

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

DIRECTOR: *GUSTAVO TOLSON-JONES*

BOLETÍN 112

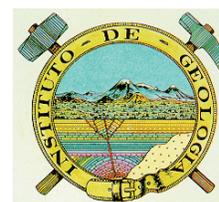
**MONITOREO DE CONTAMINANTES EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS
GUANAJUATO, SAN JUAN DE OTATES Y TURBIO Y SU
IMPACTO EN EL RÍO LERMA, ESTADO DE
GUANAJUATO, MÉXICO**

Por

*GILBERTO HERNÁNDEZ-SILVA¹,
JOSÉ GREGORIO SOLORIO-MUNGUÍA¹,
MIREYA MAPLES-VERMEERSCH¹,
LUIS VASSALLO-MORALES¹,
LOURDES FLORES-DELGADILLO²,
DANIEL HERNÁNDEZ-SANTIAGO²,
SARA SOLÍS-VALDEZ¹,
MARÍA ESTHER HERNÁNDEZ-ANGUIANO¹
Y JORGE RENÉ ALCALÁ-MARTÍNEZ²*

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México

²Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México



México, D.F.

2005

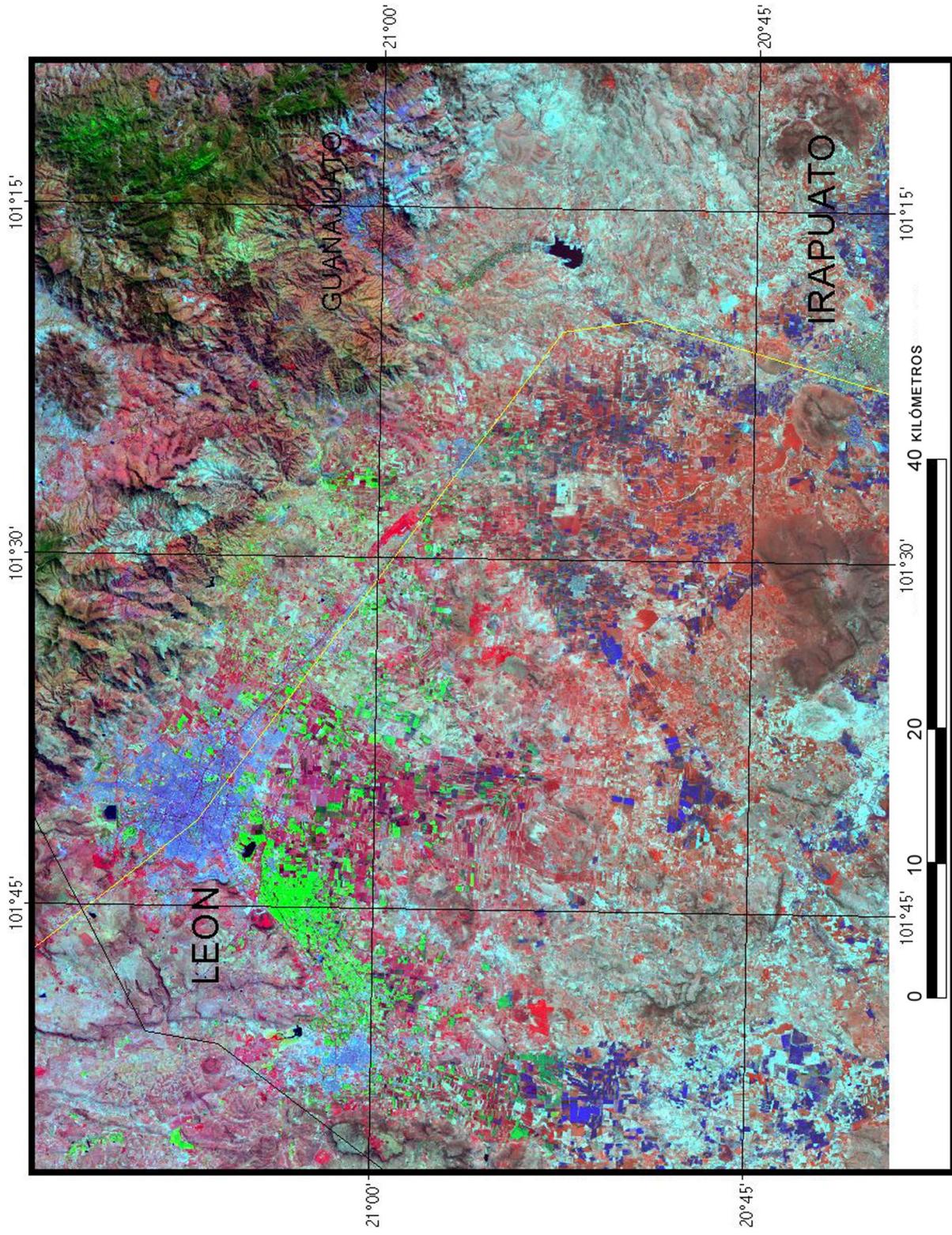


Imagen LANDSAT en falso color en la que queda comprendida el área de estudio. Convencionalmente, la vegetación se muestra en tonos de rojo, correspondiendo el más brillante a la vegetación intensa y los más tenues a la vegetación escasa. Los terrenos de cultivo tienen un color verde o café, dependiendo de la presencia o ausencia de los cultivos y de la intensidad de la humedad. Los cuerpos de agua tienen un color celeste cuando son profundos y azul cuando son someros. Las áreas urbanas tienen un color azul grisáceo.

Estudio financiado por el:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Proyecto con número de clave 400 324-5-1898 N

DR©2005 Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, D. F.

Impreso y hecho en México

ISSN 0185-5530

Hernández-Silva, Gilberto; Solorio-Munguía, J.G.; Maples-Vermeersch, Mireya; Vassallo-Morales, Luis; Flores-Delgadillo, Lourdes; Hernández-Santiago, Daniel; Solís-Valdez, Sara; Hernández-Anguiano, M.E.; y Alcalá-Martínez, J.R., 2005, Monitoreo de contaminantes en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio y su impacto en el río Lerma, Guanajuato, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 112, viii + 104 p., 46 figs., 2 tablas.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	4
ANTECEDENTES	7
1. PLANTEAMIENTOS	8
1.1 <i>LA CUENCA HIDROLÓGICA COMO UNIDAD DE ESTUDIO</i>	8
1.2 <i>INTERRELACIÓN DE SUELOS, SEDIMENTOS Y METALES PESADOS</i>	8
1.3 <i>LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS Y EL MUNICIPIO DE LEÓN</i>	10
1.3.1 <i>Cuenca del río Guanajuato</i>	10
1.3.2 <i>Cuenca San Juan de Otates</i>	10
1.3.3 <i>Cuenca del río Turbio</i>	10
1.3.4 <i>El municipio de León</i>	10
2. OBJETIVOS, ALCANCES Y METAS	11
2.1 <i>OBJETIVOS</i>	11
2.2 <i>ALCANCES</i>	11
2.3 <i>METAS</i>	11
3. METODOLOGÍA	12
3.1 <i>MUESTREO DE CAMPO</i>	12
3.2 <i>MÉTODOS ANALÍTICOS</i>	12
3.3 <i>ELABORACIÓN DE MAPAS</i>	12
3.4 <i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</i>	14
4. SUELOS, SEDIMENTOS Y METALES PESADOS	15
4.1 <i>GENERALIDADES</i>	15
4.1.1 <i>Consideraciones generales</i>	15
4.1.2 <i>Agua y transporte</i>	16
4.1.3 <i>Los metales pesados en el perfil del suelo</i>	17
4.1.4 <i>Los mapas de distribución</i>	18
4.1.5 <i>El uso de los GIS</i>	18
4.2 <i>LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE CADA ELEMENTO</i>	18
4.2.1 <i>Arsénico</i>	18
4.2.2 <i>Cadmio</i>	19
4.2.3 <i>Cobalto</i>	19
4.2.4 <i>Cobre</i>	20
4.2.5 <i>Cromo</i>	20
4.2.6 <i>Hierro</i>	20
4.2.7 <i>Manganeso</i>	21
4.2.8 <i>Mercurio</i>	21
4.2.9 <i>Níquel</i>	22
4.2.10 <i>Plomo</i>	22
4.2.11 <i>Zinc</i>	22
5. CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO	26
5.1 <i>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES</i>	26
5.1.1 <i>Localización de la zona de estudio</i>	26
5.1.2 <i>Fisiografía</i>	26
5.1.3 <i>Morfología</i>	26
5.1.4 <i>Geología</i>	28
5.1.5 <i>Clima</i>	29
5.1.6 <i>Hidrología</i>	29
5.1.7 <i>Suelos</i>	30
5.1.8 <i>Vegetación</i>	30
5.1.9 <i>Uso del Suelo</i>	30
5.2 <i>LOS METALES PESADOS TOTALES EN SUELOS Y SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO</i>	31
5.2.1 <i>Arsénico</i>	31
5.2.2 <i>Cadmio</i>	31

5.2.3 Cobalto.....	31
5.2.4 Cobre.....	33
5.2.5 Cromo.....	33
5.2.6 Hierro.....	33
5.2.7 Manganeso.....	37
5.2.9 Níquel.....	37
5.2.10 Plomo.....	37
5.2.11 Zinc.....	42
6. CUENCA SAN JUAN DE OTATES.....	44
6.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES.....	44
6.1.1 Localización de la zona de estudio.....	44
6.1.2 Fisiografía.....	44
6.1.3 Geología.....	44
6.1.4 Clima.....	46
6.1.5 Hidrología.....	46
6.1.6 Suelos.....	47
6.1.7 Vegetación.....	47
6.2 LOS METALES PESADOS EN SUELOS Y SEDIMENTOS DE LA CUENCA SAN JUAN DE OTATES.....	48
6.2.1 Arsénico.....	48
6.2.2 Cadmio.....	48
6.2.3 Cobalto.....	48
6.2.4 Cobre.....	51
6.2.5 Cromo.....	54
6.2.6 Hierro.....	54
6.2.7 Manganeso.....	56
6.2.8 Mercurio.....	56
6.2.9 Níquel.....	59
6.2.10 Plomo.....	62
6.2.11 Zinc.....	62
7. CUENCA DEL RÍO TURBIO.....	66
7.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES.....	66
7.1.1 Localización de la zona de estudio.....	66
7.1.2 Fisiografía.....	66
7.1.3 Geología.....	66
7.1.4 Clima.....	67
7.1.5 Hidrología.....	68
7.1.6 Suelos.....	69
7.1.7 Vegetación.....	69
7.2 LOS METALES PESADOS TOTALES EN SUELOS Y SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RÍO TURBIO.....	69
7.2.1 Arsénico.....	69
7.2.2 Cadmio.....	71
7.2.3 Cobalto.....	72
7.2.4 Cobre.....	74
7.2.5 Cromo.....	74
7.2.6 Hierro.....	77
7.2.7 Manganeso.....	77
7.2.8 Mercurio.....	82
7.2.9 Níquel.....	82
7.2.10 Plomo.....	82
7.2.11 Zinc.....	84
8. EL MUNICIPIO DE LEÓN.....	89
8.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES.....	89
8.2 LOS METALES PESADOS EN SUELOS Y SEDIMENTOS.....	89
8.2.1 Arsénico.....	89
8.2.5 Cromo.....	89
8.2.8 Mercurio.....	89
8.2.9 Níquel.....	89
9. CONCLUSIONES.....	95
9.1 GENERALES.....	95

9.2 CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO	95
9.3 CUENCA SAN JUAN DE OTATES	96
9.4 CUENCA DEL RÍO TURBIO	97
9.5 MUNICIPIO DE LEÓN	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. Cuencas hidrológicas en estudio	9
— 2. Sitios de muestreo	13
— 3. Cuenca hidrológica del río Guanajuato	27
— 4. Mapa de dispersión de arsénico en la cuenca del río Guanajuato	32
— 5. Mapa de dispersión de cobalto en la cuenca del río Guanajuato	34
— 6. Mapa de dispersión de cobre en la cuenca del río Guanajuato	35
— 7. Mapa de dispersión de cromo en la cuenca del río Guanajuato	36
— 8. Mapa de dispersión de hierro en la cuenca del río Guanajuato	38
— 9. Mapa de dispersión de manganeso en la cuenca del río Guanajuato	39
— 10. Mapa de dispersión de níquel en la cuenca del río Guanajuato	40
— 11. Mapa de dispersión de plomo en la cuenca del río Guanajuato	41
— 12. Mapa de dispersión de zinc en la cuenca del río Guanajuato	43
— 13. División de la cuenca San Juan de Otates en cinco subcuencas	45
— 14. Mapa de dispersión de arsénico en la cuenca San Juan de Otates	49
— 15. Mapa de dispersión de cadmio en la cuenca San Juan de Otates	50
— 16. Mapa de dispersión de cobalto en la cuenca San Juan de Otates	52
— 17. Mapa de dispersión de cobre en la cuenca San Juan de Otates	53
— 18. Mapa de dispersión de cromo en la cuenca San Juan de Otates	55
— 19. Mapa de dispersión de hierro en la cuenca San Juan de Otates	57
— 20. Mapa de dispersión de manganeso en la cuenca San Juan de Otates	58
— 21. Mapa de dispersión de mercurio en la cuenca San Juan de Otates	60
— 22. Mapa de dispersión de níquel en la cuenca San Juan de Otates	61
— 23. Mapa de dispersión de plomo en la cuenca San Juan de Otates	63
— 24. Mapa de dispersión de zinc en la cuenca San Juan de Otates	64
— 25. Mapa de dispersión de arsénico en la cuenca del río Turbio	70
— 26. Gráfica de distribución de arsénico en los sedimentos del río Turbio	71
— 27. Gráfica de distribución de arsénico en los sedimentos del río Lerma en su confluencia con el río Turbio	72
— 28. Mapa de dispersión de cadmio en la cuenca del río Turbio	73
— 29. Gráfica de distribución de cadmio en los sedimentos del río Turbio	74
— 30. Mapa de dispersión de cobalto en la cuenca del río Turbio	75
— 31. Mapa de dispersión de cobre en la cuenca del río Turbio	76
— 32. Mapa de dispersión de cromo en la cuenca del río Turbio	78
— 33. Gráfica de distribución de cromo en los sedimentos del río Turbio	79
— 34. Gráfica de distribución de cromo en los sedimentos de un tramo del río Lerma	79
— 35. Mapa de dispersión de hierro en la cuenca del río Turbio	80
— 36. Mapa de dispersión de manganeso en la cuenca del río Turbio	81
— 37. Mapa de dispersión de mercurio en la cuenca del río Turbio.....	83
— 38. Gráfica de distribución de mercurio en los sedimentos de un tramo del río Lerma	84
— 39. Mapa de dispersión de níquel en la cuenca del río Turbio	85
— 40. Mapa de dispersión de plomo en la cuenca del río Turbio	86
— 41. Mapa de dispersión de zinc en la cuenca del río Turbio	88
— 42. Mapa que muestra el límite del municipio de León y las subcuencas en estudio	90
— 43. Mapa de dispersión de arsénico en el municipio de León	91
— 44. Mapa de dispersión de cromo en el municipio de León	92
— 45. Mapa de dispersión de mercurio en el municipio de León	93
— 46. Mapa de dispersión de níquel en el municipio de León	94

TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles en suelos y sedimentos ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).....	23
— 2. Rangos de concentración de elementos traza en rocas y suelos ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	23

PRÓLOGO

Este proyecto, denominado “MONITOREO DE CONTAMINANTES EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS GUANAJUATO Y TURBIO Y SU IMPACTO EN EL RÍO LERMA”, pudo llevarse a cabo gracias a los auspicios del CONACYT (clave 400 324-5-1898 N).

Aunque el compromiso era terminar el proyecto en tres años (1994-1996), en realidad tomó un año más debido a la complejidad del tema, a la adecuación y aprendizaje de metodologías, a la vastedad del muestreo de campo requerido y realizado, a los miles de análisis de laboratorio efectuados, a la elaboración de múltiples mapas y a la interpretación de toda esta información que, a fin de cuentas, sirvió para cumplir con los objetivos y planteamientos del proyecto. De todo esto, nos ha quedado la satisfacción de haber realizado un gran esfuerzo para cumplir con el compromiso contraído con el CONACYT y con la UNAM.

Los beneficios adquiridos, además del cumplimiento de los objetivos del proyecto, fueron los de haber obtenido experiencia en el manejo de nuevas metodologías que nos permitirán logros académicos de mayor relevancia, la integración de alumnos de posgrado asociados al proyecto y su consiguiente formación académica, la interacción con otras universidades nacionales y extranjeras y, sobre todo, que los resultados de nuestros trabajos sirvan de referencia en la toma de decisiones para implementar acciones para el mejoramiento de la calidad de vida y de la salud de los habitantes de la región. Por otro lado, los resultados de estos trabajos sirven de marco de referencia para los planes de remediación y conservación integral de la cuenca del río Lerma.

Dr. Gilberto Hernández-Silva

AGRADECIMIENTOS

Los autores hacen patente su agradecimiento al CONACYT (proyecto clave 400 324-5-1898 N) por el apoyo económico brindado para la realización de este proyecto. Asimismo, se agradece la participación de Maribel Trejo Medina¹, de Fernando Salinas Velázquez¹ y del Pas. Biólogo Rubén Zamora Rojas² en la preparación de las muestras.

¹Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, Qro., UNAM.

²Instituto de Geología, Ciudad Universitaria, México, D. F.

RESUMEN

La cuenca del río Lerma ha sido considerada por el Gobierno Federal, en 1988, como la más contaminada del país. La cuenca hidrológica fue tomada como unidad de estudio debido, entre otros aspectos, a la relación que guarda con los ecosistemas y a la interdependencia con el ciclo hidrológico. Para un estudio adecuado de la cuenca, ésta fue jerarquizada en subcuencas.

Una de las ideas centrales de este proyecto fue determinar, por un lado, si existe una aportación de metales pesados hacia el río Lerma a través de los sedimentos de cada subcuenca en estudio; por otro, conocer el patrón de dispersión y acumulación de cada elemento en los suelos de cada subcuenca. Otros planteamientos importantes fueron: ubicar las áreas con concentraciones fuera de los rangos medios mundiales (probablemente contaminadas), y determinar riesgos, movilidad o transporte de los elementos, tendencias e impacto, hacia el río Lerma. El conocer y analizar estos resultados permitirá coadyuvar en el planteamiento de un programa global e integral de tratamiento de toda la cuenca del río Lerma.

La zona de estudio comprende las subcuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio, así como el municipio de León. Abarca una superficie aproximada de 5,500 km². Los suelos y sedimentos superficiales constituyen los parámetros de referencia para determinar el comportamiento de 11 elementos de cada una de las subcuencas que, en adelante, se denominarán cuencas simplemente. Estos elementos son: arsénico, cadmio, cobalto, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio, níquel, plomo y zinc cuya procedencia puede ser antropogénica o geológico-minera.

El diseño del muestreo en el campo de suelos y sedimentos se hizo con base en la geología, geomorfología, drenaje, pendiente, unidad y uso del suelo, obras de ingeniería, y ubicación de áreas con diversas actividades económicas. Las muestras de sedimentos fueron recolectadas en recorridos de 100 m en promedio, sobre los cauces de los ríos, arroyos y canales, obteniéndose una muestra representativa de este recorrido. Los sedimentos de presas fueron obtenidos en las entradas, salidas y junto a las cortinas de las mismas. Los suelos fueron recolectados de acuerdo a las unidades de suelo, usos y ubicación. Las muestras fueron digeridas con agua regia en un horno de microondas. Las concentraciones de nueve de los elementos fueron determinadas por espectrofotometría de absorción atómica de flama y de los otros dos por generación de hidruros (As y Hg). Los resultados obtenidos se reportaron en mg·kg⁻¹, µg·kg⁻¹ y %. La precisión se determinó mediante el análisis por duplicado de todas las muestras; la exactitud fue controlada a través del uso de un patrón internacional certificado; también se utilizó el procedimiento de blancos. Las concentraciones diferentes de cada elemento fueron clasificadas en tres clases. Para facilitar la interpretación de la dispersión de los 11 elementos, fueron elaborados 36 mapas, utilizando para ello el sistema de información geográfica ILWIS, v. 1.4, con el método de interpolación del vecino más cercano. Se hizo la aplicación de análisis de varianza y comparaciones múltiples de Tuckey para detectar diferencias entre sitios de muestreo y entre subcuencas y contrastes de hipótesis. Para el control de las escalas de salida se empleó el programa AUTOCAD y el Corel Draw para la edición de mapas.

Los mapas de dispersión confirman una presencia heterogénea de cada elemento, sin un patrón recurrente entre ellos, mostrando al mismo tiempo áreas marginales, áreas con problemas actuales y riesgos potenciales para el medio ambiente. Los procesos de retención o almacenamiento de los metales pesados han variado ampliamente a través del tiempo y del espacio, debido a que también las entradas han variado considerablemente. Por otro lado, es difícil comparar los niveles encontrados en la zona de estudio con respecto a otras latitudes, ya que las características de los parámetros involucrados son muy diferentes, por lo que queda invalidada una comparación; por lo tanto, se optó por comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los rangos medios mundiales para cada elemento, reportados por diferentes autores.

1. Cuenca del Río Guanajuato. La mayor contribución de metales pesados en suelos y sedimentos de ríos, arroyos y presas proviene de la influencia y proximidad de minas y áreas de mineralización. Sólo el Cu proviene, aparentemente, de actividades industriales. *As*: Se concentra principalmente en los sedimentos de la sierra por arriba del rango medio mundial. Otra área de cierta importancia la constituye el norte de Irapuato y la desembocadura en el río Lerma. Se sugiere un transporte moderado de As hacia el Lerma, a través de los sedimentos del río Guanajuato. *Cd*: No se detectó su presencia debido a las concentraciones muy bajas en suelos y sedimentos. *Co*: Existen sólo dos áreas por encima del promedio mundial que se relacionan con la minería. *Cu*: Presenta algunas áreas por encima del rango medio mundial asociadas a actividades mineras e industriales. Posible movimiento lento a través de los sedimentos del río Guanajuato, sin representar algún impacto en el río Lerma. *Cr*: Se relaciona con actividades mineras. Probable movilidad media a través de los sedimentos del río Guanajuato. *Fe*: Aunque existen suelos en algunas zonas con rangos por arriba de la media mundial, no existen las condiciones necesarias (por ejemplo, salinidad) para representar problemas de contaminación. *Mn*: Su área de influencia y dispersión se restringe a zonas de actividad minera. *Ni*: Dispersión muy restringida, con niveles superiores a los rangos medios mundiales. *Pb*: Algunas áreas por arriba del promedio mundial, que se encuentran principalmente en los jales de las minas. *Zn*: Se asocia con actividades mineras. Probable aportación media hacia el río Lerma (¹).

2. Cuenca San Juan de Otates. La fuente inicial y natural de una buena parte de los metales pesados la constituyen las rocas ultramáficas y básicas de la parte alta de la cuenca. A excepción del Ni y Cu, todos los demás elementos se encuentran dentro del sistema de drenaje, sin trascender todavía hacia las cuencas vecinas. *As*: Los niveles están por debajo del rango medio mundial; no hay problema con él. *Cd*: Existen algunas áreas con potencialidad tóxica. *Co*: Sólo existen zonas pequeñas con contenido por encima del promedio mundial. *Cu*: Hay algunas áreas que pueden ser consideradas como de riesgo. Existe una probable aportación de Cu hacia del sistema Silao-Guanajuato. *Cr*: Presencia de áreas por arriba del rango medio mundial. El origen de este elemento es natural. Escasa aportación hacia la cuenca del río Turbio. *Ni*: Se sugiere un movimiento de Ni hacia el sistema Silao-Guanajuato, a través de los sedimentos de la cuenca de San Juan de Otates. Existe una mayor concentración de Ni relacionada con el material parental. *Pb*: Algunas áreas se encuentran por encima del rango medio mundial. *Zn*: Sólo algunas áreas sobrepasan los rangos medios mundiales.

3. Cuenca del Río Turbio. Las concentraciones elevadas de los elementos en estudio son claramente de origen antropogénico. La industria, las obras de ingeniería y la explotación minera han transformado sustancialmente la distribución de los metales pesados en esta cuenca. *As*: Se asocia con áreas de mineralización. Existe una zona con probable influencia antropogénica. Escasa aportación hacia el Lerma. *Cd*: Se encuentra ampliamente distribuido en la cuenca con rangos por encima de los catalogados a nivel internacional como normales. *Co*: Con rangos por abajo del promedio mundial. Existe una vinculación antropogénica. *Cr*: Marcado transporte de este elemento a través de los sedimentos del sistema de drenaje, siendo el área más crítica la localizada entre León y El Toro. Aunque el movimiento superficial del Cr es evidente, aparentemente no ha trascendido hacia el río Lerma. *Fe*: No obstante los porcentajes altos de Fe, no existen problemas con éste, debido a que las condiciones físicas de la cuenca no favorecen su toxicidad. *Hg*: La dispersión de este elemento está confinada a unas cuantas áreas; sin embargo, estas concentraciones están muy por arriba del rango medio mundial. Los mayores niveles de Hg están ubicados al sur de León, en la confluencia con el río Lerma, y en las terrazas de este último. *Ni*: Sólo existe

(¹) De los 11 elementos estudiados, los que no se mencionan en el resumen, no representan problema alguno.

una región al norte de la cuenca con una concentración elevada, asociada con su geología. **Pb**: Su presencia se asocia con áreas de mineralización. **Zn**: Existen tres áreas por arriba del rango medio mundial; el resto se encuentra dentro del rango normal.

4. Municipio de León. Esta área se localiza dentro de las cuencas de los ríos San Juan de Otates y Turbio. Solamente el arsénico, el cromo, el mercurio y el níquel tienen significado en los suelos y sedimentos de esta área. **As**: Tiene una dispersión escasa; existe una sola contribución geológica de este elemento desde la cuenca San Juan de Otates hacia la cuenca del río Turbio y es de concentración baja. **Cr**: La presencia e incorporación del Cr en suelos y sedimentos se debe a fuentes tanto industriales como naturales. Los piroxenos de San Juan de Otates son la fuente natural de este elemento, pero sus cantidades son bajas y no pueden compararse con las debidas a fuentes industriales. **Hg**: El Hg está presente, en el sur de la ciudad de León, en un área restringida y se debe a actividades antropogénicas. **Ni**: El Ni tiene un significado especial; el patrón de distribución de este elemento es similar al del Cr. En la cuenca del río Turbio, en su parte central, el contenido de níquel tiene valores medios; éstos están asociados tanto a actividades antropogénicas como a la geología de la cuenca. En contraste, en la cuenca San Juan de Otates, el contenido de níquel es más alto, pero es exclusivamente de origen geológico.

Palabras clave: Geoquímica ambiental, río Lerma, cuenca del río Guanajuato, cuenca del río Turbio, México.

ABSTRACT

The Lerma River basin was considered by the Mexican Federal Government, in 1988, as the most contaminated area in the country. This hydrologic basin was subdivided into sub-basins that were considered as study units due to their relationships and their interdependence with the ecosystem.

The first of the main goals of this project was to see if heavy metals were brought into the Lerma River by the movement of sediments. The second of these goals was to describe the dispersion patterns for each of the eleven elements analyzed. The third one was to localize areas whose heavy-metal contents were higher than the world mean ranges of concentration of these metals. To sum up this study, we examined the hazard of the presence, transport through sediments, and impact of heavy metals on the Lerma River, which will help to plan a global and integral program for remediation of heavy-metal accumulation in the river basin.

The study area covers 5,500 km², and it includes the sub-basins of Guanajuato, San Juan de Otates and Turbio rivers, also comprising the municipality of León. The study was done on soils and surficial sediments. The elements analyzed were: As, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, and Zn. These eleven elements could be of either anthropogenic or geologic origin.

Field sampling of soils and sediments was carried out based on geology, geomorphology, drainage, slope, soil units, land use, engineering works, and the location of areas with different industrial activities. Representative samples of sediments were obtained on runs averaging 100 m in length along river courses and channels. Sampling along dams was made at their entrances, exits and near the curtains. Samples were digested with aqua regia in a microwave furnace. Nine of the analyzed elements were obtained by flame atomic-absorption spectrometry, while As and Hg were studied by hydrides. Accuracy of results was controlled by the use of certified international standards, and precision was checked analyzing all samples twice. The different concentrations of each element were divided in three classes. In order to explain the dispersion of the eleven elements, 36 maps were generated using the ILWIS Geographical Information System with the method of interpolation of the nearest neighbor. The control of scales and the process of map edition were done by means of the software programs AUTOCAD and Corel-Draw, respectively. Analysis of variance and Tuckey's multiple comparisons were done to detecting differences among sampling sites and among sub-basins. The obtained dispersion maps confirm a heterogeneous distribution of heavy metals without recurrent patterns, showing at the same time the existence of marginal areas, areas with problems at the present time, and areas with potential hazard for the environment. The processes of retention or storage of heavy metals have varied greatly through time and space, due also to the fact that entrances of heavy metals to the environment have also varied considerably. On the other hand, it is difficult to compare the levels of the heavy metals found in the area with respect to those away of it, because the characteristics of the involved parameters are very different, thus invalidating any comparison. It was decided to compare the results obtained in this work with the world mean contents obtained for each element as reported by several authors.

Data of heavy metals from the area were grouped in river sub-basins, which will be named from now on as river basins:

1. The Guanajuato River basin: The greatest contribution to the presence of heavy metals in soils and sediments from rivers, creeks and dams is due to the existence of mineralized areas and the presence of mines in them. Only Cu occurs mainly because of industrial activities. *As*: It is above world mean range, and is present in sediments from the upper part of the sierra. Another area of importance is the north of Irapuato and the confluence of the Guanajuato and Lerma rivers, where it was detected a moderate transport of As in sediments. *Cd*: It was not detected because of its very low concentrations. *Co*: There are only two areas above the Co world mean range and these are related to mining. *Cu*:

It occurs in some areas with values above the world mean range, which are related to mining and industrial activities; possibly, there is a slow transport of sediments through the Guanajuato River. *Fe*: It is present in some areas in levels above the world's mean range; nevertheless, its presence is not a source of contamination since there are not environmental conditions that favor its mobility. *Mn*: Its dispersion area is restricted to mining zones. *Ni*: It has contents greater than those of the world mean ranges, but its dispersion is very restricted. *Pb*: It shows in some areas levels above the world mean values and they are found mainly in mining tailings. *Zn*: It is associated with mining activities, with probable moderate contributions towards the Lerma River ⁽¹⁾.

2. San Juan de Otates River basin. The initial and natural source of a great part of heavy metals is found in ultramafic and mafic rocks in the upper part of the basin. Except for Ni and Cu, all the other elements are found within the drainage system, without spreading towards neighboring basins. *As*: Its levels are below the world mean range and therefore there is no problem with this element. *Cd*: In some areas, it could be potentially toxic. *Co*: It is found only in small zones, where its contents are greater than the mean world values. *Cu*: Some areas can be considered as hazardous and there is a probable contribution of Cu towards the river system of Silao-Guanajuato. *Cr*: In some areas, it has levels above the world mean range. Its origin is natural and there is scarce Cr release towards the Turbio basin. *Ni*: It seems to be moving towards the Silao-Guanajuato river system through the sediments of the basin of San Juan de Otates. This is suggested by the presence in this area of a greater concentration of Ni related to parental material. *Pb* and *Zn*: Some areas have contents greater than the world mean range.

3. Basin of the Turbio River. The high levels of the studied elements show clearly the anthropogenic origin of these elements. Industry, engineering works and mining exploitation have transformed substantially the distribution of heavy metals in this basin. *As*: It is associated with mineralized areas, but there is a zone where its presence is probably due to anthropogenic influence. There is scarce transportation of this element towards the Lerma River. *Cd*: It is amply distributed through the basin, and has ranges above those reported internationally as normal. *Co*: Its contents are greater than the world average, and it has anthropogenic vinculations. *Cr*: There is a well marked transport of this element through the sediments of the drainage system, being the most critical area the one localized between León and El Toro. Although the surficial movement of Cr is evident, there seems to be no spread towards the Lerma River. *Fe*: It does not present any problem although there are high concentrations of it, because the physical conditions of the basin do not facilitate toxicity. *Hg*: Its dispersion is restricted to a few areas, yet in these places it is present above world mean values. The greatest values of Hg are found south of León, at the confluence of the Turbio River with the Lerma and also along the terraces of this last river. *Ni*: It was found only an anomalous zone, which is located in the northern region of the basin and is related to geology. *Pb*: Its presence is associated with mineralized areas. *Zn*: There are three areas with contents greater than the average world range. The rest of the area is within normal world averages.

4. Municipality of León. This area lies within the basins of the San Juan de Otates and Turbio rivers. Only arsenic, chromium, mercury, and nickel are significant in the soils and sediments of this area. *As*: It shows scarce dispersion. There is only one geologic contribution of this element from the San Juan de Otates basin towards the Turbio basin and it is of low concentration. *Cr*: Its presence and incorporation to soils and sediments comes from both industrial and natural sources. The pyroxenes of San Juan de Otates are the natural source of this elements but its quantities are modest and cannot be compared with those brought

⁽¹⁾ Of the 11 analyzed elements, those that are omitted have not significance.

in by industrial activities. **Hg**: It occurs only in a restricted area south of the city of León and its presence is due to anthropogenic activities. **Ni**: It is of special significance. The distribution patterns of this element are similar to those of Cr. In the Turbio basin, it has normal values that are associated with the central part of the basin and to anthropogenic activities as well as to the geology of the basin. In contrast, in the San Juan de Otates basin the contents of nickel is higher but it is exclusively of geologic origin.

Key words: Environmental geochemistry, Lerma River, Guanajuato River basin, Turbio River basin, Mexico.

ANTECEDENTES

El estilo de desarrollo del país, dependiente y productivista, y la búsqueda de ganancias a corto plazo, olvidando el entorno ambiental y los recursos naturales, han sido una de las causas principales de la crisis ambiental de nuestro país. Por otro lado, la carencia de un crecimiento económico justo y equilibrado, y la presión que ejerce el aumento constante de la población por el uso de los recursos han originado, también, un rápido deterioro del ambiente y de los recursos naturales, bases indiscutibles para elevar la calidad de vida de la población y asegurar el desarrollo sostenido y el bienestar de las futuras generaciones.

Respecto al medio ambiente del país, el Gobierno Federal, a través de la Comisión Nacional de Ecología (1988), consideraba a la cuenca Lerma-Chapala como la más contaminada del país. Recientemente, se formó un programa de ordenación y saneamiento de la cuenca Lerma-Chapala (CNA, 1991); sin embargo, poco se sabe si existe una aportación de contaminantes (metales pesados en este caso), a través de los sedimentos de las diferentes subcuencas hacia el río Lerma; ni tampoco sobre la dispersión de estos elementos en los suelos de cada una de las subcuencas de estudio. El conocer la

respuesta permitirá coadyuvar en el planteamiento de un programa global e integral de tratamiento de toda la cuenca del río Lerma.

Para la organización de este proyecto se tomó en cuenta el hecho de que, actualmente, existe la tendencia a unir esfuerzos regionales, estatales, nacionales e internacionales con el objeto de compartir recursos, personal ya formado, investigaciones conjuntas, así como la vinculación entre universidades, instituciones de investigación, sector productivo y gobierno, que incidan en soluciones a problemas ambientales y en la formación de recursos humanos.

Los resultados que se presentan en este informe comprenden una extensión de aproximadamente 5,500 km² de los 52,000 km² que constituyen el total de la cuenca del río Lerma. La experiencia que se ha adquirido, junto con los recursos humanos formados, en formación y los que se incorporarán al proyecto, así como la infraestructura que se ha integrado (gracias al apoyo del CONACYT) y la vinculación con otras instituciones, son factores que alientan a proseguir con la segunda etapa de este estudio, que abarcará ahora 21,000 km².

1. PLANTEAMIENTOS

1.1 LA CUENCA HIDROLÓGICA COMO UNIDAD DE ESTUDIO

El presente estudio está constituido por cuatro cuencas hidrológicas que se encuentran dentro del sistema Lerma-Chapala, uno de los más importantes de México. La finalidad principal es determinar si hay aportaciones de metales pesados de cada una de ellas hacia el río Lerma y conocer la dispersión de éstos en los suelos y sedimentos. Las cuencas hidrográficas consideradas para este proyecto son las de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates, Turbio y Silao¹, así como el municipio de León², todos ubicados en el estado de Guanajuato (Figura 1).

Para los fines de este proyecto, cada una de las cuencas hidrográficas es considerada como unidad de estudio debido, entre otros aspectos, a la relación que guarda este concepto con los ecosistemas y a la interdependencia que mantiene con el ciclo hidrológico, ya que permite detectar funciones múltiples y alteraciones que suceden en ella, además de que, en buena medida, determinan la relación que guardan entre sí (Sarukhán y Maas, 1990).

El uso de la cuenca hidrológica como unidad de estudio y de empleo de recursos naturales, permite detectar y cuantificar los efectos que un manejo determinado tiene sobre el ecosistema. Dado que las cuencas tienen una organización jerárquica (es decir, una cuenca está formada por subcuencas, etc.), los estudios pueden realizarse a diferentes niveles de integración y escala. El objeto de considerar como unidad de estudio a una cuenca hidrológica es, básicamente, el poder englobar la problemática de los fenómenos enmarcados en ella, sobre la base de que todos están interconectados y dependen unos de otros para su funcionamiento.

¹ Aunque la cuenca del río Silao no está considerada oficialmente ante CONACYT, se estimó necesario incluirla por razones de claridad, congruencia y continuidad geográfica en relación a las otras tres cuencas. Se tiene ya la información correspondiente a ella; posteriormente se integrará al resto de las cuencas.

² El municipio de León tampoco fue considerado oficialmente ante las autoridades del CONACYT; pero dado el interés que mostraron las autoridades municipales, también se decidió incluirlo.

1.2 INTERRELACIÓN DE SUELOS, SEDIMENTOS Y METALES PESADOS

El suelo es parte esencial de los ecosistemas terrestres. Tiene funciones importantes tales como almacén, amortiguador, filtro y compartimiento de transformaciones que apoyan las interrelaciones homeostáticas entre los componentes bióticos y abióticos. La composición química de los suelos es tan diversa que, aunque gobernada por múltiples factores, generalmente predominan el clima y el material parental. A pesar de que los elementos traza son componentes menores en la fase sólida del suelo, juegan un importante papel en la bioactividad y fertilidad del suelo (Kabata-Pendias y Adriano, 1995).

Por otro lado, los sedimentos generalmente se asocian a los sistemas de drenaje, siendo los principales portadores de elementos traza en la hidrosfera. Las partículas de los sedimentos están constituidas por materiales derivados de rocas y suelos, así como por la incorporación de materiales biológicos y antropogénicos; en consecuencia, los sedimentos están considerados como los sitios con mayores contenidos de elementos traza en la hidrosfera (Davies, 1976). Los sedimentos en suspensión poseen menores cantidades de metales que los lodos del fondo de las corrientes (Gibbs, 1977; Förstner y Wittmann, 1979; Feltz, 1980).

El comportamiento de los metales traza en suelos y sedimentos se relaciona con su origen y fuente. Los metales pesados son el grupo más importante de contaminantes que se conocen como causantes de problemas en las actividades agropecuarias, en la industria, en la salud pública y en las áreas naturales.

Los parámetros considerados para determinar si existe aportación de metales pesados de cada una de estas cuencas hacia el río Lerma, los constituyen, en primer lugar, los sedimentos de ríos, arroyos, lagunas, presas, bordos, canales y microcuencas endorreicas. Tanto los rasgos naturales como las obras de ingeniería de las diferentes cuencas constituyen puntos de referencia excelentes para determinar si hay transporte de metales pesados hacia el Lerma, dado que por su mayor permanencia en el sistema aportan una información más confiable, como lo afirman en sus trabajos Graf (1994) y Horowitz (1985).

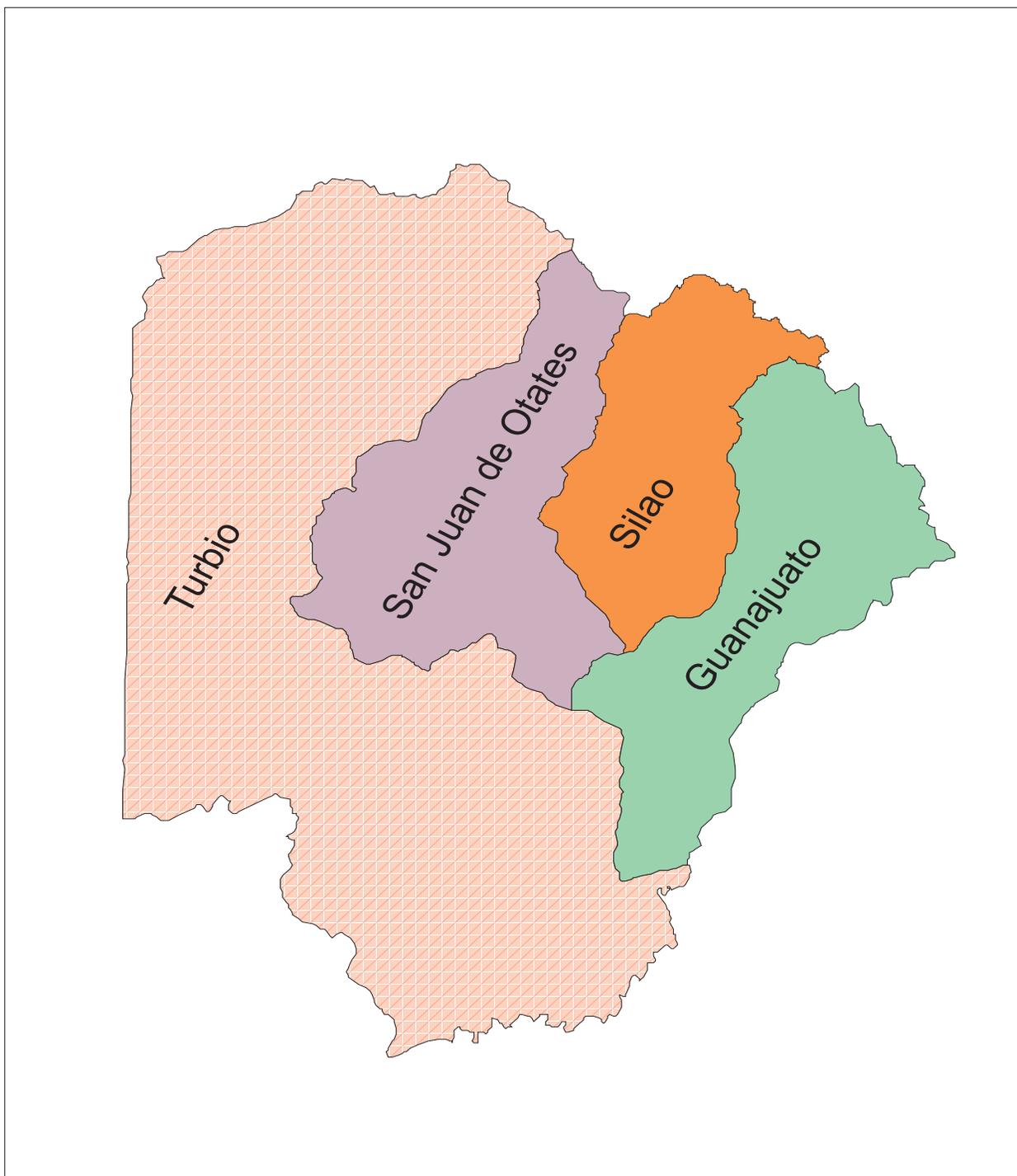


Figura 1. Cuencas hidrológicas en estudio.

Los suelos constituyen el otro parámetro considerado en este trabajo. A diferencia de los sedimentos, los suelos representan un historial casi permanente de dispersión, depósito y transformación de elementos, procedentes tanto de materiales geológicos como de aquéllos introducidos por el hombre.

Cada una de estas cuencas posee características peculiares, tanto naturales como antropogénicas, que las hacen diferentes entre sí, de manera que, desde el punto de vista de la investigación científica, representan ejemplos para ser considerados desde diversos enfoques.

1.3 LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS Y EL MUNICIPIO DE LEÓN

1.3.1 Cuenca del río Guanajuato

La región septentrional de la cuenca se distingue por su actividad minera, reconocida a nivel internacional. El oro y la plata son los metales más importantes de este distrito minero, aunque también existen yacimientos de plomo y caolín (Martínez-Reyes, 1992). Los procesos metalúrgicos desarrollados para el beneficio de estos metales preciosos se iniciaron en 1548 con el método de amalgamación; a partir de 1902, se instaló la primera planta de cianuración; y entre 1930 y 1940, se introdujo el proceso de flotación (Ramos, 1991). Los diferentes procesos de beneficio utilizados pueden ser causa de que, a través de las aguas residuales que originan estas actividades, pueda existir una acumulación de algunos metales pesados en suelos, sedimentos, aguas y cultivos, por encima de los niveles normales. Por otro lado, en la porción correspondiente al Bajío, se desarrollan actividades agropecuarias de importancia, así como actividades industriales de mediana intensidad.

1.3.2 Cuenca San Juan de Otates

El interés por la inclusión de esta cuenca, se debe a la existencia natural de piroxenita en su parte septentrional. Estas rocas se caracterizan por un contenido elevado de Ni y Cr. El estudio permite dilucidar si existen aportaciones significativas de minerales asociados a estos elementos, en suelos y sedimentos, así como su posible transporte y alcance de dispersión hacia la cuenca vecina del río Turbio debido a que, de manera artificial, actualmente drenan parte de sus aguas hacia el centro-este de la ciudad de León.

1.3.3 Cuenca del río Turbio

El desarrollo económico, industrial y urbano ha alterado de manera acelerada los ecosistemas de la cuenca del río Turbio. En este sentido, son múltiples los factores que han afectado la calidad de vida de sus habitantes así como la de los recursos naturales. Tradicionalmente, sus aguas se utilizaban para riego agrícola, ganadería y pesca. Actualmente, la industrialización de León y

San Francisco del Rincón ha originado un incremento significativo de descargas de aguas residuales sin tratamiento hacia la red de drenaje municipal, al sistema de riego y hacia el sistema hidrográfico de la cuenca. El riego con aguas residuales se inició hace más de 40 años al sur de la presa El Maestranzo. Entre Plan de Ayala y la presa San Germán, existe otra área regada con aguas negras desde hace 20 años (Ridgway *et al.*, 1994) que constituye, desde entonces, un complejo sistema de riego. Este sería el medio para que los elementos en cuestión se introdujeran en la cadena trófica. Estos posibles aportes de origen antropogénico pueden conducir a una acumulación de metales en suelos que, generalmente, persisten por períodos prolongados de tiempo (Juste y Mench, 1992).

1.3.4 El municipio de León

El crecimiento que ha tenido el municipio de León, en particular su área urbana, ha permitido identificar situaciones de conflicto con respecto al uso del suelo, no sólo en el área urbana, sino también en las zonas rurales, donde existe una clara competencia por el uso habitacional en relación con otros usos. En la actualidad, el medio ambiente en esta área ha sufrido desajustes en sus usos bióticos y abióticos causados por agentes contaminantes emitidos por el hombre, degradándolos y provocando pérdidas sólo recuperables a largo plazo y, en ocasiones, irreparables.

Existen, además del uso urbano, otros usos: agrícola, pecuario, silvícola, forestal e industrial, todos ellos en busca de su lugar dentro del territorio municipal, tratando de mantener el equilibrio entre el medio ambiente y el desarrollo del municipio. Ante estos problemas, las autoridades municipales emitieron diferentes planes directores: En el de 1991 se menciona que existen serios problemas de contaminación por aguas residuales y emanación de olores, provocados por las tenerías. En el Plan Director de 1995 se menciona que el 15.71% del total de impactos son debidos a que las industrias química y peletera tienen efecto directo sobre el suelo, el agua y el aire; por otro lado, el 15.24% del impacto total se debe a la industria textil; la expansión de la mancha urbana sobre las áreas de cultivo tiene un impacto calculado del 17.14% (IMPLAN, 1997).

