treatrise on analytical chemistry. Part III Analytical chemistry in industry. Ed. Wiley. Interscience.
- Kulatilake, P.H.; Gomez-Alvarez, A.; Villalba-Atondo, A.I.; Burgos-Flores, D. y Sortillón-Valenzuela M.R. Investigación de la Calidad del agua en la Cuenca Hidrológica del Río San Pedro, Sonora, México. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. Informe Académico Final. Hermosillo, Sonora, México.
- Linsley, R. K. 1986. Flood Estimates: How Good Are They?. Water Resources Research. 22(9): 159-164.
- Linsley, R. K. Jr.; Kohler, M. A. y Paulhus, J.L.H. 1984. Hidrología para Ingenieros. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. (3): 203 y 346.
- Meza-López, M. 1994. Estimación de Escurrimientos en la Cuenca del Río San Pedro, Sonora, México. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora.
- Moore, J. W. y Ramamoorthy S. 1984. Heavy Metals in Natural Waters: Applied Monitoring and Impact Assessment. Ed. Springer-Verlag, New York. U.S.A. Páginas 5, 78, 101, 125, y 205-206.
- Nakamura, S., 1997. Análisis Numérico y Visualización Gráfica con MatLab. Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A. México. 3: 94 –105.

- Nieboer, E and Richardson, D.H.S., 1980. The replacement of the nondescript term "Heavy Metals" by a biologically and chemically significant classification of metal ion, *Environ. Pollut. Serv. B* 1, 3.
- O.S.P. 1989. Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana. Año 6, Vol. 106, No.1.
- Pacheco-Ávila. J. G., 1999. Nitratos en Agua Subterránea. *Ciencia y Desarrollo*; Artículo de divulgación. VOL XVII, NÚM. 102. Enero/Febrero 1999. Págs. 99-104.
- Pacheco-Ávila. J. G.; Sauri-Riancho. M. R. y Cabrera-Sansores, A. 1997. Impacto de la porcicultura en el medio ambiente. Artículo de Divulgación. *Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*. 1(3): 53-59.
- Pérez-Tello, M.G. 1991. Evaluación Experimental de Diferentes Metodología para Cuantificación de Metales Pesados en Agua y Sedimento Estuarinos. Tesis de Licenciatura. Departamento de Química e Ingeniería Química. Instituto Tecnológico sé Sonora. Cd. Obregón, Sonora. Páginas 3-15.
- Péres, J.M. 1980. La polución de las aguas marinas. Ediciones Omega. España. Páginas 25-28.
- Pia, L. E. 1986. Análisis Multivariado: Método de Componentes Principales. Departamento de Producción Vegetal. Área de Ciencias del Agro y del Mar. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Coro, Faicón, Venezuela. Boletín preparado para la Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington, D.C.

- Rainwater, K.A. 1988. Cation Exchange in Groundwater Solute Transport. *Journal of Hydraulics Engineering: American Society of Civil Engineers.* 114(2): 173-191.
- Remenieras, G. 1974. *Tratado de hidrología aplicada.* Editores técnicos asociados. Barcelona, España. 3: 181, 10: 513.
- San Martín, H. 1975. *Salud y Enfermedad.* Tercera Edición. Editorial Fournier, S.A. México, D.F. página 56.
- Sántos-Vázquez. S. del C. y Ramírez-Herrera. J. G. 1997. Contenido de nitratos de los pozos de agua para consumo humano en Santa Gertrudis Copó. Artículo de Divulgación. *Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.* 1(3): 53-59.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicado en el Diario Oficial de la Federación, el día 6 de enero de 1997. México, D.F. págs. 68-66.
- Secretaría de Salud (SS), 1988. *Manual de Técnicas y Procedimientos de Laboratorio de Agua Potable, Series: Manuales Técnicos.* México, D.F., págs. 7-20
- Secretaría de Salud, 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. "Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que se debe someterse el agua para su potabilización". Secretaría de Salud, México, D.F. p. 1-6.