2. OBJETIVOS, ALCANCES Y METAS

2.1 OBJETIVOS

1. Establecer y cuantificar los niveles de concentración de 11 elementos pesados en suelos y sedimentos superficiales de tres subcuencas pertenecientes al sistema Lerma-Chapala. Los elementos analizados fueron escogidos de acuerdo con la infraestructura disponible, a la importancia de cada elemento dentro de la zona de estudio y de acuerdo a las referencias consultadas. Los elementos seleccionados fueron: arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, hierro, mercurio, manganeso, níquel, plomo y zinc totales.
2. Indicar el modelo de distribución de cada uno de tales elementos en suelos y sedimentos superficiales de cada una de las cuencas, señalando los diferentes niveles de concentración.
3. Determinar el posible transporte de cada elemento de estudio hacia el río Lerma, a través de los sedimentos de cada cuenca.

2.2 ALCANCES

1. El recabar, producir, manejar e interpretar la información generada en esta investigación permite conocer el estado actual que guarda la presencia de metales pesados en el ambiente edáfico y sedimentario, base importante para el conocimiento integral del medio ambiente y su consiguiente tratamiento.
2. Este estudio sirve de referencia o punto de partida para un monitoreo constante, así como para un seguimiento de tendencias en el comportamiento de cada uno de los metales pesados considerados en este estudio.

3. Con los resultados obtenidos, se han reafirmado algunas ideas generales que se tenían sobre problemas ambientales, pero que, mediante información más precisa, se han podido delimitar y conocer mejor. En otros casos, se obtuvieron resultados inesperados que permitirán realizar trabajos más puntuales.
4. También, el presente estudio sirve de base para relacionar los resultados obtenidos con problemas de salud pública, calidad alimentaria, recursos naturales y medio ambiente.

2.3 METAS

1. Proporcionar un diagnóstico integral de la concentración de cada elemento en las diferentes cuencas, de manera que permita coadyuvar en el planteamiento de estrategias adecuadas para crear planes de recuperación del medio ambiente, conservar la calidad y uso adecuado de los recursos naturales, la restauración del equilibrio ecológico, así como el desarrollo sustentable de la cuenca del río Lerma.
2. Llevar a cabo investigaciones puntuales de acuerdo con los resultados que han sido obtenidos a través del desarrollo del proyecto.
3. Mediante el establecimiento de convenios, incrementar el programa de investigaciones de temas relacionados con el medio ambiente, seguir fomentando la formación de recursos humanos de alto nivel, consolidar vínculos académicos y de colaboración con universidades estatales y extranjeras, así como con instancias municipales, estatales y federales.

3. METODOLOGÍA

3.1 MUESTREO DE CAMPO

La localización de los sitios de muestreo se hizo con base en las características geológicas de cada cuenca, su geomorfología, sistemas de drenaje, pendientes, unidades y uso del suelo, así como obras de ingeniería. La cuenca San Juan de Otates fue tomada como cuenca de referencia, por lo que se dividió en subcuencas para un mejor análisis y control de los parámetros considerados en el estudio.

Las muestras de sedimentos fueron recolectadas a través de recorridos de 100 m sobre la trayectoria de la corriente. Cada sitio representa una muestra compuesta, con un promedio de 7 submuestras superficiales (Ridgway *et al.*, 1994). Los materiales fueron tomados con una pequeña pala de plástico hasta reunir 4 kg de material.

Para la zona de El Bajío, los sedimentos de ríos y arroyos fueron tomados a partir de los lechos, planicies de inundación y terrazas aluviales (Lewin *et al.*, 1974) hasta una profundidad ordinaria de 20 cm. Se recogió un promedio de 5 muestras en un trayecto de 100 m, mismas que se mezclaron obteniéndose, de esta manera, una muestra representativa de 4 kg de peso. En algunas terrazas aluviales fueron tomadas muestras a profundidades hasta de 3.5 m. En los canales, los sedimentos fueron recolectados a lo largo de ellos, en recorridos de aproximadamente 100 m con el mismo procedimiento de recolección que el empleado en el muestreo de ríos y arroyos. Los sedimentos de las presas se obtuvieron en las entradas, salidas y junto a las cortinas.

Los suelos fueron recolectados de acuerdo a las diferentes unidades de suelo y a sus diferentes usos y ubicación respecto a diferentes actividades industriales; en parcelas agrícolas de control, fueron tomadas cuatro submuestras a una profundidad de 25 cm, mismas que fueron mezcladas para obtener una representativa. En la cuenca del río Guanajuato, fueron muestreados 138 sitios; en San Juan de Otates 102; en la del río Turbio 255; para el municipio de León se tomaron en cuenta 118 sitios. La recolección de los materiales se llevó a cabo durante el verano, otoño e invierno de 1994; primavera y verano de 1995; y primavera e invierno de 1996 (Figura 2).

3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

Las muestras de sedimentos y suelos fueron secadas a temperatura ambiente (22–25°C), cuarteadas y molidas en un mortero de ágata para homogeneizarlas pasando por un tamiz de malla 100 con 0.149 mm de abertura. La determinación de los elementos metálicos y metaloides se realizó utilizando 0.5 g de muestra (tamaño de grano <0.149 mm) secada en estufa a 105–110°C durante 3 horas, la que se sometió a una digestión con 10 mL de agua regia (HCl-HNO₃, 4:1 v/v) en un horno de microondas (CEM modelo 2000) durante 15 minutos a 130 psi. El contenido de los elementos fue determinado por espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer, modelo 3110) con flama para Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn; y con generación de hidruros (MHS 10) para As y Hg, con corrección de ruido de fondo a través de una lámpara de deuterio. La calidad de los resultados estuvo controlada mediante el análisis de todas las muestras por duplicado, con una variación entre ellas menor que el 6%; también, mediante el uso de un patrón internacional de referencia (GBW-07408, MC) que fue sometido al mismo procedimiento descrito anteriormente en cada lote de 48 muestras, obteniendo una variación menor que el 7%; asimismo, se utilizó el procedimientos de blancos. Los resultados reportados se expresan en mg·kg⁻¹, µg·kg⁻¹ y en porcentaje. Con la metodología descrita se obtuvieron los siguientes límites de detección: As: 0.020 µg·kg⁻¹; Cd: 0.2 mg·kg⁻¹; Co: 0.5 mg·kg⁻¹; Cu: 1.0 mg·kg⁻¹; Cr: 1.0 mg·kg⁻¹; Fe: 5.0 mg·kg⁻¹; Pb: 3.0 mg·kg⁻¹; Hg: 0.002 µg·kg⁻¹; Mn: 3.5 mg·kg⁻¹; Ni: 0.8 mg·kg⁻¹; Pb: 3.0 mg·kg⁻¹; y Zn: 1.0 mg·kg⁻¹.

Aunque los sedimentos no son suelos, pueden ser considerados como una matriz sólida que muestra una similitud con los suelos en términos de una interacción con los metales pesados; por ejemplo, Ni y Cr (Förstner y Wittman, 1981). Por ello, sedimentos y suelos fueron considerados como una sola unidad para la elaboración de los mapas de dispersión de cada elemento.

3.3 ELABORACIÓN DE MAPAS

Para la elaboración de los mapas, se digitizaron los ya existentes, tanto de topografía (CETENAL, 1973a,

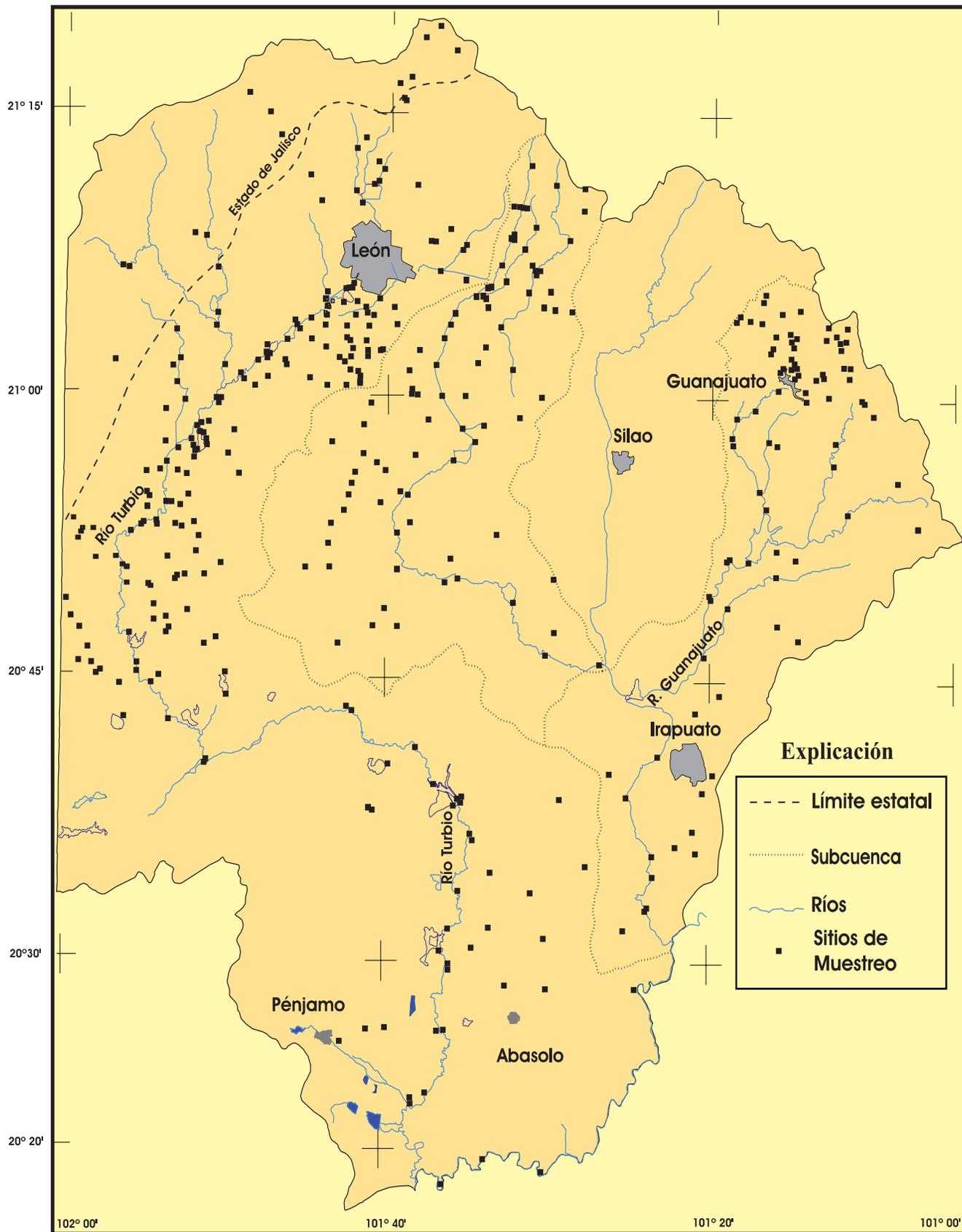


Figura 2. Sitios de muestreo

1973b, 1975), suelos (DETENAL, 1978) como de geología (Martínez-Reyes, 1992). Con base en ellos, fueron elaborados los mapas respectivos para facilitar la interpretación del comportamiento de la dispersión de los 11 metales pesados en suelos y sedimentos en las diferentes cuencas hidrológicas. En ellos, se hizo la síntesis de una enorme cantidad de datos de campo, laboratorio y análisis estadísticos. Esta información sirvió para integrar la base de datos. Las diferentes concentraciones de cada uno de los elementos y de cada cuenca fueron clasificadas en tres clases (alta, media y baja) cuyos rangos variaron de acuerdo a las características de cada elemento en estudio. El criterio utilizado para clasificar las concentraciones de los elementos fue formado con base en las concentraciones de fondo geoquímico (*background*) y límites permisibles reportados por Kabata-Pendias y Pendias (1992). En el caso del hierro y del manganeso, la categorización fue hecha en función del rango de concentraciones observadas en toda la zona de estudio. La categorización de las concentraciones de arsénico fue un tanto arbitraria, pues la mayoría de ellas estuvieron dentro de los límites permisibles reportados por los autores antes mencionados.

Para la elaboración de los mapas se utilizó, en primer lugar, el sistema de información geográfica ILWIS, v. 1.4, que sirvió para digitizar los mapas y realizar el

análisis espacial, empleando para ello el método de interpolación del vecino más cercano. Para digitizar los mapas, se utilizó el método *raster* que emplea la matriz de mallas o celdas; éstas tienen la ventaja de manejar la sobreposición de manera óptima aunque los límites de las clases resultantes tienen apariencia rígida. También, fueron usados los programas AUTOCAD, v. 11, para el control de las escalas de salida, y Corel Draw, v. 5, para la edición de mapas. Estas representaciones gráficas constituyen una herramienta valiosa para la discusión de la inspección y dispersión de los elementos traza en suelos y sedimentos.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A la información obtenida se le practicó un análisis de varianza seguido del análisis de comparaciones múltiples de Tuckey para detectar las diferencias significativas entre sitios de muestreo y entre subcuencas. Por otra parte, también se realizaron contrastes de hipótesis, contrastando las diferencias en las concentraciones medias de los elementos entre los dos tipos de materiales estudiados (suelos y sedimentos), con el objeto de comprobar si las diferencias de medias son reales o son variaciones casuales debidas al azar (Downie y Heath, 1973). Todos los análisis se realizaron sin eliminar los posibles valores aberrantes.

4. SUELOS, SEDIMENTOS Y METALES PESADOS

4.1 GENERALIDADES

4.1.1 Consideraciones generales

Aunque la roca claramente es la fuente inicial dominante de los elementos traza en suelos y sedimentos, existen otras fuentes que deben ser tomadas en cuenta. Es una característica de la industria moderna que muchas materias primas hayan sido extraídas, concentradas y aplicadas al suelo de manera directa a través de fertilizantes, herbicidas o pesticidas, o de manera indirecta como contaminantes, a través de desechos industriales vertidos al medio ambiente (Purves, 1977).

Por lo común, los suelos de la zona de estudio han sido formados a partir de materiales transportados por procesos coluviales, aluviales y fluviales. En un momento dado, se formaron capas gruesas de ceniza volcánica o aluvión fácilmente detectables. Pero cuando estos depósitos son delgados o se encuentran diluidos, su presencia sólo puede detectarse por análisis mineralógico o de laboratorio. Ambos depósitos externos pueden constituir una fuente importante de elementos pesados (Hernández-Silva *et al.*, 1997).

Aunque los valores promedio de los elementos en las rocas son predecibles, pueden existir peculiaridades locales que hacen variar los rangos de estos promedios. Esto puede tener un significado importante en un estudio detallado de un elemento traza y en relación al suelo derivado de esa roca (Goldschmidt, 1937; Krauskopf, 1967; Wedepohl, 1969; Jenkins y Jones, 1980).

Los rangos óptimos de los metales pesados en suelos y sedimentos son muy estrechos; tanto las deficiencias como los excesos pueden dar origen a serios problemas ambientales. La calificación de los contenidos de los sedimentos y suelos en “altos, anómalos o normales” puede tener sentido si se comparan con estándares derivados del análisis de suelos pedológicamente semejantes o áreas con parámetros parecidos. Muchos suelos fueron caracterizados como altamente contaminados debido a su situación geográfica (por ejemplo, lugares situados en las proximidades de fábricas altamente contaminantes), a los resultados de sus análisis considerados como altos, o porque sus valores parecieron elevados cuando se compararon con

rangos dados por otros autores en otros ambientes y que de alguna manera han tenido efectos adversos en plantas, animales y el propio hombre.

Cuando las fuentes de contaminación tienen su origen en actividades humanas, la presencia más severa del contaminante se encuentra en los primeros 3 km y descende progresivamente de manera curvilínea, hasta que alcanza los niveles normales que puede ser entre los 10 y 15 km (Lagerwerff *et al.*, 1973; Wixson y Jennet, 1975; Davies, 1980). Las aglomeraciones urbanas son, desde luego, consideradas como fuentes contaminantes; lo mismo que en las inmediaciones de las autopistas o carreteras con intenso tráfico vehicular (Warren y Delavault, 1960; Berth *et al.*, 1973; Ward *et al.*, 1974).

Los contaminantes procedentes de la industria y de las regiones mineras entran al sistema de drenaje en forma de solutos. El agua residual es transportada hacia lagunas de sedimentación para permitir la sedimentación de las partículas más finas. Teóricamente, el agua que se incorpora al sistema de drenaje lo hace de manera óptima. Cuando no hay medidas de tratamiento o éstas son parciales, tanto los efluentes industriales como el drenaje a través de los depósitos de materias primas pueden afectar profundamente la red de drenaje local, con consecuencias ambientales severas.

Lewin y colaboradores (1974) investigaron las fuentes de contaminación en una cuenca en el este de Gales con sistemas hidrológicos contaminados por actividades mineras; concluyeron que las fuentes de sedimentos y solutos fueron espacialmente distintas. Los contaminantes de origen industrial que ingresan a la red de drenaje se unen a un complejo sistema preexistente de retención, transportación y redistribución de sólidos; el destino de estos contaminantes es mejor entendido mediante un análisis de los procesos geomorfológicos fluviales.

Ridgway y colaboradores (1994) llevaron a cabo un estudio para determinar una posible contaminación por actividades mineras actuales y pasadas, partiendo de un muestreo de sedimentos en terrazas en las cuencas de los ríos Guanajuato y de la Laja. Esos autores llegaron a la conclusión de que los datos geoquímicos obtenidos no muestran una variación sistemática que pruebe una evidencia concluyente de contaminación por metales

a partir de las actividades mineras. Sólo encontraron una pequeña diferencia entre los niveles pre- y post-antropogénicos de metales potencialmente tóxicos. Mencionan, como de particular interés, la presencia ocasional en algunos horizontes de elevadas cantidades de arsénico, así como de algunos metales asociados a la actividad minera.

El informe técnico preparado por el *British Geological Survey* (1995) menciona que el Cr proveniente de los efluentes de la industria de la región de León no se encuentra en sus mantos acuíferos como consecuencia del riego. Más bien, este riego es el que distribuye al Cr en los primeros centímetros del suelo y se precipita en los sedimentos de canales y lagunas. Las concentraciones de Cr en las aguas que se infiltran están en los límites de detección.

Otro tipo de contaminación, muy restringida a ciertas partes de la zona de estudio, es la debida a transporte mecánico o gravitacional, causada por los terreros de minas o jales de plantas de beneficio o de algún depósito contaminante que pudo moverse pendiente abajo y causar problemas de contaminación (Ramos, 1991).

4.1.2 Agua y transporte

El agua transporta pequeñas cantidades de metales pesados. Es el primer vehículo en relación con la energía del sistema hidrológico. Su variabilidad en términos de flujo totales y anuales, así como los períodos de inundación, influyen grandemente en el movimiento del sedimento a través del sistema. La calidad del agua es la más inmediata causa relacionada con los metales pesados debido al uso que le da el hombre. Los sedimentos generalmente contienen una mayor concentración de contaminantes que el agua. En otras palabras, el flujo de agua actúa como un importante agente de concentración y distribución de metales pesados. La concentración de metales pesados en el agua puede ser muy baja, pero la cantidad de agua que pasa a través del sistema hidrológico es muy grande; por consiguiente, al considerar el flujo completo, la cantidad puede hacer aumentar las concentraciones bajas (Graf, 1994). El transporte del aluvión desde su origen es un proceso lento y complejo. El aluvión y el sedimento del drenaje se derivan principalmente de la regolita y del suelo erosionados de las partes

superficiales de una cuenca; por lo tanto, representan una muestra compuesta de rocas y sedimentos; por ello, también pueden ser considerados como parte importante de una evaluación geoquímica regional (Thornton y Webb, 1980).

Los sedimentos de ríos, arroyos, canales y presas representan la aproximación natural más cercana a la muestra compuesta, procedente del intemperismo del material geológico y de la erosión del suelo, río arriba a partir del sitio de muestreo (Smith, 1985). Los sedimentos de ríos, arroyos, presas y lagos constituyen los materiales más importantes, ya que son la fuente más significativa en la localización de metales pesados (Horowitz, 1985; Fergusson, 1989). Por otro lado, el agua a través del drenaje constituye un agente importante en la alteración del paisaje, así como del intemperismo y de la erosión; además, provee a ríos y arroyos de elementos disueltos o en suspensión, quienes los transportan y redepositan en cualquier lugar río abajo. Este material suspendido en los ríos puede ser depositado dentro de la cuenca como aluvión y posteriormente transformarse en material parental del suelo.

Los procesos físicos y químicos relacionados con la dispersión fluvial significan que aun las formas iónicas de los metales contaminantes pueden incorporarse a los suelos aluviales y permanecer ahí hasta que estos suelos sean erosionados posteriormente por procesos normales de desarrollo de canales. Por ejemplo, Hakonson y colaboradores (1981), determinaron que la erosión de suelos por agua y viento es el principal medio de transporte de plutonio en un ecosistema terrestre. Graf y colaboradores (1991) concluyeron que los metales estudiados por ellos estuvieron más fuertemente asociados a aspectos espaciales de los procesos fluviales y dispersión que a la variabilidad asociada con el tamaño de la partícula, aspecto que contrasta con lo señalado por otros autores que afirman que el factor más importante en el control de la capacidad de retención de los metales, tanto en sedimentos en suspensión como en los sedimentos de fondo de ríos o arroyos, es el tamaño de la partícula del grano (Gibbs, 1973; Horowitz, 1974; Thorne y Nickless, 1981; de Groot *et al.*, 1982).

La composición de una matriz aluvial es aumentada por la adsorción y precipitación de elementos disueltos en el río, lo que se traduce en una transformación de

ganancia geoquímica en cualquier cuenca de depósito. No obstante, en la actualidad, lo anterior constituye un riesgo ecológico por la incorporación de contaminantes a la corriente.

Por otro lado, los planos de inundación contienen los materiales depositados durante un período de tiempo prolongado, ya que por lo general contienen los materiales que se encuentran cuenca arriba. Mediante los factores y procesos formadores, estos sedimentos se transforman posteriormente en suelos.

Durante el transporte fluvial, los solutos pueden reaccionar con otros constituyentes disueltos, así como con sedimentos suspendidos. Schroeder y Lee (1974) estudiaron las transformaciones de Cr(III) y Cr(IV) en condiciones simuladas de agua natural; encontraron que fácilmente eran transformados, dado que la reducción pudo haber sido afectada por el Fe(II), sulfuros disueltos y ciertos grupos orgánicos, mientras que la oxidación pudo ocurrir con la presencia del MnO_2 y O_2 .

Los metales pesados tienden a ser retenidos por las partículas más finas (Larsen y Widdowson, 1971; Nair y Cottenie, 1971). El transporte de sedimentos tiene la particularidad de separar las partículas durante su transporte por procesos fluviales, lo que facilita la separación física de las partículas pequeñas y ligeras de las pesadas. Este depósito resulta errático y discontinuo. La identificación de estos materiales finos en arroyos intermitentes permite un muestreo más eficiente. Los materiales más finos viajan más lejos, hasta que alcanzan la mitad o la parte más baja de la corriente o de la presa; estos materiales reflejan en buena medida los materiales en suspensión durante el transporte a lo largo de la trayectoria de la corriente (Graf, 1994).

La capacidad que tiene la materia orgánica para concentrar metales pesados en suelos y sedimentos, tanto en suspensión como en los del fondo de las corrientes, es bien conocida (Kononova, 1966; Nriagu y Cooker, 1980; Förstner, 1982). Las arcillas también pueden actuar como concentradores importantes de metales pesados en sedimentos (Hirst, 1962; Jenne, 1976).

4.1.3 Los metales pesados en el perfil del suelo

Cuando los materiales parentales han sido mezclados y redistribuidos por el transporte fluvial, el contenido del material parental puede estar enmascarado, modificado

o su efecto dirigido en el sentido de la corriente. La influencia del material parental en el contenido total y forma del elemento es modificado de diferentes maneras por los procesos pedogenéticos, que a la vez pueden conducir a la movilización y redistribución de los elementos traza dentro del perfil y entre los suelos circundantes. El grado en el que la relación material parental-suelo superficial es afectada, depende de la facilidad de intemperismo de los minerales primarios y de la etapa de desarrollo del suelo (FAO, 1990).

En el caso de las cuencas bajo estudio, los suelos de mayor significado económico son los vertisoles pélicos de origen aluvial, desarrollados en su mayor parte sobre tobas ácidas. El material que subyace al suelo tiene escasa influencia en la presencia de los metales pesados; más bien, los materiales provenientes de los diferentes tipos de roca de la sierra de Guanajuato, de origen coluvio-aluvial, son los que determinan el *status* natural de los metales. La distribución, forma y movilidad del elemento dentro del perfil es afectada, entre otros aspectos, por la textura arcillosa, drenaje lento, contenidos de materia orgánica, procesos de pedoargilización, junto con otras propiedades como pH, Eh, capacidad de intercambio catiónico y contenidos de sesquióxidos de Fe y Mn.

La distribución de los metales traza en los perfiles tiende a enriquecerse en la superficie del suelo, en especial en los horizontes orgánicos. En la literatura existen múltiples ejemplos en este sentido, tanto en zonas agrícolas (Mitchell, 1964; Fleming y Ryan, 1964; John, 1971), como industriales (Kovda, 1974; Ragaini *et al.*, 1977) y mineras (Bolter *et al.*, 1972; Thornton y Webb *et al.*, 1975). El humus y los compuestos orgánicos solubles ejercen un control considerable en la reacción con los elementos traza, además de que afectan la solubilidad y movilidad de los metales traza (Hodgson, 1963; Lisk, 1972, *in* Davies, 1980).

Sin embargo, existen casos en que los elementos son redistribuidos en el perfil del suelo, en especial si provienen del intemperismo del material parental o fueron agregados por procesos de contaminación de manera que indujeron a esta situación. Las concentraciones de metales pesados a determinadas profundidades se atribuyen a las aportaciones irregulares de metales y a su removilización; además, los análisis de correlaciones muestran que las diversas fuentes y mecanismos de acumulación están influenciados por la

distribución del metal dentro de la cuenca (Ramanathan *et al.*, 1996).

Purves (1977) concluyó que la contaminación del suelo respecto al Cu, Pb y Zn parece ser virtualmente permanente. Frissel y colaboradores (1974) experimentaron con Hg en columnas de suelos durante seis meses y concluyeron que prácticamente no hubo pérdida del elemento. Korte y colaboradores (1975) confirmaron que el Pb, en especial, permaneció inmóvil en el suelo.

4.1.4 Los mapas de distribución

Una de las mayores aplicaciones de los mapas de dispersión de ciertos elementos, es la de identificar las áreas con riesgos latentes o reales de contaminación. Los mapas constituyen un catálogo útil para proporcionar una información básica en la distribución actual y potencial de los elementos contaminantes, como pueden ser el Cd, Pb o Cr en relación con la composición de la roca y su mineralogía y, al mismo tiempo, proporciona evidencias de contaminación regional, debido a las actividades antropogénicas actuales y pasadas.

Los mapas geológicos no reflejan los cambios en facies geoquímicas dentro de las formaciones ni dan suficiente información acerca del origen y composición del material transportado. Los mapas geoquímicos realizados en otros países, basados en sedimentos de ríos y arroyos, reflejan la composición de suelos de origen aluvial e *in situ*. Lo ideal sería, entonces, apoyarse en ambos tipos de mapas. Debido a la carencia en nuestro país de mapas geoquímicos, el muestreo de suelos y sedimentos resultó prolongado y costoso.

En algunos países, se han llevado a cabo levantamientos geoquímicos para determinar la distribución de elementos traza basados en muestreos de sedimentos de arroyos y ríos. Sin embargo, la extrema complejidad geológica que presenta la sierra de Guanajuato, constituye un problema adicional para determinar, *a priori* o mediante una aproximación, un resultado cercano a la realidad de las características químicas y mineralógicas de los sedimentos resultantes; por ello, hubo necesidad de un muestreo relativamente intensivo y sistemático, tanto en suelos como en sedimentos.

Kinniburgh y Beckett (1983) llevaron a cabo levantamientos de metales pesados comparando

muestreos entre sedimentos de arroyos con muestreos de suelos en áreas sin mineralización, concluyendo que los sedimentos no fueron útiles para predecir concentraciones de metales pesados en suelos.

4.1.5 El uso de los GIS

El uso de los sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) se ha incrementado últimamente en muchos terrenos de la investigación; por ejemplo, Tim y Jolly (1994) realizaron un trabajo para evaluar la contaminación en un área agrícola, usando un GIS y un modelo hidrológico. Ese estudio demostró la utilidad para caracterizar las fuentes de difusión de los contaminantes a nivel de paisaje. Pueden mencionarse otros estudios con temas parecidos: Hession y Shanholtz (1988), Young y colaboradores (1989), y Ribaudó (1992); con tema hidrológico: Zhang y colaboradores (1990), Halliday y Wolfe (1991), y Hammock y Lorenz (1992); estudios de erosión: Blaszczynki (1992), De Roo y colaboradores (1989), etc.

4.2 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE CADA ELEMENTO

4.2.1 Arsénico

El arsénico se distribuye casi de manera uniforme en los principales tipos de roca; sus concentraciones comunes varían de 0.5 a 2.5 mg·kg⁻¹, pero en sedimentos arcillosos, el valor promedio puede ser hasta de 13 mg·kg⁻¹. Este elemento tiene una gran afinidad para formar minerales. El arsénico está altamente asociado a depósitos minerales de diversos metales, por lo que es utilizado comúnmente en prospecciones geoquímicas. Aunque los minerales y compuestos son altamente solubles, la migración del As está muy limitada, debido a la fuerte adsorción por arcillas, hidróxidos y materia orgánica. Las reacciones del As están regidas por su estado de oxidación; sin embargo, los arseniatos son conocidos por ser altamente fijados por los componentes del suelo como las arcillas, geles de fósforo, humus y calcio; los más activos en la retención de arsénico son el hierro hidratado y los óxidos de aluminio. Huang (1975) señala que en la parte externa de los minerales micáceos, el hidróxido de Al es la parte esencial en la retención del arsénico. Norrish (1975) apunta que existe

una fuerte asociación del As con Fe (especialmente goethita).

Los niveles más bajos de As se encuentran en suelos arenosos, especialmente los derivados de granito; mientras que los más altos están relacionados con suelos aluviales y suelos ricos en materia orgánica. Los suelos con horizontes sulfúricos, son reportados con una alta proporción de As nativo, de 30 a 50 mg·kg⁻¹ (Dudas, 1987). En Canadá, se ha encontrado, en suelos cercanos a industrias procesadoras de arsénico, rangos que van de 33 a 2,000 mg·kg⁻¹ (Temple *et al.*, 1977). En Japón la aplicación de pesticidas ha incrementado los niveles de As en los suelos, con rangos que van de 31 a 625 mg·kg⁻¹ (Elfving *et al.*, 1975). La Comunidad Económica Europea establece como concentración máxima aceptable de As en suelos 20 mg·kg⁻¹, mientras que Canadá lo establece en 14 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

4.2.2 Cadmio

La existencia del Cd en rocas magmáticas y sedimentarias generalmente no excede de 0.3 mg·kg⁻¹; las mayores concentraciones se encuentran en pizarras y esquistos. Desde el punto de vista de su geoquímica, el Cd está fuertemente asociado al Zn y al S, variando la concentración de Cd en proporción directa a la del Zn (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Es uno de los elementos más tóxicos para los organismos cuando se encuentra biodisponible en grandes concentraciones, además de que se caracteriza por tener una gran persistencia en el suelo (Soon y Bates, 1982).

El Cd en suelos no contaminados se relaciona estrechamente con el material parental del que provienen. El contenido medio en suelos normales se encuentra entre 0.06 y 1.1 mg·kg⁻¹. En suelos derivados de rocas ígneas, se reportan de 0.1 a 0.3 mg·kg⁻¹. En suelos derivados de rocas metamórficas, los intervalos reportados varían de 0.1 a 1.0 mg·kg⁻¹. En cambio, para los suelos que provienen de material sedimentario los rangos van de 3.0 a 11.0 ppm. La presencia más alta de Cd en suelos se encuentra en los Histosoles, con 0.78 mg·kg⁻¹, y la más baja en los Podzoles, con un promedio de 0.37 mg·kg⁻¹ (Aller y Bernal, 1986). De acuerdo a Alloway (1990), los valores más comunes aparecen en muchos suelos agrícolas sin problema de contaminación, los que fluctúan entre 0.2 y 1.0

mg·kg⁻¹. Los fertilizantes fosfatados son también una fuente de adición de Cd a los suelos, ya que los rangos pueden variar de 3.6 a 92.0 mg·kg⁻¹ (Williams y David, 1976). El depósito de Cd atmosférico y la aplicación de fertilizantes fosfatados incrementan los contenidos de Cd en la capa superficial del suelo (Jones *et al.*, 1987). Las concentraciones máximas permisibles en suelos en diferentes países varían de 1.0 a 1.6 mg·kg⁻¹ en Estados Unidos, Canadá y la Comunidad Económica Europea (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Para sedimentos, Müller *et al.* (1992) señalan que el límite permisible debe ser de 0.9 mg·kg⁻¹; en cambio, Fergusson (1989) sugiere que el límite permisible para cadmio en sedimentos debe ser de 0.3 mg·kg⁻¹.

4.2.3 Cobalto

Las rocas más significativas en contenidos de cobalto son las ultrabásicas, como dunita y peridotita, así como el producto de su metamorfismo, la serpentina, tienen de 100 a 200 mg·kg⁻¹ de Co; las rocas básicas e intermedias, como basalto y andesita, de 30 a 45 mg·kg⁻¹; mientras que las rocas ácidas, como granito y riolita, sólo de 5 a 10 mg·kg⁻¹ (Aubert y Pinta, 1977). El contenido de Co en las rocas sedimentarias refleja la composición del material del que se originan; por ejemplo, las pizarras formadas a partir de rocas ultrabásicas y básicas fácilmente intemperizables son relativamente altas en Co, de 10 a 50 mg·kg⁻¹, mientras que las areniscas formadas de rocas ácidas ricas en sílice tienen concentraciones mucho más bajas (Mitchell, 1964).

Los minerales de cobalto más frecuentes son cobaltita, skutterudita, linneíta, eritrita, etc. El ciclo geoquímico del Co está unido a los del Fe y el Mn; su distribución está determinada fuertemente por óxidos de Mn y por la presencia de materia orgánica (Brown, 1969).

Los niveles normales en suelos están presentes en el rango de 1 a 40 mg·kg⁻¹, con mayor frecuencia entre 3 y 15 mg·kg⁻¹. La concentración media reportada para la mayoría de los suelos es de 8.2 a 8.5 mg·kg⁻¹; aunque han sido encontrados valores de 2,600 mg·kg⁻¹ para un suelo de Zaire y más de 1,000 mg·kg⁻¹ para suelos derivados de serpentinas en Nueva Zelanda, siendo el valor promedio de 400 mg·kg⁻¹ (Aller, *et al.*, 1989). Canadá ha establecido en 20 mg·kg⁻¹ el valor máximo

permisible en suelos (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

4.2.4 Cobre

El Cu se presenta en numerosas rocas formando una gran variedad de minerales; por ejemplo, calcopirita, cuprita, malaquita, bornita, azurita, etc. (Vassallo y Martínez, 1988). El Cu es considerado como uno de los metales más móviles en el ambiente de la superficie, donde las cantidades de Cu exceden la capacidad de adsorción y donde las condiciones ácidas y oxidantes pueden establecer cantidades apreciables en solución (Mortvedt, 1983). El Cu es el más móvil de los metales pesados, aunque también presenta una alta reactividad con numerosos compuestos orgánicos e inorgánicos, formando otros bastante estables, lo que provoca que se inmovilice; su inmovilidad en suelos ligeros es notable; en cambio, es lenta en suelos francos y muy lenta en suelos orgánicos. El material parental y los procesos de formación del suelo, determinan el estatus del cobre en este medio (Sheppard y Thibault, 1991).

Alloway (1990) muestra una tabla de rangos de concentraciones de Cu típicas en suelos; por ejemplo, en Arenosoles los rangos varían de 2 a 10 mg·kg⁻¹; en Gleysoles con altos contenidos de arcilla, de 10 a 27 mg·kg⁻¹. Según Bohn *et al.* (1985), los contenidos normales de cobre en suelos se ubican en un rango que va de 2 a 100 mg·kg⁻¹. Por otro lado, las cantidades anormales de este elemento en suelos pueden deberse a la existencia natural de procesos de mineralización del cobre o, también, a la actividad industrial, siendo la metal-mecánica y la relacionada con el petróleo, las más importantes (Valdares *et al.*, 1983; Williams y David, 1987). Las cantidades mayores de Cu en suelos agrícolas están asociadas al uso de agroquímicos (Baker, 1990). Para cobre en sedimentos, Müller *et al.* (1992) proponen como límite máximo permisible, 90 mg·kg⁻¹.

4.2.5 Cromo

Las rocas máficas y ultramáficas son las más ricas en cromo, con rangos que pueden ir de 100 a 3,400 mg·kg⁻¹; en cambio, para rocas ácidas y sedimentarias, los valores de concentración varían comúnmente de 5 a 120 mg·kg⁻¹; y en rocas basálticas, el rango

van de 40 a 600 mg·kg⁻¹. Los minerales de cromo más importantes son cromita, daubrelita, estechtita, formacita, bellita, entre otros (Grove y Willis, 1980). La cromita es el mineral más característico asociado a rocas ultramáficas y máficas (Nriagu y Nieboer, 1988). El Cr (III) reemplaza al Fe³⁺ y Al³⁺ en otros muchos minerales, como granates, micas, turmalinas y cloritas. El Cr puede existir en estado oxidado; las formas más estables y comunes son Cr(III), que es menos móvil, adsorbiéndose fuertemente a las partículas, y Cr(VI) que existe como anión y es fácilmente extraíble de las partículas del suelo y sedimento; ésta es la forma más tóxica.

Los contenidos altos de Cr en suelos se encuentran en aquéllos derivados de basaltos y serpentinas, con rangos que van de 5 a 300 mg·kg⁻¹ (Bowen, 1979; Bloomfield y Pruden, 1980). En suelos derivados de serpentina, se reportan valores entre 1,000 y 3,000 mg·kg⁻¹ y Shacklette y Borngen (1984) encontraron rangos que van de 1 a 2,000 mg·kg⁻¹. El Cr en suelos superficiales se incrementa a través de precipitación a partir de las aguas residuales provenientes de diversas industrias. La acumulación se da principalmente en suelos superficiales y arenosos, aunque se ha encontrado hasta 3 m de profundidad, con concentraciones que van de 112 a 10,000 mg·kg⁻¹ (McClellan *et al.*, 1987). Bohn *et al.* (1985) consideran que el rango normal de Cr en suelos puede variar de 5 a 1,000 mg·kg⁻¹. Para la Comunidad Económica Europea, la concentración máxima permisible de cromo en suelos es de 50 mg·kg⁻¹; en cambio, para el Canadá, es de 120 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Para cromo total en sedimentos, Müller *et al.* (1992) consideran como límite máximo permisible, 90 mg·kg⁻¹.

4.2.6 Hierro

El hierro es el elemento más abundante en la corteza terrestre; se encuentra en cantidades elevadas en rocas magmáticas. Su geoquímica está determinada por sus estados de valencia, que cambian fácilmente y que están unidos a ciclos del oxígeno, azufre y carbón (Aller *et al.*, 1989).

En suelos, el hierro se encuentra en un rango que va de 0.5 a 5%. Durante el intemperismo, las reacciones del Fe dependen de las condiciones en el sistema Eh-pH, así como de las condiciones de oxidación; estas

últimas y las alcalinas provocan la precipitación del Fe; las condiciones ácidas y reductoras favorecen la disolución de minerales de Fe.

En suelos, se encuentra principalmente en forma de complejos orgánicos. La concentración de Fe en la solución del suelo varía de 0.030 a 0.450 % dependiendo de su estado reducido y del contenido de materia orgánica; en suelos muy ácidos es posible encontrar concentraciones de 2 % (Garnett *et al.*, 1987). El Fe soluble es extremadamente bajo en suelos no aireados y en condiciones de pH elevados. El Fe inorgánico soluble es más alto en suelos ácidos que en los suelos neutros o calcáreos (Dekock, 1981).

4.2.7 Manganeseo

Las concentraciones mayores de Mn se encuentran en rocas ígneas básicas, como el basalto y el gabro, debido a que básicamente substituye al Fe^{2+} en los octaedros de las estructuras de los minerales de los silicatos ferromagnesianos (Gilkes y McKenzie, 1988). Los contenidos de manganeso en las rocas varían ampliamente; por ejemplo, en rocas ígneas ácidas, como el granito o la riolita, varían de 200 a 1,000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En rocas sedimentarias, como la caliza, los rangos pueden ir de 400 a 600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y en areniscas de 20 a 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Aubert y Pinta, 1977). El manganeso se asocia a minerales primarios, óxidos e hidróxidos, como pirolusita, manganita, braunita, rodonita, rodocrosita, etc.

El manganeso es el elemento que origina la mayor variedad y número de complejos en el suelo. La solubilidad del Mn^{4+} es extremadamente baja; el Mn^{3+} es altamente inestable en el ambiente del suelo; la mayor parte del manganeso en solución está presente como Mn^{2+} (Heenan y Campbell, 1980); la disponibilidad del Mn compite con otros cationes, especialmente con Ca y Mg. Las condiciones oxidantes reducen su disponibilidad, las condiciones reductoras lo hacen fácilmente disponible, permitiendo que se llegue a niveles tóxicos (Cheshire y Berrow, 1977). La máxima toxicidad de Mn se presenta en suelos con valores de pH inferiores a 5.5, dependiendo de las condiciones de aereación del suelo, contenido de agua y actividad biológica (Fleming *et al.*, 1968). Smith (1990) reporta que, en suelos derivados de serpentinas, el Mn total llega a 1,500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En Espodosoles

derivados de gneis granítico, el Mn total es de 1,000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y en suelos derivados de riolitas los contenidos variaron de 1,000 a 1,200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

4.2.8 Mercurio

El contenido de mercurio en todas las rocas magmáticas es muy bajo, no excediendo de 0.01 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. En calizas y dolomitas, los rangos varían de 0.04 a 0.05 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; en cambio, se reporta una mayor concentración para rocas sedimentarias de origen terrígeno, incluyendo sedimentos arcillosos, en particular en pizarras y esquistos ricos en materia orgánica, de 0.20 a 0.40 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Las características geoquímicas más importantes son: afinidad para establecer uniones muy fuertes con el S (HgS, cinabrio, que es el mineral de mercurio más común), formación de compuestos organomercurícos relativamente estables en medios acuosos y la volatilidad del Hg elemental.

Generalmente, los suelos orgánicos tienen una mayor concentración de mercurio que los suelos minerales. Esto es debido, básicamente, a la capacidad que tiene el humus de ligarse con el Hg (Johansson *et al.*, 1988). Datos reportados para diferentes suelos en diferentes ambientes señalan una concentración media de Hg que no sobrepasa las 400 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Los niveles medios más elevados se reportaron en unos Histosoles del Canadá (400 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). En suelos inundados en Japón y Vietnam, se reportaron 350 y 350 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente. De igual manera, en suelos orgánicos y arcillosos de Estados Unidos, las concentraciones promedio más altas se encontraron en Histosoles con un contenido de 280 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ y en suelos limosos con 130 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Probablemente los suelos orgánicos y los inundados retengan una mayor cantidad de Hg. De acuerdo a estudios anteriores, el contenido medio de Hg en suelos, puede ser considerado en el rango de 50 a 300 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, dependiendo de la unidad de suelo de que se trate. Por consiguiente, los contenidos de Hg que sobrepasen estos valores, pueden ser considerados como contaminación antropogénica o proceder de cualquiera otra fuente (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Finnecy y Pearce (1986) establecen como concentración máxima permisible para condiciones europeas 2.0 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; mientras que Page *et al.* (1988) sugieren que para condiciones canadienses el límite permisible es 0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

4.2.9 Níquel

El contenido de níquel varía de acuerdo a los diferentes tipos de rocas; las rocas ultramáficas, como peridotita, dunita y piroxenita, tienen las mayores concentraciones, seguidas por las rocas máficas, como gabro y basalto, y las rocas intermedias. Las rocas ígneas ricas en ferromagnesianos, como piroxenos, olivinos, biotita y clorita, son ricas en níquel. Las rocas ígneas ácidas tienen menos Ni que las anteriores y las rocas alcalinas y sedimentarias se encuentran en los niveles más bajos (McGrath y Smith, 1996).

En suelos, el Ni puede variar desde 5 hasta 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, dependiendo del material parental, pero en suelos derivados de rocas ígneas ácidas el contenido puede ser inferior a 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Berrow y Reaves, 1986); en cambio, para suelos derivados de rocas básicas, volcánicas y serpentinitas, el Ni puede ser elevado (Nriagu, 1980). Brooks (1987) reporta que en suelos derivados de serpentinas, los rangos varían entre 100 y 7,000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Los niveles críticos de Ni en la solución del suelo pueden encontrarse entre 0.3 y 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Narwal *et al.*, 1983). La contaminación de Ni en suelos proviene principalmente de emisiones de industrias fundidoras y de la utilización de agroquímicos (Singh y Narwal, 1984). La concentración máxima de Ni permisible en suelos por la Comunidad Económica Europea es de 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que para Canadá es de 32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

4.2.10 Plomo

Generalmente, el plomo se encuentra como elemento traza en rocas y suelos, por lo que generalmente existe un incremento en la concentración del plomo que va desde las rocas ultramáficas, con un promedio de 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, hasta esquistos negros, con un promedio de 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Davies, 1990). Presenta una tendencia a concentrarse en rocas magmáticas y en sedimentos arcillosos en rangos que van de 10 a 40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En rocas ultrabásicas y en sedimentos calcáreos, los niveles pueden variar de 0.1 a 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Gough *et al.*, 1979). Por sus propiedades calcófilas, el plomo se encuentra en estado natural principalmente como galena (sulfuro de plomo); forma, además, otros sulfuros, seleniuros y silicatos, entre los que se pueden mencionar claustalita, cerusita, anglesita, etc. (Schalscha *et al.*, 1987).

Los contenidos de plomo varían de 22 a 28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de acuerdo a las diferentes unidades de suelos, siendo los Histosoles los de mayor concentración (Linn and Jackson, 1982). En suelos no contaminados, los contenidos de plomo pueden variar ampliamente; por ejemplo, Nriagu (1978) reporta un promedio de 17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Ure y Berrow (1982) señalan un promedio de 29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Davies (1983) considera un rango que va de 15 a 106 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Bohn *et al.* (1985) indican que los rangos normales en suelos pueden variar de 2 a 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El plomo se acumula particularmente en la capa superficial del suelo; se ha establecido, según Koeppel (1981), como valor límite superior, 70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para un suelo no contaminado, dado que se ha señalado un promedio de 12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en una región alejada de posibles contaminantes; además, se sugiere que valores por encima de 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ pueden reflejar efectos contaminantes.

Cuando el plomo es liberado en el medio ambiente, su permanencia en él es considerable comparada con otros contaminantes; como resultado de esto, el Pb y sus compuestos tienden a acumularse en suelos y sedimentos, donde, debido a su baja solubilidad, permanecen accesibles para introducirse en la cadena alimenticia (Davies, 1990). Para la Comunidad Económica Europea, la concentración máxima permisible en suelos es de 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que para Canadá es de 60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Müller *et al.* (1992) consideran que para que un sedimento deba ser considerado como contaminado, debe tener un mínimo de 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Fergusson considera en 88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ este límite.

4.2.11 Zinc

En rocas magmáticas, el contenido de zinc total varía de 40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en granitos, a 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en rocas basálticas; en rocas sedimentarias, como esquistos y pizarras, varía de 80 a 120 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; mientras que en areniscas, calizas y dolomitas, va de 10 a 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Krauskopf, 1972). El zinc se encuentra en la naturaleza en grandes cantidades en minerales como esfalerita, calamina, wilemita, adamita, hidrozincita, etc. (Lindsay, 1979).

Los contenidos totales de zinc en los suelos dependen primordialmente de la composición del material parental. Durante los procesos de intemperismo,

el zinc se libera en condiciones ácidas y oxidantes. La solubilidad está controlada por los minerales arcillosos que lo adsorben, por los óxidos e hidróxidos, y por el pH del medio (Davies, 1977). La movilidad en suelos está marcada por la presencia de agentes quelatantes en la solución del suelo (Schnitzer y Khan, 1978). La toxicidad proviene del uso excesivo de fertilizantes que contienen zinc y por contaminación del medio ambiente, presentándose principalmente en suelos ácidos con drenaje deficiente (Miller *et al.*, 1983). Kabata-Pendias (1984) reporta que los valores más altos se localizaron en suelos aluviales (Solonchaks), mientras que los valores más bajos se encontraron en suelos ligeramente

minerales y ligeramente orgánicos. La concentración máxima aceptable para la Comunidad Económica Europea es de 150 mg·kg⁻¹, mientras que Canadá la establece en 220 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Alloway (1990) considera como rango normal en suelos, contenidos que van de 10 a 300 mg·kg⁻¹. Un valor máximo de 100 mg·kg⁻¹ es considerado por Müller *et al.* (1992) como el límite máximo permisible en sedimentos.

En las tablas 1 y 2 se muestra, en forma resumida, los límites máximos permisibles de la mayoría de los elementos en estudio, así como las características generales de cada elemento.

Tabla 1. Límites máximos permisibles en suelos y sedimentos (mg·kg⁻¹).

Elemento	Suelos U.E.	Suelos Canadá	Sedimentos	Referencias
As	20	14		Kabata-Pendias y Pendias, 1992
Cd	1.6	1.4	0.3 0.9	Fergusson, 1989 Müller <i>et al.</i> , 1992
Co		20		Kabata-Pendias y Pendias, 1992
Cu	50	100	90	Müller <i>et al.</i> , 1992
Hg	0.2	0.5		Finnecey y Pearce, 1986; Page <i>et al.</i> , 1988
Ni	30	32		Kabata-Pendias y Pendias, 1992
Pb	50	60	20 80	Müller <i>et al.</i> , 1992 Fergusson, 1989
Zn	150	220	100	Müller <i>et al.</i> , 1992

Tabla 2. Rangos de concentración de elementos traza en rocas y suelos (mg·kg⁻¹).

Elemento	Rocas		Suelos		Referencia
	Tipo	Rango	Tipo	Rango	
As	Ultramáficas	0.5–1.0	Arenoso	1.1–28.9	Frank <i>et al.</i> , 1976
	Máficas	0.6–2.0	sobre r. máfica	5.0–8.2	Ure y Berrow, 1982
	Ácidas	1.0–2.6	Chernozem	1.9–23	Shacklette <i>et al.</i> , 1984
	Sedimentarias	1.0–13.0	Histosol	0.1–48	Shacklette <i>et al.</i> , 1984
Cd	Ultramáficas	0.03–0.05	Derivados de r. ígnea	0.1–0.3	Aller y Bernal, 1986
	Máficas	0.13–0.22	Derivados de r. metamórfica	0.1–1.0	Aller y Bernal, 1986
	Ácidas (granitos)	0.09–0.20	Derivados de r. sedimentaria	3.0–11	Aller y Bernal, 1986
	Ácidos (volcánicas)	0.09–0.20	Histosol	<0.78	Aller y Bernal, 1986
	Sedimentarias	0.03–0.30			

Tabla 2. Rangos de concentración de elementos traza en rocas y suelos (mg·kg⁻¹). Continuación.

Elemento	Rocas		Suelos		Referencia
	Tipo	Rango	Tipo	Rango	
Co	Ultramáficas	100–200	Normal	1.0–40	Aller <i>et al.</i> , 1989
	Máficas	35–50	Arenoso	0.4–20	Kubota, 1968
	Ácidas (granitos)	1.0–7.0	Arcilloso	3.0–30	Kubota, 1968
	Ácidas (volcánicas)	15	Rendzina	10.0–30	Fleming <i>et al.</i> , 1968
	Sedimentarias	0.1–20	Histosol	3.0–10	Kubota, 1968
Cu	Ultramáficas	10–40	Normal	2.0–100	Bohn, 1985
	Máficas	60–120	Arenoso	2.0–10	Alloway, 1990
	Ácidas (granitos)	10–30	Arcilloso	10–27	Alloway, 1990
	Ácidas (volcánicas)	5–20	Rendzina	7–70	Shacklette y Boerngen, 1984
	Sedimentarias	2–60	Histosol	5–100	Shacklette y Boerngen, 1984
Cr	Ultramáficas	1600–3400	derivado de serpentinas	1000–3000	Shacklette y Boerngen, 1984
	Máficas	170–200	derivado de basaltos	1–2,000	Bowen, 1979
	Ácidas (granitos)	4–25	Arenoso	3–200	Shacklette y Boerngen, 1984
	Ácidas (volcánicas)	4–16	Arcilloso	20–100	Shacklette y Boerngen, 1984
	Sedimentarias	5–120	Histosol	1–100	Shacklette y Boerngen, 1984
Fe (%)	Ultramáficas	9.4–10.0	Normal	0.5–5.0	Aller <i>et al.</i> , 1989
	Máficas	5.6–8.7			
	Ácidas (granitos)	1.4–2.7			
	Ácidas (volcánicas)	2.6			
	Sedimentarias	0.4–4.8			
Mn	Ultramáficas	850–1500	arenoso	15–1,500	
	Máficas	1200–2000	arcilloso	110–1,060	
	Ácidas (granitos)	350–600	Rendzina	70–2,000	Shacklette y Boerngen, 1984
	Ácidas (volcánicas)	600–1200	Histosol	20–2,200	Kabata-Pendias y Piotrowska, 1971
	Sedimentarias	100–1000			
Hg	Ultramáficas	0.0x	Arenoso	0.02–0.32	Erdman <i>et al.</i> , 1976
	Máficas	0.0x	Cambisol	0.45–1.1	van Faassen, 1973
	Ácidas (granitos)	0.08	Rendzina	0.01–0.5	Shacklette y Boerngen, 1984
	Ácidas (volcánicas)	0.0x	Histosol	0.05–1.1	Frank <i>et al.</i> , 1976
	Sedimentarias	0.10–0.40		0.03–0.1	Barghigiani <i>et al.</i> , 1987

Tabla 2. Rangos de concentración de elementos traza en rocas y suelos (mg·kg⁻¹). Continuación.

Elemento	Rocas		Suelos		Referencia
	Tipo	Rango	Tipo	Rango	
Ni	Ultramáficas	1400–2000	arenoso	<5–70	Shacklette y Boerngen, 1984
	Máficas	130–160	arcilloso	3–98	Frank <i>et al.</i> , 1976
	Ácidas (granitos)	5–15	Rendzina	7–41	Czarnowska y Gworek, 1987
	Ácidas (volcánicas)	20	Histosol	5–50	Shacklette y Boerngen, 1984
Pb	Ultramáficas	0.1–1.0	arenoso	<10–70	Shacklette y Boerngen, 1984
	Máficas	3–8	arcilloso	14–33	Räutä <i>et al.</i> , 1985
	Ácidas (granitos)	15–24	Rendzina	10–50	Shacklette y Boerngen, 1984
	Ácidas (volcánicas)	10–20	Histosol	18–85	Sapek, 1971
	Sedimentarias	3–40	normal	2–200	Bohn <i>et al.</i> , 1985
Zn	Ultramáficas	40–60	arenoso	14–146	Whitton y Wells, 1974
	Máficas	80–120	arcilloso	13–362	Kabata-Pendias, 1981
	Ácidas (granitos)	40–60	derivado de r. magmáticas	40–100	Krauskopf, 1972
	Ácidas (volcánicas)	40–100	derivado de r. sedimentarias	80–120	Krauskopf, 1972
	Sedimentarias		Histosol	5–108	Shacklette y Boerngen, 1984

5. CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO

5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES

5.1.1 Localización de la zona de estudio

La cuenca del río Guanajuato se encuentra localizada en la región centro-meridional del estado de Guanajuato. Esta cuenca pertenece al sistema hidrológico Lerma-Chapala; se localiza entre los paralelos 20°27'30" y 21°07'30" de latitud norte y los meridianos 101°05'00" y 101°33'00" de longitud oeste; comprende parte de los municipios de Pueblo Nuevo, Irapuato, Silao y Guanajuato; y abarca una superficie aproximada de 1,300 km². A la cuenca del río Guanajuato la limitan al norte, el poblado de Nuevo Valle de Moreno y la sierra El Ocote; al sur, los municipios de Abasolo y Valle de Santiago; al este, los municipios de Salamanca y Dolores Hidalgo, y al oeste, los municipios de Abasolo, Romita y Silao (Figura 3).

5.1.2 Fisiografía

Esta cuenca hidrográfica se localiza en dos provincias fisiográficas: la Altiplanicie o Mesa Central y el Eje Neovolcánico Transmexicano. La provincia de la Mesa Central está constituida por enormes planicies con una altitud que va de 1,900 a 2,200 m s.n.m. Se encuentra rodeada por la Sierra Madre Occidental, la Oriental y el Eje Neovolcánico, que sirven de barreras naturales y que han determinado sus características más sobresalientes. Al interior de esta zona, la provincia se divide en tres subprovincias: (a) hacia el norte, las llanuras y sierras del norte de Guanajuato; (b) al centro de la zona, los valles paralelos del sureste de la sierra de Guanajuato; y (c) en el extremo sur, El Bajío guanajuatense.

La subprovincia de las llanuras y sierras del norte de Guanajuato ocupa partes importantes del municipio de Guanajuato; presenta una gran complejidad fisiográfica con sierras, mesetas, lomas, valles y llanuras. En forma general, las llanuras y mesetas de erosión se ubican prácticamente al centro de la subprovincia, conformando un sistema montañoso que, junto con las discontinuidades centrales, forman la sierra de Guanajuato. Los valles paralelos del sureste de esta sierra constituyen una discontinuidad localizada en su ladera sudoccidental, abarcando los municipios de León

y Guanajuato. Asimismo, los valles se caracterizan por su convexidad (SPP, 1980; García, 1992).

5.1.3 Morfología

En cuanto a sus características topográficas, la cuenca se divide en tres grandes regiones: la primera de ellas es considerada como un sistema denudatorio de montaña, en donde se localizan las mayores elevaciones de la zona; se inicia en los 2,000 m de altitud, en la ciudad de Guanajuato, y llega hasta los 2,750 m, constituyendo el límite hidrológico de la cuenca; abarca el área comprendida al norte de la ciudad capital hasta alcanzar la región más alta, en Santa Rosa, municipio de Guanajuato. Las pendientes oscilan entre 20 y 50%.

La segunda zona corresponde a las áreas de depósito que pueden ser consideradas como zonas acumulativas aluviales y cuyas elevaciones van de los 1,850 m s.n.m., en la salida de la presa La Purísima, hasta los 2,000 m, al sur de la ciudad de Guanajuato; comprende las regiones de Aldama, Silao y parte del municipio de Guanajuato. Las pendientes oscilan entre 8 y 20°.

La tercera región se presenta entre 1,700 y 1,800 m de altitud; comprende parte de los municipios de Pueblo Nuevo, Irapuato y Silao. Esta región es parte del *graben* de El Bajío, con pendientes menores que 5%; las principales elevaciones que se presentan en esta zona son los cerros Arandas, Blanco, El Veinte, Prieto, La Campana, El Capulín, El Venado, Tinaja de Bernal y El Brete, que se localizan en los municipios de Irapuato y Pueblo Nuevo.

Las características físicas de la región han sido determinadas por la existencia de bloques de extraordinaria longitud, producidos por fenómenos de fallamiento en gran escala, la eyección de gigantescas masas de material volcánico y un largo período de erosión, que suavizó los abruptos picos de las montañas, cubriendo sus vertientes con detritus que han llegado desde la región de El Bajío hasta las ciudades de Celaya y Apaseo. Las principales unidades orográficas que cruzan el Estado son: la abrupta y escabrosa sierra Gorda, ubicada en la región nororiental del estado de Guanajuato, que tiene una dirección NW-SE. El segundo grupo montañoso importante, lo constituye la sierra de



Figura 3. Cuenca hidrológica del río Guanajuato

Guanajuato, que es un largo y nuevo anticlinal fallado en grandes bloques, que se levanta abruptamente de los valles que lo rodean en medio de la Mesa Central y casi en el centro del Estado, con una dirección general NW-SE (SPP, 1980)

5.1.4 Geología

El Eje Neovolcánico parece ser una antigua sutura reabierto a fines del Cretácico. La zona se caracteriza por la presencia de una gran cantidad de aparatos volcánicos, diversos conos, calderas y coladas que en su mayoría han conservado intacta su estructura original. Existe también en el lugar una gran cantidad de fracturas y fallas asociadas al vulcanismo terciario y cuaternario que han dado lugar a fosas largas y de cierta profundidad (Zaragoza, 1978).

Los principales eventos geológicos que dieron origen a la conformación de esta zona pueden ser resumidos de la siguiente manera: Durante el Triásico, comienza el depósito marino, formando las rocas más antiguas del distrito, que Antúnez-Echegaray (1964) cataloga como pizarras y esquistos con intercalaciones de cuarcita y caliza marmorizada. Al final de este período se presentó la actividad volcánica con emisión de corrientes lávicas ácidas y básicas.

En el Jurásico, la región estuvo sujeta a transgresiones marinas, comenzando una segunda fase de sedimentación y dando lugar a depósitos de lutita calcárea y margas. Los movimientos orogénicos fueron más intensos, produciendo derrames andesíticos y basálticos, originando fracturas y plegamientos de estructuras sedimentarias existentes. En el Jurásico Tardío hubo dos deformaciones compresivas; la última, acompañada por intrusiones. Se depositaron clastos marinos carbonatados y carbonosos en condiciones de aguas profundas (Medina-Ruvalcaba, 1982).

En el Cretácico hubo mayor actividad volcánica con emisión de corrientes de lava ácida y básica. Las rocas triásicas formaron pliegues suaves; probablemente en este período hubo mayores condiciones continentales (Antúnez-Echegaray, 1964).

Durante el Terciario a fines del Paleoceno, debió ocurrir la intrusión granítica con una secuencia de rocas básicas y ultrabásicas. Hubo otro período de vulcanismo continental con emisión de materiales riolíticos y tobáceos seguidos por derrames básicos,

siendo a principios del Eoceno cuando las rocas sedimentarias y volcánicas sufrieron fracturas y fallas. Las rocas más antiguas de este período corresponden al Conglomerado Rojo de Guanajuato derivado, en su mayor parte, de las rocas subyacentes del Cretácico y Triásico. En este período se produjo la segunda deformación compresiva que originó el anticlinal que forma el núcleo de la sierra de Guanajuato. Al final de este período, las rocas ya falladas estuvieron expuestas a los agentes erosivos más o menos intensos, y todavía hubo actividad volcánica con emisión de derrames de lava (Antúnez-Echegaray, 1964; Medina-Ruvalcaba, 1982).

Al final del Cuaternario, la acción erosiva originó la formación de arroyos superpuestos entre sí, valles abruptos y estrechos en forma de "V", lo que evidencia la acción erosiva de las corrientes de agua. En el Eoceno hubo acumulación detrítica de origen volcánico que rellenó los valles, además de un vulcanismo continental generalizado, alternando con períodos de depósito de terrígenos acompañado de intrusiones y fallamiento normal *pre-basin and range*. En el Oligoceno y Mioceno decrece el vulcanismo y tiene lugar la deformación *basin and range* afectando a toda la región. El Bajío y la sierra de Guanajuato adquieren su morfología actual. Hay fallamiento en toda la secuencia litoestratigráfica y las depresiones son rellenadas por clastos y también hay extrusión de basalto. Finalmente, durante el Plioceno finaliza el período de vulcanismo, sólo se presentan episodios esporádicos del mismo, continuando la deformación *basin and range*. El período culminó con eventos de construcción de montañas. La litología de la región en estudio está representada de la siguiente manera: Tonalita Cerro Pelón (del Jurásico), Diorita La Palma, complejo vulcanosedimentario Sierra de Guanajuato, Caliza La Perlita, Conglomerado Guanajuato, Riolita La Bufa, Arenisca Calderones, Andesita El Cedro, Intrusivo Peregrina, Riolita Chichíndaro, Ignimbrita Cuatralba, Grava El Capulín y aluvión. La mayor parte del material geológico de la región presenta características que van de ligeramente alcalinas a casi neutras. Muchas de ellas presentan un alto grado de resistencia al intemperismo, debido al contenido de minerales como cuarzo, plagioclasa y biotita, lo que ha influido notoriamente en el desarrollo de los suelos de la región (Hernández-Silva, 1990a).

Hacia el sur de la cuenca del río Guanajuato, comprendiendo los municipios de Pueblo Nuevo, Irapuato y parte del municipio de Silao, se ubica un valle de origen aluvial con pequeñas zonas de basalto, localizadas en el cerro de Arandas y el cerro Blanco, en el municipio de Irapuato. Al norte de éste, en las regiones de Aldama y Santa Fe de Guadalupe, existen rocas ígneas extrusivas ácidas entre los 1,800 y los 3,000 m de altitud. En la región oeste de Aldama, al norte de Santa Fe de Guadalupe, la región este de Silao y sur del municipio de Guanajuato, se localizan capas de arenisca y conglomerado. En la región norte, específicamente en el municipio de Guanajuato, se encuentran solamente conglomerados. Existen pequeñas regiones en esta área donde es posible localizar dioritas, así como en una región del municipio de Silao que presenta riolitas (DETENAL, 1978).

5.1.5 Clima

La cuenca del río Guanajuato posee un clima BS_1hw ; es decir, semiseco-semicálido, con lluvias en verano y escasa precipitación invernal, con invierno fresco. La temperatura media anual es de 18°C y la oscilación anual de la temperatura media mensual, es extremosa. La precipitación presenta ligeras variaciones a lo largo de la cuenca; en el área de El Bajío, la precipitación registrada es de 700 mm, mientras que en la región de Aldama y sierra de Guanajuato, es de 800 mm anuales. En la sierra de Guanajuato existe un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y poca precipitación en invierno. En los alrededores de Santa Rosa, la precipitación media es de más de 800 mm; los rangos térmicos son menores a 16°C. La máxima precipitación se presenta en agosto con 180 mm. El mes más cálido es mayo, con una temperatura media entre 17° y 18°C; el mes más frío es enero con temperaturas entre 11° y 12°C (SPP, 1980).

Izaguirre-Mendoza y Domínguez-Corona (1979) realizaron la delimitación mesomicroclimática del Estado, correspondiendo a la porción norte de la cuenca tres categorías:

1. $C(w_2)(w)b$: representa al grupo de climas intermedio en cuanto a humedad, con lluvias de verano, porcentaje de lluvia invernal menor de 5 respecto a la lluvia anual.
2. $C(w_2)(w)h(i')$: este grupo de climas representa al más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias de verano, porcentaje de lluvia invernal menor de 5.0, invierno fresco, temperatura del mes más frío inferior a 18°C y poca oscilación térmica.
3. $BS_1hw(w)(e)$: representa a los más húmedos de los BS, invierno fresco con temperatura media anual entre 18° y 22°C, régimen de lluvia de verano, con al menos 10 veces más lluvia en el mes más húmedo en la mitad caliente del año, que en el mes más seco; pueden llegar a presentarse oscilaciones térmicas extremosas, pero no de manera sistemática ni prolongada.

Las variaciones climáticas en la zona de estudio se deben más a las condiciones de humedad que a las condiciones de temperatura. La amplitud térmica en la sierra de Guanajuato es de 3.7°C con precipitación promedio de 496 mm (Terrones y Mejía, 1989).

5.1.6 Hidrología

Esta cuenca se localiza en el sistema hidrológico Lerma-Chapala. Los ríos Guanajuato y Silao constituyen los afluentes más importantes del centro del Estado. La red hidrográfica del Estado pertenece, en su gran mayoría, a la vertiente del Pacífico; sólo las corrientes de la región septentrional del municipio de San Luis de la Paz y las que cruzan el territorio que ocupan los municipios de Xichú, Victoria, Atarjea, Santa Catarina y Tierra Blanca, en la región noreste, corresponden a la vertiente del Golfo de México. En la vertiente del Pacífico, los ríos principales son: Turbio, Ibarra, La Laja, Lerma y Guanajuato. El río Guanajuato se origina en las estribaciones sudoccidentales de la sierra de Guanajuato; se forma con el río Santa Ana, al que se le unen las corrientes que pasan por la capital del Estado, se dirige hacia el sur, atravesando los municipios de Irapuato y Pueblo Nuevo y se une al río Lerma.

La cuenca del río Guanajuato comprendía tres sistemas: La Llave, Silao y Guanajuato los que anteriormente desembocaban en el río Irapuato, que a su vez descargaba sus aguas en el río Lerma. Actualmente, tanto el río de la Llave como el Silao, son interrumpidos por las presas La Llave y el Conejo,

respectivamente, de tal forma que ahora sólo el río Guanajuato desemboca en el río Lerma.

El sistema del Guanajuato, actúa como río troncal en la cuenca del mismo nombre, alimentado por un gran número de arroyos y ríos secundarios, dentro de los que se encuentran los arroyos Soledad, Yerbabuena, El Sauz, El Cubo y el río Grande, así como numerosos arroyos secundarios y terciarios. Siguiendo esta corriente hacia el sur y ya dentro del municipio de Irapuato, se corta su curso formándose de nuevo en las laderas del cerro de Arandas, donde se tiene el inicio de un gran número de canales que riegan los cultivos de esta zona; la corriente continúa hasta desembocar en el río Lerma, en el municipio de Pueblo Nuevo.

5.1.7 Suelos

Los suelos localizados en la sierra correspondientes a la cuenca del río Guanajuato, se caracterizan porque el intemperismo químico moderado es el principal proceso formador del suelo, siendo su distinción principal el escaso desarrollo. Los colores de los suelos están estrechamente relacionados con el contenido mineralógico del material parental y con los porcentajes de materia orgánica, que van de medios a altos. Los óxidos de Fe (removidos) están presentes en un mayor porcentaje en los suelos provenientes de las piroxenitas, y en menor proporción en los derivados de granitos. Los rangos de capacidad de intercambio iónico varían de 12.79 (granito) hasta 55.69 meq/100 g en los suelos provenientes de ignimbritas-basaltos. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sugiere que los suelos desarrollados sobre ignimbritas-basaltos y granitos se generan más rápidamente; en contraste, los suelos derivados de las rocas ultrabásicas son los menos desarrollados (Hernández-Silva *et al.*, 1990).

Tomando como base la carta de suelos elaborada por DETENAL en 1978, las siguientes unidades de suelo están presentes en la cuenca del río Guanajuato: Vertisol pélico en las partes planas de Pueblo Nuevo, Irapuato y Silao. En el poblado de Aldama, los alrededores de Irapuato, en el cerro de Arandas y Blanco, en el municipio de Silao y parte de Guanajuato, el suelo predominante es Feozem háplico. En la región de Santa Rosa y parte del municipio de Guanajuato, se presenta Luvisol órtico; y en Santa Fe de Guadalupe, Cambisol eútrico.

5.1.8 Vegetación

De acuerdo con Zaragoza (1978) las principales asociaciones vegetales presentes en la Sierra de Guanajuato son:

1. **Pastizal amacollado abierto:** Se caracteriza por la predominancia de especies herbáceas graminiformes y amacolladas con una altura de 50 a 80 cm. Algunas de las especies dominantes son *Bouteloa grandulosa*, *B. curtispindula*, *Heteropogon contortus*, *Muhlenbergia lanata*, *M. emerleyi*, *Andropogon scoparius* y *Dasylium cendrosanum*.

2. **Bosque esclerófilo:** Se caracteriza por poseer árboles medianos de 8 a 15 m de alto con hojas esclerotizadas que se pierden por un breve período. Las especies más características son: *Quercus laceyi*, *A. canbyie*, *Q. fusiformis*, *Q. intricata*, *Q. oleoides*, *Q. polymorpha*.

Pastizal amacollado con nopalera: se caracteriza por la predominancia de especies gramíneas y herbáceas amacolladas, y también arbustivas, como nopales. Algunas especies son: *Bouteloa filiformis*, *Heteropogon contortus*, *Opuntia robusta*, *O. guilanchi*, *Mimosa biuncifera* y *Dasylium cendrosanum*.

5.1.9 Uso del Suelo

Agricultura: Existe una tendencia relativamente alta a diversificar la producción agrícola, de manera que en la superficie de riego se cosecha fresa, ajo, cebolla, col de bruselas y espárragos como principales productos externos; como productos internos se siembra principalmente chile y jitomate. En las zonas de agricultura de temporal, se cultivan productos básicos, como maíz y frijol. Un producto que ha venido adquiriendo importancia en los últimos años es el sorgo.

Ganadería: Se distinguen dos tipos de ganadería: la extensiva, que se desarrolla básicamente en la región norte con cría de ganado bovino y caprino, y la intensiva, relacionada con la ganadería lechera y la porcicultura que se practican en El Bajío. Las actividades pecuarias de mayor relevancia económica son la bovina, porcina y caprina, dándose un fuerte impulso a la explotación de la ganadería ovina.

Minería: La principal zona minera está constituida por el distrito minero de Guanajuato, caracterizado principalmente por la producción de oro y plata, especialmente por la “veta Madre” (estructura en la que se ha basado el distrito por 400 años). Las minas más importantes que se ubican en este distrito son: La Valenciana, Rayas, Sirena, Cedros, Las Torres, Mellado y Santo Niño. En el extremo norte se ubican las minas de San Nicolás del Monte y pequeñas exploraciones en las vetas de Santa Rosa. La explotación en el distrito ha sido variable debido a las fluctuaciones en el precio de los minerales.

Silvicultura: La actividad forestal se basa principalmente en las especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*, predominando el segundo. La espesura de la zona boscosa varía de aclarada a excesiva, con desarrollos de latizal, medio y viejo fustal. De acuerdo con sus características silvícolas, el pino se usa para productos aserrados, papel, pilotes para minas, leña, etc.; el encino se utiliza para carbón (SPP, 1980).

5.2 LOS METALES PESADOS TOTALES EN SUELOS Y SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO

5.2.1 Arsénico

El arsénico constituye uno de los elementos más dispersos en suelos y sedimentos de la cuenca de río Guanajuato. La Clase 3 (20.1–110.0 mg·kg⁻¹) se encuentra distribuida en una gran parte de la sierra (Figura 4). Dentro de esta clase, los sitios con las concentraciones más importantes son los sedimentos del arroyo San Antonio, en la unión con la presa Los Mata, con 109.86 mg·kg⁻¹; los sedimentos del río Santa Ana, en el cruce con la carretera Silao-Guanajuato, con 103.61 mg·kg⁻¹; el arroyo Duraznillo, cerca de Los Mexicanos, con 99.44 mg·kg⁻¹; los jales de El Cedro (mineral Las Torres), con 97.36 mg·kg⁻¹; así como los jales de Monte San Nicolás, con 91.52 mg·kg⁻¹. En segundo lugar, y dentro de la misma sierra y de la misma Clase 3, están los jales de El Cubo, La Peregrina y La Valenciana, con contenidos que van de 21.25 a 68.47 mg·kg⁻¹. Los sedimentos de los arroyos Dedete, Durán y Murciélago tienen rangos que van de 41.11 a 56.80 mg·kg⁻¹. En cuanto a los contenidos de As en suelos de la sierra, los rangos son más amplios, ya que fluctúan de

3.19 mg·kg⁻¹, en Llanos de Santa Ana, a 47.22 mg·kg⁻¹, en Agua Colorada. En El Bajío, al norte de Irapuato, en una franja que corre desde la presa El Conejo hasta El Carrizal, existe un promedio de 27.0 mg·kg⁻¹. En la confluencia de los ríos Guanajuato y Lerma se tuvo una concentración de 46.11 mg·kg⁻¹.

La media geométrica de los contenidos de As fue de 17.2 mg·kg⁻¹ con un coeficiente de variación del 98%, ya que los valores fluctúan entre 1.6 y 109.8 mg·kg⁻¹. El análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre los contenidos de As proveniente de suelos y sedimentos, por lo que se pueden considerar como homogéneas en relación con el contenido de este elemento. Los suelos presentaron un contenido promedio de 34.5 mg·kg⁻¹ y los sedimentos de 24.2 mg·kg⁻¹. Sin embargo, los sedimentos fueron el material que presentó las más altas concentraciones, encontrándose un sitio con casi 110 mg·kg⁻¹.

El rango medio mundial de As en suelos va de 9.0 a 85.0 mg·kg⁻¹, según McBride (1994). La Unión Europea menciona como máximo aceptable 20.0 mg·kg⁻¹, mientras que Canadá la fija en 14.0 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

5.2.2 Cadmio

Las concentraciones de este elemento estuvieron por debajo del límite de detección (0.2 mg·kg⁻¹) de acuerdo a la metodología utilizada.

5.2.3 Cobalto

Las concentraciones elevadas de Co, pertenecientes a la Clase 3 (50.1–80.0 mg·kg⁻¹), se ubican en áreas perfectamente localizadas en los suelos de las inmediaciones del río Guanajuato, a la altura del puente San José de la Cruz, con 76.20 mg·kg⁻¹, así como en los sedimentos del arroyo La Cata, en el mineral del mismo nombre, con 65.50 mg·kg⁻¹. Dentro de la Clase 2 (10.1–50.0 mg·kg⁻¹), pero con los valores fuera del rango medio mundial, se tiene a Santa Teresa (río Guanajuato), puente Santa Ana (río Guanajuato), arroyo San Antonio (Pastita), noroeste de Pozuelos, arroyo Cedro (al este de Villalpando), arroyo sin nombre entre las presas La Soledad y La Esperanza y arroyo Grande al norte de la presa La Esperanza; todos estos sitios con valores que fluctúan entre 30.8 y 42.95 mg·kg⁻¹.

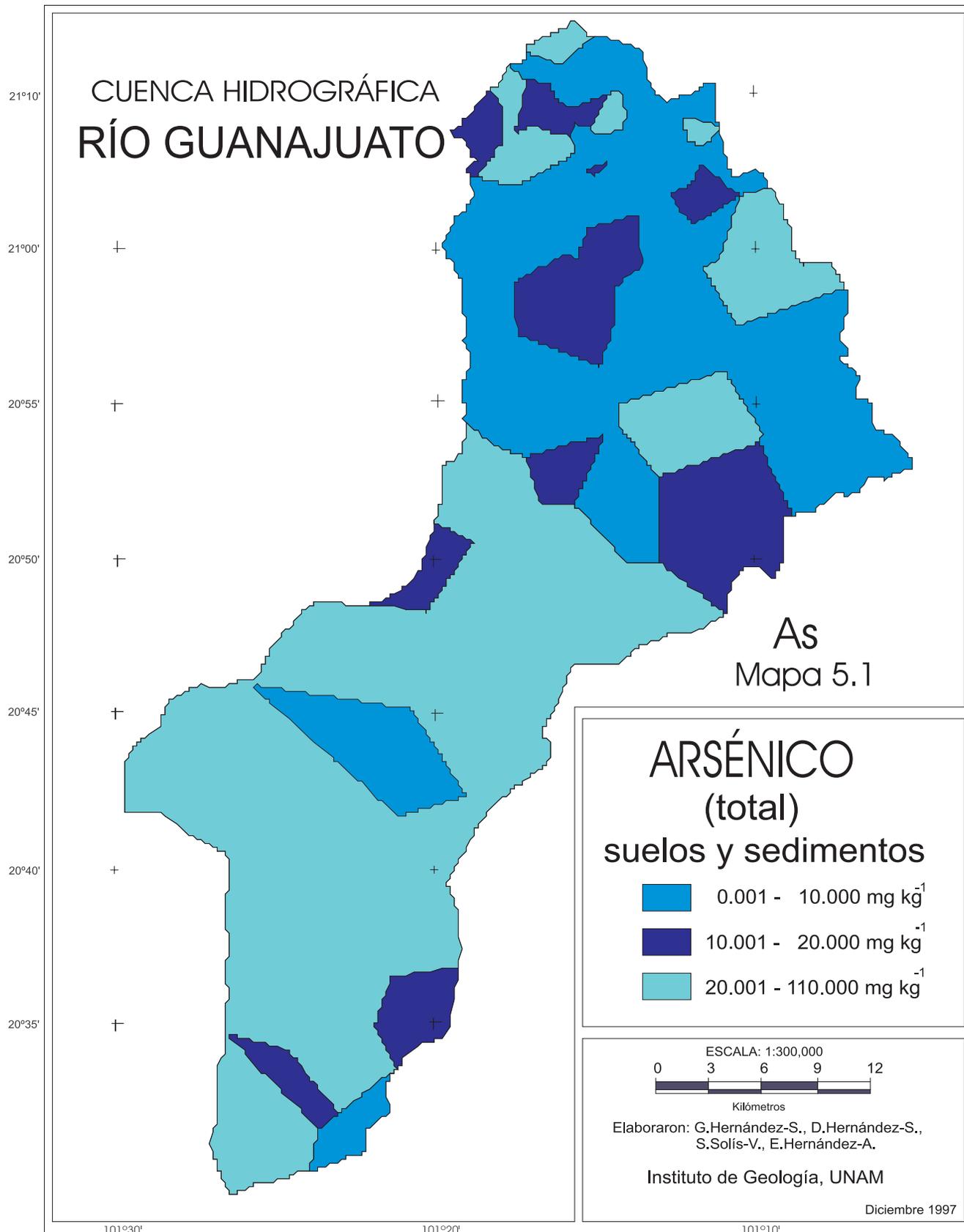


Figura 4. Mapa de dispersión de arsénico en la cuenca del río Guanajuato.

La dispersión de las concentraciones elevadas de cobalto (Clase 3) se encuentra muy restringida. La mayor parte de la cuenca del río Guanajuato está dominada por la Clase 2 (10.1–50.0 mg·kg⁻¹), aunque existen áreas que se encuentran por arriba de la media mundial (Figura 5).

El cobalto muestra concentraciones estadísticamente semejantes tanto en suelos como en sedimentos, lo que origina valores muy semejantes de media geométrica, siendo de 17.3 mg·kg⁻¹ para suelos y de 21.9 mg·kg⁻¹ para sedimentos. El rango en el que fluctuaron las concentraciones de Co en los dos materiales fue de 5.95 a 76.2 mg·kg⁻¹ con un coeficiente de variación de 73.6%.

McBride (1994) menciona en su trabajo que el rango medio mundial de Co oscila entre 1.6 y 21.5 mg·kg⁻¹. Canadá acepta como máximo contenido permisible 20.0 mg·kg⁻¹ de Co en suelos.

5.2.4 Cobre

Los niveles más altos de acumulación de Cu se encuentran en primer lugar, en la Clase 3 con niveles que van de 100.1 a 185.0 mg·kg⁻¹ en la terraza aluvial del río Guanajuato al norte de La Haciendita, muy cerca de la confluencia con el arroyo Yerbabuena con 184.7 mg·kg⁻¹; este mismo arroyo en los sedimentos que salen de la presa del mismo nombre con 130.20 mg·kg⁻¹; el arroyo Cedro, al este de Villalpando con 126.25 mg·kg⁻¹; en los sedimentos de la zona industrial al sur de Irapuato con 132.5 mg·kg⁻¹. Otras áreas que se mantienen fuera de los rangos medios mundiales pero dentro de la Clase 2, son: Canal Principal cerca de San Roque con 92.70 mg·kg⁻¹ así como los sedimentos del arroyo Dedete cerca del mineral La Valenciana con 88.30 mg·kg⁻¹; al sur de Cajones, a la entrada de la presa La Purísima con 84.55 mg·kg⁻¹ (Figura 6).

Las concentraciones de Cu tuvieron una media geométrica de 23.9 mg·kg⁻¹ en los suelos y de 35.3 mg·kg⁻¹ en los sedimentos. El coeficiente de variación para los suelos fue de 109.3% ya que los valores de concentración del cobre fluctuaron desde 4.4 mg·kg⁻¹ hasta 184.7 mg·kg⁻¹; mientras que, el coeficiente de variación para sedimentos fue de 67.4% con un rango menor de variación (10.4 a 132.5 mg·kg⁻¹). A pesar de la aparente diferencia en los rangos de concentraciones de ambos materiales, el análisis estadístico correspondiente

indicó que los suelos y sedimentos son materiales cuyo contenido de Cu no presenta diferencia significativa. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los suelos presentaron los más altos contenidos de este elemento.

Los rangos medios mundiales en suelos, según McBride (1994), varían de 60.0 a 80.0 mg·kg⁻¹. Para la Unión Europea, el límite máximo permisible debe ser 50.0 mg·kg⁻¹; para Canadá 100.0 mg·kg⁻¹. Según Müller *et al.*, (1992) el máximo tolerable de Cu en sedimentos debe ser 45.0 mg·kg⁻¹.

5.2.5 Cromo

En la cuenca del río Guanajuato, existen dos áreas que se encuentran fuera del rango medio mundial, que son los jales del mineral La Cata con 769.0 mg·kg⁻¹, así como los sedimentos de Monte San Nicolás con 346.0 mg·kg⁻¹ y, un poco por debajo del límite superior del rango medio mundial, los sedimentos del arroyo que comunica a las presas La Soledad y La Esperanza con 215.0 mg·kg⁻¹. En el resto de la cuenca y, tanto en suelos como en sedimentos, las concentraciones de Cr permanecen en niveles bajos variando desde, 17.0 mg·kg⁻¹ en el arroyo Sauz al sur de Aldama, hasta 124.5 mg·kg⁻¹ en el río Santa Ana. Sobre las terrazas aluviales del río Guanajuato a la altura de Cajones y Haciendita, los valores van de 48.50 a 89.00 mg·kg⁻¹ (Figura 7).

Parte de las zonas clasificadas como Clase 3 están por encima del rango medio mundial para suelos (de 7 a 221 mg·kg⁻¹ según McBride, 1994). En relación al máximo permisible de Cr en suelos, Müller *et al.* (1992) lo consideran en 90.0 mg·kg⁻¹, la Unión Europea lo estima en 90.0 mg·kg⁻¹ y Canadá en 120.0 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

5.2.6 Hierro

Los valores más altos de Fe se localizan en los sedimentos del arroyo Cedro al este de Villalpando (7.190%), mineral La Cata (6.845%), puente de Santa Ana (5.755%), los sedimentos ubicados entre las presas La Esperanza y la Soledad (5.665%), arroyo Llano Grande al norte de la presa La Esperanza (5.100%) y arroyo La Calera (5.085%). La Clase 3 (5.01-7.20%), la de mayor importancia, se localiza principalmente en la cuenca alta del río Guanajuato, asociada a condiciones naturales derivadas de la geología y mineralogía de

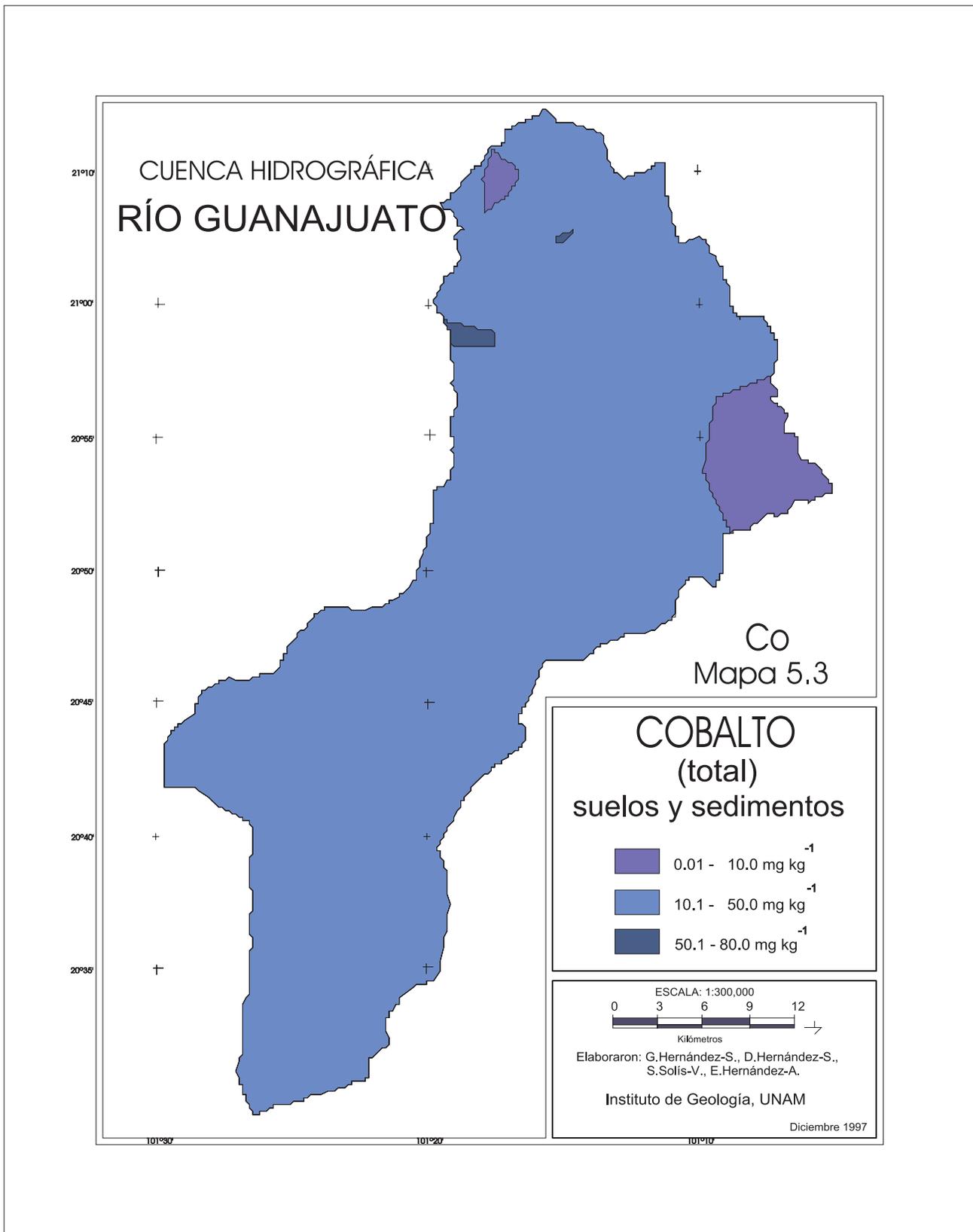


Figura 5. Mapa de dispersión de cobalto en la cuenca del río Guanajuato.

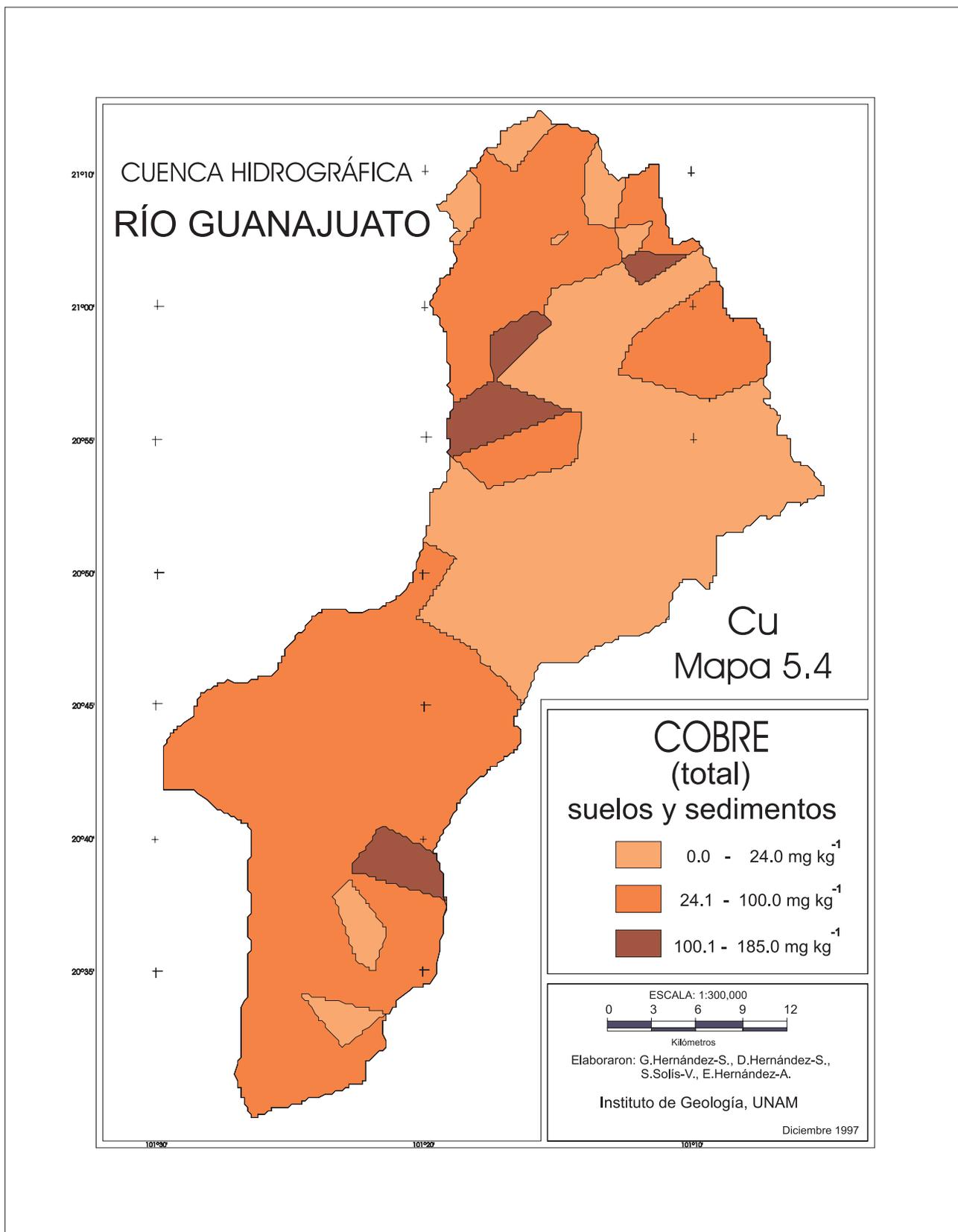


Figura 6. Mapa de dispersión de cobre en la cuenca del río Guanajuato.