- S.E.D.U.E. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1988. Control de la contaminación de agua. Subsecretaría de Ecología. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. México, D.F. 366 páginas.
- Siegel, S. 1990. Estadística no Paramétrica: Aplicada a las ciencias de la conducta. Editorial Trillas, México, D.F. páginas; 52-55 y 215-217.
- Sortillón-Valenzuela, M. R. 1987. Construcción de un Modelo de Simulación para la Cuenca de la Presa Abelardo L. Rodríguez. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora.
- Stoker, S. H. y Seager, S. L. 1981. Química Ambiental: Contaminación del aire y del agua. Editorial Blume, Barcelona. Páginas 259-299.
- Tiburcio-Munive, G. 1999. Entendiendo los Sistemas ORP: Optimice las reacciones midiendo el potencial redox. Notas de clase del curso de Química Ambiental del Posgrado en Ingeniería Ambiental. Departamento de Química y Metalurgia. Universidad de Sonora.
- Tiscareño-Alvarado, J. G. 1993. Evaluación de la Calidad Fisicoquímica y Bacteriológica del Agua de Consumo de seis Municipios del Río, Sonora. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Varela-Romero, A. 1992. Prospección de peces nativos en la Cuenca del Río San Pedro, Sonora. Centro Ecológico de Sonora, Area de Ecología Acuática. Hermosillo, Sonora.
- Yocupicio-Anaya y Gómez-Alvarez, A. 1987. Estudio de la Contaminación por Metales Pesados en el Río Sonora y su Afluente el Río Bacanuchi. Tesis de Licenciatura. Depto. de Ciencias Químico-Biológicas. Universidad de Sonora, Sonora, México.

ANEXO A

Bitácora fotográfica de los muestreos

Agua Superficial de la Estación 1 (Arizpe; aguas arriba del poblado)



Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)



Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)

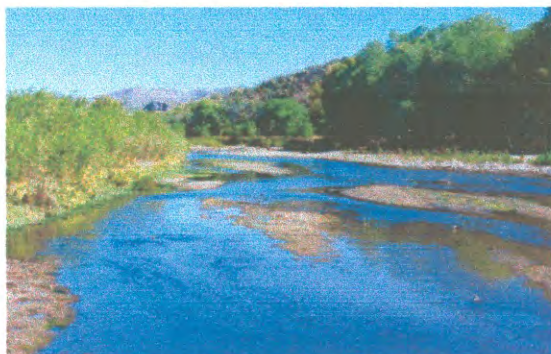


Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

Agua Superficial de la Estación 2 (Arizpe; aguas abajo del poblado)



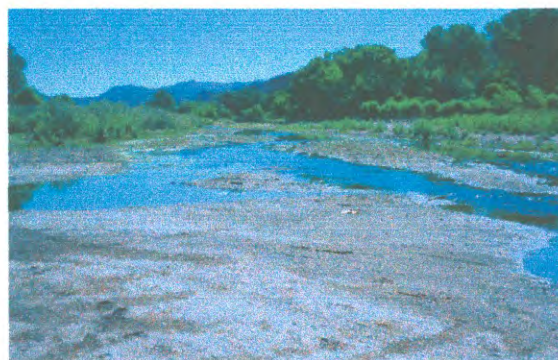
Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)



Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)



Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

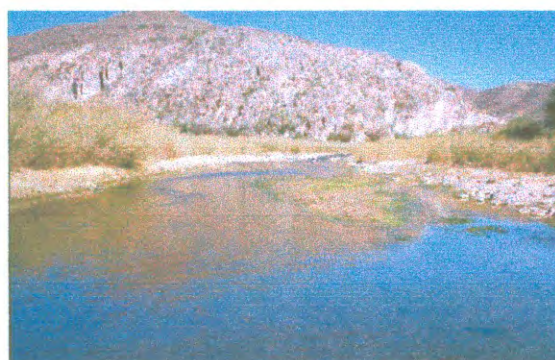
Agua Superficial de la Estación 3 (Tetuachi)



Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)

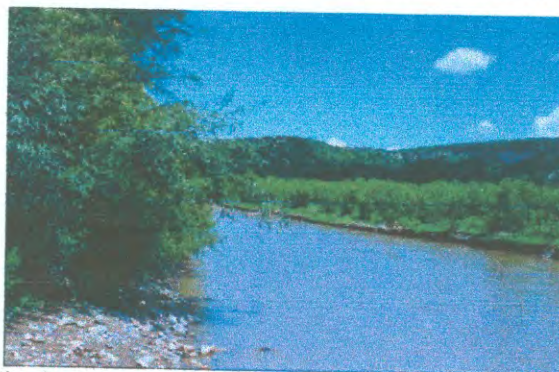


Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)



Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

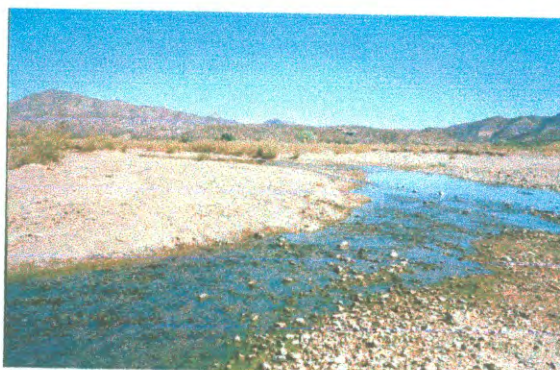
Agua Superficial de la Estación 4 (Sinoquipe)



Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)

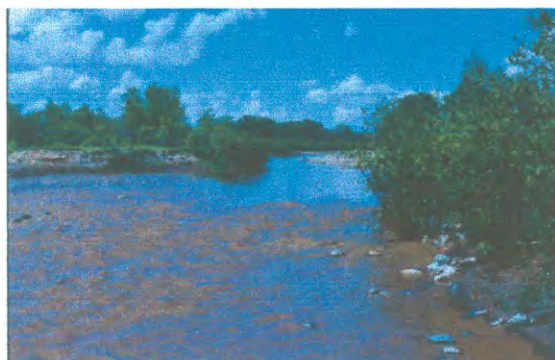


Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)



Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

Agua Superficial de la Estación 5 (Aconchi)



Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)

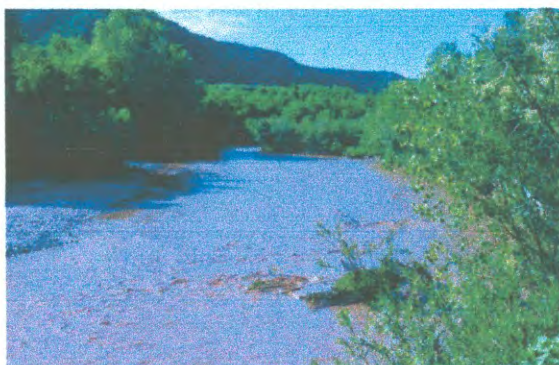


Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)



Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

Agua Superficial de la Estación 6 (Baviácora)



Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)

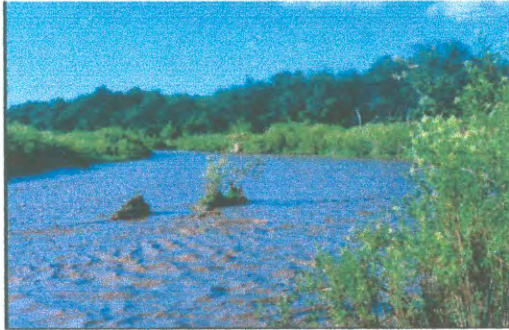


Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)



Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

Agua Superficial de la Estación 7 (Mazocahui)



Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)