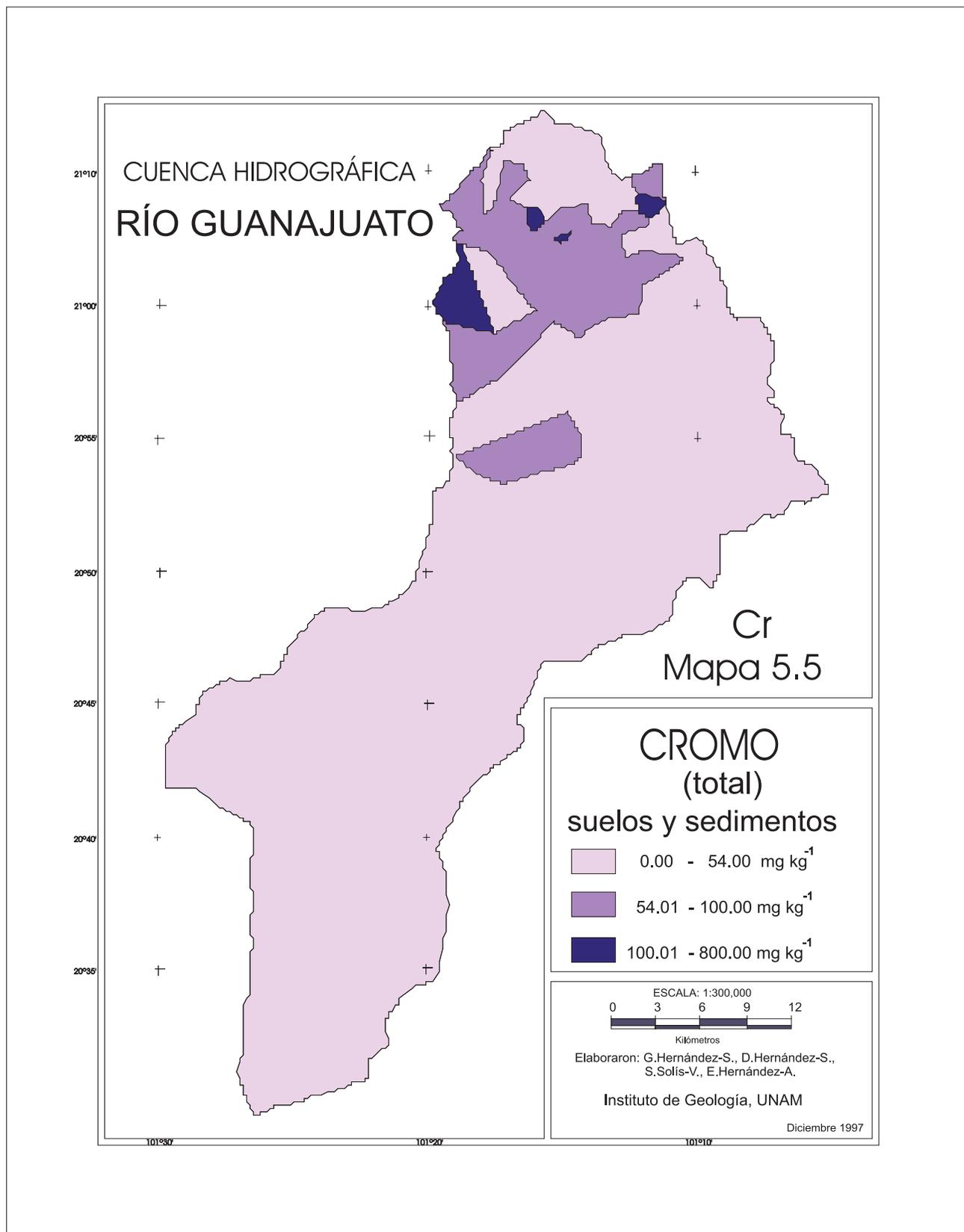


Figura 7. Mapa de dispersión de cromo en la cuenca del río Guanajuato.

la sierra, pero también conectada con las actividades mineras del Distrito de Guanajuato (Figura 8).

Dado que en los lugares con altas concentraciones de Fe no existen condiciones de salinidad, éstos no pueden constituirse en áreas con potencialidad tóxica por Fe (Johnston y Proctor, 1977); por tanto, no existe riesgo a pesar de que existen algunas concentraciones por arriba del promedio mundial en suelos, que va de 1.4 a 4.0% según Green (1959).

5.2.7 Manganeso

Las concentraciones de Mn más importantes se localizan en la sierra de manera dispersa. La Clase 3 (1,000.1-2,000.0 mg·kg⁻¹) se encuentra restringida y conectada a actividades mineras. La mayor concentración de Mn se ubica en los jales de Monte San Nicolás con 1,706.0 mg·kg⁻¹, seguido por los sedimentos del arroyo que conecta las presas La Soledad y La Esperanza con 1,583.0 mg·kg⁻¹ así como el cruce del puente de la carretera Guanajuato-Silao con el río Santa Ana con 1,392.0 mg·kg⁻¹ (Figura 9). Otros lugares con concentraciones significativas de Mn, pero que se ubican dentro de los rangos superiores normales son: los sedimentos de los arroyos Rayas, (mineral Rayas-Mellado) con 1,215.0 mg·kg⁻¹, arroyo Durán (mineral Rayas) con 1,041.0 mg·kg⁻¹, arroyo San Antonio (Pastita) con 1,080.0 mg·kg⁻¹, arroyo Raíces (La Peregrina) con 1,032.0 mg·kg⁻¹ y arroyo La Joya (La Luz) con 1,051.3 mg·kg⁻¹; la presa Guadalupe con 1,120.0 mg·kg⁻¹ y Cajones con 1,088.0 mg·kg⁻¹ en la terraza aluvial del río Guanajuato. La mayor parte de la cuenca del río Guanajuato se cataloga como Clase 2 (100.1-1,000 mg·kg⁻¹) ubicada entre los rangos medios (Figura 9). McBride (1994) menciona que el rango medio mundial de Mn en suelos va de 80 a 1,300 mg·kg⁻¹.

5.2.8 Mercurio

No existen datos.

5.2.9 Níquel

La mayor concentración de níquel se encuentra en Monte San Nicolás con 472.40 mg·kg⁻¹, los jales de Cata (mineral La Cata) con 324.7 mg·kg⁻¹ y los sedimentos del arroyo localizado entre las presas La

Soledad y La Esperanza con 117.5 mg·kg⁻¹. La Clase 3 asociada a actividades mineras (100.1-475.0 mg·kg⁻¹), queda restringida a pequeñas áreas (Figura 10); también la Clase 2 posee tendencias a permanecer ligada a la minería, con rangos que van de 23.15 mg·kg⁻¹ en arroyo San Pedro, a 86.35 mg·kg⁻¹ en Santa Rosa. La Clase 2, con 57.6 mg·kg⁻¹ de promedio, tanto en suelos como en sedimentos también se haya representada en los alrededores de Cajones y presa Guadalupe.

De acuerdo a McBride (1994), el rango medio mundial de Ni en suelos va de 4.0 a 55.0 mg·kg⁻¹. De acuerdo a la Unión Europea, la concentración máxima aceptable en suelos para Ni es 30.0 mg·kg⁻¹ y para Canadá 32.0 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

5.2.10 Plomo

Las concentraciones de Pb total más significativas fueron encontradas en el Distrito Minero de Guanajuato; dentro de éste, los jales derivados de las actividades mineras tuvieron mayor preponderancia, al presentar rangos que van de 99.40 mg·kg⁻¹ en el mineral de Cata, hasta 511.40 mg·kg⁻¹ en el jale antiguo de Monte San Nicolás. En sedimentos de arroyos, las concentraciones fluctuaron de 24.5 mg·kg⁻¹ en el río Santa Ana, hasta el arroyo Dedate (mineral La Valenciana) con 314.95 mg·kg⁻¹, siendo los más importantes, arroyo Murciélagos con 130.6 mg·kg⁻¹, arroyo Durán con 182.05 mg·kg⁻¹ (mineral Mellado), arroyo Duraznillo con 153.7 mg·kg⁻¹ y arroyo La Cata (mineral La Cata) con 103.85 mg·kg⁻¹. Con respecto a los suelos de esta misma área, los valores variaron de 59.8 a 79.5 mg·kg⁻¹ (Figura 11). Otra zona con contenidos importantes de Pb es la correspondiente a las terrazas aluviales del río Guanajuato a la altura de Cajones, Haciendita y Santa Teresa con niveles que van de 102.45 a 197.7 mg·kg⁻¹. Los contenidos de Pb en la región de El Bajío, correspondiente a la cuenca del río Guanajuato tanto en suelos como en sedimentos, los valores variaron de 14.30 mg·kg⁻¹ a 63.5 mg·kg⁻¹, excepto en sedimentos del canal principal a la altura de San Roque con 85.7 mg·kg⁻¹ (Figura 11).

McBride (1994) menciona que el rango medio mundial de Pb en suelos fluctúa entre 10.0 y 84.0 mg·kg⁻¹. Müller *et al.*, (1992) sugieren que el máximo permisible en sedimentos debe ser 20.0 mg·kg⁻¹, mientras que Fergusson (1989) lo establece en 80.0

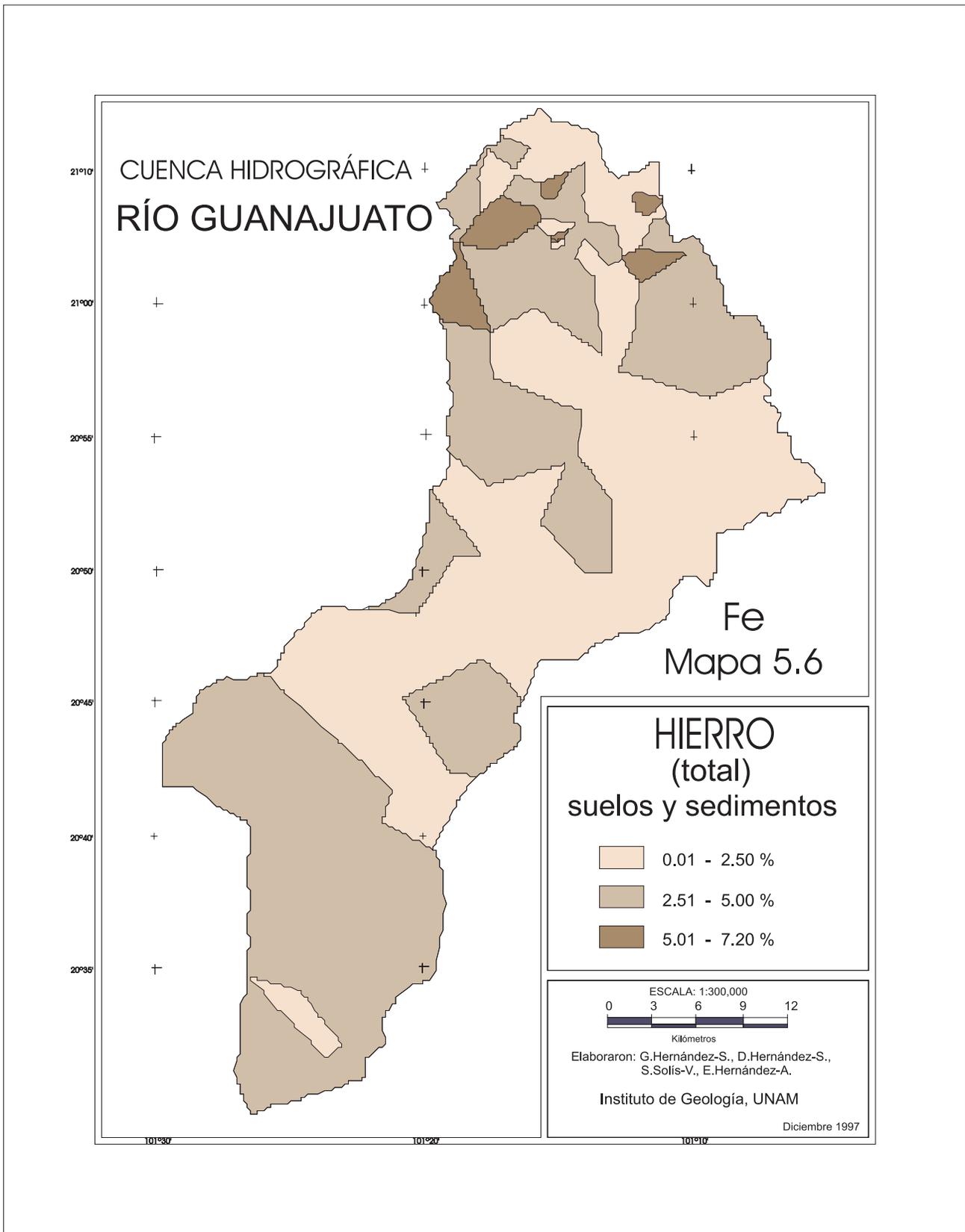


Figura 8. Mapa de dispersión de hierro en la cuenca del río Guanajuato.

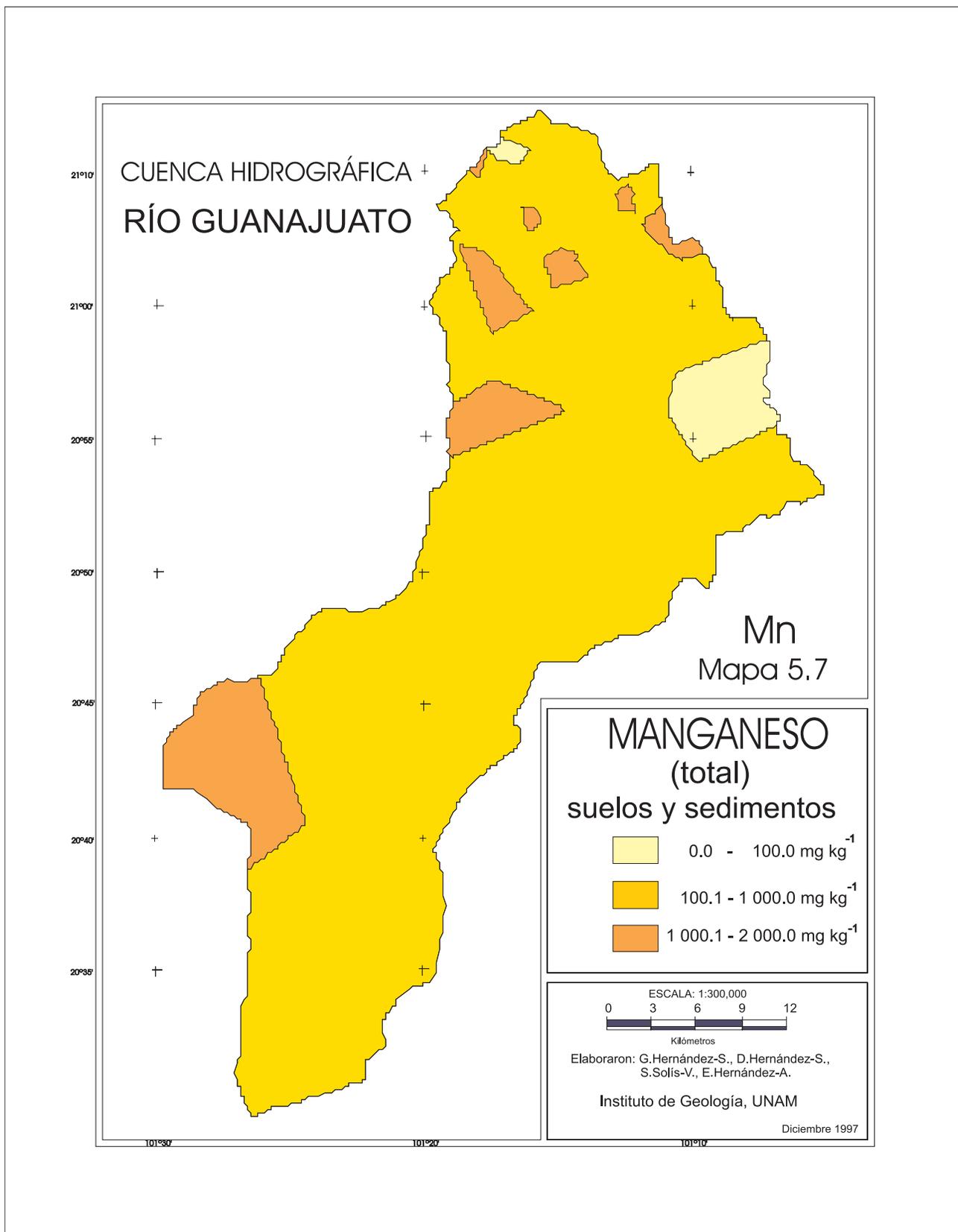


Figura 9. Mapa de dispersión de manganeso en la cuenca del río Guanajuato.

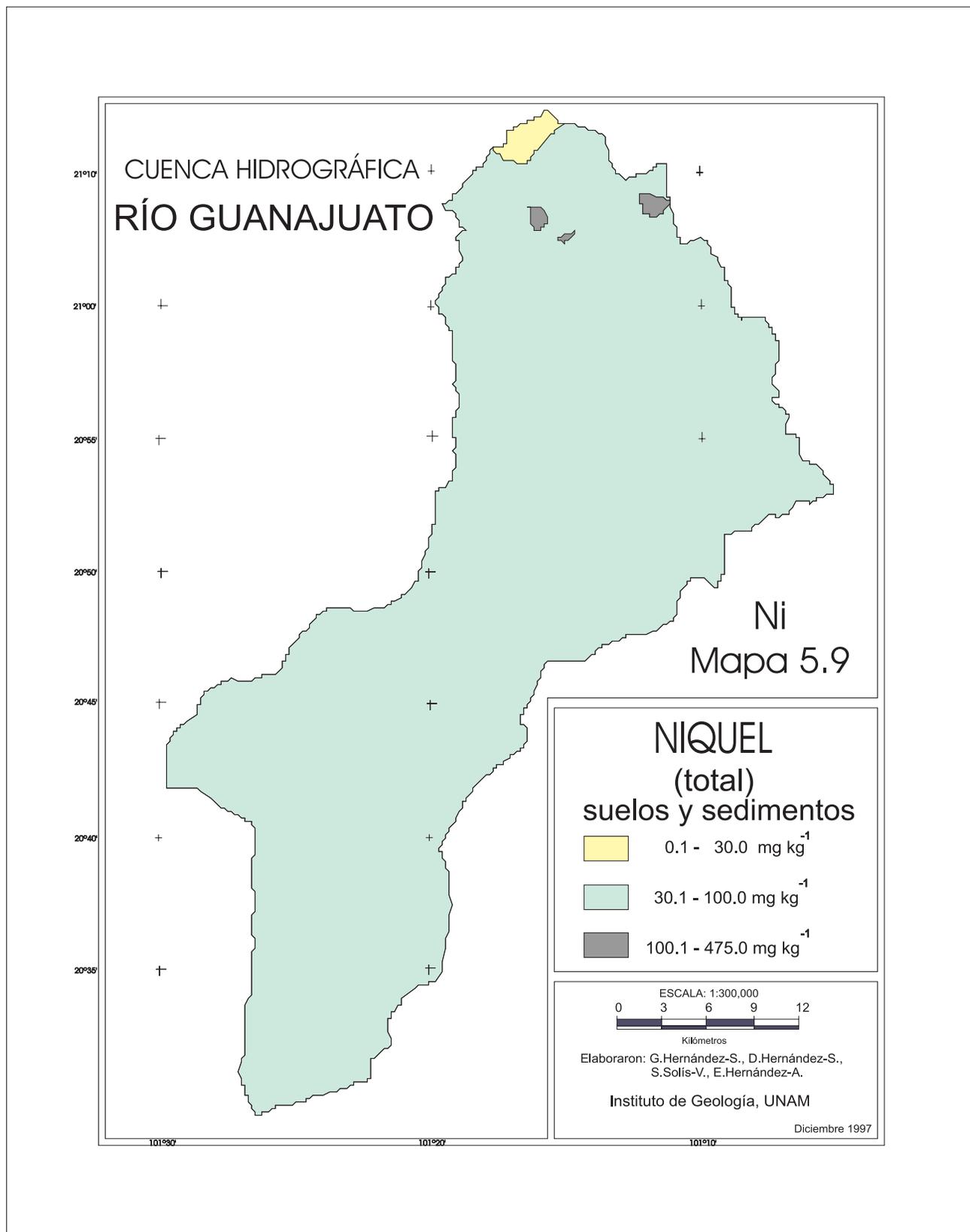


Figura 10. Mapa de dispersión de níquel en la cuenca del río Guanajuato.

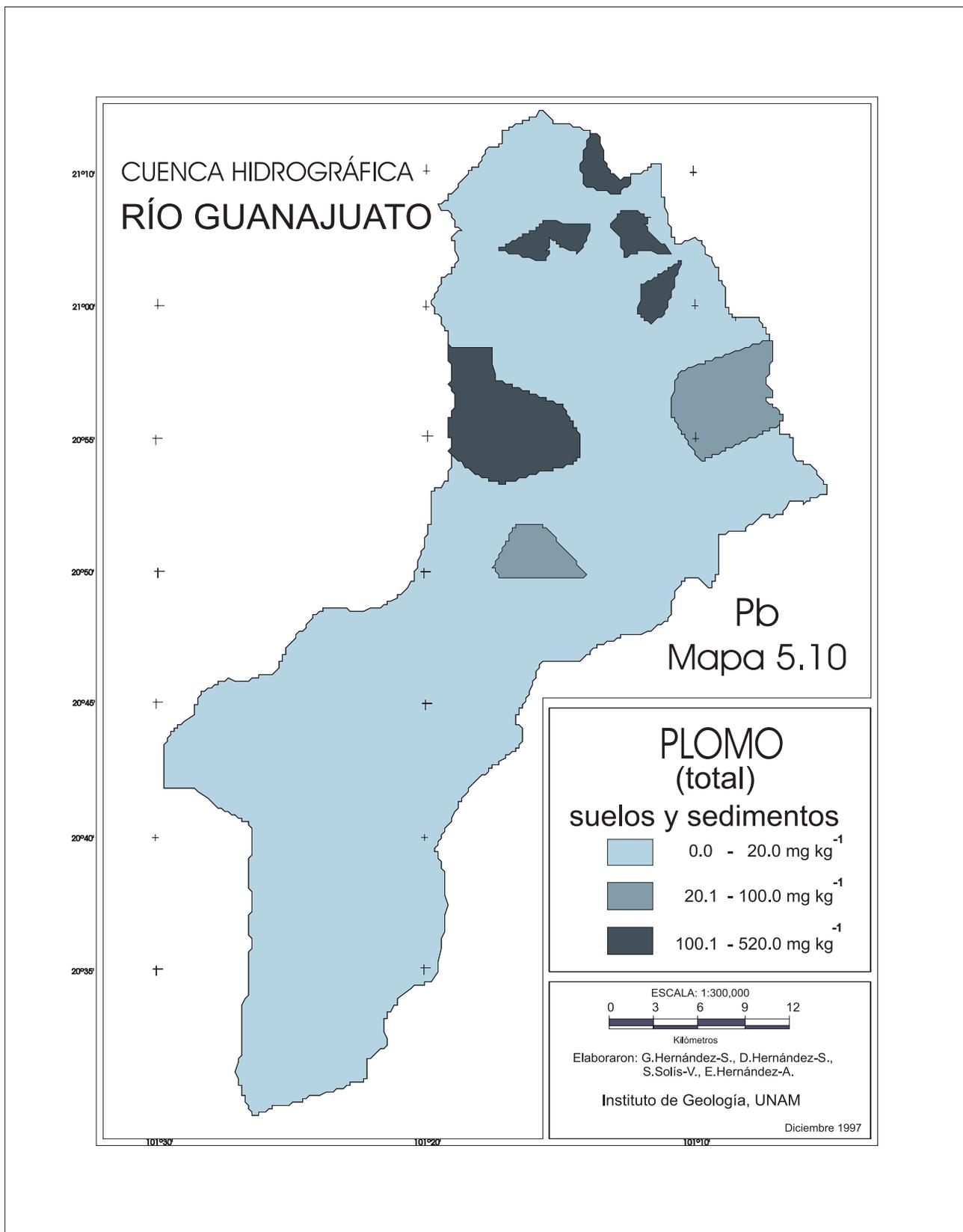


Figura 11. Mapa de dispersión de plomo en la cuenca del río Guanajuato.

mg·kg⁻¹. La Unión Europea lo establece en 50.0 mg·kg⁻¹ y Canadá en 60.0 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

5.2.11 Zinc

El Zn es otro elemento asociado a la zona de minerización y a la actividad minera del Distrito de Minero de Guanajuato. La presencia de Zn más significativa se encuentra en los jales de La Peregrina (347.6 mg·kg⁻¹), El Cubo (295.8 mg·kg⁻¹), Monte San Nicolás (213.0 mg·kg⁻¹). Los sedimentos de los arroyos localizados en la sierra, también poseen concentraciones importantes: arroyo Durán (mineral Mellado) con 313.65 mg·kg⁻¹, arroyo Durán (mineral de Rayas) con 250.6 mg·kg⁻¹, arroyo Rayas (mineral Rayas-Mellado) con 223.9 mg·kg⁻¹, arroyo Duarte (mineral La Valenciana) con 179.8 mg·kg⁻¹ y sedimentos de la presa Los Mata y confluencia con el arroyo San Antonio con 167.45 mg·kg⁻¹. Otra área relevante la constituyen las terrazas aluviales del río Guanajuato en Cajones y Haciendita, con cantidades que fluctúan de 118.3 a

350.85 mg·kg⁻¹. Los contenidos de Zn en los suelos de la sierra van de 21.10 (cerro Pelón) hasta 198.5 mg·kg⁻¹ en el puente Santa Ana. En la región correspondiente a El Bajío, las áreas con mayor concentración de Zn son el canal Principal a la altura de San Roque (281.35 mg·kg⁻¹) y el mismo canal Principal a la altura de San Isidro Borja con 212.0 mg·kg⁻¹. La confluencia de los ríos Guanajuato y Lerma tuvieron 133.05 mg·kg⁻¹; los terrenos de la Escuela de Agricultura 129.95 mg·kg⁻¹ y la zona industrial de Irapuato con 186.0 mg·kg⁻¹ (Figura 12).

Este elemento se encuentra unido principalmente al Distrito Minero, como lo demuestra la Clase 3. Dentro de la Clase 2 que es la más extendida (Figura 12), existen numerosos lugares con niveles que sobrepasan las 125.0 mg·kg⁻¹, que es el límite superior del rango medio mundial en suelos según McBride (1994). Müller *et al.* (1992) consideran que el límite máximo permisible para Zn en sedimentos es de 100.0 mg·kg⁻¹. La Unión Europea lo evalúa en 150.0 mg·kg⁻¹ y Canadá en 220.0 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

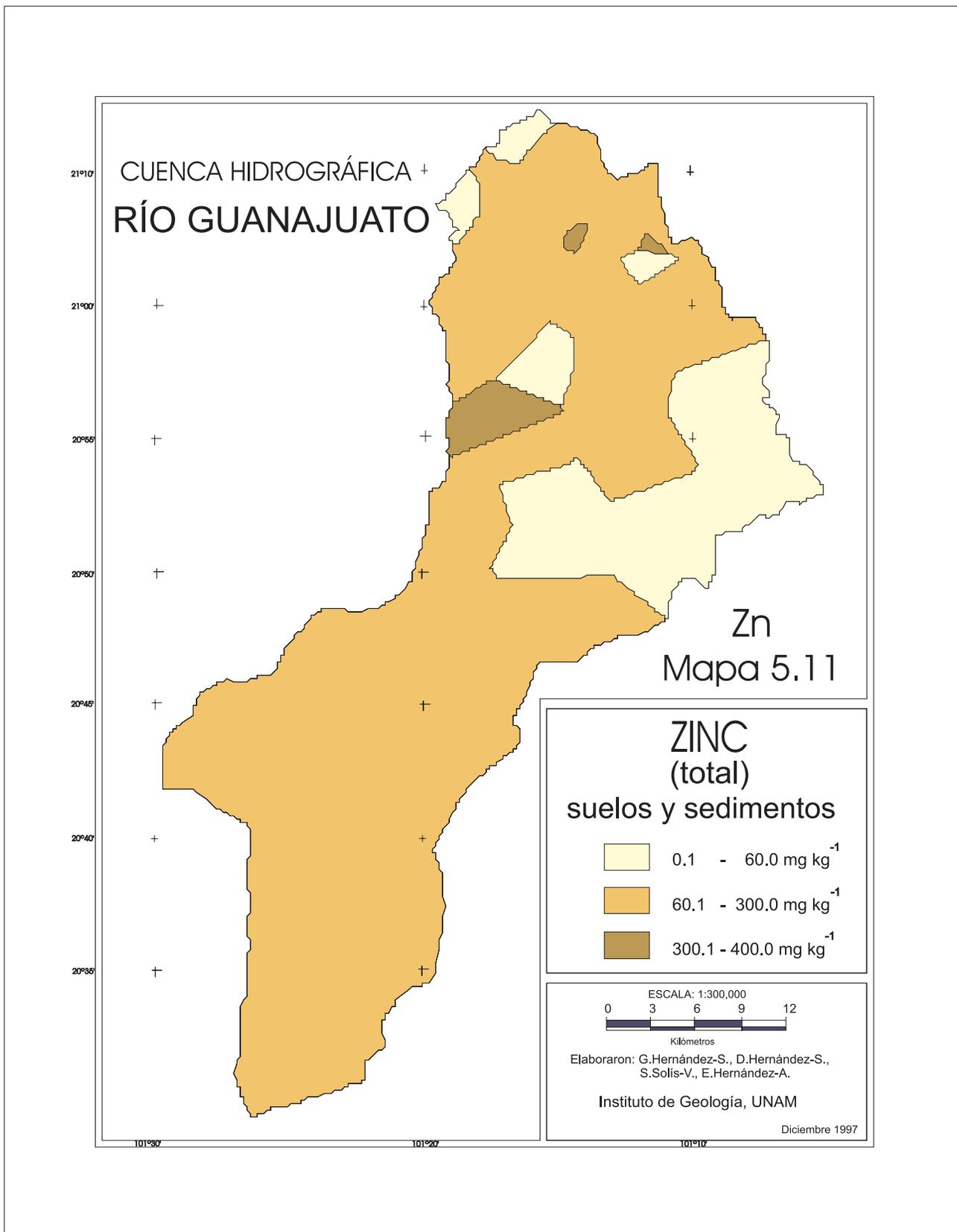


Figura 12. Mapa de dispersión de zinc en la cuenca del río Guanajuato.

6. CUENCA SAN JUAN DE OTATES

6.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES

6.1.1 Localización de la zona de estudio

Esta cuenca se encuentra al noreste del sistema hidrológico Lerma-Chapala, abarca una superficie de 1,152 km². Los límites son: al norte, la cuenca del río La Laja, al oeste y sur, la cuenca del río Turbio, al este, las cuencas de los ríos Silao y Guanajuato (Figura 13). El sistema San Juan de Otates descarga sus aguas en el río Guanajuato y éste en el río Lerma.

6.1.2 Fisiografía

Se localiza en dos regiones fisiográficas; el norte forma parte de la Mesa del Centro, mientras que el sur forma parte del Eje Neovolcánico Transmexicano. La primera incluye muchas subregiones destacando en ellas, la sierra de Guanajuato formada por sierras y mesetas drenadas por valles paralelos, con una dirección general noreste-suroeste o bien norte-sur. Estos valles se caracterizan por “la convexidad vertical” (SPP, 1980); es decir, sus pendientes son más pronunciadas hacia el fondo de las cañadas. La sierra ha tenido distintas etapas de erosión resultado de movimientos tectónicos. La erosión se ha facilitado debido a la presencia de fuertes pendientes, que pueden superar los 40° además de las múltiples fracturas existentes, que también facilitan los procesos de degradación. Una gran falla al sur de la sierra de Guanajuato sirve de límite con el Eje Neovolcánico. Esta fractura permitió la formación de un graben hacia el sur, conocido como El Bajío que consiste en un área de llanuras y lomeríos al sur del área de estudio. Entre los 1,890 y 1,900 m s.n.m. se encuentra la ruptura de pendiente abajo de la cual predominan las pendientes menores de 8°. También existe una pequeña zona de lomeríos al sur y al este de Duarte donde las pendientes son intermedias, entre 8° y 20°. El Bajío es un valle estructural, rellenado con material transportado por las corrientes que bajan de la sierra.

6.1.3 Geología

Desde el punto de vista estratigráfico (Martínez-Reyes, 1992), la sierra de Guanajuato está constituida

por dos conjuntos litológicos claramente definidos: uno inferior, mesozoico (con batolito granítico asociado K=51 Ma (Stein *et al.*, 1993) y otro superior, cenozoico vulcano-sedimentario continental. Las rocas mesozoicas en su parte basal presentan varios plutones de edades diferentes K-Ar=110-145 Ma (Ortiz-Hernández y Martínez-Reyes, 1993), así como rocas de diferente composición (de ultramáficas a félsicas) y rocas vulcano-sedimentarias con metamorfismo de bajo grado y plegamientos de diferentes grados, ocurridos tanto en el Mesozoico como en el Plioceno. El Oligoceno está representado por intrusivos ácidos (pórpidos riódacíticos) de dimensiones pequeñas en formas de cuellos volcánicos y/o domos. Las principales formaciones geológicas son:

Mesozoico. Está formado por secuencias representativas de dos ambientes paleogeográficos diferentes: una, vulcano-plutónica alóctona, perteneciente a un arco insular intra-oceánico (arco de Guanajuato) y otra, vulcano-sedimentaria para-autóctona, perteneciente a una cuenca oceánica: cuenca de Arperos (Monod *et al.*, 1990; Lapierre *et al.*, 1992).

Piroxenita San Juan de Otates (Jpsj). Es una roca verde oscuro, constituida principalmente por piroxenos (augita), hornblenda, olivino y plagioclasas cálcicas, con diferentes grados de serpentización. Los autores de este informe encontraron en estas rocas, concentraciones de Ni que van de 170 a 520 mg·kg⁻¹ y de 2,830 a 3,025 mg·kg⁻¹ de Cr.

Complejo Vulcano-Sedimentario Sierra de Guanajuato (Kesg). Comprende tanto rocas terrígenas como volcánicas del Cretácico Inferior (Dávila-Alcocer y Martínez-Reyes, 1987). En esta formación abundan las grauvacas. Las rocas volcánicas incluyen lavas almohadilladas de composición basáltica, sills doleríticos, dacitas y tobas básicas. La geoquímica de estas rocas muestra una afinidad magmática alcalina, relacionada con una corteza oceánica.

Cenozoico. Abarca depósitos de ambiente continental, donde diversas fases de vulcanismo y plutonismo son acompañadas por fases de sedimentación. Entre

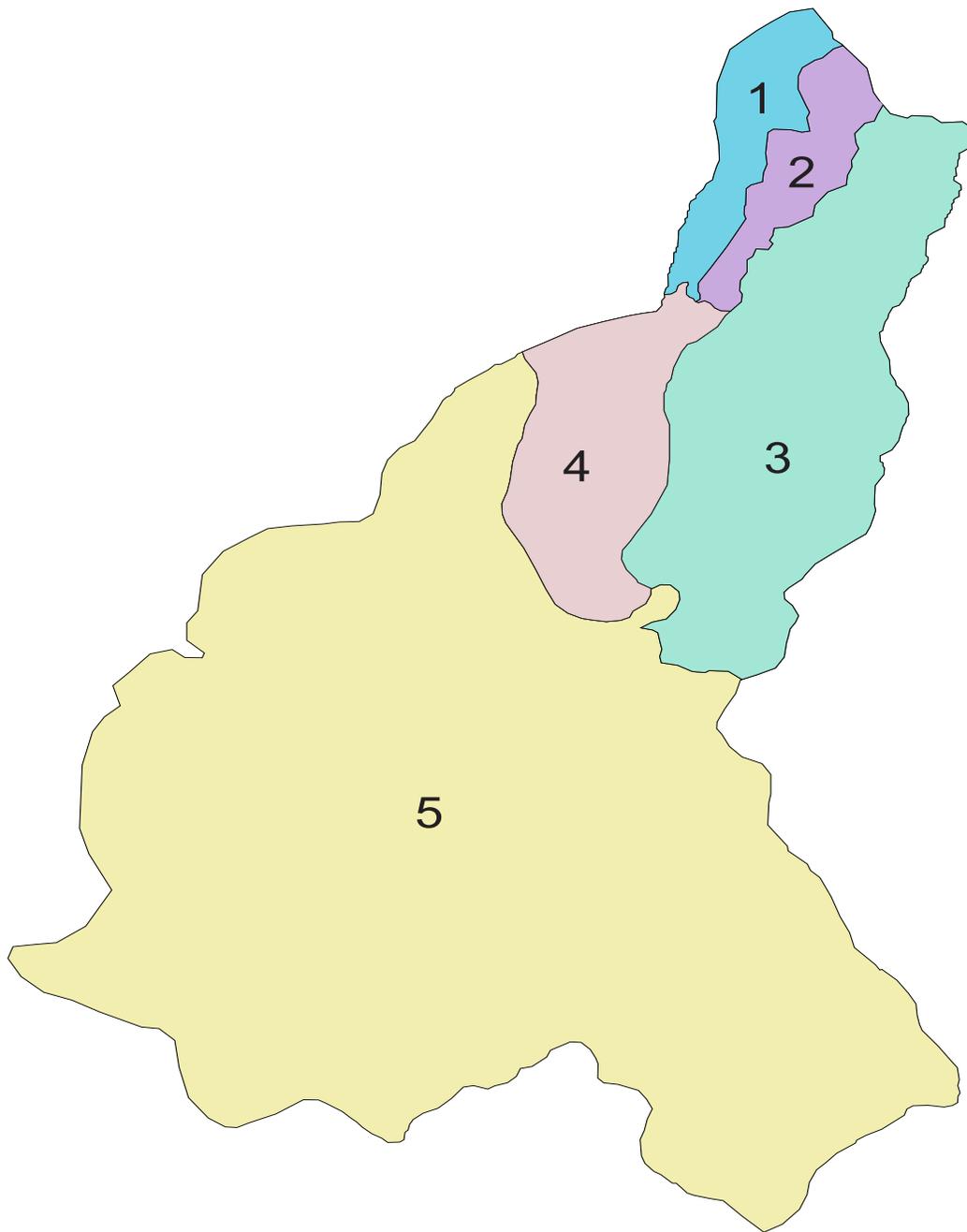


Figura 13. División de la cuenca San Juan de Otates en cinco subcuencas.

el conjunto basal mesozoico y la cubierta vulcano-sedimentaria cenozoica, se encuentra un intrusivo de composición ácida, conocida como granito Comanja (Tgco), que aflora a lo largo de casi toda la sierra de Guanajuato. No muestra metamorfismo regional, pero sí una amplia aureola de metamorfismo de contacto que produjo varios tipos de rocas, de acuerdo a la roca encajonante intrusionada (Vassallo y Martínez-Reyes, 1988).

Conglomerado Basal Terciario (Tedu). Al norte del poblado Duarte, aparece una roca de estratificación masiva, bien consolidada de color rojo, constituida por clastos de naturaleza volcánica, plutónica, sedimentaria y/o metamórfica, con matriz arenosa como cementante. El conglomerado descansa discordantemente sobre la secuencia vulcano-sedimentaria sierra de Guanajuato; es equivalente al Conglomerado Rojo de Guanajuato (Edwards, 1955).

Riolita El Ocote (Troc). Está representada principalmente en la sierra del Ocote con formas dómicas y con altos contenidos de topacio.

Ignimbrita Cuatralba (Ticu). En esta unidad se agrupan todas las rocas de naturaleza piroclástica que cubren amplias extensiones, tanto en la sierra de Guanajuato como en El Bajío. Se trata de rocas de composición riolítica, que consisten en tobas soldadas poco consolidadas de color rosado y blanco. Su posición estructural es horizontal en la mayoría de los casos, con una edad de 28 Ma, según Nieto *et al.* (1996).

Una gran falla que corre en dirección NW a SE entre los 1,890 y 1,900 m s.n.m., al sur de la sierra de Guanajuato, sirve de límite con el resto de la cuenca: el graben de El Bajío. Este graben está constituido por un valle estructural de origen tectónico, rellenado con material transportado por las corrientes que bajan de la sierra. En esta área se encuentran ignimbritas, basaltos, riolitas, andesitas, areniscas y conglomerados, cuyas altitudes van desde 1,900 m en el centro, hasta 2,160 m al SW de la cuenca. Entre estas elevaciones se encuentran grandes extensiones de tierras agrícolas de riego, cuyas altitudes varían de 1,850 m en la porción cercana a la falla, hasta los 1,730 m en la confluencia con el río Guanajuato.

6.1.4 Clima

Dentro de esta cuenca no hay estaciones climatológicas a excepción del aeropuerto internacional de Silao; sin embargo, debido a los pocos años que tiene esta estación, no es posible obtener un promedio representativo de los datos climáticos; por lo tanto, deben examinarse puntos aledaños, como el Mineral de la Luz, León y Silao.

En esta cuenca existen tres climas distintos, según la clasificación de Köppen modificada por García (1981). Las zonas más altas superiores a los 2,000 m de altitud, presentan un clima C(w₂)(w)bi; es decir, el más húmedo de los climas templado subhúmedos, con lluvias en verano. Este es el caso del mineral de la Luz cuya temperatura media anual es de 15.7°C con una precipitación media anual de 929.9 mm; además, presenta la peculiaridad de un verano fresco y largo que es resultado de la altura. El clima BS₁hw(e)g es el menos seco de los climas semi-secos con lluvias en verano; se localiza en toda la franja central de la zona, cuya estación climática representativa es León, con una temperatura media anual de 19.2°C y precipitación media anual de 619.8 mm. Tiene además un subtipo climático denominado gangético, donde la temperatura media más alta del año cae antes del solsticio de verano. El tercer tipo de clima es (A)Cw₀a(e), lo representa Silao y cubre la parte más baja de la cuenca de San Juan de Otates-La Llave, hacia el sur de la zona de estudio. Se trata del clima más seco de los semi-cálidos con lluvias de verano; la temperatura media anual es de 19°C y la precipitación media anual de 661.2 mm. Se observa una variación extremosa de la temperatura media mensual, aunque se trata de un límite con el clima SB.

6.1.5 Hidrología

La subcuenca del río de San Juan de Otates-La Llave incluye 3 corrientes que son de oeste a este, San Juan de Otates, San José de Otates y Arroyo Grande. Antes que se introdujera el riego en gran escala en esta zona, estas tres corrientes integraban una sola, que río abajo, se denominaba río La Llave antes de confluir hacia el sistema Silao-Guanajuato.

Los arroyos San Juan de Otates, Juache, Grande y San José de Otates, se originan en la meseta de Cuatralba a unos 2800 m de altitud. El arroyo San Juan de Otates drena la parte media de la meseta, pasa por

la ranchería de los Alisos, luego la mina de El Maguey; finalmente sale de la sierra a la planicie cerca de la población de San Juan de Otates. Durante su recorrido por la sierra recibe pocos afluentes de trayectoria corta; además, drenan la mesa El Zacate, el cerro El Timbal, la mesa de Los Vargas y el cerro San Juan. El arroyo San José de Otates drena la parte sur de la mesa de Cuatralba pasando por la población del mismo nombre. A partir de la ranchería Piedra del Coche, cambia de nombre por el de arroyo El Juache que finalmente sale de la sierra en la población de La Laborcita.

Los arroyos de San Juan de Otates y San José de Otates corren paralelamente tanto en la serranía como en la planicie y se unen cerca de la cota de 1850 m; después la corriente se encuentra canalizada en dos tramos formando así, el canal de Santa Ana del Conde. Estas aguas en general escurren en dirección noreste-suroeste, aunque después toman la dirección noroeste-sureste. Poca agua alcanza a llegar a la presa de San Antonio donde se localiza el histórico poblado de Santa Ana del Conde. Las aguas prosiguen su curso y van a formar parte de la presa Gavia de Rionda. Al salir de esta presa, las aguas están nuevamente canalizadas; esta vez con dirección oeste-este hasta alcanzar la presa La Llave. Saliendo de esta obra hidráulica, el río se llama río La Llave y con un curso noroeste-sureste. Antes de unirse al río Silao, pasa por una zona pantanosa al poniente del pueblo de Tejamanil y otra zona de inundación. El río Silao es a su vez, afluente del río Guanajuato a la altura de la ciudad de Irapuato. Las presas Gavia de Rionda, La Llave y otras pequeñas represas fueron hechas, ampliadas o acondicionadas para proteger de las inundaciones a la ciudad de Irapuato.

La tercera corriente que forma parte de esta cuenca de Otates es el arroyo Grande. Anterior al uso intensivo de riego en la zona, el arroyo Grande se unía al canal de Santa Ana cercano al vaso de la presa San Antonio. Actualmente el agua es consumida antes que las dos corrientes puedan unirse. El arroyo Grande drena una parte de la sierra de Guanajuato, con localización hacia el este de los arroyos de San Juan y San José de Otates. En la parte montañosa, el arroyo Grande recibe como afluente importante al arroyo Las Pilas, cercano a la población del mismo nombre. Entre este poblado y la confluencia del arroyo Las Pilas existe una angosta presa que sirve para controlar inundaciones y almacenar agua. El arroyo Grande cambia de nombre

al recibir por el Este las aguas del arroyo Cundo, cerca de Loza de los Padres, volviéndose arroyo El Colgado. Éste se bifurca en un brazo que desaparece cerca del aeropuerto y en otro que toma el nombre de arroyo Los Sauces hasta Loza de Barrera.

6.1.6 Suelos

La zona de la sierra de Guanajuato se caracteriza por la predominancia de Feozems háplicos con escaso desarrollo y con intemperismo químico de mediana intensidad (Hernández-Silva *et al.*, 1990) y con Vertisoles pélicos en las partes bajas de los valles que son los que más se emplean para la agricultura. En forma asociada sobre las fuertes pendientes, existen Regosoles eútricos y Litosoles; son suelos derivados de rocas intemperizadas *in situ*. La clase textural es media, predominando las fases líticas. En la zona de lomeríos, al este y sur de Duarte existen Vertisoles pélicos y como suelo asociado, el Feozem háplico con textura fina y fase lítica. Las llanuras de El Bajío junto a las corrientes, presentan aluviones derivados de material erosionado, procedente de la sierra o de los lomeríos. El resto de la llanura tiene en forma predominante, Vertisoles pélicos asociados a Feozems calcáricos, cuyo material parental fue transportado desde la sierra de Guanajuato.

6.1.7 Vegetación

La zona se caracteriza por tener distintos ambientes de vegetación debido a las diferencias en relieve, suelo, geología y clima, lo que se refleja a su vez en la gran variación de vegetación. En la sierra existe matorral subtropical, bosque de encino, pastizal natural e inducido. La vegetación más abundante es el matorral subtropical con garambullo (*Mhyrtillocactus geometrizans*), caahuate (*Ipomoea* sp.), huizache (*Acacia* sp.), nopal (*Opuntia* sp.), ocotillo (*Dodonaea viscosa*). El estrato más bajo lo conforman herbáceas como la *Bouteloua* sp. En la parte más alta llega a existir bosque de encino (*Quercus* sp.), pino (*Pinus* sp.) y pino-encino. En El Bajío, la mayor parte del área se encuentra bajo agricultura, pocas áreas con vegetación de mezquital, matorral subtropical, matorral cracicaule, pastizal natural halófilo y pastizal inducido.

El matorral subtropical de El Bajío consiste en órgano (*Lemaireocereus* sp.), caahuate (*Ipomoea* sp.),

nopal (*Opuntia* sp.), huizache (*Acacia* sp.) y mezquite (*Prosopis laevigata*). En el estrato inferior hay *Bouteloua* sp., *Aristida* sp., *Hilaria* sp., etc. El matorral halófilo aparece donde hay drenaje restringido y con acumulación de sales que sólo permiten el crecimiento de plantas como *Distichlis spicata*, *Hilaria* sp. y *Buchloe* sp.

La palabra *otates*, que forma parte del nombre del área de estudio, se utiliza para denominar una vegetación hidrófila, presente a lo largo de corrientes de movimiento lento, lo que es común en los ríos de esta zona.

6.2 LOS METALES PESADOS EN SUELOS Y SEDIMENTOS DE LA CUENCA SAN JUAN DE OTATES

6.2.1 Arsénico

Las concentraciones de arsénico en las rocas de la parte septentrional de la cuenca son, por naturaleza, muy bajas (<2.5 mg·kg⁻¹). La mineralogía macroscópica realizada a las muestras, no mostró mineral alguno asociado al arsénico. El análisis estadístico, realizado con los datos del arsénico, indica que hay diferencias significativas entre las cinco subcuencas. El análisis de comparaciones múltiples señala que los contenidos promedio de las subcuencas A y B son iguales; lo mismo ocurre con las subcuencas D y E. La subcuenca C tiene una concentración promedio similar a las subcuencas A y B. Estos niveles fluctúan entre 0.0 y 96.58 mg·kg⁻¹. La concentración promedio de arsénico en sedimentos (8.26 mg·kg⁻¹) no fue estadísticamente diferente a la concentración media en suelos (14.36 mg·kg⁻¹), lo cual fue debido a la gran variabilidad de estos resultados. En general, todas las subcuencas presentan valores bajos de arsénico, a excepción de la subcuenca C, que deja ver valores desde casi 70 mg·kg⁻¹ hasta más de 90 mg·kg⁻¹. El arsénico fue uno de los elementos que mayor variabilidad presentó en toda la zona con 197.6%

Las concentraciones mayores de As, se localizan en el centro-este y sur de la parte montañosa de la cuenca de San Juan de Otates; también al este de Duarte, sur de Malpaso, este de Comanjilla, norte de Piedra del Coche y en la región plana que se ubica entre las poblaciones de El Rayo y San Carlos del Jagüey. Estas regiones muestran concentraciones arriba de 100 mg·kg⁻¹ tanto en suelos como en sedimentos (Figura 14).