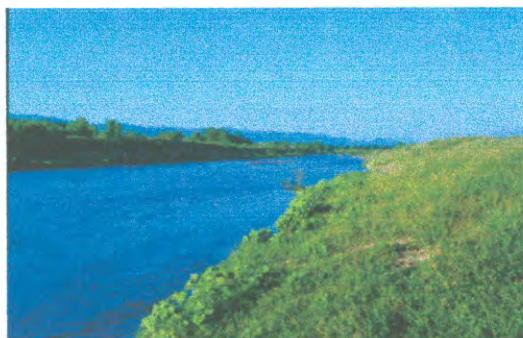


Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)

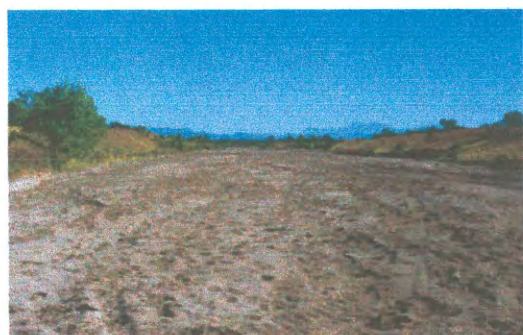


Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

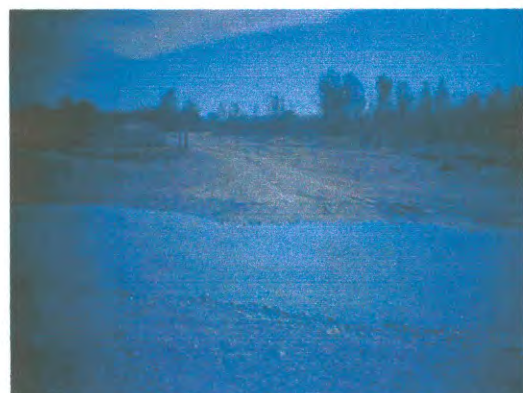
Agua Superficial de la Estación 8 (Ures)



Condiciones del sitio durante el primer muestreo; verano (3 de septiembre de 1999)



Condiciones del sitio durante el segundo muestreo; otoño (29 de octubre de 1999)



Condiciones del sitio durante el tercer muestreo; invierno (4 de febrero del 2000)



Condiciones del sitio durante el cuarto muestreo; primavera (28 de abril del 2000)

Agua Subterránea; Imágenes del Pozo 1; Arizpe (propiedad privada)

Primer muestreo: 4 febrero del 2000 (invierno)
 Segundo muestreo: 28 de abril del 2000 (primavera)



Fotografía de la izquierda: Panorámica general de la entrada hacia la casa habitación, obsérvese el motor y cabezal del pozo en la margen derecha de la foto. Este pozo fue el que se utilizó para recolectar las muestras, mientras que la fotografía de la derecha, es un acercamiento hacia la descarga de donde se obtuvieron las muestras (llave de jardín).



Fotografía izquierda: se continúa con el acercamiento hacia el punto de descarga, mientras que en la fotografía de la derecha, se observa la llave de jardín de donde se tomaron las muestras. La conducción que suministra agua a esta llave, viene directamente del pozo.



En la fotografía de la izquierda se muestra las condiciones generales del pozo, y en la foto del lado derecho, se aprecia la profundidad del espejo del agua, aproximadamente 6 metros. El agua de este pozo se utiliza para consumo humano de los habitantes de esta propiedad, así como para riego agrícola y hortalizas (en menor escala).

Agua Subterránea; Imágenes del Pozo 2; Aconchi (propiedad del municipio)

Primer muestreo: 4 febrero del 2000 (invierno)
 Segundo muestreo: 28 de abril del 2000 (primavera)



Fotografía de la izquierda: Panorámica general de la caseta de bombeo, operada por personal del organismo operador, mientras que la fotografía de la derecha, es una Panorámica de los alrededores del pozo, el cual está situado en medio de campos agrícolas.



En esta fotografía se muestra un acercamiento de la tubería que conduce el agua hacia el poblado de Aconchi.



En la fotografía de se observa una llave de jardín, de la cual se tomaron las muestras. A pesar que la caseta cuenta con equipo de cloración, este se encontraba fuera de funcionamiento; es decir, el agua se suministra a la red sin tratamiento.