6.2.2 Cadmio

Las rocas mesozoicas (vulcanosedimentarias) y cenozoicas (conglomerados volcánicos, sedimentarios y metamórficos), constituyen la característica geológica de la porción norte de la cuenca; además, representan los factores determinantes para que, eventualmente los contenidos de Cd en estas rocas no rebasen el 0.3 mg·kg⁻¹. Sin embargo, existen áreas restringidas de pizarras y esquistos que probablemente sean el origen de contenidos más elevados de Cd en suelos.

Desde el punto de vista del análisis estadístico, el Cd fue el elemento que mostró menor variabilidad en toda la cuenca hidrográfica, al obtenerse un coeficiente de variación de 25.5%. Las concentraciones fluctuaron entre 1.6 y 5.1 mg·kg⁻¹, con una media geométrica de 2.8 mg·kg⁻¹. El análisis de varianzas indicó diferencias significativas entre subcuencas. El de comparaciones múltiples señaló por un lado que, las subcuencas A y B son estadísticamente iguales y por otro, las subcuencas E, C, D y B no mostraron diferencias significativas en relación al contenido promedio de Cd. La concentración promedio obtenida tanto en suelo (3.06 mg·kg⁻¹) como en sedimentos (2.72 mg·kg⁻¹) fueron significativamente diferentes.

La dispersión más alta observada de Cd (0.1 a 5.1 mg·kg⁻¹) se localiza en el límite septentrional de la cuenca; también al sur de Santa Rosa de Lima, La Angostura, La Providencia y norte de Malpaso. Otra área con estas características se localiza entre el aeropuerto internacional, San José Bautista, Providencia y San Juan de Abajo. Una región relativamente extensa, es la de San José del Resplandor, La Estancia, Jesús del Monte, Plan de Guanajuato, La Muralla, Tutitlán, San Efigenia, Nueva California y Los Amoles (Figura 15).

Según Aller y Bernal (1986), el contenido medio de cadmio en suelos normales se encuentra entre 0.06 y 1.1 mg·kg⁻¹. Alloway (1990) por otro lado, señala que los valores comunes en suelos agrícolas sin contaminación, fluctúan entre 0.2 y 1.00 mg·kg⁻¹. De acuerdo al trabajo de McBride (1994), los rangos medios mundiales de Cd en suelos normales varían de 0.06 a 1.0 mg·kg⁻¹.

6.2.3 Cobalto

Las rocas ultrabásicas asociadas a olivinos, son las que contienen los mayores niveles de Co: entre 100 y 200

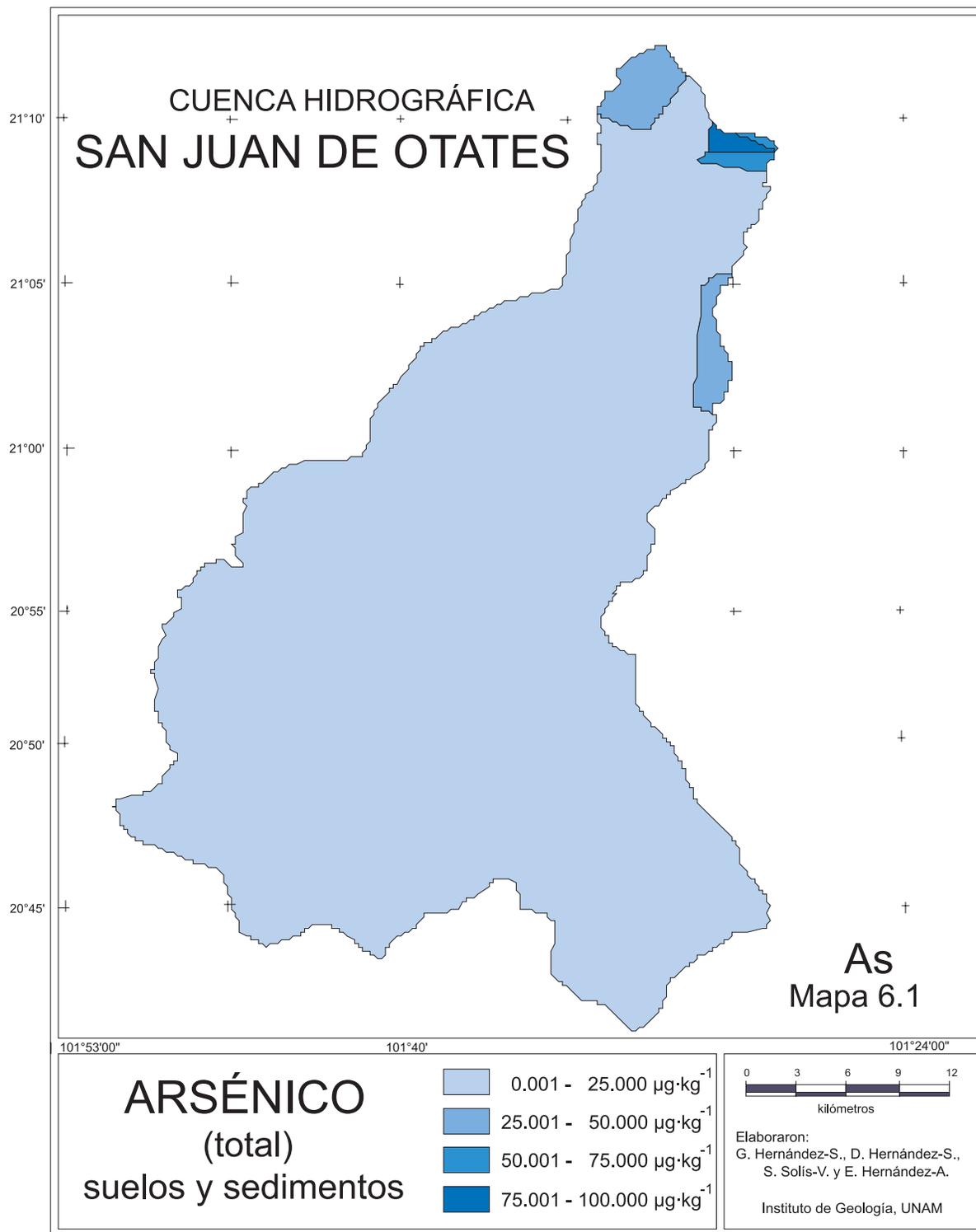


Figura 14. Mapa de dispersión de arsénico en la cuenca San Juan de Otates.

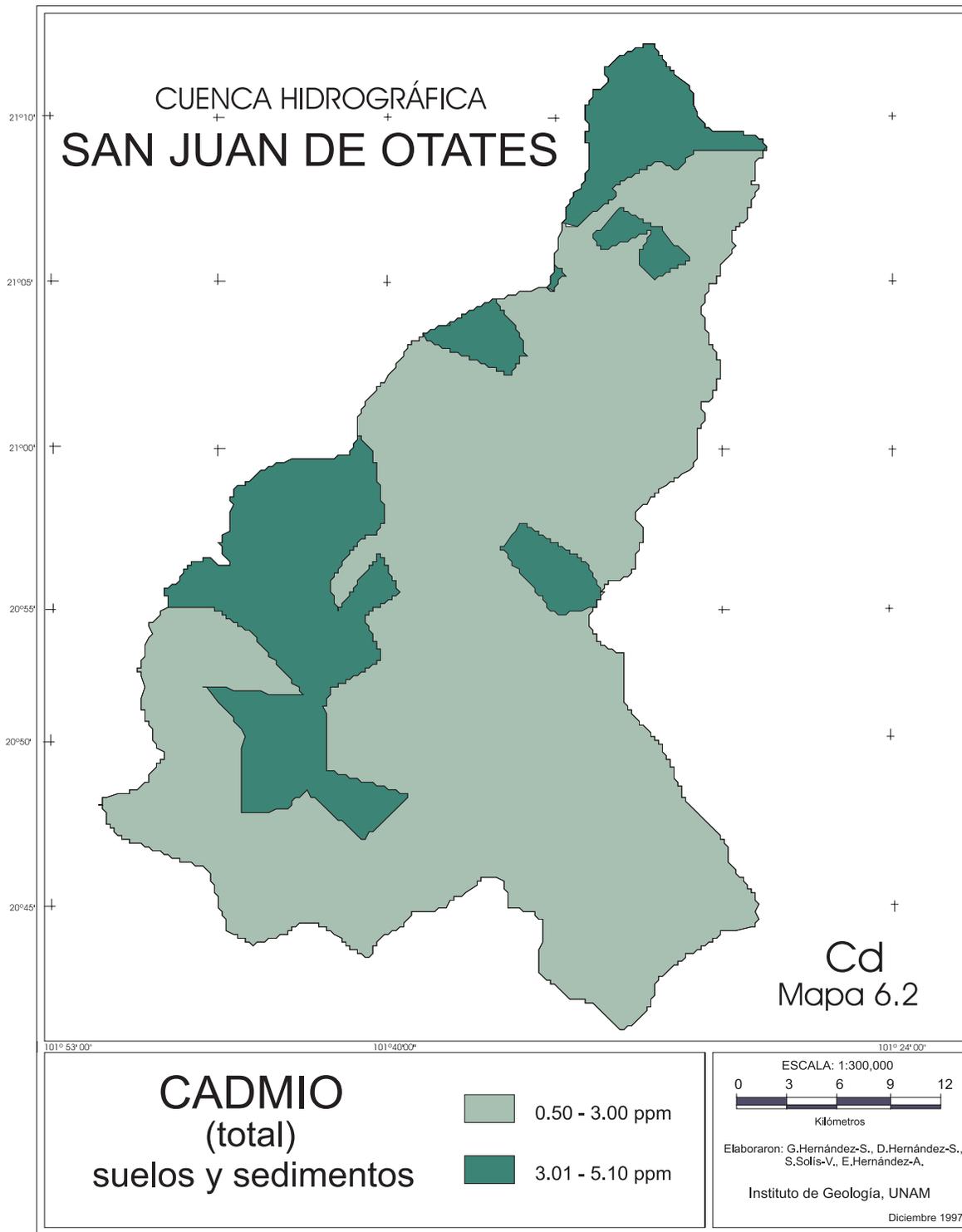


Figura 15. Mapa de dispersión de cadmio en la cuenca San Juan de Otates.

mg·kg⁻¹ (Aubert y Pinta, 1977); las pizarras formadas de rocas ultrabásicas contienen entre 10 y 50 mg·kg⁻¹; las rocas ácidas pueden contener entre 1 y 15 mg·kg⁻¹ y las sedimentarias de 0.1 a 20 mg·kg⁻¹ (Mitchell, 1964). El cobalto se asocia a los minerales arcillosos, materia orgánica y minerales de Fe. En la zona de estudio el cobalto presenta concentraciones que fluctúan entre 4.9 mg·kg⁻¹ y 115.6 mg·kg⁻¹ con una media geométrica de 19.5 mg·kg⁻¹. La variabilidad que presentaron las observaciones en la zona fue relativamente alta (71.1%). El análisis de varianza detectó diferencias significativas entre las concentraciones promedio de cobalto provenientes de las diferentes subcuencas. El análisis de comparaciones múltiple señala dos grupos de homogeneidad: 1) con las subcuencas E, B, C y D, y 2) con las subcuencas A, E y B. No hubo diferencias significativas halladas entre las concentraciones promedio de cobalto con los dos tipos de materiales estudiados; en suelos fue 22.4 mg·kg⁻¹ y en sedimentos de 23.1 mg·kg⁻¹.

Cañadita del Agua, Estancia de Otates, Mesa de Vaqueros y el norte de Duarte son áreas que tienen rangos que fluctúan entre 10.1 y 50.0 mg·kg⁻¹. Entre las zonas con contenidos de 0.1 a 10.0 mg·kg⁻¹ están el sur de Santa Rosa de Lima, Mangas de Estancia, Los Jacales y Los Sauces. También el área comprendida entre Capellanta de Olvera, Los López, Estación Trinidad y, finalmente, Loza de los Padres, el aeropuerto internacional y Los Jacales (Figura 16).

Según el trabajo de Aller *et al.* (1989), los niveles normales de Co en suelos, generalmente se encuentran entre 3 y 15 mg·kg⁻¹. De acuerdo a McBride (1994), los rangos medios mundiales en suelos normales se encuentran entre 1.6 y 21.5 mg·kg⁻¹. Como máximo permisible, Canadá establece 20 mg·kg⁻¹; los Estados Unidos determinaron que 5.0 mg·kg⁻¹ era el nivel apropiado para diferenciar suelos con niveles adecuados de cobalto y suelos deficientes (Soltanpour, 1985).

6.2.4 Cobre

Se encuentra en estado nativo en la corteza terrestre, por lo tanto, es un elemento que se presenta en diferentes tipos de rocas así como en una gran variedad de minerales. Es considerado también como uno de los elementos pesados de mayor movilidad en la superficie terrestre.

El análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre las concentraciones de cobre en las diferentes subcuencas. De igual manera, no hay diferencia estadística significativa entre las concentraciones medias de Cu en suelos (22.8 mg·kg⁻¹) y en sedimentos (20.2 mg·kg⁻¹). Las concentraciones promedio de cobre en toda la zona variaron entre 0.0 y 77.5 mg·kg⁻¹, con una media general de 21.4 mg·kg⁻¹. Estos valores tuvieron un coeficiente de variación de 89.3%.

Las mayores concentraciones de Cu (24.1–100.0 mg·kg⁻¹) en la cuenca San Juan de Otates se localizan en una pequeña área de Cañadita de Agua, oeste de Mesa de Vargas y Ojo de Agua. En una franja irregular que corre de norte a sur y que corresponde a la trayectoria del arroyo Grande; abarca desde La Angostura, Santa Rosa de Lima, norte de Malpaso, La Providencia, Duarte, oeste de Comanjilla, San Carlos-La Roncha, norte de Albarradones, Mezquite de Sotelo, El Refugio de los Sauces y San José del Clavel y, finalmente, los alrededores de Esquina de Garbancillo. Las regiones con contenidos medios de cobre (0.1 a 24.0 mg·kg⁻¹) se encuentran en una franja de la parte septentrional de la cuenca; en una zona que abarca el norte de Malpaso, El Llano, oeste de Comanjilla, San José de los Romero y norte de Albarradones. Asimismo otra área comprendida entre, el norte de Playas de Sotelo, Santa Ana del Conde, San Antonio de Pocholes, Santa Rosa de Gavia, La Sardina, El Rayo y El Refugio de los Sauces; también en la parte correspondiente a la presa El Carmen, San José de Tunas Agrias, Los Ocotes, San José de Solís, El Reparó y El Refugio; finalmente, en la zona correspondiente a la confluencia del arroyo de La Llave con el sistema Silao-Guanajuato en los alrededores de El Venado de San Lorenzo (Figura 17).

En cuanto al contenido de Cu, Bohn *et al.* (1985) consideran como suelos normales aquéllos que se encuentran en el rango comprendido entre 2 y 200 mg·kg⁻¹. Alloway (1990) muestra una tabla con intervalos que van de 2 a 180 mg·kg⁻¹ dependiendo del suelo de que se trate. McBride (1994) menciona que el rango medio mundial en suelos, varía de 6 a 80 mg·kg⁻¹. La concentración máxima aceptable por la Unión Económica Europea es de 50 mg·kg⁻¹; Canadá, acepta 100 mg·kg⁻¹ como límite (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Para Cu en sedimentos, Müller *et al.* (1992) señalan como máximo permisible 45 mg·kg⁻¹.

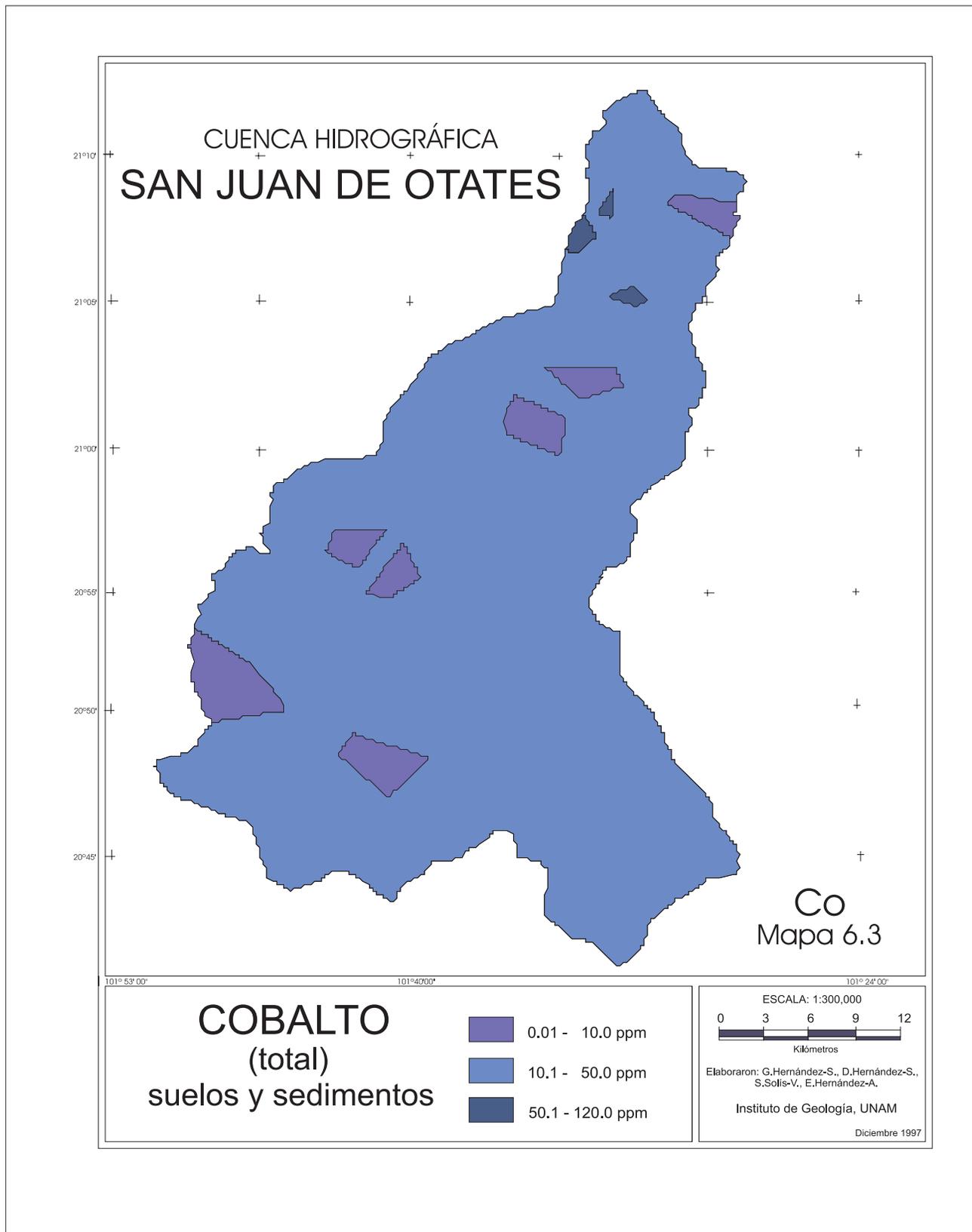


Figura 16. Mapa de dispersión de cobalto en la cuenca San Juan de Otates.

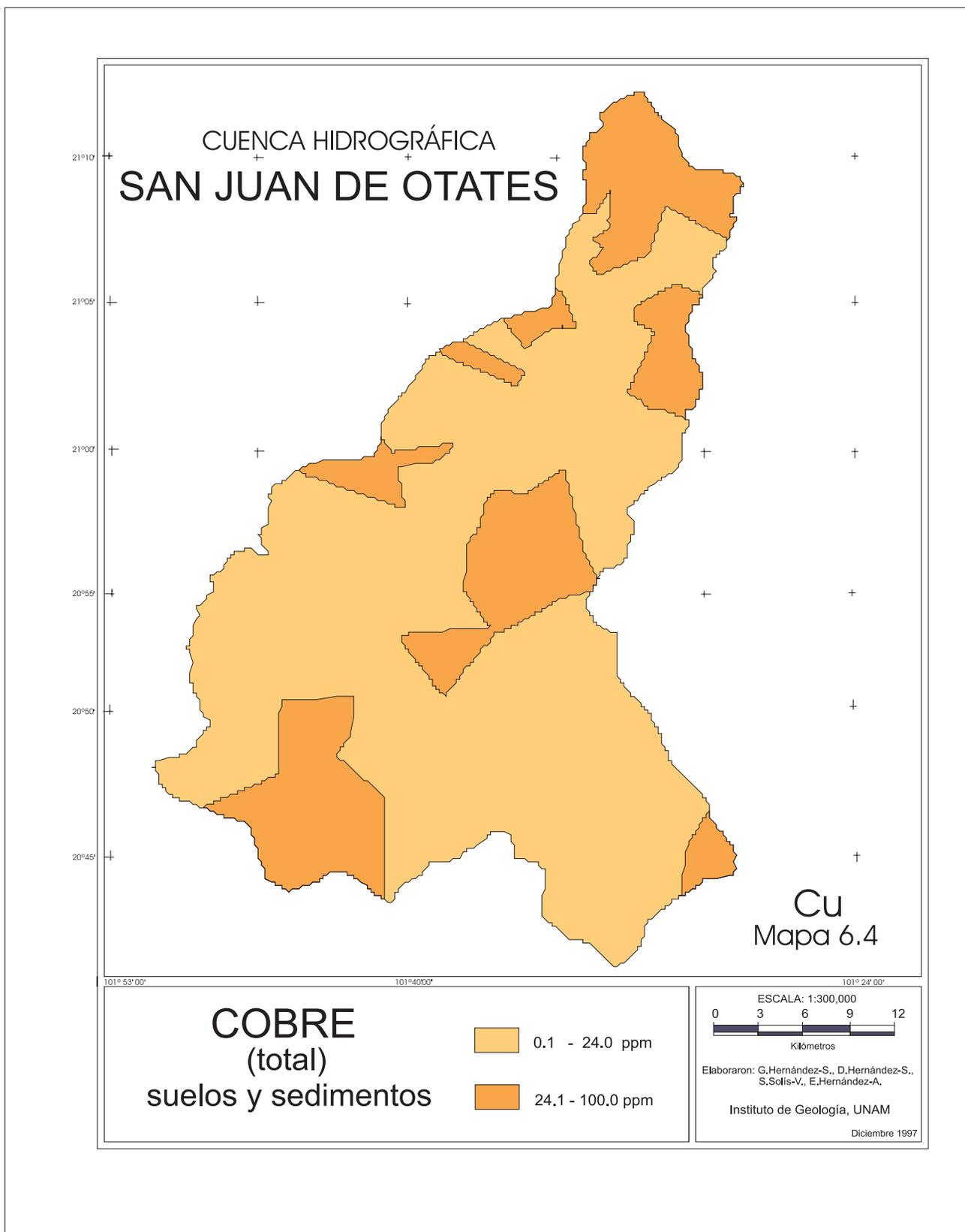


Figura 17. Mapa de dispersión de cobre en la cuenca San Juan de Otates.

6.2.5 Cromo

Las piroxenitas existentes en la porción norte de la subcuenca del arroyo San Juan de Otates son, en buena medida, el origen de los contenidos de Cr en suelos y sedimentos de la zona de estudio. Son rocas verdes oscuro, constituidas principalmente por piroxenos (augita), olivino, hornblenda y plagioclasas cálcicas con diferentes grados de serpentización. Nriagu y Nieboer (1988) reportan que, en rocas ultramáficas, los contenidos de Cr pueden variar de 1,000 a 3,400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Los principales minerales asociados a estas rocas que se obtuvieron en el análisis mineralógico macroscópico fueron: augita, piroxena, serpentina, hornblenda, olivino y talco. En suelos derivados de serpentinas y basaltos, los rangos pueden variar de 5 a 3,000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Bowen, 1979); los encontrados en la cuenca San Juan de Otates fluctúan entre 27 y 615 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Hernández-Silva *et al.*, 1997) (Figura 18).

El análisis de varianza de los datos obtenidos, indica que hay diferencias significativas entre las concentraciones promedio de cromo entre las diferentes subcuencas. El análisis de comparaciones múltiples indicó que la subcuenca A (San Juan de Otates) con 173.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ es, estadísticamente, diferente a las demás. Por otro lado, las subcuencas D y E (Juache y canal Santa Ana del Conde respectivamente) son similares, así como también entre D y C (La Llave y arroyo Grande). El cromo tuvo un coeficiente de variación de 130.3%, con concentraciones que variaron entre 3.0 y 615.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con una media geométrica de 36.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Las concentraciones promedio obtenidas en los diferentes materiales, suelo (59.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y sedimento (60.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) no presentan diferencia significativa.

Los contenidos por arriba de 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en suelos y sedimentos se localizan en primer lugar, en la región comprendida entre El Maguey, oeste de Sauz Seco, Piedra del Coche, Lucio Blanco, La Laborcita, la confluencia de los arroyos Juache y San Juan de Otates. Otra, abarca la zona comprendida entre las poblaciones de San José Bautista, San Juan de Abajo, Los López y Estación Trinidad. También por arriba de las 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, se encuentra el área comprendida entre San Sebastián, El Cuije, Los Ramírez y San Agustín del Mirasol. Finalmente, un área situada entre el norte de Jesús del Monte y Plan de Guanajuato. Los rangos

comprendidos entre 54.1 y 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ se localizan en una zona comprendida entre las poblaciones San José el Alto, el aeropuerto internacional, San José Bautista y Los López; lo mismo que la región ubicada entre San Juan de Abajo, Estación Trinidad, El Cuije, El Resplandor, El Bajío de Bolas Blancas, Playas de Sotelo, Santa Ana del Conde, Nuevo Lindero, Barretos y presa San Antonio; es decir, una franja que corre primero de norte a sur y después, de este a oeste, que coincide con la trayectoria del canal Santa Ana del Conde (Figura 18).

McBride (1994) reporta rangos medios mundiales de cromo en suelos de 7 a 221 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. La concentración media en la cuenca hidrológica es de 59.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Bohn *et al.* (1985) consideran que el rango normal de Cr puede variar de 5 a 1,000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Para la Unión Económica Europea la concentración máxima permisible en suelos es de 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; para el Canadá, 120 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Para Cr total en sedimentos, Müller *et al.* (1992) proponen como límite máximo permisible 90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

6.2.6 Hierro

Es el elemento más abundante en la corteza terrestre. Las rocas ultramáficas son las de mayor contenido en Fe (9.85%) seguidas de las máficas (8.56%). Las sedimentarias asociadas con óxidos de hierro pueden tener un rango que va de 1.3 a 4.3% (Green, 1959). Según Lawton (1955), el contenido medio de hierro en suelos puede variar de 1.4 a 4.0%.

El hierro presentó valores de concentración que fluctuaron entre 0.73 y 6.4% con una media geométrica de 2.8%. Este elemento junto con el cadmio tuvieron bajos coeficientes de variación en comparación con el arsénico y el mercurio. El coeficiente de variación de las concentraciones de hierro fue de 33.4%. El análisis de varianza detectó diferencias significativas entre las concentraciones promedio de hierro de las diferentes subcuencas. El de las comparaciones múltiples señala a las subcuencas A y E similares, pero a la vez, diferentes a la D. No hubo diferencia significativa entre las concentraciones promedio de hierro obtenidas en los suelos (3.05%) y en los sedimentos (3.06%). La toxicidad por hierro se presenta en suelos fuertemente ácidos, como Ultisoles y Oxisoles, y en suelos inundados (Johnston, 1981), suelos que, desde luego, no existen en la región.

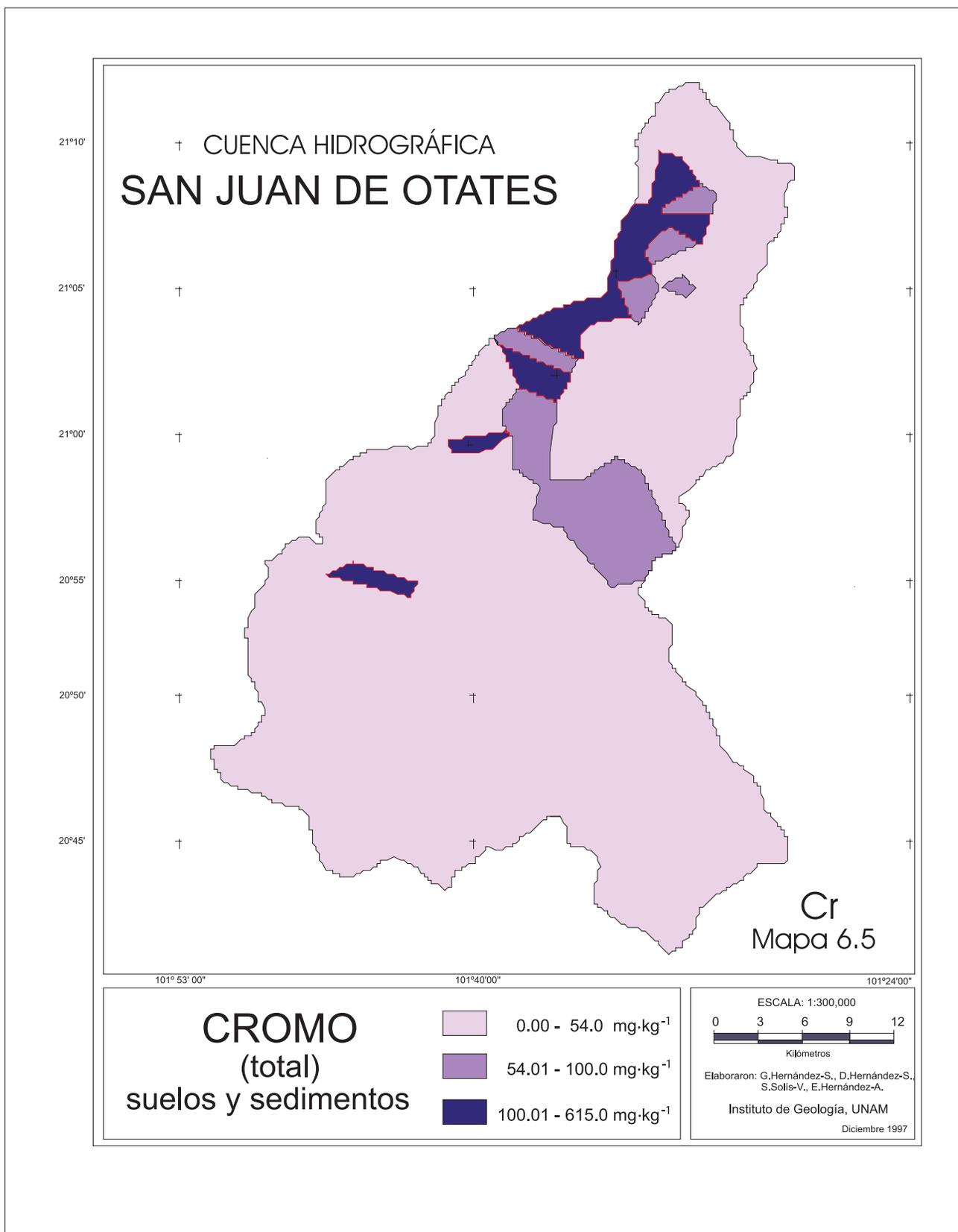


Figura 18. Mapa de dispersión de cromo en la cuenca San Juan de Otates.

Las mayores concentraciones de Fe total (2.31 a 3.5%) en suelos y sedimentos de la zona de estudio, se encuentran en la parte septentrional de la cuenca, en los alrededores de Los Alisos; al norte de cerro Verde y oeste de San José de Otates; el área comprendida entre El Maguey, este del Sauz Seco y mesa de Los Vargas; entre Lucio Blanco y la confluencia de los arroyos El Juache y San Juan de Otates; entre La Providencia y Las Pilas, Mangas de la Estancia, El Llano, Comanjilla, San José de los Romero y Albarradones; entre San José de Buenavista, Providencia, sur del aeropuerto internacional y San José del Clavel; el área que abarca El Bajío de Bolas Blancas, Santa Ana del Conde, Playas de Sotelo, presa de San Antonio y San Antonio de los Pochotes; La Sardina, este del Camaleón, San Antonio y Loma de Portillo; Santa Anita del Guaricho, presa La Llave, norte de Los Ángeles, norte del Pedregal de los Barroso, San Clemente y norte de Santa Rosa de Rivas y, finalmente, la confluencia del arroyo de la Llave con el sistema Silao-Guanajuato en las proximidades de Venado de San Lorenzo.

Las concentraciones bajas de hierro (0.01 a 2.3%) se localizan en los alrededores del cerro Verde, Piedra del Coche, Malpaso, Los López, Loza de Barrera y Mezquite de Sotelo; en áreas más extensas: San José del Resplandor, San Judas, Nuevo Jesús del Monte, Plan Libertador, La Estancia, Plan de Guanajuato, Jesús del Monte, Las Amapolas, El Panal y Jalpa; Rancho Nuevo de la Luz, El Terrero, este de Barreto, La Arcina, El Jagüey y La Sardina; Sauz de Armenta, San Antonio de Funes y El Tejocote; Los Ocotes, La Muralla, Palos Amarillos y Tutitlán (Figura 19).

6.2.7 Manganeseo

Los contenidos de manganeso en rocas ígneas tienen un promedio de $1,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; las ultramáficas pueden tener $1,300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; las máficas, $2,200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y las félsicas $600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Green, 1959). De acuerdo a Aubert y Pinta (1977), los contenidos de manganeso en las rocas varían ampliamente. En rocas ácidas, como el granito o las riolitas, los valores de manganeso pueden variar de 200 a $1,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; en calizas, de 400 a $600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y en areniscas de 20 a $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Gilkes y McKenzie (1988) afirman que las concentraciones mayores en rocas se encuentran en rocas ígneas como el basalto y el gabro.

Las concentraciones de manganeso en la zona variaron de $109.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ a $2,235.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con una media geométrica de $599.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. La variabilidad del elemento también fue relativamente baja, presentando un coeficiente de variación de 39.0%. El análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre las concentraciones promedio de Mn de las diferentes subcuencas. Únicamente hubo diferencia significativa entre los promedios obtenidos de los diferentes materiales: suelo, $700.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; sedimento, $591.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Las mayores concentraciones de manganeso (751.0 - $2,250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en la cuenca San Juan de Otates se encuentran en las siguientes áreas: norte de San José de Otates, cerro Verde, Piedra del Coche, cerro de San Juan, La Angostura, Sauz Seco, Cañadita de Agua y Mesa de Agua; los alrededores de La Laborcita y Providencia; el área comprendida entre El Llano, Duarte, Comanjilla, Ignacio Zaragoza y San José de los Romeros; también la zona comprendida entre San José el Alto, San José Bautista, Capellanta de Olvera y San José del Clavel; presa San Antonio, Playas de Sotelo, Santa Ana del Conde y El Camaleón; también entre El Desagüe, Plan Libertador y Jesús del Monte; norte de la Loma de Portillo, Gavia de Rionda, Cruz de Aguilar y Los Amoles; El Hizache de Serranos, La Mora y La Tinaja; finalmente, Vista Hermosa, sur de El Tejamanil, norte del cerro del Veinte y el Venado de San Lorenzo (Figura 20).

Según Green (1959), el promedio mundial de manganeso en suelos es de $850 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. De acuerdo a McBride (1994), los rangos medios mundiales de manganeso varían de 80 a $1,300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; sin embargo, puede haber variación; por ejemplo, si los suelos son derivados de serpentinas, el manganeso total puede llegar hasta $1,500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Smith, 1990). El nivel crítico de deficiencia de manganeso se ha establecido entre 15 y $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Fleming *et al.*, 1968). De acuerdo al trabajo de Foy (1978), se determinó que el nivel crítico de manganeso para la mayoría de los cultivos es $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

6.2.8 Mercurio

El contenido bajo de mercurio total en suelos y sedimentos superficiales de toda la cuenca se debe básicamente a la naturaleza propia de las rocas que

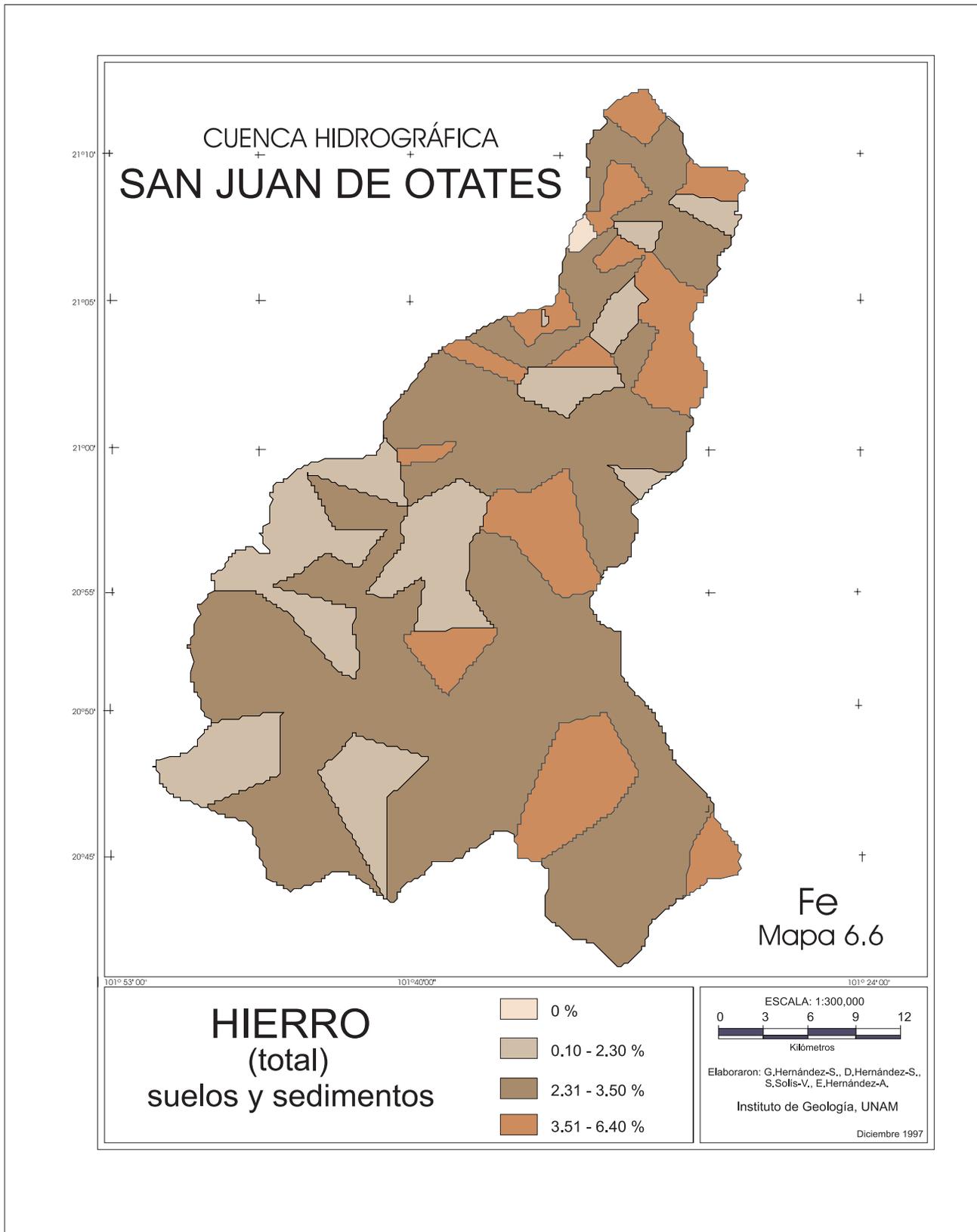


Figura 19. Mapa de dispersión de hierro en la cuenca San Juan de Otates.

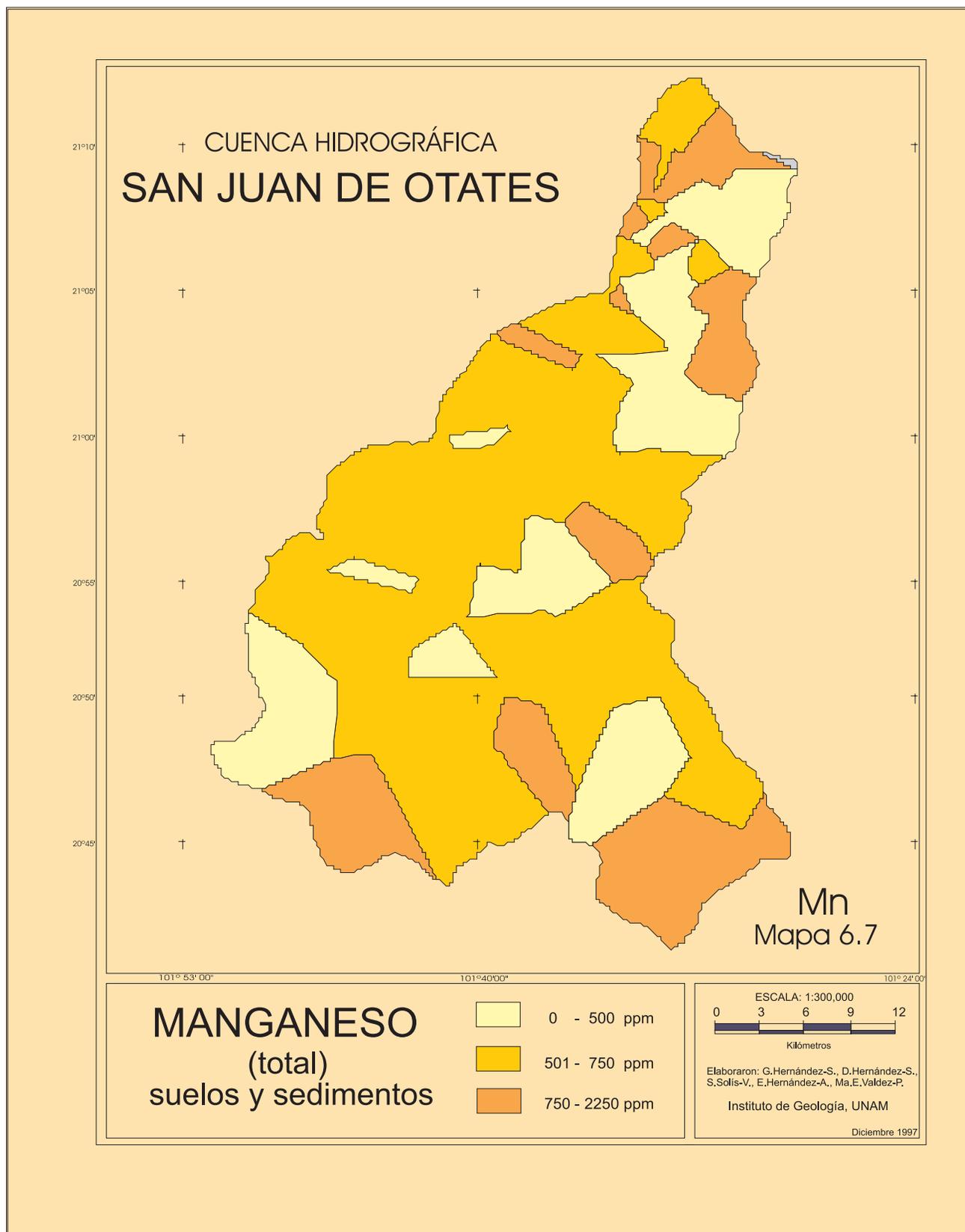


Figura 20. Mapa de dispersión de manganeso en la cuenca San Juan de Otates.

prevalecen en ella (básicas, ultrabásicas, conglomerado rojo, riolitas, andesitas, ignimbritas, calizas). Por otro lado, el análisis mineralógico macroscópico correspondiente, no detectó la existencia de minerales con apreciables cantidades de mercurio.

El análisis de varianza realizado con las concentraciones promedio de mercurio en las diferentes subcuencas de San Juan de Otates, indica que no hay diferencias significativas entre ellas. No obstante, el mercurio fue el elemento que mayor variabilidad mostró en la zona (302.8%), con valores que fluctuaron entre 0 y 30.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. La concentración promedio de Hg en los suelos (2.23 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) no fue estadísticamente diferente a la concentración promedio en los sedimentos (2.43 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Los suelos de la cuenca se ubican en el nivel más bajo dentro de los rangos mundiales normales (0.02 a 0.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Aunque el Hg en suelos y sedimentos se encuentra en el rango mínimo de la media mundial, se realizó una clasificación de su contenido, adecuando la información para la elaboración del mapa correspondiente. La clasificación se realizó en cuatro niveles: 0.000–10; 10.001–20; 20.001–30.5; y $> 30.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. La mayor concentración (relativa) de mercurio total se encuentra en la región comprendida entre Los Ramírez, San Agustín del Mirasol, El Cuije y norte de la presa La Purísima. Otras áreas con cierta significancia (de 20.001 a 30.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), se ubican al norte de las piroxenitas de San Juan de Otates, El Maguey, Las Pilas, Mezquite de Sotelo y los alrededores de la confluencia de los arroyos El Juache y San Juan de Otates así como los suelos comprendidos entre la cortina de la presa San Antonio, los alrededores de La Arcina, Barretos y Nuevo Lindero (Figura 21).

6.2.9 Níquel

La principal característica geológica de la cuenca San Juan de Otates en la parte correspondiente a la sierra de Guanajuato, es la presencia de piroxenitas, serpentinitas, peridotitas y basaltos. Los principales minerales asociados y detectados en el análisis mineralógico macroscópico fueron: piroxena, serpentina, augita, hornblenda, biotita y olivino. La concentración de Ni en estas rocas llega hasta 3,500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El promedio mundial de Ni en rocas ultramáficas es de $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Nriagu, 1980).

El análisis de varianza realizado en las concentraciones promedio del Ni en las distintas subcuencas, indica que hay diferencias significativas entre ellas, el de comparaciones múltiples mostró que la subcuenca A es, estadísticamente, diferente a las demás. El Ni presenta valores que fluctúan entre 0.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y 539.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con una media geométrica de 33.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El coeficiente de variación fue de 121.7%. La concentración promedio de níquel en suelos (59.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) no presentó diferencia significativa con la concentración promedio de Ni en sedimentos (58.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Las concentraciones más elevadas de níquel total en suelos y sedimentos (por arriba de 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), dentro de la cuenca San Juan de Otates, se localizan dentro de la sierra de Guanajuato, en el área comprendida entre El Maguey, este de Piedra del Coche, Cañadita del Agua, La Angostura, La Laborcita, hasta la confluencia de los arroyos Juache y San Juan de Otates. Otras zonas con contenidos altos de níquel se encuentran entre San José del Alto y el aeropuerto internacional; también se hallan localizadas en la región comprendida entre San Rafael de los Morales, Playas de Sotelo, Santa Ana del Conde y presa San Antonio y, finalmente, en la zona que abarca los poblados de Los Ramírez, El Cuije y San Agustín del Mirasol.

Las regiones que cuentan con concentraciones medias de níquel en la cuenca San Juan de Otates, entre 30.1 y 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, se localizan en la porción más septentrional de la cuenca; norte de Malpaso, cerro Grande, y Las Pilas; a lo largo del canal de Santa Ana; el área correspondiente a San Judas, San José del Resplandor y Esquina del Garbancillo; entre Barretos y Nuevo Lindero; de manera aislada, este de Sauz de Armenta; La Sardina, Gavia de Rionda y Los Amoles y, finalmente, el Venado de San Lorenzo en la confluencia con el río Silao-Guanajuato (Figura 22).

Los rangos medios mundiales de níquel en suelos reportados por McBride (1994) se ubican entre 4 y 55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, lo que colocan a esta cuenca en un rango ligeramente por encima de la media mundial. Si se comparan las concentraciones máximas permitidas tanto por la Unión Económica Europea como por Canadá (30 y 32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente), entonces se puede estimar que hay problemas de contaminación de níquel en los suelos de las regiones que se mencionaron en el párrafo anterior.

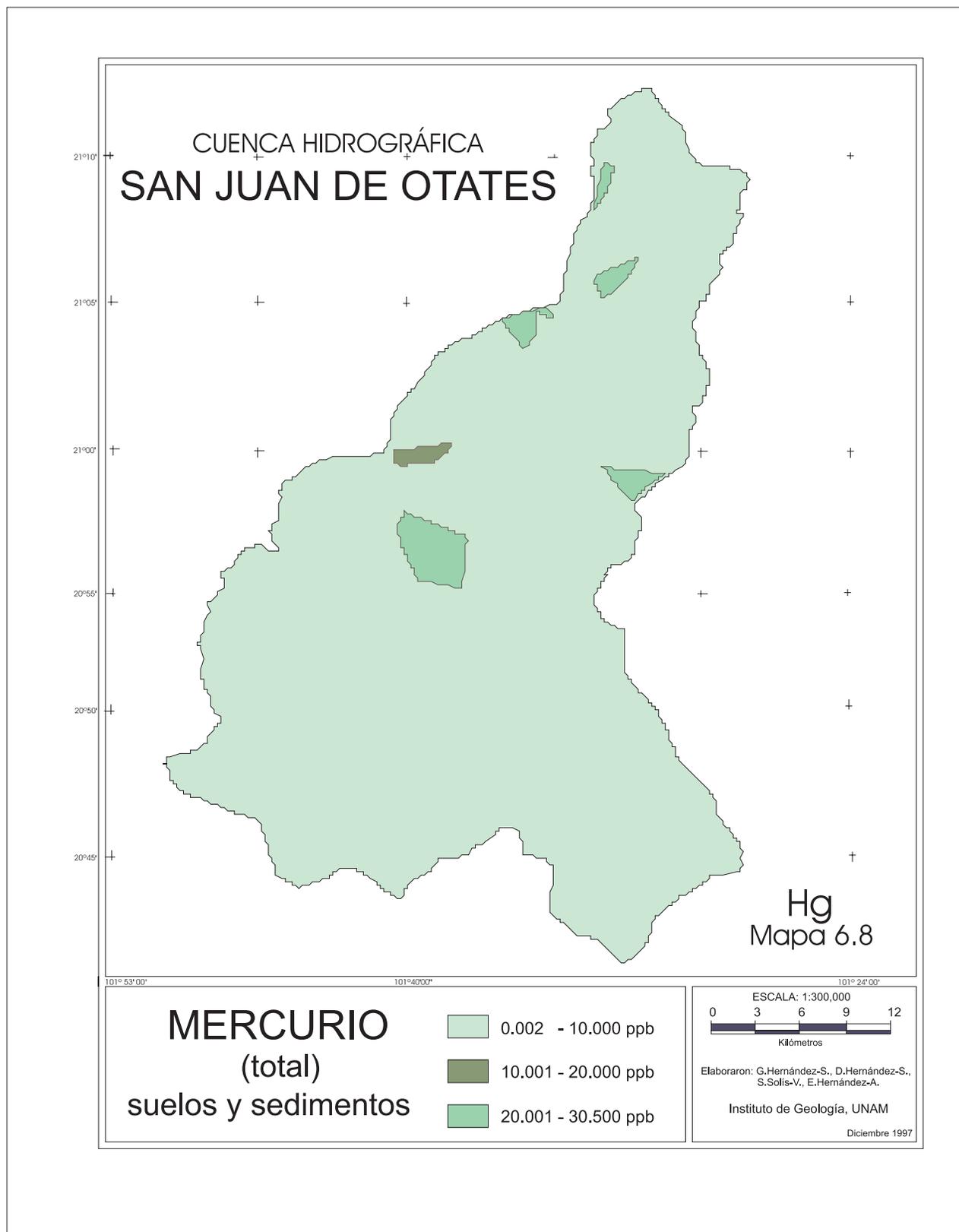


Figura 21. Mapa de dispersión de mercurio en la cuenca San Juan de Otates.

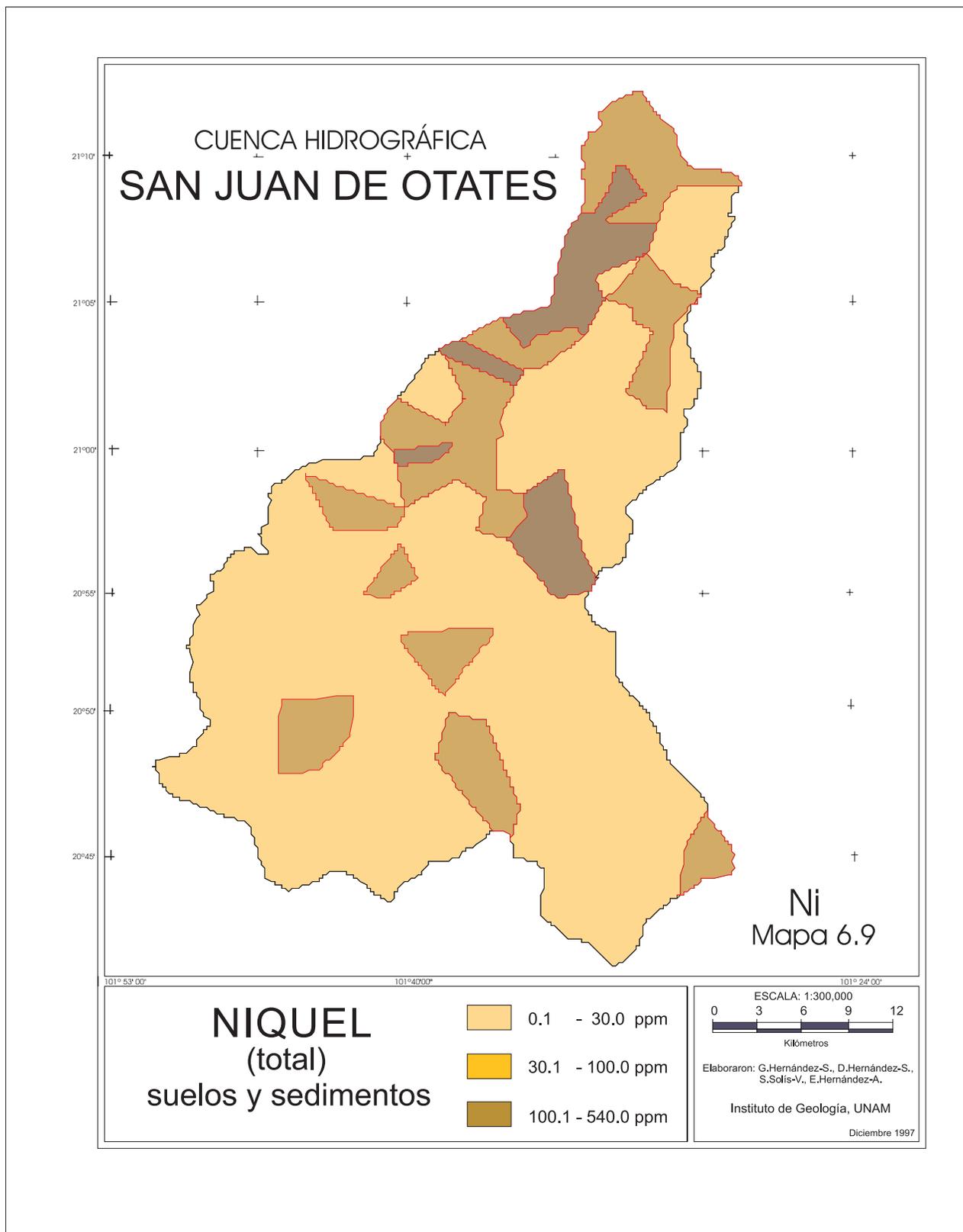


Figura 22. Mapa de dispersión de níquel en la cuenca San Juan de Otates.

6.2.10 Plomo

Se encuentra como elemento traza en rocas; su incremento va desde las rocas ultramáficas con un promedio de $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, hasta esquistos negros con un promedio de $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Davies, 1990). En rocas magmáticas y en sedimentos arcillosos los promedios fluctúan entre 10 y $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; en rocas ultrabásicas y en sedimentos calcáreos los niveles pueden variar de 0.1 a $10.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Gough *et al.*, 1979).

De acuerdo a los resultados de laboratorio obtenidos, las concentraciones variaron de 11.3 a $362.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. La media geométrica fue de $38.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El coeficiente de variación fue de 88.1%. El análisis de varianza señaló diferencias significativas entre las concentraciones promedio de plomo de las diferentes subcuencas. El de comparaciones múltiples indicó que, las subcuencas contrastantes y la de mayor diferencia significativa fueron A y D. No hubo diferencia significativa entre las concentraciones promedio de plomo en los dos tipos de materiales empleados; en suelos fue de $43.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y en sedimentos de $46.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Las regiones consideradas con contenidos altos de plomo (100 a $365.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) se ubican en la porción septentrional de la cuenca, comprendiendo, por una parte, Los Alisos, la mesa El Zacate y El Maguay y, por otra, el noreste de la cuenca. Los contenidos medios (25.1 a $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) de Pb se localizan en áreas que comprenden: Santa Rosa de Lima, oeste de la mesa del Obispo y Mangas de la Estancia; Duarte, El Paso, Comanjilla, Albarradones, Los Sauces y el aeropuerto internacional y, finalmente, la desembocadura del arroyo La Llave con el río-Silao-Guanajuato, a la altura de los poblados San Lorenzo y El Venado de San Lorenzo (Figura 23).

Según Nriagu (1978), los suelos no contaminados pueden tener un promedio de $17.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de plomo. Koeppe (1981) establece que el valor límite para un suelo no contaminado es de $70.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y que valores por encima de $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pueden reflejar efectos tóxicos. Ure y Berrow (1982) señalan que el promedio es $29.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Bohn *et al.* (1985) reportan que los rangos normales pueden variar de 2 a $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. McBride (1994) menciona que el rango medio mundial de plomo en suelos va de 10 a $84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Por otro lado, Müller *et al.* (1992) consideran que para que los

sedimentos sean considerados como contaminados, deben tener un mínimo de $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; en cambio Fergusson (1989) estima que el límite debe ser $80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Para la Comunidad Económica Europea, la concentración máxima permisible es de $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que para Canadá es de $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

6.2.11 Zinc

El zinc es uno de los elementos más abundantes de la naturaleza. Su contenido promedio en rocas ígneas es de $90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en ultramáficas de $140 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en máficas de $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y en félsicas de $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En rocas sedimentarias, los rangos pueden variar de 2 a $2,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Green, 1959). En granitos, el promedio es de $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en basaltos; en esquistos y pizarras varía de 80 a $120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Krauskopf, 1972).

El zinc presenta valores de concentración que fluctúan entre 17.3 y $278.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con una media geométrica de $80.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un coeficiente de variación de 53%. El análisis de varianza detectó diferencias significativas entre las concentraciones de Zn de las diferentes subcuencas. El de comparaciones múltiples señala que las subcuencas A y D son las de mayor contraste y diferencia significativa. Los valores promedio de concentraciones en ambos materiales, suelo y sedimento, no mostraron diferencias significativas: suelo $92.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y sedimento $90.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Las concentraciones relativamente más elevadas de Zn total (entre 60.1 y $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) se localizan en la región comprendida entre el cerro Verde y al este de éste; una zona más extendida a lo largo de arroyo Grande que abarca Cañadita de Agua, Piedra del Coche, La Angostura, La Providencia, Las Pilas, así como Loza de los Padres, Duarte, Los Jacales y oeste de Comanjilla; San José del Clavel, Estación Trinidad y Los Sauces; lo mismo que el área enclavada entre Los Albarradones, El Refugio de los Sauces y Mezquite de Sotelo; también al sur de San Agustín del Mirasol, Nuevo Lindero y oeste de Plan Libertador; la zona comprendida entre El Desagüe, Santa Rita, Jesús del Monte, Las Amapolas, San Antonio de Funes, Rancho Grande, El Panal, norte de San Rafael y presa 5 de Mayo; la región localizada entre El Tecolote, El Refugio, La Muralla y Tutitlán; finalmente, entre Los Otates, Santa Efigenia y San Pedrito (Figura 24).

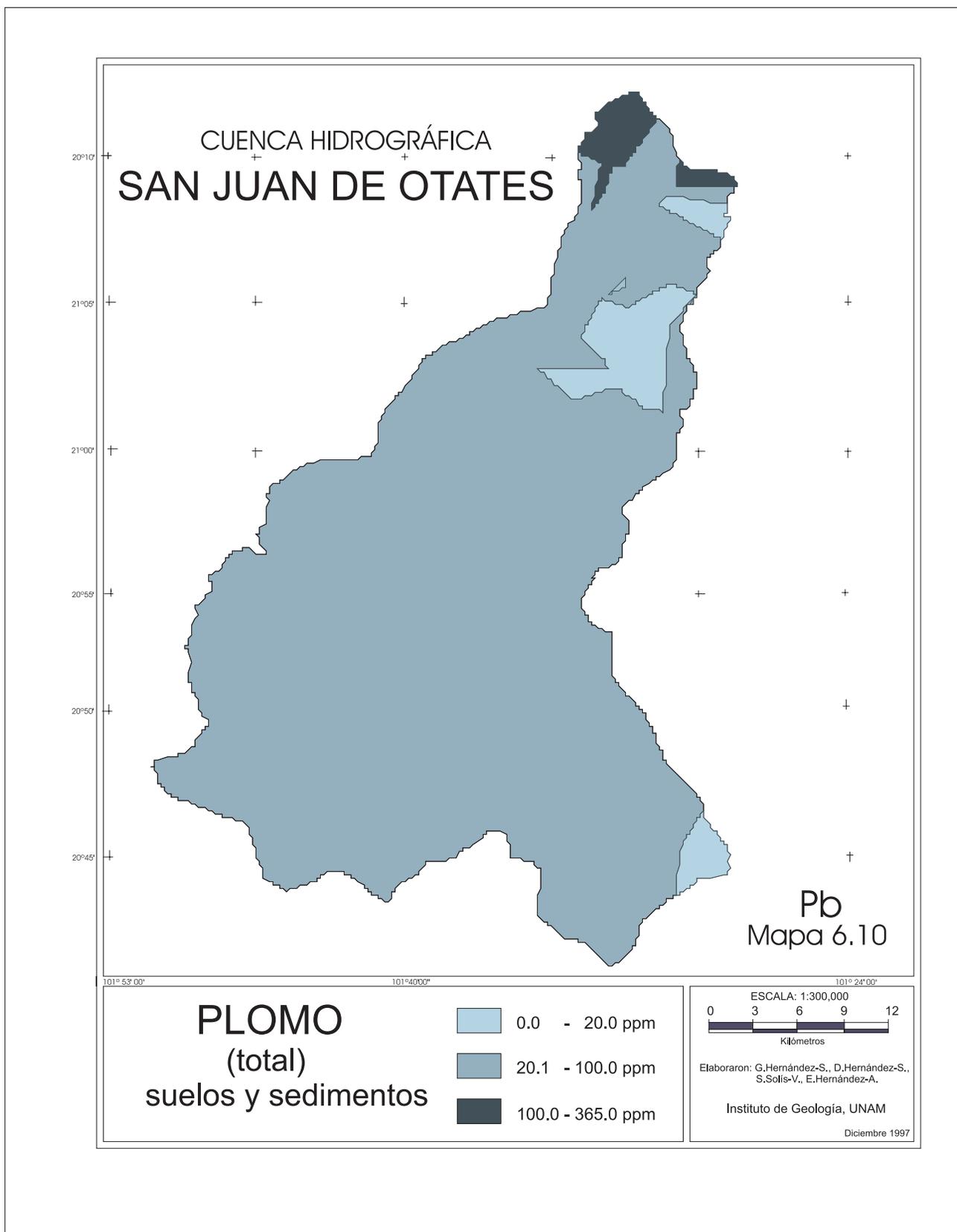


Figura 23. Mapa de dispersión de plomo en la cuenca San Juan de Otates.

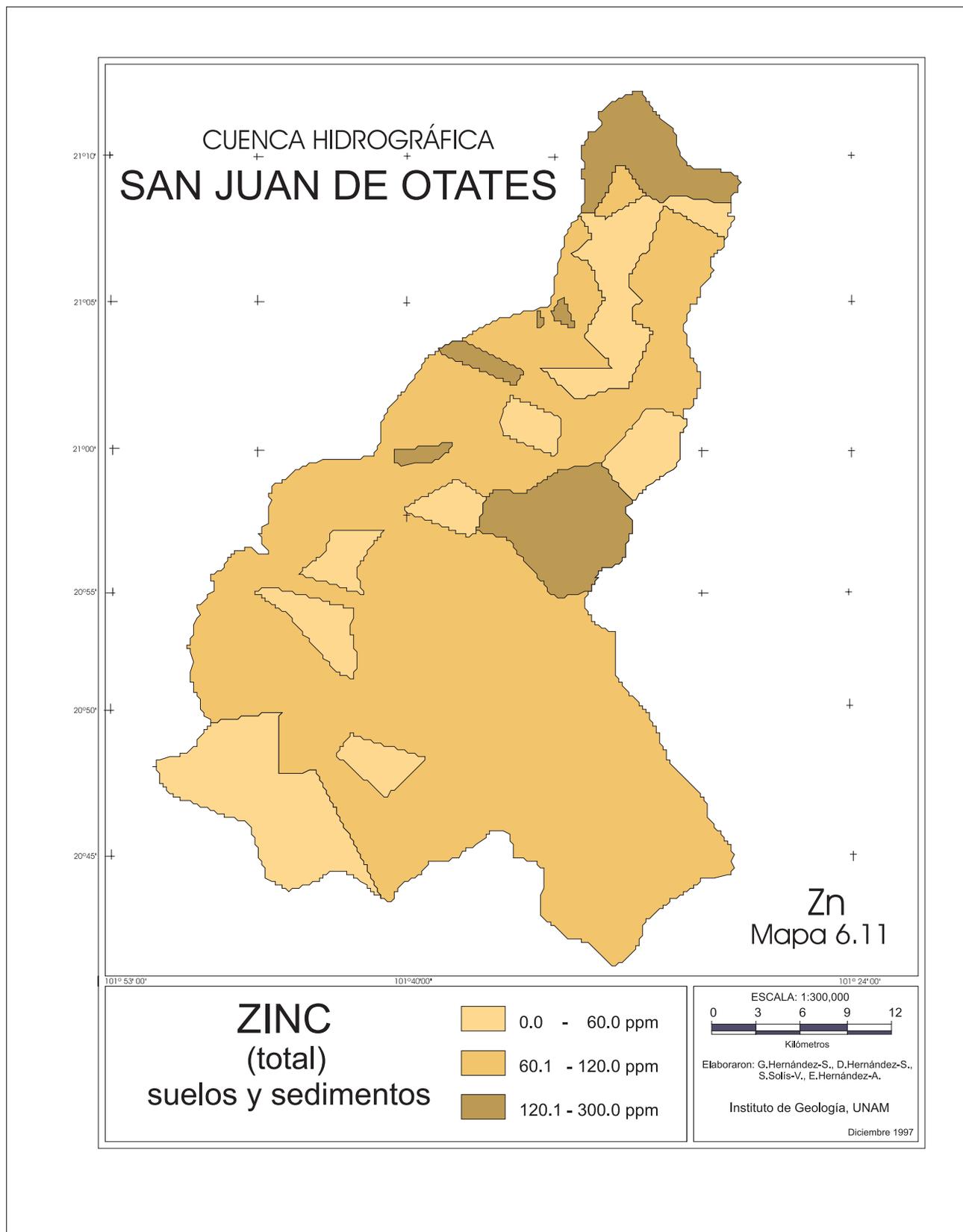


Figura 24. Mapa de dispersión de zinc en la cuenca San Juan de Otates.

Los contenidos de zinc total en suelos tienen un promedio de $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y rangos que van de 20 a $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Green, 1959). De acuerdo a Lindsay (1979), los niveles de zinc en suelos generalmente se encuentran entre 10 y $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Kabata-Pendias y Pendias (1992) reportan contenidos de zinc total en suelos de 17 a $125 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Alloway (1990) considera como rango normal en suelos, contenidos de zinc que van de

10 a $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. McBride (1994) señala que el rango medio mundial para zinc, va de 17 a $125 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. La Comunidad Económica Europea establece como rango superior aceptable $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que Canadá lo fija en $220 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Müller *et al.* (1992) consideran que el máximo permisible de zinc total para sedimentos es de $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Sólo algunas áreas restringidas en San Juan de Otates sobrepasan estos límites (Figura 24).

7. CUENCA DEL RÍO TURBIO

7.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES

7.1.1 Localización de la zona de estudio

La cuenca del río Turbio se localiza en varios municipios. Su curso alto se ubica en los municipios de León, San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos. El curso medio en los municipios Manuel Doblado, Romita y Cuerámara. El curso bajo en los municipios de Cuerámara, Abasolo, Huanímaro y Pénjamo. Abarca una extensión aproximada de 3,000 km² (Figura 1).

7.1.2 Fisiografía

Se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano. Dentro de ésta, se ubica la subprovincia conocida como Bajío Guanajuatense que ocupa gran parte del sur del Estado de Guanajuato.

El río Turbio tiene sus orígenes en la sierra de valles paralelos de la sierra de Guanajuato, así como en la sierra de Comanja relacionada con las mesetas de lavas de los Altos de Jalisco. También los escurrimientos que fluyen desde el oeste hacia el Turbio tienen su origen en esta misma zona de mesetas. Esta es una geoforma que, aunque ubicada dentro de la provincia del Eje Neovolcánico, es en sí, una subprovincia distinta al Bajío Guanajuatense. Además, existe una serie de escurrimientos procedentes del este del curso medio del río Turbio, que nacen en los lomeríos asociados a mesetas y lomeríos aislados. Otras zonas elevadas, donde se encuentran afluentes del río Turbio, son la sierra de Pénjamo, el cerro del Veinte y el cerro de Huanímaro.

Los ríos Los Gómez, León y la parte baja del Santiago, se localizan dentro de la llanura de aluviones profundos. A partir del lugar donde el río recibe el nombre de Turbio, comienza un cambio en las llanuras. Estas se vuelven pantanosas debido a que se encuentran dentro de la topografía de llanuras con tobas a poca profundidad. Las llanuras de aluviones profundos constituyen el área más baja, plana y predominante de todo El Bajío guanajuatense. Se observa al sur de León pero también aparece en el último tramo del río Turbio cerca de su confluencia con el río Lerma. Existen en estas llanuras suelos profundos que suelen tener en algunas

partes varios metros de profundidad. Las llanuras con toba a poca profundidad se localizan en el curso medio del río Turbio; consisten en suelos arcillosos de poca profundidad sobre una toba, generalmente menor a los 50 cm.

Las mesetas de lavas se encuentran dentro de la subprovincia de los Altos de Jalisco e incluyen a la sierra de Comanja. Aunque esta topografía se encuentra en la provincia del Eje Neovolcánico se incluye en este trabajo, por encontrarse en ella, gran parte de las cabeceras de los arroyos que alimentan el río Turbio. Se trata de derrames de lavas que han sido erosionados y que se encuentran cortados por cañadas. Estas mesetas se unen a las cumbres abruptas de la sierra de Pénjamo que alcanza 2,500 m de altura; se distinguen por tener hacia El Bajío una bajada abrupta y cóncava. Se observa una variedad de suelos como son Planosoles mólicos, asociados a Feozem háplico y Vertisoles pélicos con fase pedregosa y dúrica. Las sierras de laderas tendidas están presentes sólo en el cerro del Veinte. Los lomeríos asociados a mesetas se localizan al este del curso medio del Turbio. Son los lomeríos de calizas al norte y sur de Jesús del Monte y más al sur, lomeríos y mesetas de rocas ígneas (SPP, 1980).

7.1.3 Geología

A finales del Mesozoico y principios del Cuaternario, la cuenca del río Lerma tuvo una gran actividad volcánica; las lavas interrumpieron el drenaje que existía, dando como resultado la formación de una serie de lagos escalonados, que formaron a la vez cuencas cerradas. Posteriormente, los materiales volcánicos que interrumpían el drenaje fueron erosionados, acarreados y depositados en las partes más bajas donde se encontraban los lagos.

Durante el Jurásico y el Cretácico Temprano, el Lerma se encontraba bajo el mar, donde se depositaron grandes cantidades de carbonatos de calcio, procedentes de microorganismos marinos que dieron lugar a la formación de calizas de gran espesor. A fines del Mesozoico hubo una intensa actividad orogénica; estos plegamientos fueron tan intensos que llegaron a fracturarse dejando paso al magma. Esta actividad volcánica en contacto con rocas sedimentarias favoreció

la mineralización, dando lugar a la presencia de minas, particularmente de plata, oro, cobre, antimonio, mercurio y plomo (Martínez-Reyes, 1992).

El Cuaternario se caracterizó por el vulcanismo aunado a la erosión, transporte y depósito de materiales desde las cimas volcánicas hacia las partes más bajas del Lerma. La presencia de una discordancia tectónica a lo largo del paralelo 19 N se convirtió en fractura por donde salieron materiales ígneos que formaron el Eje Neovolcánico. En algunos casos las erupciones levantaron las calizas del Cretácico aspecto que se observa en El Bajío. Estas erupciones interrumpieron el drenaje preexistente, resultando de ello, cuencas cerradas y escalonadas con lagos en las partes más bajas. Actualmente, se caracteriza por una sucesión de llanuras fluviales y lacustres que se encuentran a distintas alturas, limitadas al sur por elevaciones volcánicas (López-Ramos, 1979).

Las características de las formaciones geológicas de esta zona están conformadas por una tectónica de distensión, que a la vez presentan una estructura de sierras y cuencas (*horsts* y *grabens*) asociados al vulcanismo. Las unidades litoestratigráficas representativas del área son:

a. **Ignimbrita Cuatralba (miembro superior)**. Aflora principalmente en la región de los Altos de Jalisco y en la sierra de Guanajuato formada por ignimbritas muy fracturadas.

b. **Ignimbrita Cuatralba (miembro inferior)**. Se localiza en los Altos de Jalisco y en menor proporción en la sierra de Guanajuato; constituida por tobas sin soldar, de composición riolítica.

c. **Basalto Dos Aguas**. Aflora en los Altos de Jalisco; constituido por basaltos muy fracturados.

d. **Terciario Granular Indiferenciado**. Constituido por conglomerados, areniscas, limonitas, lutitas y calizas de origen lacustre; sobreyace a la Ignimbrita Cuatralba; se localiza en la parte plana, cubierta por sedimentos del Cuaternario.

e. **Sedimentos Cuaternarios**. Forman las capas someras del valle y el piedemonte de las estribaciones montañosas (Rodríguez *et al.*, 1991).

Debido a la erosión marginal de los Altos de Jalisco, se forman abanicos aluviales a lo largo del piedemonte; estos aluviones son transportados y depositados en el *graben*.

El río León, que posteriormente se transforma en el río Turbio, corre paralelo a la falla León-San Francisco del Rincón con dirección NO-SE; a la vez, esta falla constituye el límite meridional del pilar tectónico de los Altos de Jalisco y El Bajío. Es muy probable la existencia de una zona elongada de permeabilidad alta a lo largo de este fallamiento existente entre los Altos de Jalisco y el *graben* de El Bajío. Una de las características principales de estas unidades litológicas es que, debido a su fracturamiento, la permeabilidad es de mediana a alta.

Las heterogeneidades debidas a los paleomeandros y la gran falla, que probablemente es propia del acuífero, contribuyen a la gran dispersión de la pluma contaminante que es característica en una parte de la región (Hernández-Laloth, 1991).

7.1.4 Clima

La cuenca tiene algunas variaciones climáticas. De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1981), la ciudad de León y su zona circundante poseen un clima $BS_{hw}(w)(e)g$; es decir, un clima seco el menos seco de los BS. La precipitación se presenta predominantemente en verano; la invernal representa sólo el 5% de la anual. La temperatura media anual es 19.2°C; el mes más frío (enero) es inferior a 18°C; por lo tanto, el clima se considera semicálido y extremo (e); las temperaturas más altas se presentan antes del solsticio de verano (g).

Otro clima representativo es el de las partes bajas; se clasifica como $(A)C(w_0)(w)a(e)g$, representado por los datos climáticos de ciudad. Manuel Doblado. Este clima es semicálido, $(A)C$; se trata del más cálido de los templados C, con temperatura media anual mayor de 18°C y la del más frío, menor a 18°C. Para esta estación, la temperatura media anual y la media del mes más frío es de 20.5°C y 15.9°C respectivamente. El cociente P/T es de 35.24, menor al valor especificado como límite máximo (43.2) de un clima subhúmedo con lluvias de verano $(w_0)(w)$; por lo tanto, éste es el más seco de los climas semicálidos. La lluvia invernal es menor a 5% del total de la lluvia anual. Se trata de un

clima con verano cálido, puesto que el mes más cálido es de 24.5°C; ocasionalmente, se convierte en clima extremoso ya que la oscilación anual de temperatura media mensual es de 8.6°C; es un clima gangético ya que la temperatura media mensual más alta ocurre antes del solsticio de verano.

El tercer tipo de clima común en la cuenca es el $C(w_0)(w)$; esto es, el más seco de los climas templados con lluvias de verano. Ocurre generalmente en las elevaciones superiores a 1850 m al norte y este de León, en los Altos de Jalisco y en las elevaciones de El Bajío, onde se observan temperaturas medias anuales menores a 18°C. La mayor parte de la cuenca del río Turbio se encuentra entre las isoyetas de 600 a 800 mm de precipitación anual.

7.1.5 Hidrología

El río Turbio es uno de los afluentes más importantes del río Lerma. El curso general de este río es norte-sur y, desde sus orígenes hasta la ciudad de Manuel Doblado, con una dirección noreste-suroeste. En su cauce medio, el curso del río Turbio es de oeste a este y, finalmente, de norte a sur, antes de unirse con el río Lerma en Las Adjuntas.

Los orígenes del río Turbio son los escurrimientos de una serie de corrientes que proceden de la serranía, al norte de la ciudad de León. Esta serranía tiene varios nombres locales, pero en forma general, se denomina sierra de Comanja. Los arroyos, enumerados de este a oeste, son: Alfaro, El Hueso, Saltillo, Hondo, Ojo de Agua, Los Reyes, El Muerto, Ibarrilla, La India, Los Castillos, El Calvillo, Rincón Los Caballos, Hacienda de Arriba y Chichingas. Estos cuatro últimos arroyos alimentan la presa El Palote, que se encuentra al norte de León. Esta desagua en la continuación del arroyo Hacienda de Arriba que recibe las aguas del arroyo Los Castillos del lado este, y del oeste, las del arroyo Mariche, para así formar el río Los Gómez que cruza la ciudad de León y continua su curso hacia el suroeste, recibiendo agua de algunos arroyos como La Joya, Campo Verde, La Mora y La Venta. Después de la presa San Germán, el río Los Gómez recibe el nombre de río León. En las cercanías de San Francisco del Rincón baja una serie de arroyos: Soto, Hondo, las Cruces, Malpaso, Chamácuaro, La Mesita, Atarjea, Primavera y otros, procedentes de la sierra de Comanja. Estos

forman el río Santiago ya dentro del municipio de San Francisco del Rincón, que a su vez se une al río León; a partir de aquí, se llama río Santiago. Después de pasar junto a la población de San Bernardo, el río Santiago cambia de nombre y se convierte en el río Turbio. Recibe a varios arroyos procedentes del oeste de los Altos de Jalisco como son: el arroyo de Jalpa, La Cañada y Presa Vieja.

El río Turbio también recibe escurrimientos de una región de mesetas y colinas situadas al este del valle, como el arroyo Coyote que se pierde en las lagunas de las partes bajas. Esta región situada al este del río Turbio también tiene escurrimiento hacia el noreste, por medio del arroyo Sauz de Armienta; o bien, los arroyos que se forman cerca de La Muralla, que conducen sus aguas hacia el este, donde se localiza el río La Llave, escurrimientos que se pierden en El Bajío. Los pocos escurrimientos de estas mesetas y colinas, con dirección sureste, se unen a presas que desaguan hacia el río Turbio. Dentro de los municipios Manuel Doblado y Cuerámara, recibe durante la época de lluvias, las aguas de arroyos que se originan en los Altos de Jalisco y en la sierra de Pénjamo.

Se ha tratado de mejorar el drenaje de esta zona, creando una serie de represas como La Alberca (también conocida como Tres Villas), el Coyote, Corralejo y otras de menor importancia. Toda la cuenca del río Turbio se caracteriza por tener un sinnúmero de presas, además de lagunas naturales, como es la ciénega de Enmedio. En la parte montañosa, cercana a León, las presas sirven para el control de avenidas, además de retener agua para el consumo de las poblaciones de la región, usos industriales y para riego. En ciertos casos, las presas en El Bajío se convierten en verdaderas lagunas de depósito de sólidos provenientes de la industria de la comarca, como es el caso de la presas La Maestranza y San Germán. Algunas ya se han azolvado y sus vasos sirven de áreas de cultivo, como es el caso de la presa La Trinidad.

Después de recibir las aguas de arroyo Seco, el río Turbio recibe como afluentes a los arroyos Magallanes, Prieto, Pénjamo, todos procedentes de la sierra de Pénjamo; además, recibe las aguas de algunos canales como Maravillas, Varal y el desagüe de la presa San Fernando, que se encuentra en el municipio de Pénjamo para, finalmente, penetrar al río Lerma, a dos kilómetros de la población de La Calle.

7.1.6 Suelos

En lo que se conoce como llanuras de aluviones profundos del río Turbio, predominan los Vertisoles pélicos, con altos contenidos de arcilla expandible asociados a Faeozems háplicos. En las llanuras con tobas a poca profundidad, predominan los Planosoles y Vertisoles con fase salina. Las sierras con cumbres escarpadas consisten principalmente, en Litosoles y Faeozems háplicos o lúvicos con fase lítica. En las mesetas lávicas, se encuentran Planosoles mólicos, asociados a Faeozems háplicos y Vertisoles pélicos con fase pedregosa y dúrica. En las sierras de laderas tendidas, los suelos predominantes son los Vertisoles pélicos y Faeozems háplicos con fase pedregosa. En los lomeríos asociados a mesetas, existen Vertisoles pélicos asociados a Faeozems háplicos con fase pedregosa (SPP, 1980).

Los grandes grupos de suelos que predominan en la zona de estudio son los Vertisoles pélicos, en algunas partes con fases líticas profundas y, en menor proporción, los Castanozems lúvicos y Chernozems lúvicos, desarrollados sobre areniscas y conglomerados del Terciario Granular Indiferenciado. Aunque hay varios procesos activos en la formación de los vertisoles, parece ser que los principales son la haploidización originada por la argilipedoturbación (Hernández-Silva, 1990).

7.1.7 Vegetación

La vegetación natural de mayor importancia en el área es la de matorral subtropical; este tipo de vegetación debió de haber ocupado extensiones muy amplias en épocas prehispánicas. En la actualidad, el matorral subtropical existe sólo como islotes en zonas con pendientes suaves dentro de El Bajío. Su presencia se observa en la sierra de Comanja, en los Altos de Jalisco y en elevaciones, al este del curso medio del río Turbio y en el cerro del Veinte. El matorral subtropical tiene en el estrato superior, cactáceas, particularmente nopal (*Opuntia* sp.), órgano (*Lemairocereus* sp.), huizaches (*Acacia* sp.), mezquites (*Prosopis laevigata*) y cazahuate (*Ipomoea* sp.). El estrato medio lo conforman arbustos de huizaches (*Acacia* sp.) y uña de gato (*Mimosa* sp.). El estrato inferior lo dominan los pastizales y otras plantas pequeñas como son *Bouteloua* sp., *Aristida* sp.,

Chloris sp. y *Eragrostis* sp. También existen relictos de mezquiales como los que se encuentran cerca de la presas El Coyote y La Alberca. Estos son verdaderos bosques de mezquites en los que puede haber cazahuate y nopal en el estrato medio y en el inferior, *Bouteloua* sp., *Aristida* sp. e *Hilaria* sp. La vegetación natural de bosques de encino se observa en las sierras Cuatralba y Pénjamo y en zonas pequeñas y aisladas de los Altos de Jalisco, donde incluso puede haber asociaciones de bosques de encino y pino.

7.2 LOS METALES PESADOS TOTALES EN SUELOS Y SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RÍO TURBIO

7.2.1 Arsénico

Las concentraciones más elevadas de As se encuentran en los sedimentos, con rangos que van de 12.50 a 45.56 mg·kg⁻¹ (Clase 3), como es una zona al oeste de la industria Química de México, al noreste de Estancia de Sapos y arroyo Malpaso (Las Palmas). En sedimentos del río Lerma: a la altura de Rodeo de San Antonio, donde existe una concentración de 12.92 mg·kg⁻¹ y, en Pastor Ortiz, 12.50 mg·kg⁻¹. En suelos y, con intervalos que van 14.44 a 32.36 mg·kg⁻¹, se localizan las áreas: sur de la ciudad de León, Plan de Ayala, Estancia de Vaqueros y sur de Santa María de Bolaños. En los sedimentos de la presa Ibarillas al noreste de la presa El Palote, se encontraron 20.55 mg·kg⁻¹ y en el canal Los Naranjos 18.33 mg·kg⁻¹. Asociado también a sedimentos pero en los límites de la zona de mineralización, al noreste de la cuenca del Turbio, se ubican San José del Potrero (17.78 mg·kg⁻¹), arroyo El Maestranzo (25.97 mg·kg⁻¹) y arroyo El Salto (41.39 mg·kg⁻¹). Al noroeste de esta última área en los sedimentos de los arroyos Guanajuatillo y Barbosa, así como en El Saúco y Todos Santos, los intervalos de arsénico van de 11.39 a 35.28 mg·kg⁻¹ (Figura 25).

En la Figura 26, se muestra la gráfica de la distribución del arsénico en los sedimentos del río Turbio en el trayecto que abarca desde su nacimiento en la sierra Cuatralba, a una altitud de 2,650 m s.n.m., hasta su desembocadura en el río Lerma, a una altitud de 1,680 m s.n.m., con un recorrido aproximado de 165 km. Las concentraciones mayores de arsénico (5.8 a 35.2 mg·kg⁻¹) se hallan en la parte septentrional de la subcuenca, correspondiente a la sierra Cuatralba; son

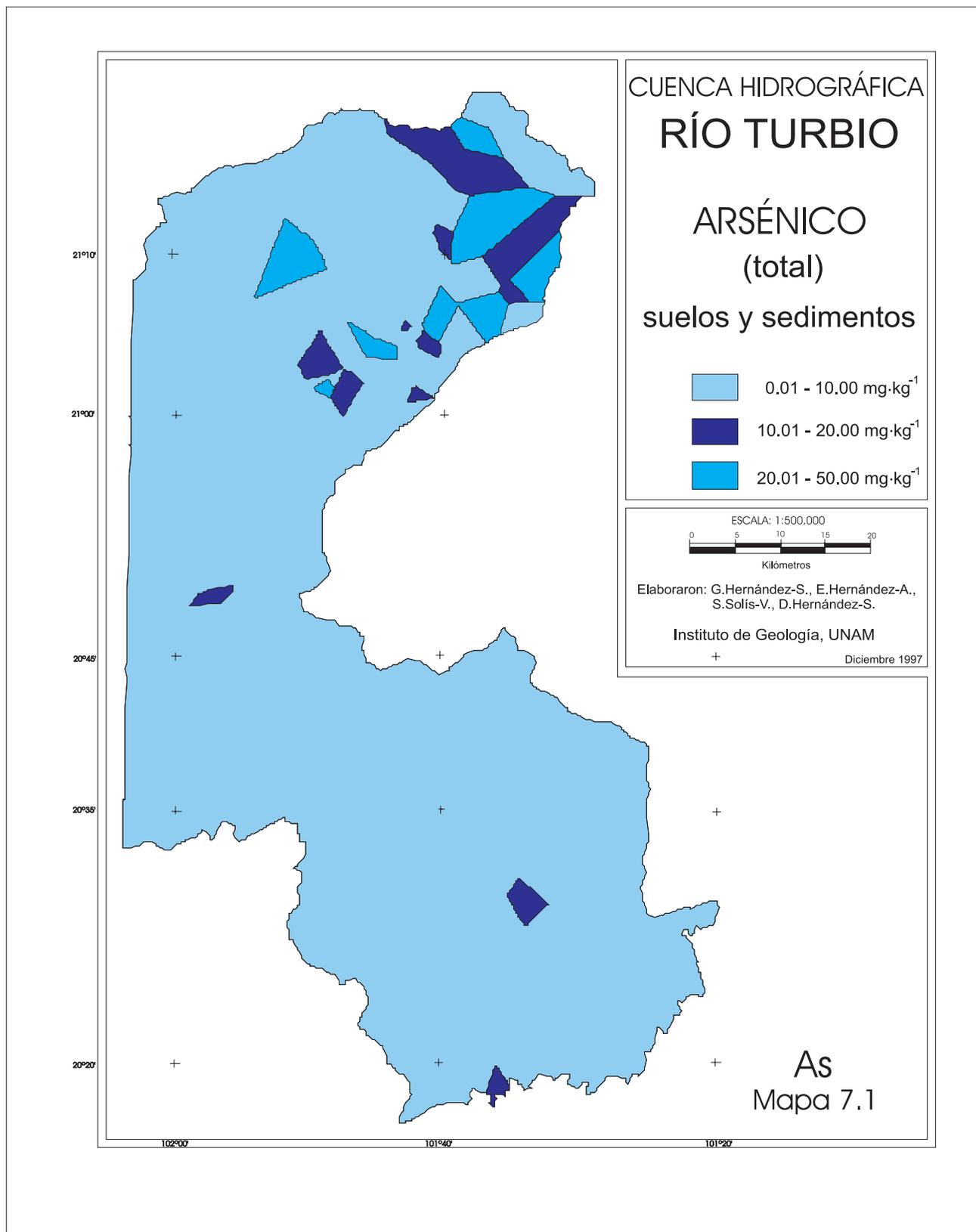


Figura 25. Mapa de dispersión de arsénico en la cuenca del río Turbio.

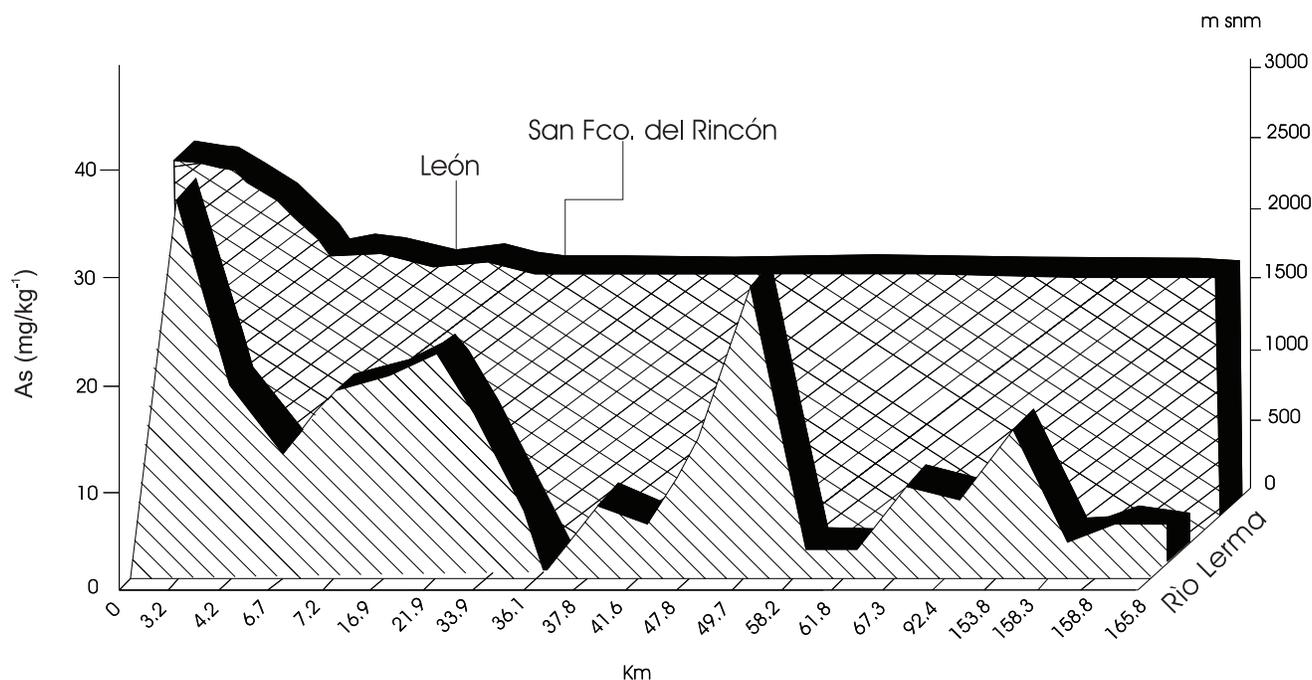


Figura 26. Gráfica de distribución de arsénico en los sedimentos del río Turbio.

debidas a que aquí se ubica un área de mineralización y, por otro lado, a las actividades industriales de la ciudad de León y su zona urbana. Por otro lado, en la Figura 27 se muestra el contenido de As en los sedimentos del río Lerma en su confluencia con el río Turbio. En el tramo del río Lerma que va del poblado de Peralta al de La Calle, los valores varían de 1.6 a 12.9 mg·kg⁻¹. Lo anterior podría significar un lento avance del As a través de los sedimentos de fondo del río Turbio hacia el Lerma.

Los valores de arsénico tienen una media geométrica de 3.4 mg·kg⁻¹ y un coeficiente de variación de 10.46%. La concentración promedio de As en suelos es de 5.6 mg·kg⁻¹ y la de sedimentos 5.4 mg·kg⁻¹, por tanto, el análisis de contraste de medias señala que no hay diferencia significativa entre los contenidos promedio de As procedentes de esos dos tipos de materiales.

De acuerdo a McBride (1994), los rangos medios mundiales de arsénico en suelos se sitúan entre 9 y 85 mg·kg⁻¹. La Comunidad Económica Europea sugiere como contenido máximo aceptable 20.00 mg·kg⁻¹, mientras que Canadá lo fija en 14.0 mg·kg⁻¹ (McBride, 1994).

7.2.2 Cadmio

Asociadas con áreas de mineralización y con rangos comprendidos entre 5.0 y 26.0 mg·kg⁻¹, (Clase 3) están: Todos Santos, El Saúco, San José del Potrero, arroyo El Maestranzo y arroyo El Salto. Asociados con sedimentos del río Turbio y con rangos entre 3.00 y 6.5 mg·kg⁻¹ se ubican las áreas: presa de Silva, noreste de Cañada de Negros, El Tecolote, presa de Piedra y confluencia del río Turbio con el río Lerma; así como en las riveras del Lerma: Durazno, Rodeo de San Antonio y Labor de Peralta. Asociados a sedimentos de afluentes del río Turbio y con rangos entre 6.0 y 17.9 mg·kg⁻¹ se encuentran: Jalpa de Canovas y arroyo presa Reventada, al norte de Purísima de Bustos. Relacionados con sedimentos provenientes de la sierra de Pénjamo con intervalos entre 3.2 y 3.5 mg·kg⁻¹, arroyo Pénjamo y arroyo Prieto. Asociados a suelos y con contenidos que fluctúan entre 6.0 y 6.5 mg·kg⁻¹ está la zona comprendida entre el norte y oeste de los Arcos, el sur de la ciudad de León y suroeste de El Tecolote (Figura 28).