Agua Subterránea; Imágenes del Pozo 3; Ures (propiedad del municipio)

Primer muestreo: 4 febrero del 2000 (invierno)

Segundo muestreo: 28 de abril del 2000 (primavera)



Fotografía de la izquierda: panorámica del pozo vista desde la calle, al cual se llega mediante una vereda. La orientación de la tubería de conducción es hacia el poblado de Ures. La fotografía de la derecha es un acercamiento del pozo, en la cual se pueden observar las características de la instalación. En ningún momento se aprecia tratamiento alguno de desinfección.



Fotografía izquierda: se continúa con el acercamiento del pozo con orientación hacia el punto de descarga, mientras que en la fotografía derecha se observa la tubería de conducción. Por medio de una fuga en ésta se obtuvieron las muestras.

En la fotografía se alcanza a observar dicha fuga (casi en el centro de la foto).



En la fotografía de la izquierda se muestra una panorámica de la tubería de conducción hacia el poblado. En la foto del lado derecho se aprecian las parcelas de cultivos que se encuentran ubicadas en la margen derecha de la tubería de conducción. El agua de este pozo se utiliza exclusivamente para consumo humano de los habitantes del poblado.

Imágenes de las muestras recolectadas en sus respectivos recipientes

Primer muestreo del agua superficial: 3 de septiembre de 1999 (verano)

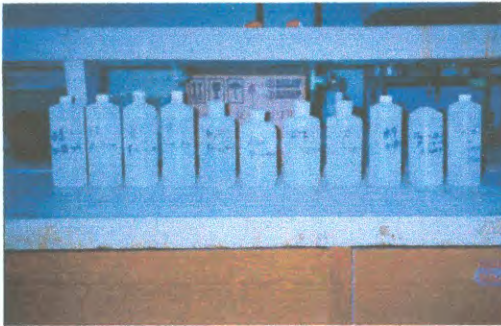
Segundo muestreo del agua superficial: 29 de octubre de 1999 (otoño)

Tercer muestreo del agua superficial y primero del agua subterránea: 4 de febrero del 2000 (invierno)

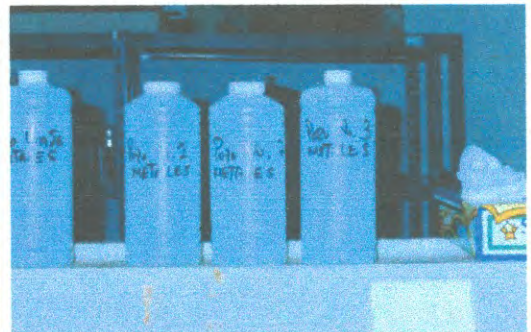
Cuarto muestreo del agua superficial y segundo del agua subterránea: 28 de abril del 2000 (primavera)



Fotografía de la izquierda: muestras recolectadas en el primer muestreo del agua superficial (éstas son sólo una parte, ya que se tomaron por triplicado en cada punto de muestreo; para analizar físico-químicos, metales y nutrientes). Obsérvese el contraste de la turbiedad entre los primeros cuatro puntos contra los últimos. La foto de la derecha corresponde a las muestras del segundo muestreo, nótese en este caso que todas presentan una característica cristalina en todos los puntos, y compárese esta particularidad entre ambos muestreos.



En la fotografía de la izquierda se expone una parte de las muestras del tercer muestreo del agua superficial, en las cuales no se aprecia turbiedad a simple vista, en ninguno de las estaciones; es un agua casi transparente. Lo mismo sucede con las muestras del cuarto muestreo del agua superficial; foto de la derecha.



En las fotografías tanto de la izquierda como derecha se observan las muestras del agua subterránea del primer y segundo muestreo respectivamente. En ésta se aprecia a simple vista que el agua no presenta turbiedad. Todas estas fotografías se tomaron previo al análisis de los parámetros físico-químicos, en las Instalaciones del DICTUS.