Los valores de Cd presentan una media geométrica de 1.56 mg·kg⁻¹ y un coeficiente de variación de

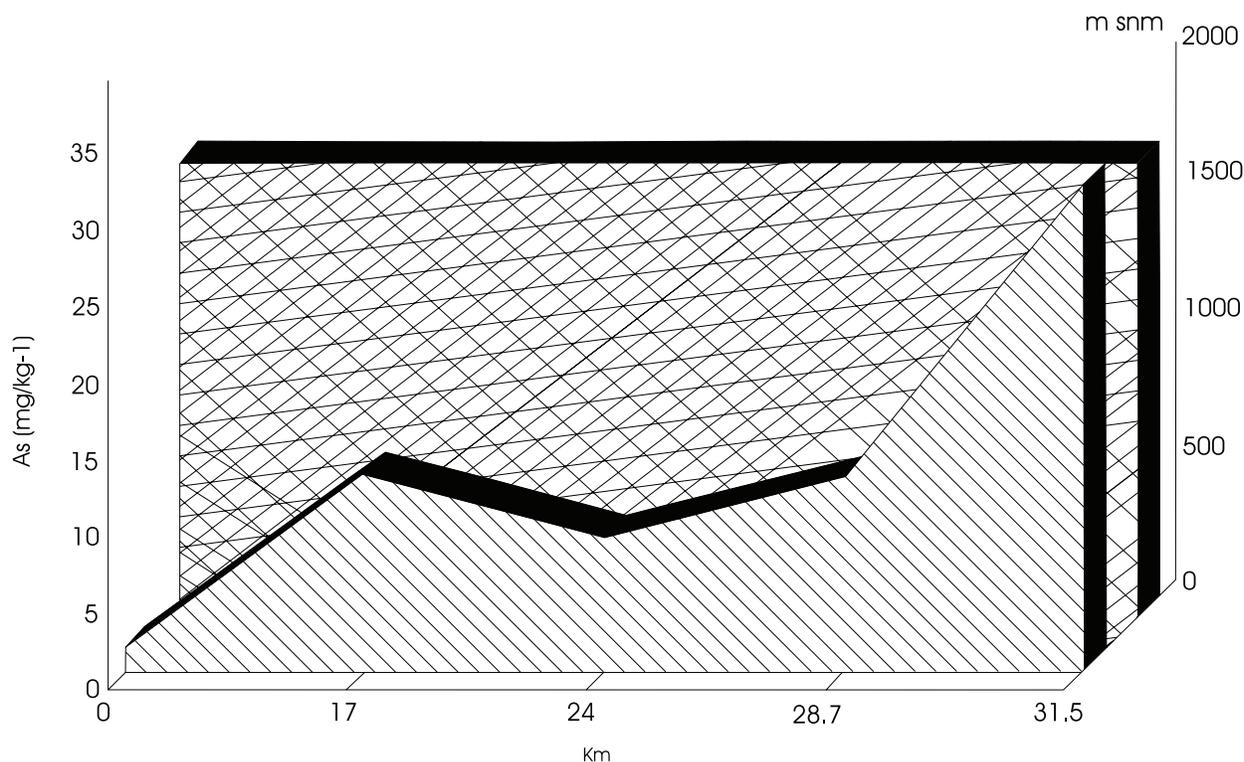


Figura 27. Gráfica de distribución de arsénico en los sedimentos del río Lerma en su confluencia con el río Turbio.

115.17%. Estos valores tan dispersos probablemente se deban a la heterogeneidad del material geológico y mineralógico de la cuenca. El análisis de contrastes de medias, practicado en las concentraciones de Cd procedentes de las dos poblaciones, señala que hay una diferencia altamente significativa entre ellas: en promedio, los sedimentos contienen una mayor cantidad de Cd ($2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) que los suelos ($1.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

En la Figura 29, se puede apreciar la dispersión de Cd en los sedimentos del cauce del río Turbio. La mayor concentración de Cd se encuentra en la zona mineralizada de Todos Santos, en los sedimentos al norte de la presa El Palote y al sur de la presa la Trinidad, con valores que van de 5.40 a $26.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cerca del poblado El Toro, el Cd se incrementa a $17.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En la vecindad de la desembocadura del río Turbio en el río Lerma, las concentraciones varían de 2.5 a $3.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

De acuerdo a McBride (1994), los rangos mundiales normales en suelos fluctúan entre 0.06 y $1.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por lo que puede considerarse que una buena parte de la Clase 2 señalada en el Figura 28 correspondiente, **se encuentra** por arriba del rango normal mundial.

7.2.3 Cobalto

Se encontró que las concentraciones de cobalto por arriba de $30.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Clase 3) se localizan en sedimentos de los arroyos Prieto y Hondo (Cuerámaro), provenientes de la sierra de Pénjamo. En relación a la zona de mineralización al norte de la cuenca del Turbio, se encuentran Casa Blanca y el arroyo Guanajuatillo, así como la región ubicada en San José del Potrero y la presa El Salto; también Pastor Ortiz zona ligada al río Lerma. En forma aislada, sedimentos del arroyo Negro provenientes del cerro El Veinte al suroeste de San Cristóbal y, el arroyo La Atarjea en los Altos de Jalisco (Figura 30).

Los valores de Co tienen una media geométrica de $13.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un coeficiente de variación de 46.77%. Existe una mayor heterogeneidad en los valores de Co en las muestras de sedimentos. El análisis de contrastes de medias realizado en los valores de Co procedentes de los dos tipos de materiales, indicó que hay diferencia altamente significativa entre ellos, ya que en promedio, los sedimentos presentan un mayor contenido de Co ($17.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en comparación con los suelos ($13.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

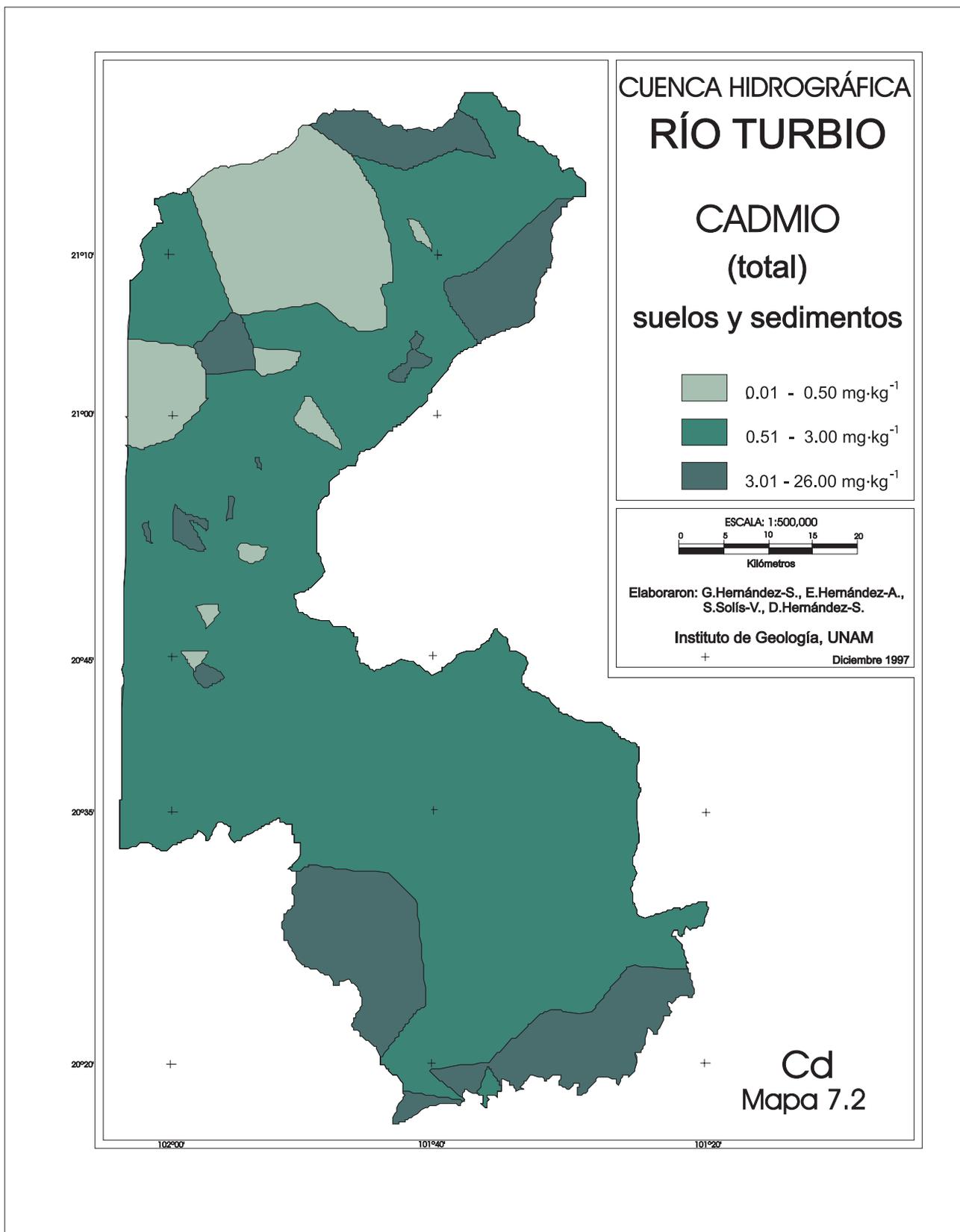


Figura 28. Mapa de dispersión de cadmio en la cuenca del río Turbio.

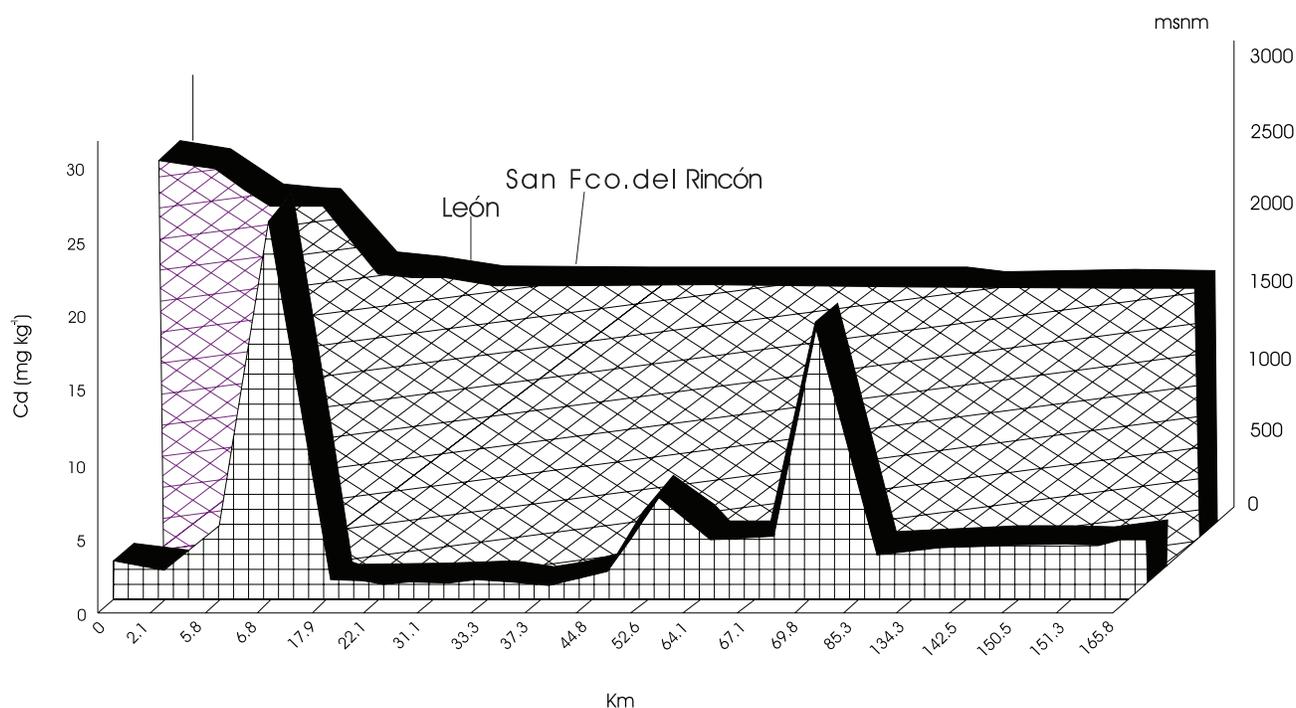


Figura 29. Gráfica de distribución de cadmio en los sedimentos del río Turbio.

La concentración máxima aceptable de Co en suelos de Canadá es $20.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. De acuerdo a este criterio, gran parte de los suelos de la cuenca del río Turbio se encuentran por arriba de estos niveles de referencia.

7.2.4 Cobre

El lugar conocido como Todos Santos tuvo la mayor concentración de Cu en los sedimentos de la cuenca del río Turbio con $260.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, muy por arriba del rango medio mundial que es de $6\text{-}80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, reportado por McBride (1994). Otros sitios que sobrepasan estos valores (Clase 3) los constituyen: arroyo Pénjamo ($107.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Estación San Joaquín ($120.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). El área con los suelos más significativos en cuanto a contenidos de Cu resultó ser el sur de La Reserva ($104.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Estas áreas constituyen la Clase 3 (Figura 31). Otras áreas que se ubican en la Clase 2 y dentro de los rangos mundiales normales se encuentran los sedimentos del arroyo Pénjamo, arroyo Guajolota, arroyo Presa Vieja, Química de México, arroyo sin nombre al noreste de Cañada de Negros, al oeste de la intersección de Purísima de Bustos con el arroyo Purísima, canal Los Castillo, El Saúco y presa Ibarillas, cuyos rangos van

de 50.5 a $79.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En suelos, al este de Jalpa de Canovas y Santa Rosa de Ayala con rangos que van de 50.0 a $51.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Figura 31).

Los valores de Cu fluctúan alrededor de una media geométrica de $20.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un coeficiente de variación de 88.66% . El análisis de contraste de medias no alcanza a detectar diferencias significativas entre las concentraciones promedio de Cu provenientes de ambos materiales, suelos ($21.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), y en sedimentos ($27.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Sin embargo, debe señalarse que las muestras de sedimentos presentaron las más altas concentraciones, alcanzando valores de hasta $226.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En este sentido, hubo mayor homogeneidad en los datos de Cu de las muestras de suelos.

Müller *et al.* (1992) consideran que el máximo permisible de Cu en sedimentos es $45.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que la Comunidad Económica Europea lo estima en $50.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en tanto que Canadá lo establece en $100.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

7.2.5 Cromo

Las concentraciones de cromo más importantes se encuentran asociadas con: (a) sedimentos del sistema León-río Turbio, en especial la presa de Silva, San

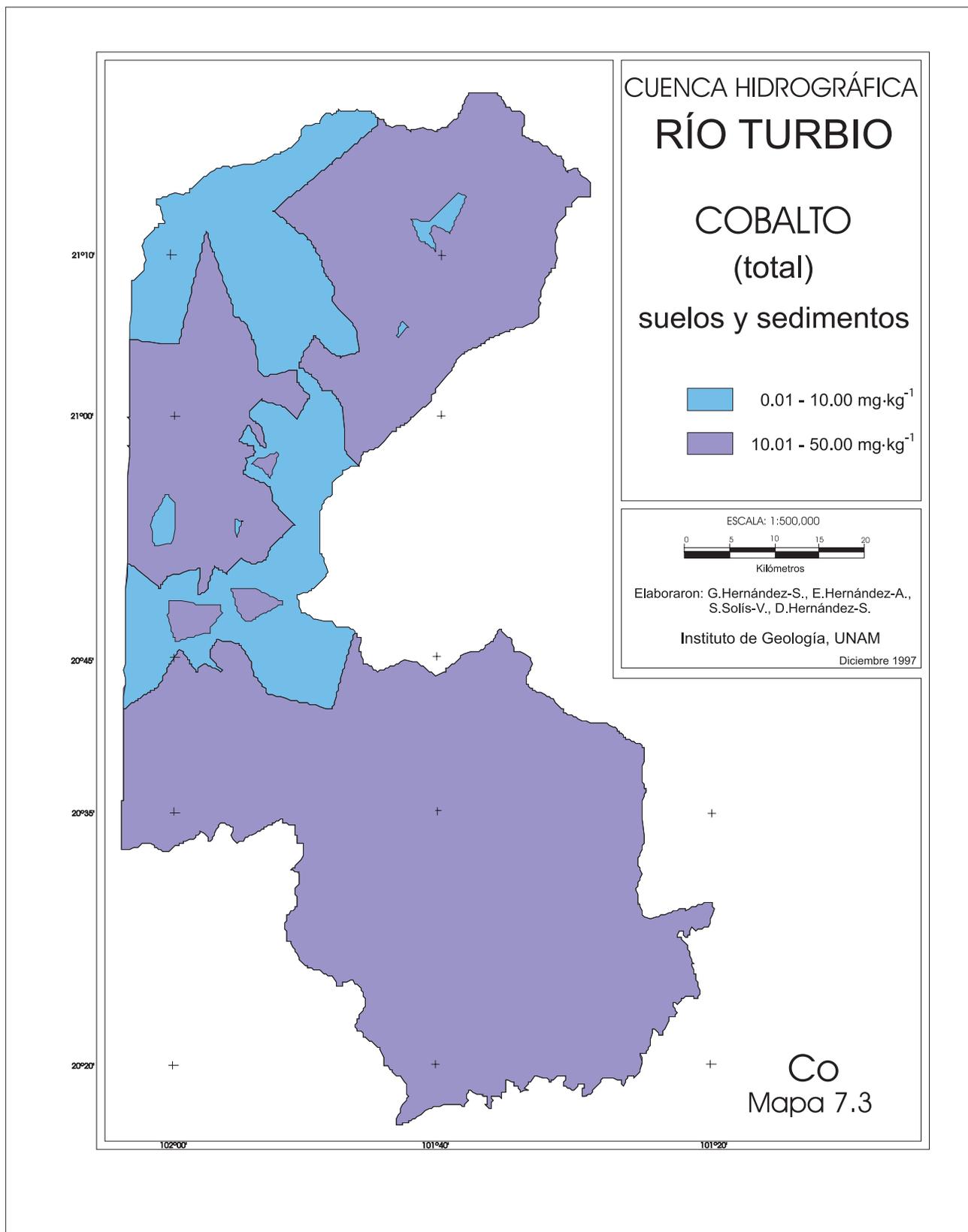


Figura 30. Mapa de dispersión de cobalto en la cuenca del río Turbio.

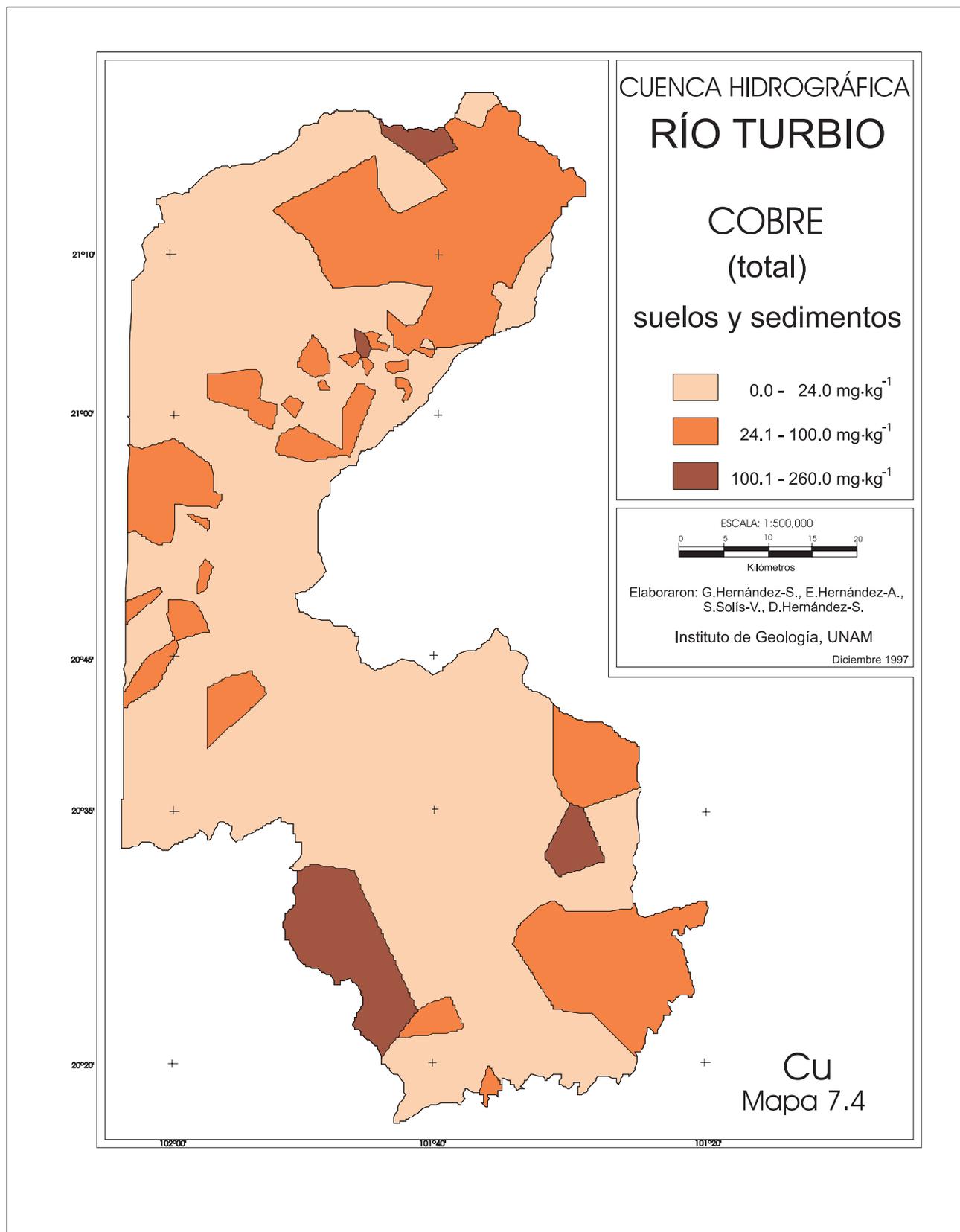


Figura 31. Mapa de dispersión de cobre en la cuenca del río Turbio.

Roque de Montes, la presa El Maestranzo y El Claro, junto con los afluentes del Turbio, los arroyos La Joya y Mora, con rangos que van de 220.0 a 690.0 mg·kg⁻¹; (b) suelos del área comprendida entre Estancia de Vaqueros (con 2196.0 mg·kg⁻¹), que se ubica inmediatamente después de la confluencia con el arroyo La Mora y antes de la presa Trinidad; y (c) La Reserva, sureste de Betania, sur de Plan de Ayala y Malagana, con rangos que van de 281.0 a 595.0 mg·kg⁻¹ (Figura 32).

La Figura 33 muestra que las mayores concentraciones de Cr se localizan en los sedimentos de la zona urbana de la ciudad de León. En la Figura 32 puede verse que el corredor industrial León-San Francisco-Purísima de Bustos es la zona más conflictiva en lo que se refiere al Cr en suelos y sedimentos, con valores que van de 100 a 2,200 mg·kg⁻¹. En la Figura 34, se aprecia que en el tramo del río Lerma que limita con la subcuenca del río Turbio, los sedimentos presentan valores bajos de Cr, entre 19 y 21 mg·kg⁻¹. Solamente la desembocadura del río Turbio presenta concentraciones más altas, de 44 mg·kg⁻¹, que también es un valor bajo.

Los valores de Cr fluctuaron alrededor de la media geométrica de 35.2 mg·kg⁻¹ con un coeficiente de variación de 244.27%. En el caso de este elemento, varias muestras de suelos resultaron con concentraciones arriba de 300.0 mg·kg⁻¹ señalando problemas de acumulación, junto con algunas otras muestras de sedimentos. El análisis de contraste de medias practicado en las concentraciones de Cr procedentes de los dos tipos de materiales, no detecta diferencias significativas, a pesar de que la concentración promedio en sedimentos es de 54.6 mg·kg⁻¹ y en suelos de 80.2 mg·kg⁻¹, lo cual es debido a la gran variabilidad que presenta esta cuenca respecto a sus contenidos de cromo.

La Comunidad Económica Europea señala como concentración máxima aceptable para Cr en suelos 50.0 mg·kg⁻¹; en cambio, Canadá la fija en 120.0 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Por otro lado, McBride (1994) afirma que los rangos medios mundiales para el Cr en suelos, van de 7.0 a 221.0 mg·kg⁻¹. Müller *et al.* (1992) recomiendan, para sedimentos, un máximo permisible de 90.0 mg·kg⁻¹.

7.2.6 Hierro

Los suelos comprendidos en el área que se ubica entre Cañada de Negros y San Ángel, así como los

sedimentos del arroyo La Atarjea al oeste de Química de México y las presas Alfaro e Ibarillas, han acumulado concentraciones de Fe que van de 4.15 a 4.70% y que corresponden a la Clase 2, nivel medio. En la Clase 4 con rangos que van de 5.01 a 7.50%, se ubican los arroyos Guanajuatillo y Barbosa, así como El Saúco, Todos Santos y Pastor Ortiz, con concentraciones que fluctúan entre 5.10% 6.25%. Solamente al este del poblado conocido como Dolores, al pie de basaltos y riolitas de los Altos de Jalisco, se encontraron 9.61% en suelos, cantidad muy por arriba de los rangos considerados como medios mundiales (Figura 35).

Las concentraciones de Fe fluctuaron alrededor de una media geométrica de 2.37%, con un coeficiente de variación de 37.55%. El análisis de contraste de medias practicado en los dos materiales, indicó que hay diferencia altamente significativa en relación a sus contenidos de Fe, siendo los sedimentos los que, en promedio, presentan los mayores niveles de este elemento.

7.2.7 Manganeso

Dentro de las Clase 3, los rangos de Mn en sedimentos van de 1,000 a 1,300 mg·kg⁻¹, ubicados en los arroyos Prieto, Negro, Hondo, Joya, Guanajuatillo, Castillo, Todos Santos y Peralta (río Lerma). Con respecto a los suelos, se encuentran el sureste de Peñuelas, Cañada de Negros, San Ángel, oeste de Los Arcos. Dentro de la Clase 3, los contenidos más elevados se ubican en los sedimentos de los arroyos La Atarjea (1,856.0 mg·kg⁻¹), arroyo sin nombre en Los Castillo (1,339.0 mg·kg⁻¹) y El Saúco con 1,890.0 mg·kg⁻¹ (Figura 36).

Las concentraciones de Mn tuvieron una media geométrica de 524.1 mg·kg⁻¹ y un coeficiente de variación de 43.36%. El análisis de contraste de medias practicado en suelos y sedimentos, indicó que no hay diferencia significativa entre ellos. Sin embargo, las muestras de sedimentos son las que presentan las más altas concentraciones, alcanzando valores de hasta 1,890.0 mg·kg⁻¹. Como consecuencia, existe una mayor heterogeneidad en los valores de Mn en los sedimentos.

La dispersión del Mn es muy errática; se encuentra asociada a la zona de mineralización que se encuentra al sur de la sierra Cuatralba así como en los basaltos del cerro El Veinte y de la sierra Pénjamo. Estas áreas

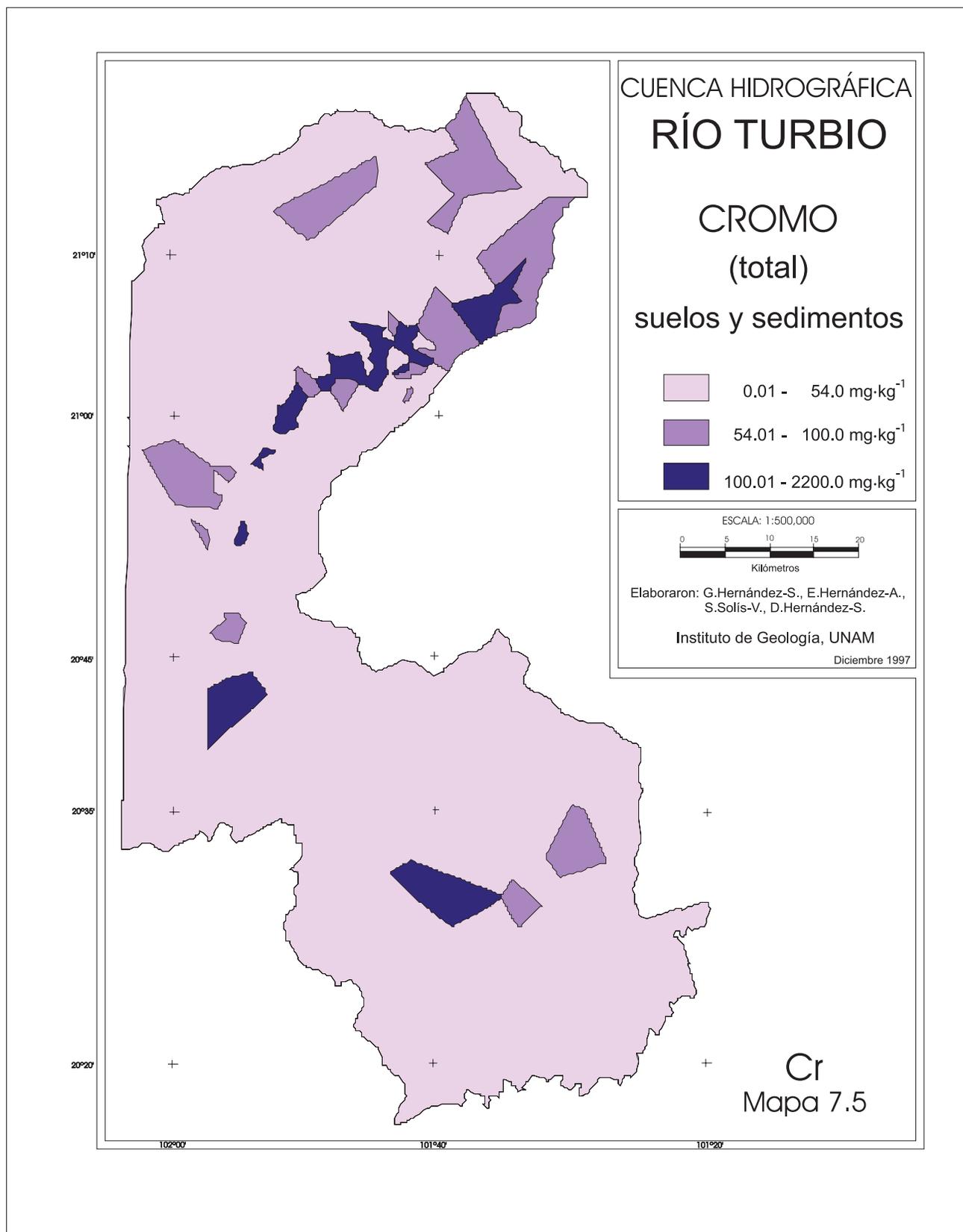


Figura 32. Mapa de dispersión de cromo en la cuenca del río Turbio

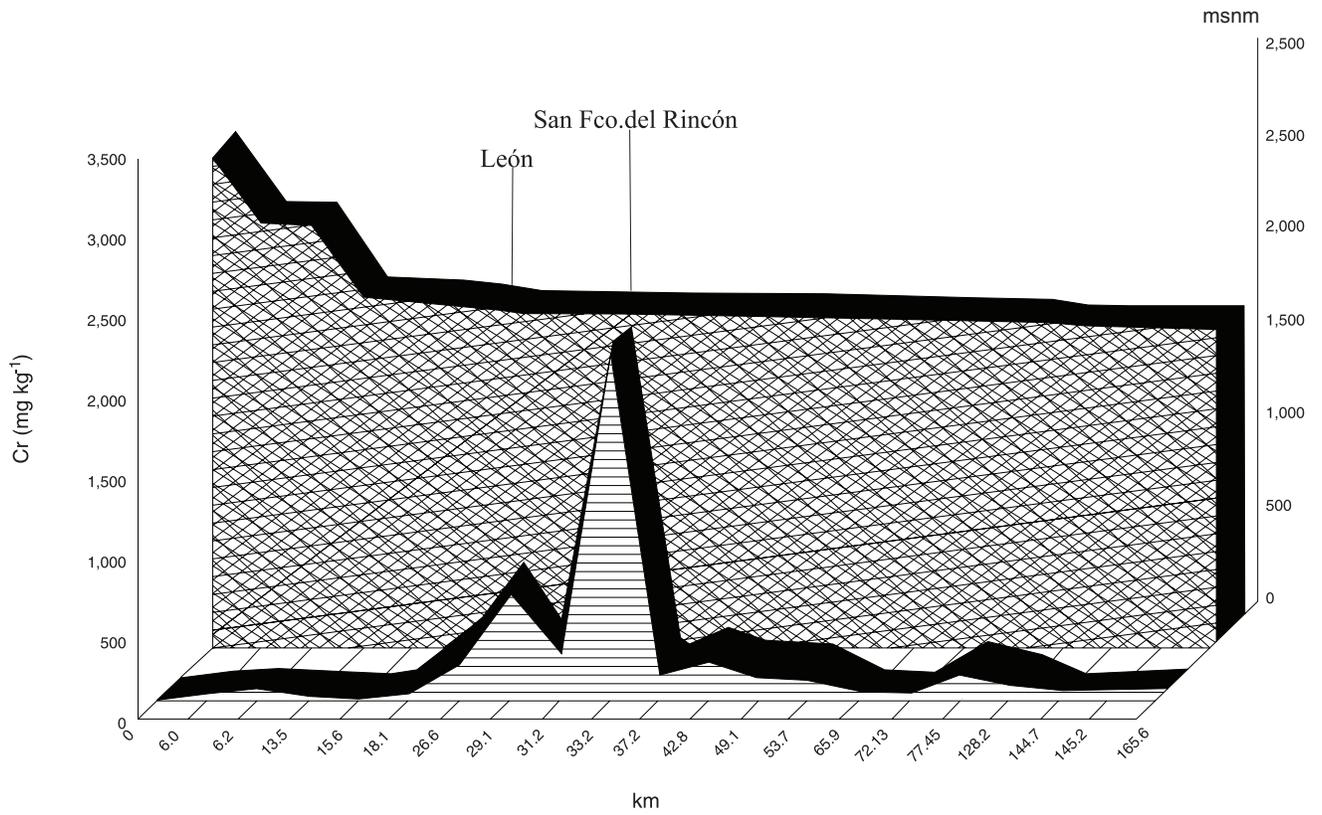


Figura 33. Gráfica de distribución de cromo en los sedimentos del río Turbio.

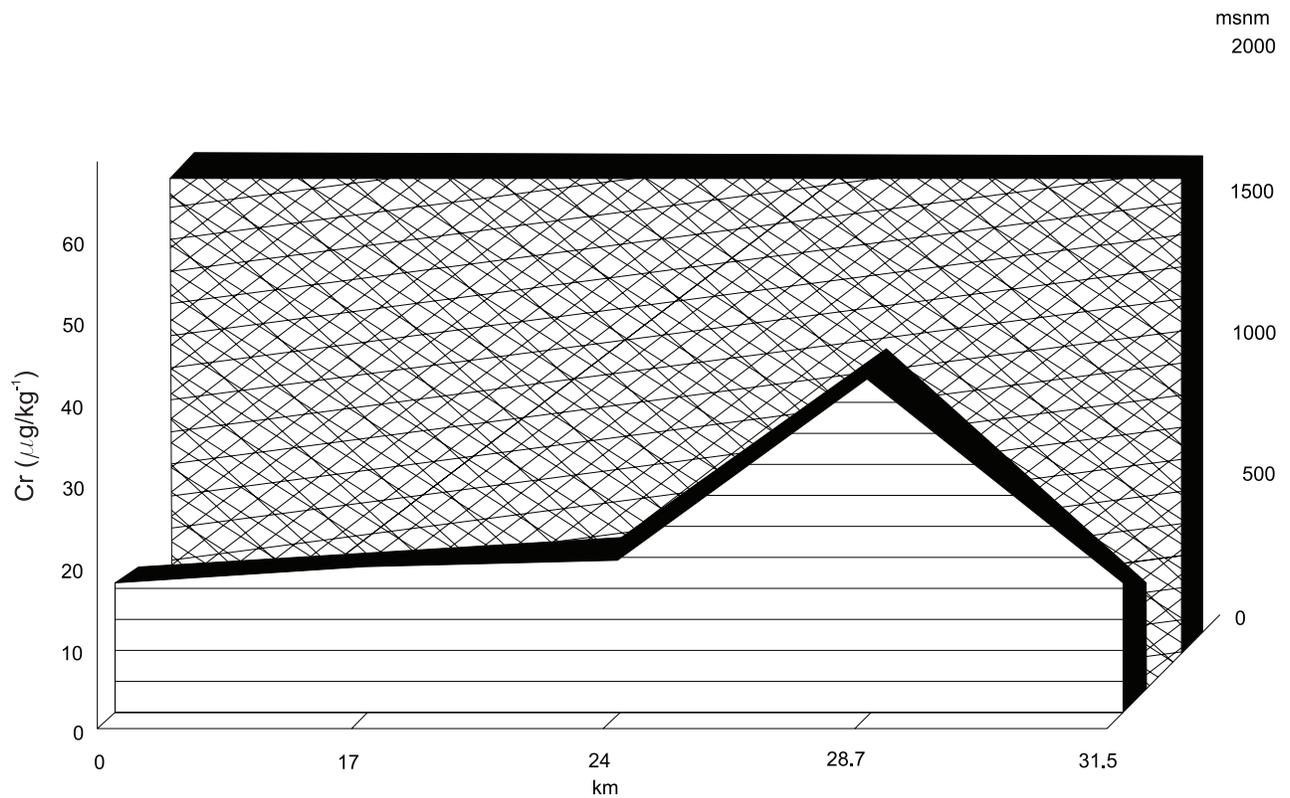


Figura 34. Gráfica de distribución de cromo en los sedimentos de un tramo del río Lerma.

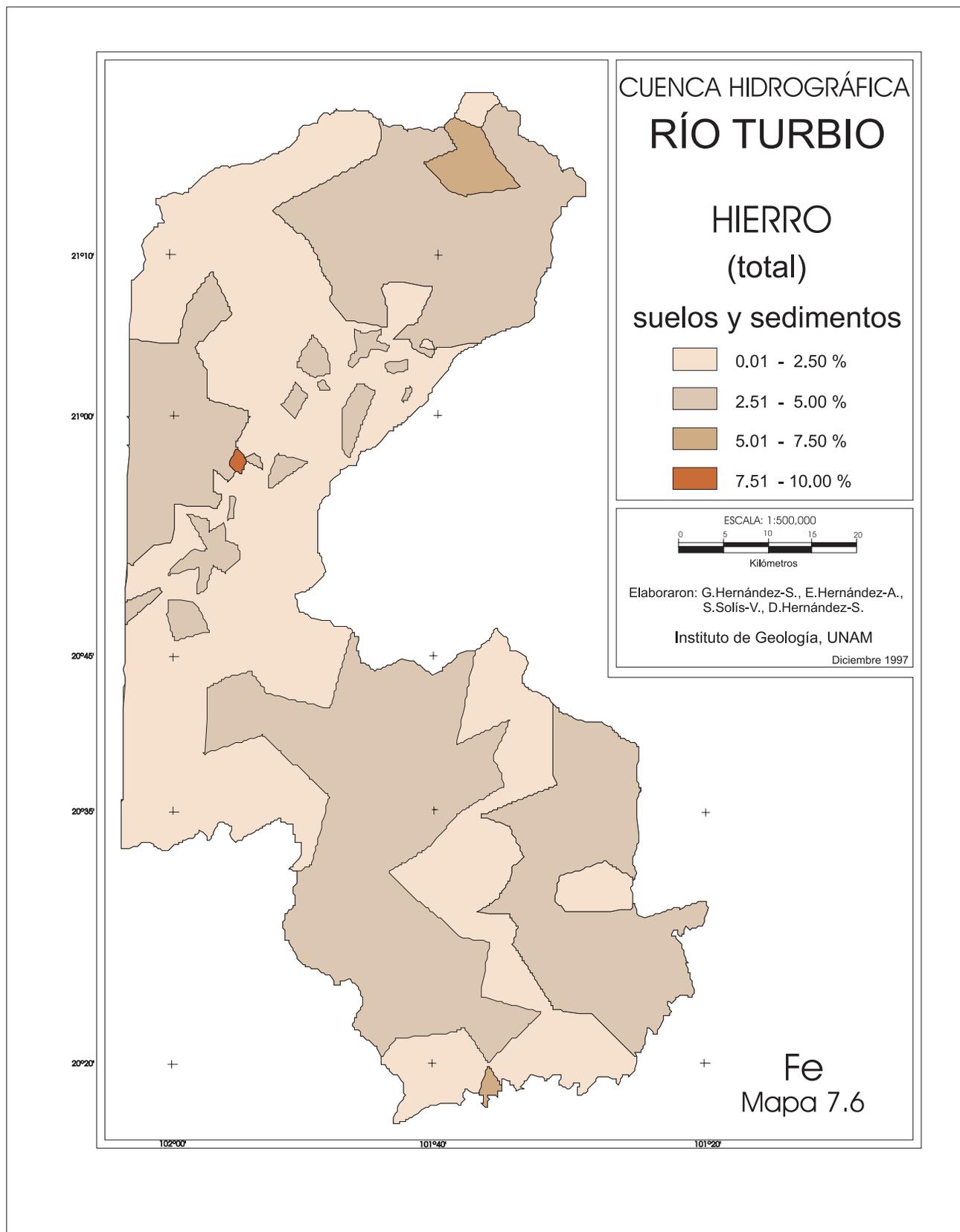


Figura 35. Mapa de dispersión de hierro en la cuenca del río Turbio.

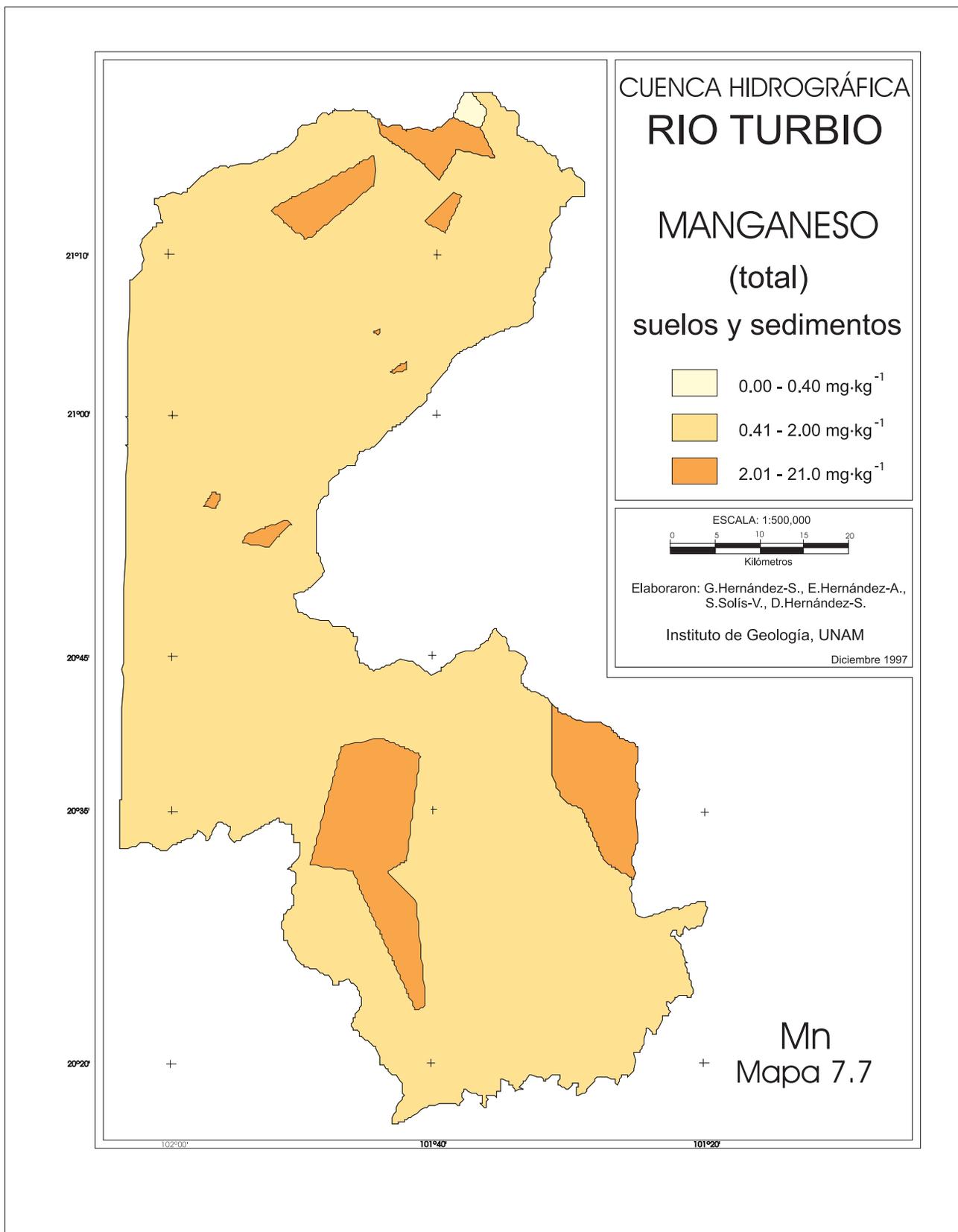


Figura 36. Mapa de dispersión de manganeso en la cuenca del río Turbio.

constituyen las de mayor riesgo de acumulación de Mn en suelos y sedimentos ya que, de acuerdo a McBride (1994), el rango medio mundial en suelos, se encuentra entre 80.0 y 1,300 mg·kg⁻¹.

7.2.8 Mercurio

La mayor parte del Hg en suelos y sedimentos se deriva fundamentalmente de los granitos, pizarras y sedimentos arcillosos de la cuenca del río Turbio. Las concentraciones de Hg más importantes se encuentran, en primer lugar, en las confluencias de los ríos Turbio y Lerma. Los sedimentos a lo largo del río Lerma tuvieron un rango que va de 0.52 mg·kg⁻¹ (Labor de Peralta) a 4.63 mg·kg⁻¹ (Peralta). Las concentraciones en los sedimentos del río Turbio, cercanos a la convergencia con el río Lerma, fluctúan entre 0.69 y 1.38 mg·kg⁻¹. En cambio, los valores de los sedimentos del río Lerma cercanos a la confluencia del río Turbio, fluctúan entre 0.70 y 2.50 mg·kg⁻¹. Con respecto a los suelos, los valores más elevados se encuentran en el área comprendida entre las localidades de El Puente (0.72 mg·kg⁻¹), Malagana (0.59 mg·kg⁻¹), La Mora (0.84 mg·kg⁻¹) y Estancia de Vaqueros con 20.49 mg·kg⁻¹ (Figura 37). En el trayecto que va del poblado Peralta al de La Calle, puede constatar una variabilidad de Hg en los sedimentos del río Lerma con valores que van de 2.67 a 21.00 μg kg⁻¹ (Figura 38).

Los valores de Hg tuvieron una media geométrica de 0.095 mg·kg⁻¹ y un coeficiente de variación de 527%. La concentración promedio de Hg en suelos es de 0.38 mg·kg⁻¹ y en sedimentos de 0.14 mg·kg⁻¹. Sin embargo, el análisis de contraste de medias no detectó diferencias significativas en el contenido de mercurio de estos dos tipos de materiales. Los contenidos más altos de Hg fueron observados en muestras de suelos, alcanzando una de ellas el valor de 20.5 mg·kg⁻¹.

El rango medio mundial de mercurio en suelos va de 0.02 a 0.41 mg·kg⁻¹, según McBride (1994). En cambio Kabata-Pendias y Pendias (1992) señalan que los contenidos de mercurio en diferentes suelos de diferentes países van de 0.01 a 1.5 mg·kg⁻¹.

7.2.9 Níquel

Las mayores concentraciones de Ni en la cuenca del río Turbio se localizan en la zona de mineralización

de los arroyos Guanajuatillo y Barbosa así como en los alrededores de Todos Santos (Clase 3) con rangos que van de 105.5 a 107.0 mg·kg⁻¹; también en los sedimentos de los arroyos Pénjamo y Hondo. De igual manera, en el área comprendida entre La Tinaja, canal Los Naranjos, arroyo Hacienda de Arriba, con valores que van de 60.0 a 66.0 mg·kg⁻¹; arroyo La Atarjea en Los Altos de Jalisco con 65.0 mg·kg⁻¹. Con respecto a los sedimentos ligados al río Turbio, las zonas más significativas fueron: El Tecolote (61.0 mg·kg⁻¹) y El Dique (83.5 mg·kg⁻¹); en relación al río Lerma, Pastor Ortiz con 61.0 mg·kg⁻¹ (Figura 39).

Todos los valores de Ni presentan una media geométrica de 30.6 mg·kg⁻¹, con un coeficiente de variación de 50.19%. El análisis de contraste de medias de suelos y sedimentos mostró que, al igual que el Cd, Co y Fe, los valores promedio de Ni presentan diferencia significativa ya que los sedimentos tienen un valor de 41.2 mg·kg⁻¹ y los suelos de 30.4 mg·kg⁻¹; en el caso de este elemento es significativa al 99% de probabilidad.

Los rangos medios mundiales para el Ni en suelos, según McBride (1994), van de 4.0 a 55.0 mg·kg⁻¹. Kabata-Pendias y Pendias (1992) señalan que para la Comunidad Económica Europea la concentración máxima aceptable en suelos es de 30.0 mg·kg⁻¹, mientras que para Canadá es de 32.0 mg·kg⁻¹.

7.2.10 Plomo

Las concentraciones de Pb más significativas se localizan alrededor de Todos Santos con 1,850.0 mg·kg⁻¹ y El Saúco con 293.8 mg·kg⁻¹, localizados al sur de la sierra Cuatralba. En relación a los sedimentos existen áreas por encima de los rangos reportados como normales en arroyo Palenque (132.0 mg·kg⁻¹), arroyo Presa Reventada (139.8 mg·kg⁻¹) y arroyo El Molino (104.1 mg·kg⁻¹) y arroyo Presa Vieja (96.0 mg·kg⁻¹). En relación al Pb en sedimentos del río Turbio: noreste de Estancia de Vaqueros (178.6 mg·kg⁻¹), Las Adjuntas (149.9 mg·kg⁻¹) y Maravillas (113.0 mg·kg⁻¹). En cuanto a los contenidos de plomo considerados por encima de los rangos normales a nivel mundial, se tienen las zonas: sur de La Aldea (110.8-139.2 mg·kg⁻¹), oeste de El Nacimiento (90.4 mg·kg⁻¹), suroeste de Peñuelas (128.7 mg·kg⁻¹) y noreste de San Bernardo con 98.4 mg·kg⁻¹ (Figura 40).

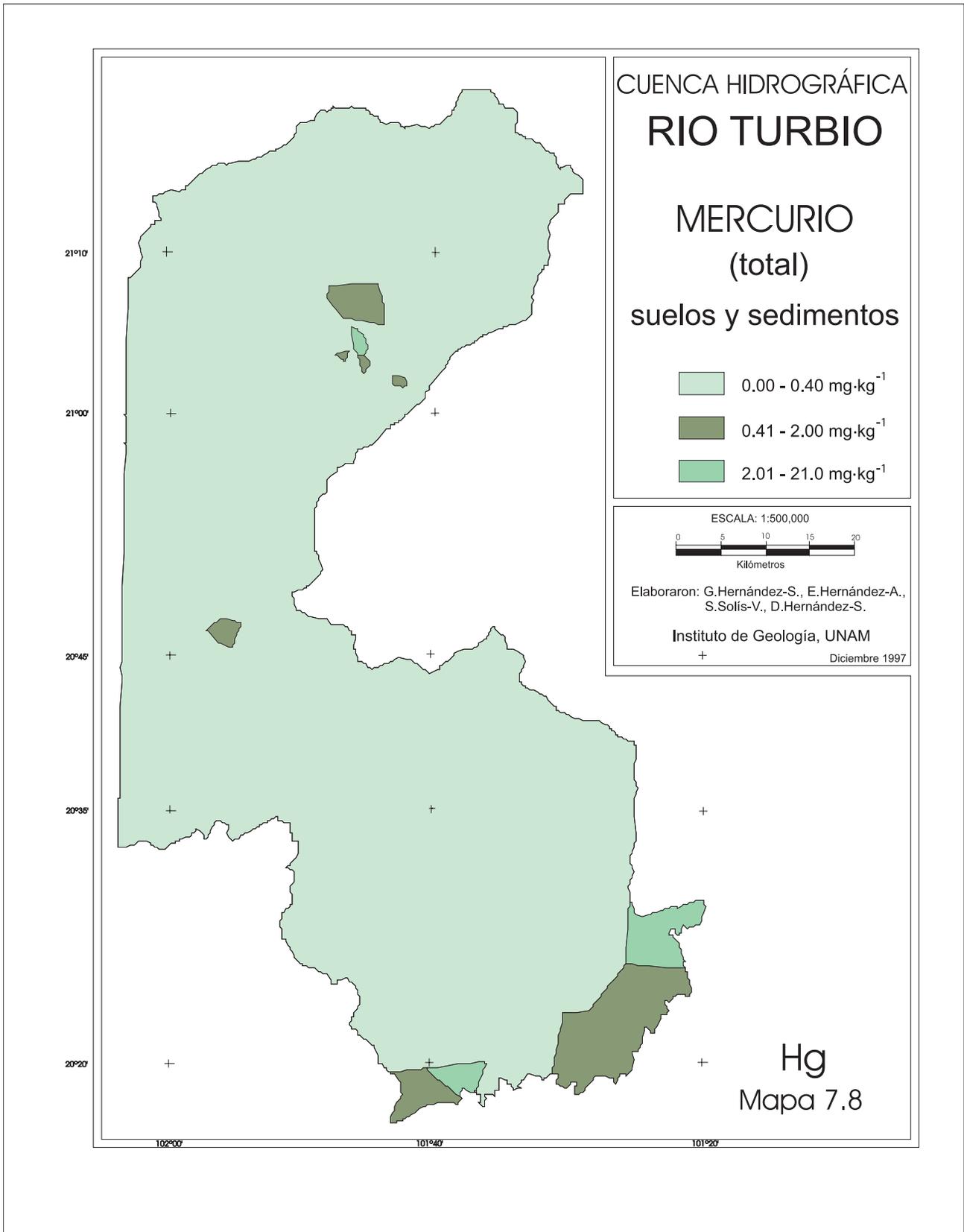


Figura 37. Mapa de dispersión de mercurio en la cuenca del río Turbio.

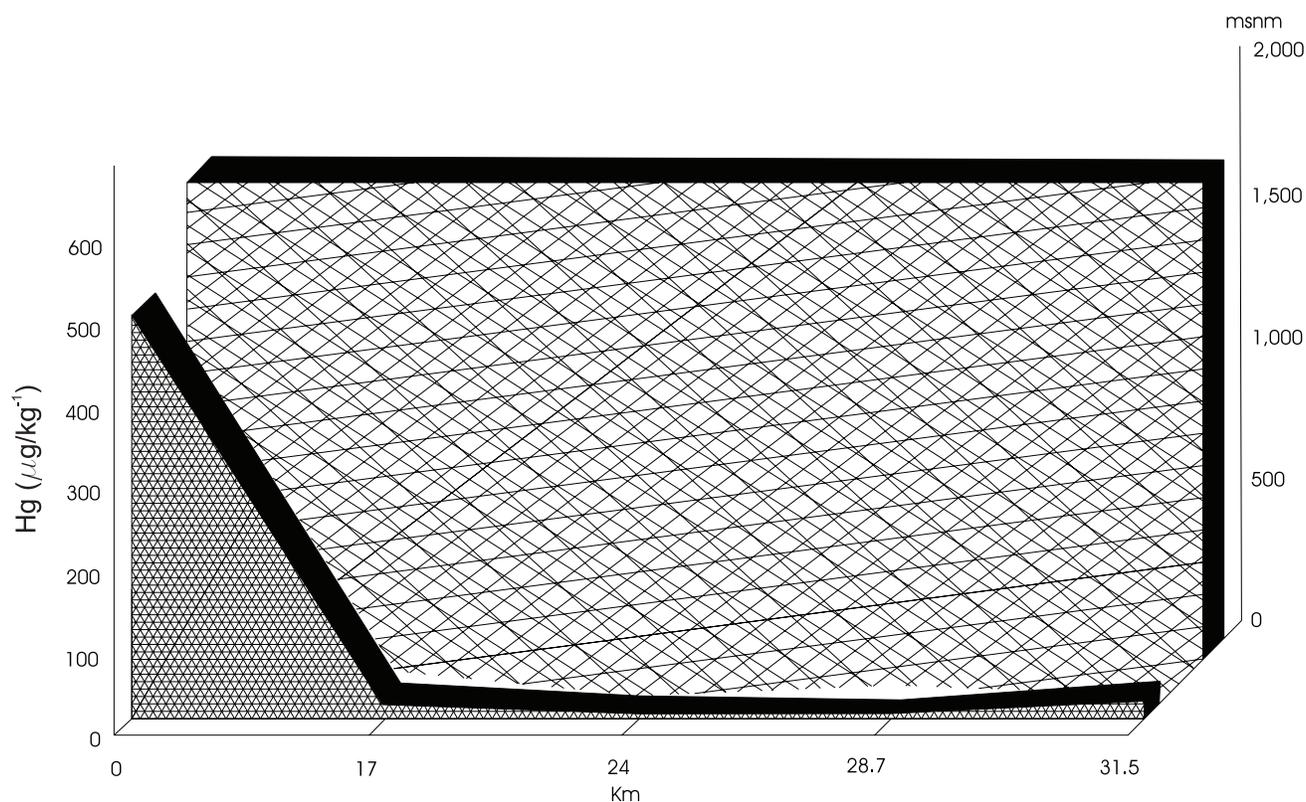


Figura 38. Gráfica de distribución de mercurio en los sedimentos de un tramo del río Lerma.

Los valores de Pb indican una media geométrica de $45.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un coeficiente de variación de 208.04%. Esta heterogeneidad está dada por las concentraciones de los sedimentos en los que una muestra alcanza un valor de $1850.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, valor situado muy por arriba de lo permisible. A pesar de ello, el análisis de contraste de medias practicado en las concentraciones de Pb en los dos tipos de materiales no detectó estas diferencias, señalando a los dos materiales, contenidos promedio de Pb muy similares: sedimentos $60.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y suelos $56.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Los rangos medios mundiales para el plomo en suelos, según McBride (1994), van de 10.0 a $84.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Por otro lado, la Comunidad Económica Europea considera como concentración máxima permisible en suelos, $50.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; mientras que Canadá lo establece en $60.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Para concentraciones máximas permisibles en sedimentos Müller *et al.* (1992) consideran el nivel de $20.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que Fergusson (1989) señala como límite aceptable, $80.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

7.2.11 Zinc

Los niveles más importantes de zinc (Clase 3, de 300.1 a $3,010 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) se localizan en los sedimentos de la región que comprende San José del Potrero ($2,048.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y arroyo El Maestranzo ($1,062.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); al sur de la sierra Cuatralba, se encuentra El Saúco con $565.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; también en relación a sedimentos, pero en el sistema del río Turbio y a la altura de Las Tablas ($343.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Estación San Joaquín con $420.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En suelos, al sureste de Betania y sur de Las Amalias, se encontraron $628.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Con concentraciones que van de 125.5 a $265.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ se tiene a: arroyo Escalerilla (Casa Blanca), presa Ibarillas, arroyo El Molino (al oeste de la presa El Palote), presa La Alberca, El Claro (sobre el río Turbio), arroyo la Presa Vieja, arroyo sin nombre cerca de Cañada de Negros, represa al este de El Consuelo, La Correa, intersección carretera Purísima de Bustos-Manuel Doblado con arroyo La Purísima de Bustos, arroyo La Atarjea, sur y este de Plan de Ayala, noreste de Malagana, Estancia

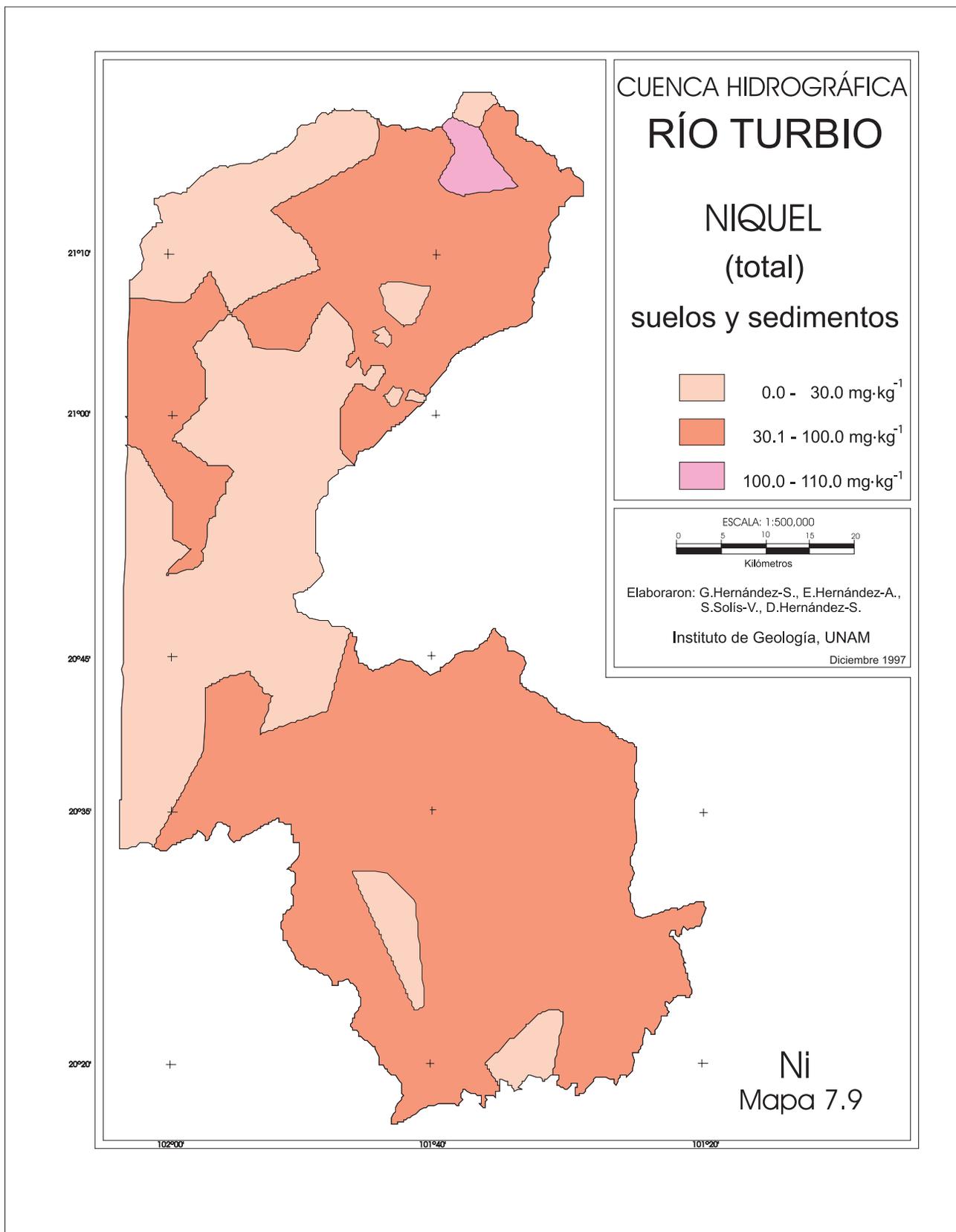


Figura 39. Mapa de dispersión de níquel en la cuenca del río Turbio.

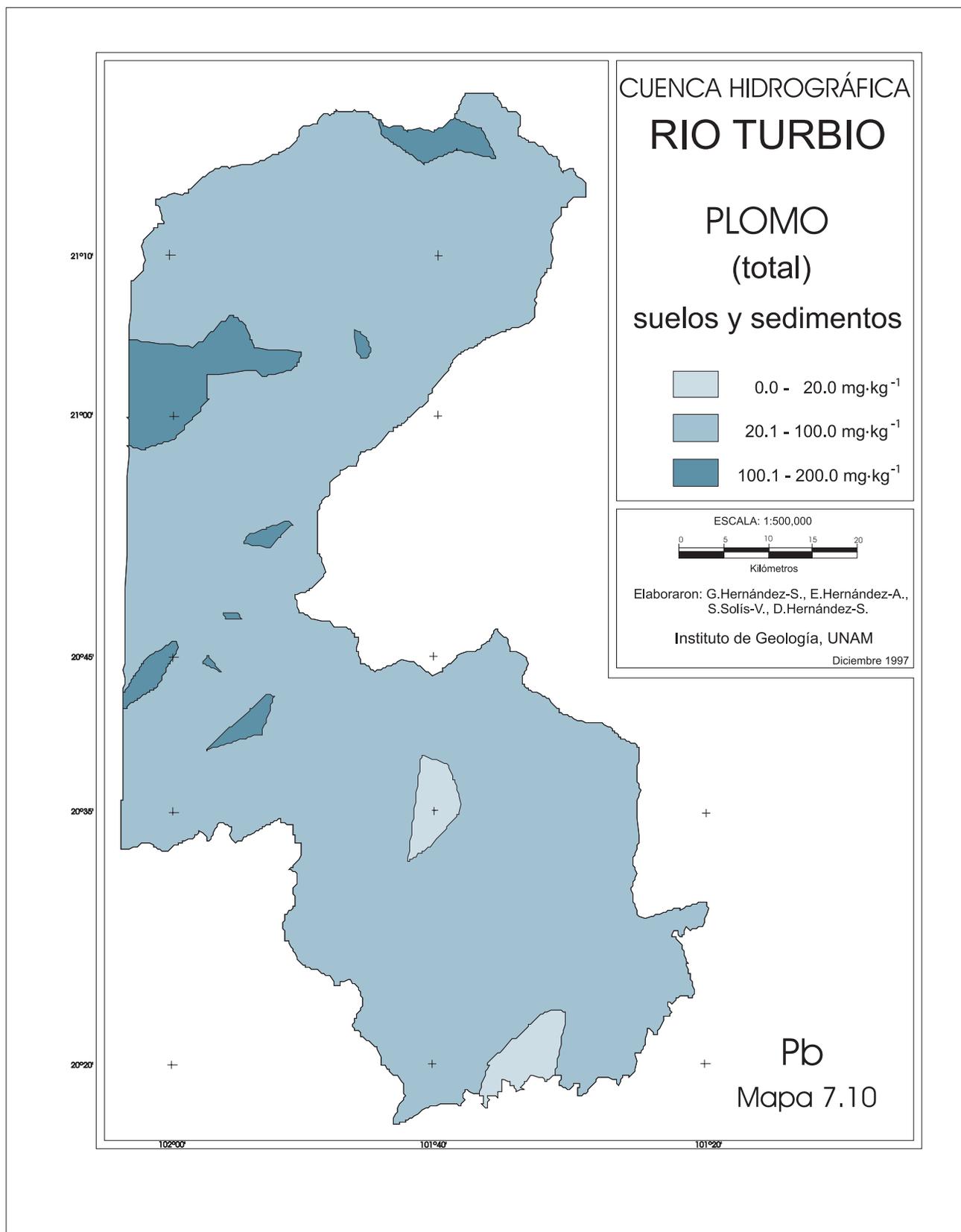


Figura 40. Mapa de dispersión de plomo en la cuenca del río Turbio.

de Vaqueros, este de La Reserva, presa El Maestranzo, norte y noroeste de la presa El Maestranzo, canal Los Castillo, arroyo El Calvillo, Todos Santos, arroyo Pénjamo y sur de Capilla de Márquez (Figura 41).

Los datos del Zn tienen una media geométrica de $80.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un coeficiente de variación de 232.60%. El análisis de contraste de medias practicado a los valores de Zn en los dos tipos de materiales, señala que no hay diferencia significativa entre ellos, a pesar de que en promedio, los sedimentos tienen una mayor concentración de Zn ($156.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en comparación con los suelos que es de $88.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Esta aparente

falta de sensibilidad en el análisis es debida a la gran variación que presentan las concentraciones de Zn en toda la subcuenca. Tres muestras de sedimentos presentaron los mayores niveles de Zn, alcanzando una de ellas $3,010.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Los rangos de los niveles mundiales de Zn en suelos fluctúan entre 17.0 y $125.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de acuerdo a McBride (1994). La Comunidad Económica Europea señala como concentración máxima aceptable $150.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que Canadá la fija en $220.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Para sedimentos, Müller *et al.* (1992) mencionan como máxima permisible, $100.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

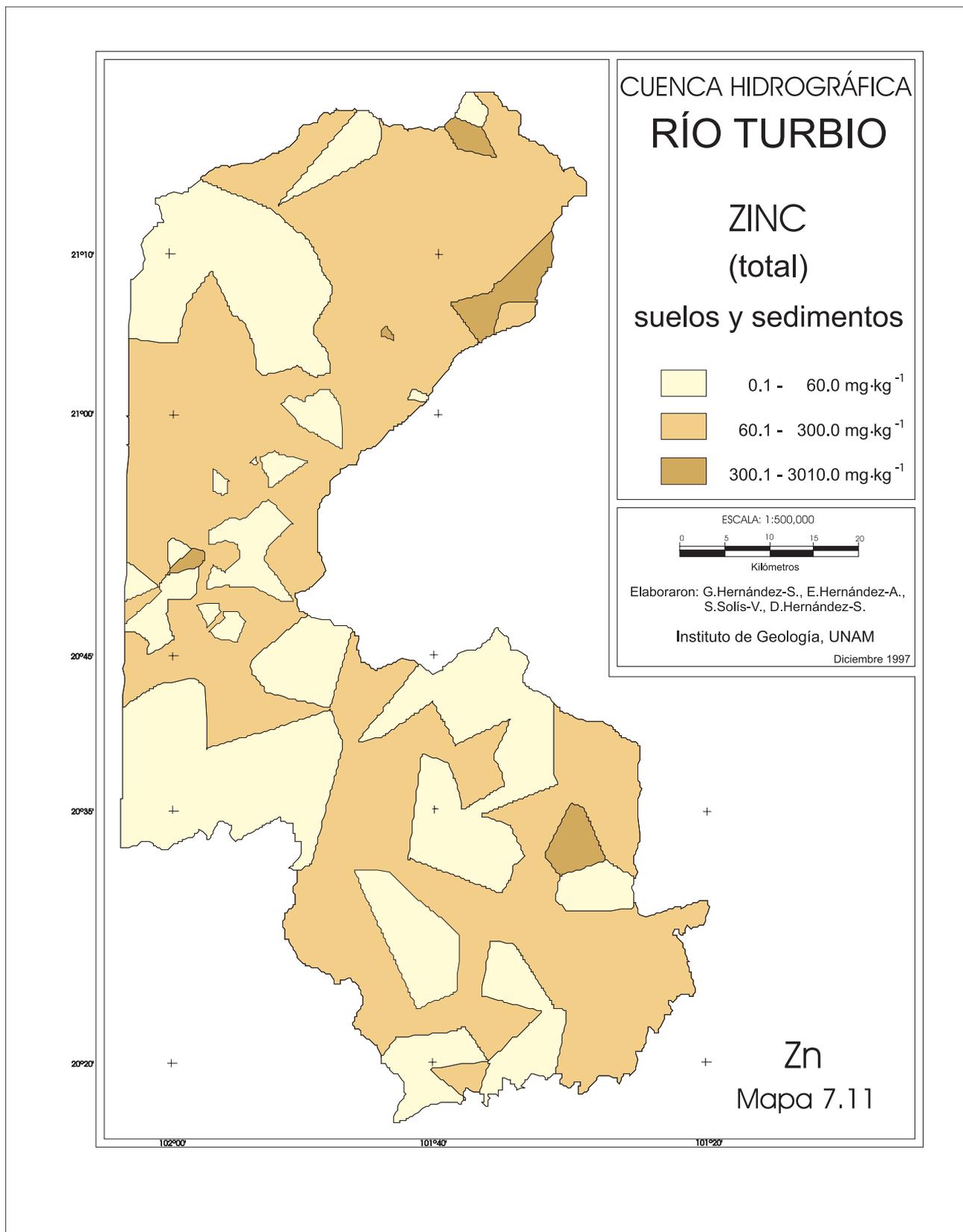


Figura 41. Mapa de dispersión de zinc en la cuenca del río Turbio.

8. EL MUNICIPIO DE LEÓN

8.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES

La realización de esta serie de mapas se llevó a cabo debido al interés que mostraron las autoridades municipales por los resultados de estos trabajos, ya que sirven como apoyo para la realización de planes de rehabilitación del medio ambiente.

El territorio del municipio de León está integrado por dos subcuencas, la de San Juan de Otates y la del río Turbio (Figura 42). En virtud de que estas dos cuencas ya han sido descritas con más detalle anteriormente, sólo se describirán como ejemplo de integración de las dos cuencas, los elementos arsénico, cromo, mercurio y níquel por considerar que éstos constituyen los más representativos del municipio. Los límites municipales fueron tomados del mapa proporcionado por el IMPLAN de León (1997). Este mapa fue digitizado y trasladado a la misma escala y procesado de la misma manera que el resto de los mapas.

8.2 LOS METALES PESADOS EN SUELOS Y SEDIMENTOS

8.2.1 Arsénico

El As se ha dispersado en suelos y sedimentos básicamente en la cuenca del río Turbio en el área correspondiente a la zona de mineralización (Clase 3, 20.01–50.0 mg·kg⁻¹), que incluye San José del Potrero, Guanajuatillo, Barbosa, El Saúco y Todos Santos; por otro lado, Ibarillas y Los Naranjos; presa de San Germán, Química de México, Estancia de Sapos y Las Palmas; sur de la ciudad de León y Santa Ma. de Bolaños. La cuenca de San Juan de Otates solamente tiene una zona de especial relevancia que se localiza al este de San José de Otates, con un rango que va de 50.001 a 100.0 mg·kg⁻¹ (Figura 43).

8.2.5 Cromo

Las concentraciones más elevadas de Cr (Clase 3, > 100.0 mg·kg⁻¹) se ubican en la cuenca San Juan de Otates, a lo largo de las subcuencas de los arroyos San Juan de Otates y El Juache y canal de Santa Ana del Conde; Los Ramírez y Rancho de Abajo. Dentro de la cuenca del río Turbio, se localizan las áreas Estancia

Los Sapos, Ramillete, El Ratón, Puerta del Cerro, Presa San Germán, Química de México, Malagana y Estancia de Vaqueros. En contraste, las áreas con Clase 2 (54.01 y 100.0 mg·kg⁻¹) de la cuenca San Juan de Otates se localizan en la zona comprendida entre La Laborcita, Las Pilas y Duarte; norte de Loza de los Padres, San José del Alto y San Juan Bautista. En la cuenca del río Turbio, la Clase 2 se ubica al norte del municipio, Guanajuatillo, Hacienda de Arriba, San Nicolás de González y San José del Potrero (Figura 44).

8.2.8 Mercurio

Los contenidos más significativos (Clase 3, 2.01 a 21.0 mg·kg⁻¹) se ubican en un área restringida de la cuenca del río Turbio que abarca El Puente, Malagana, La Mora y Estancia de Vaqueros; otras más pequeñas, pero de la Clase 2 (0.41–2.00 mg·kg⁻¹) están en Plan de Ayala y El Maestranzo. Los contenidos de mercurio en la parte correspondiente a San Juan de Otates son muy bajos, dado que son reportados en µg·kg⁻¹ y no en mg·kg⁻¹; no obstante, se elaboró el mapa correspondiente con el fin de tener una idea de su dispersión. Este muestra concentraciones relativamente altas (Clase 3, de 20.001 a 30.500 µg·kg⁻¹) en Sauz Seco, Providencia y La Angostura; en la confluencia de los arroyos El Juache y San Juan de Otates, así como presa San Antonio y Santa Ana del Conde (Figura 45).

8.2.9 Níquel

El níquel se halla concentrado principalmente dentro de la cuenca de San Juan de Otates, en lo que son las subcuencas de los arroyos San Juan de Otates y El Juache y su confluencia, así como en el área donde se ubica la terminación del canal de Santa Ana del Conde y la región que abarca la parte baja de Playas de Sotelo; también, se encuentra concentrado en la zona correspondiente al aeropuerto internacional y San Juan de Abajo. Esta zonas corresponden a la Clase 3 (100.1 a 540.0 mg·kg⁻¹). En la cuenca del Turbio, solamente existe una región importante de acumulación de Ni (100.0–110.0 mg·kg⁻¹), que corresponde a la zona de mineralización de los arroyos Guanajuatillo y Barbosa, así como a Todos Santos (Figura 46).

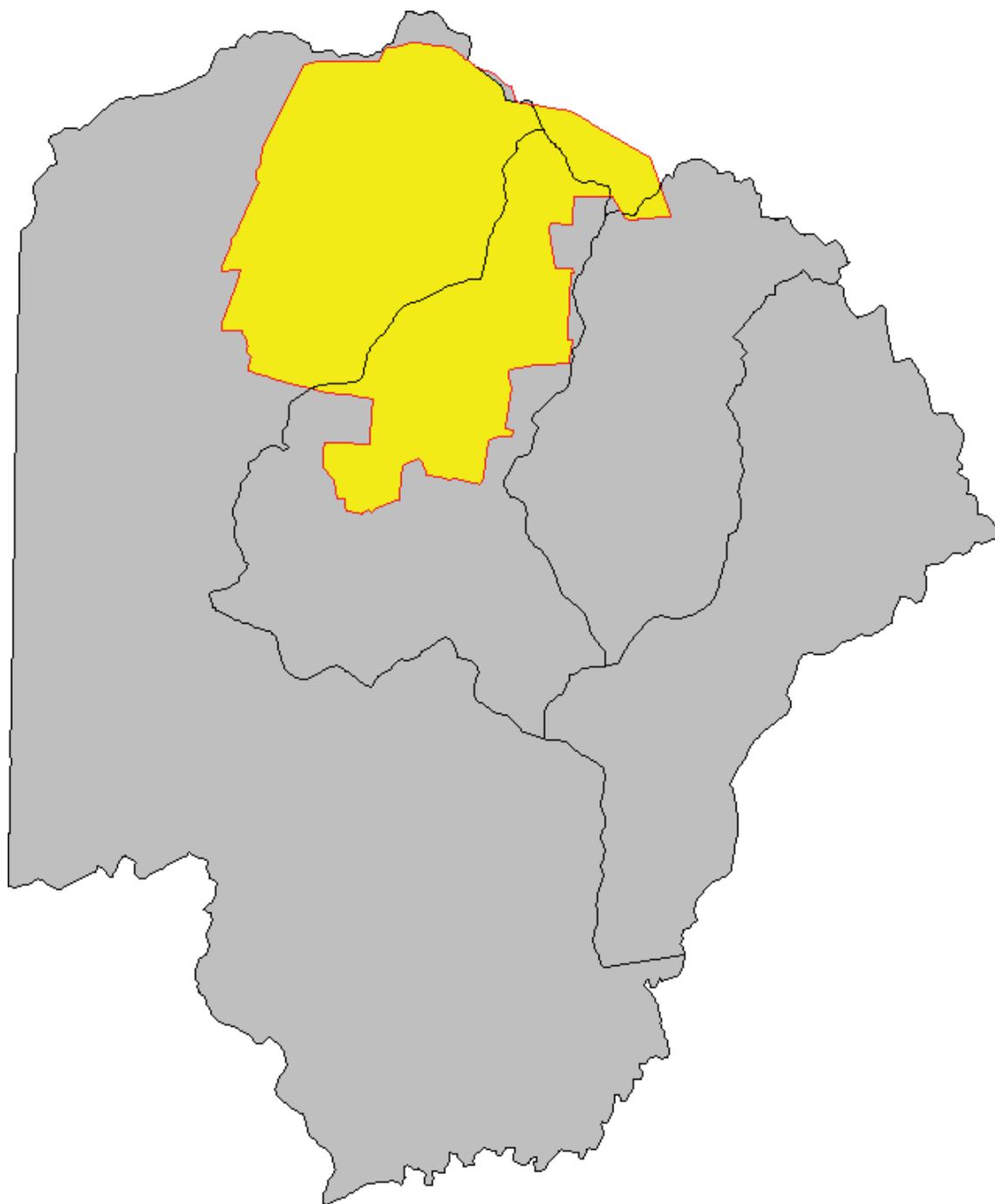


Figura 42. Mapa que muestra el límite del municipio de León y las subcuencas en estudio.

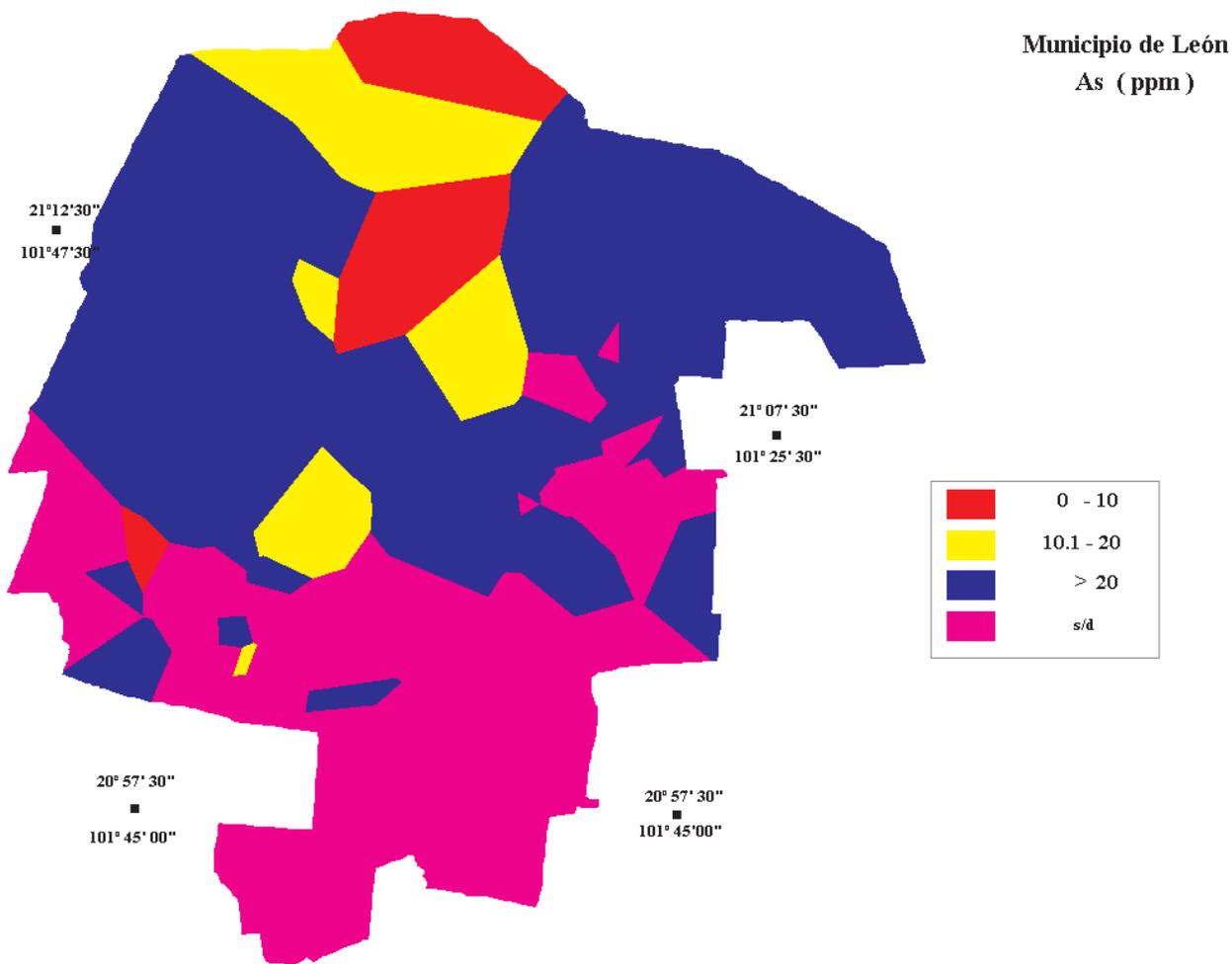


Figura 43. Mapa de dispersión de arsénico en el municipio de León.

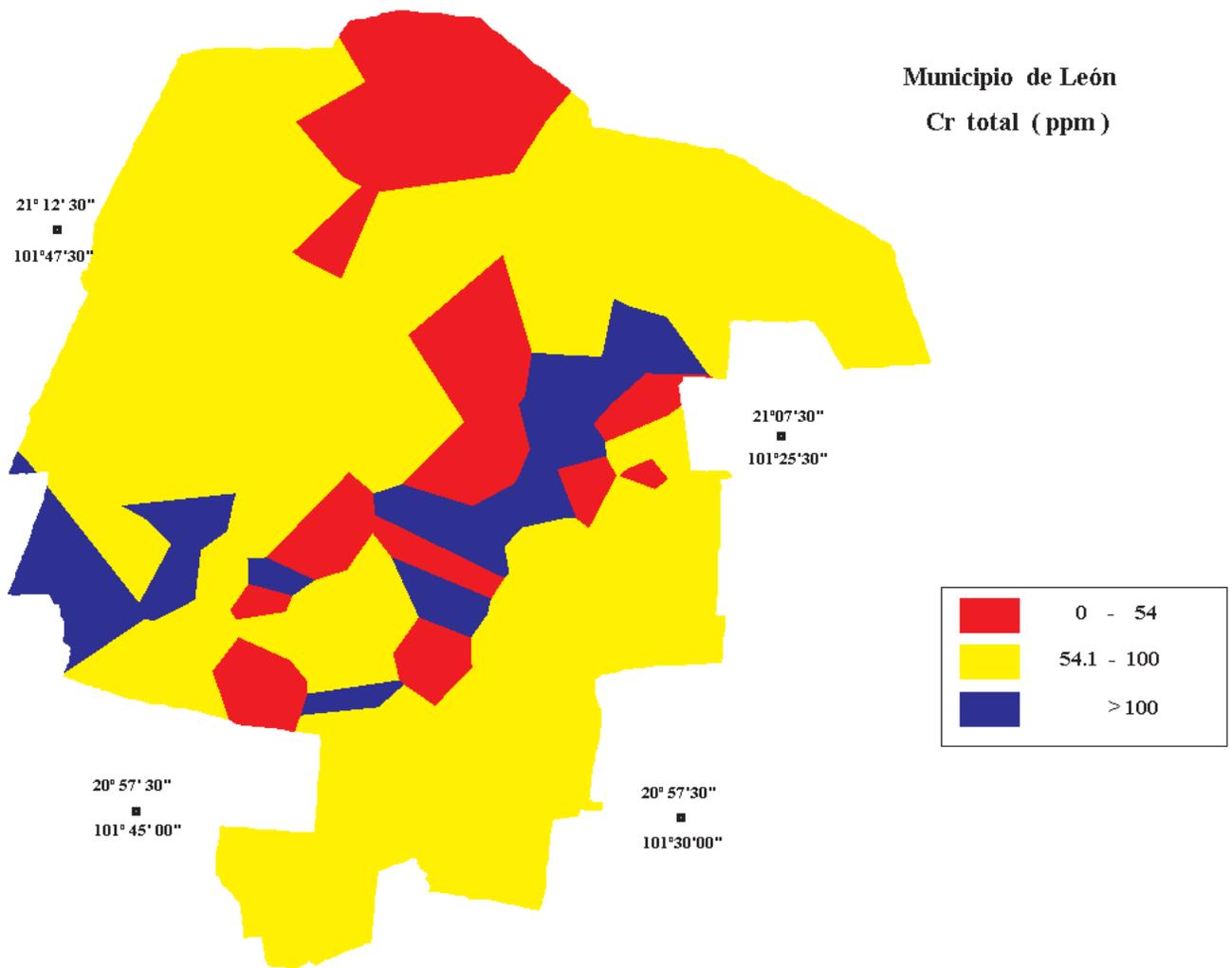


Figura 44. Mapa de dispersión de cromo en el municipio de León.

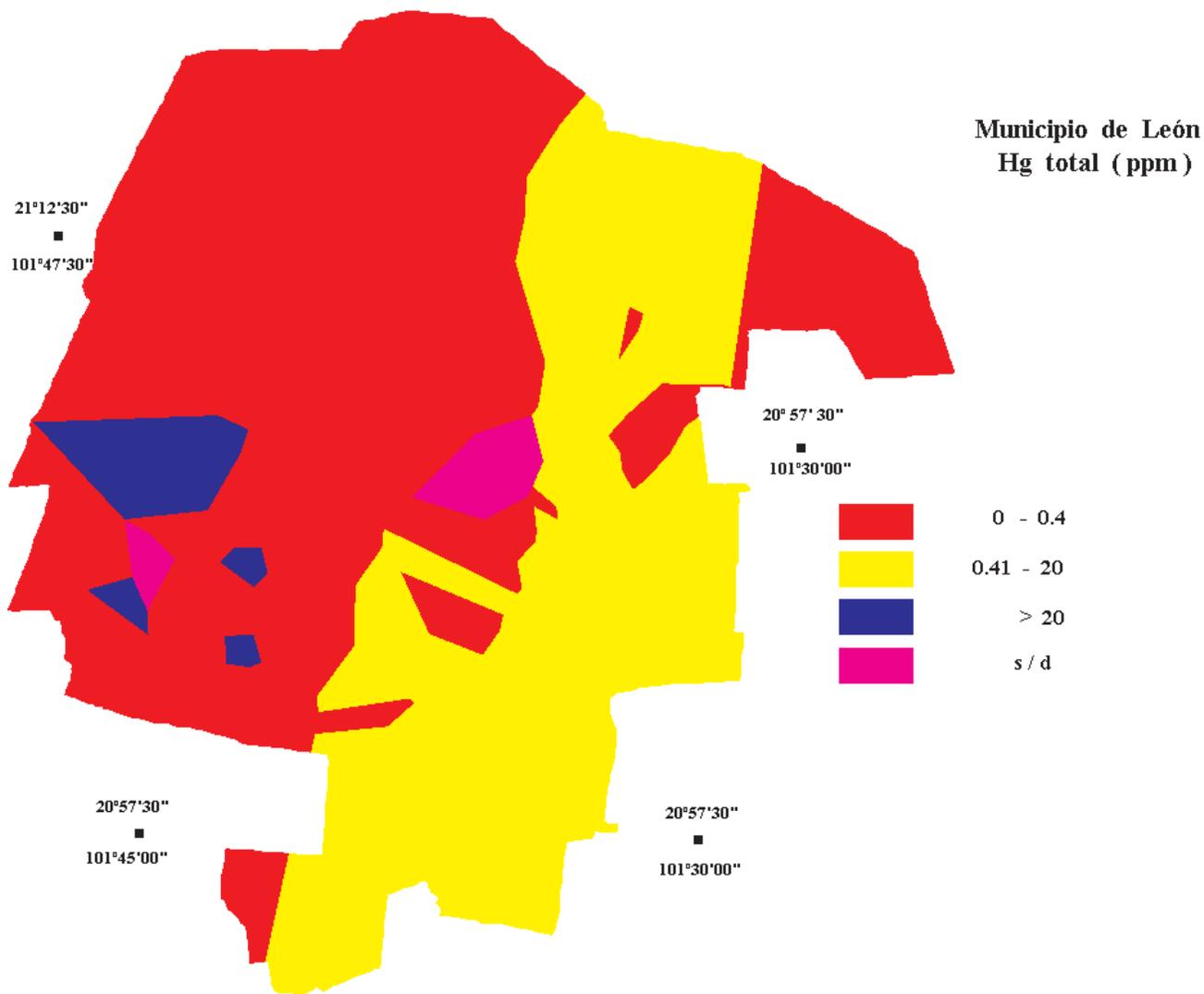


Figura 45. Mapa de dispersión de mercurio en el municipio de León.

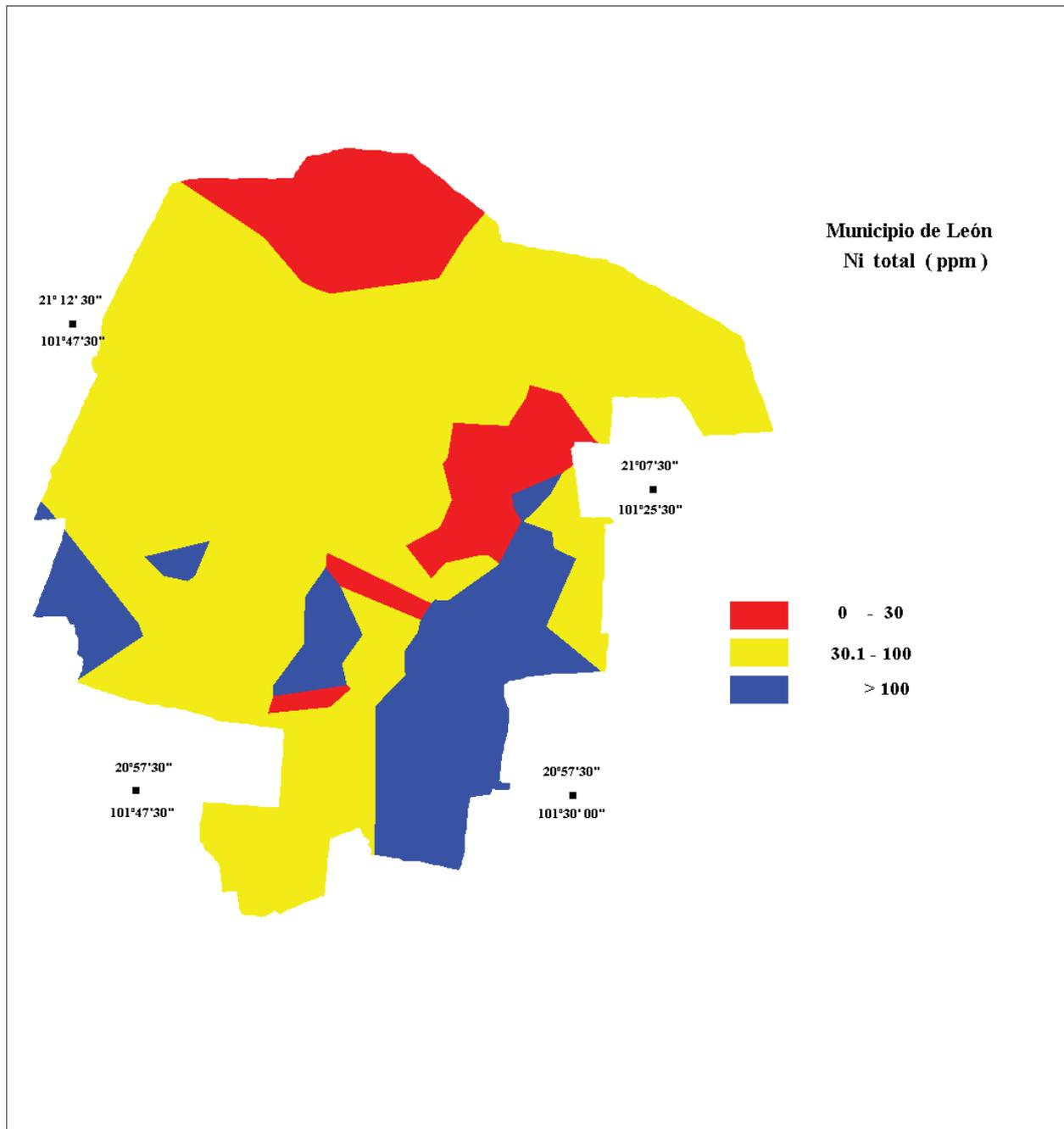


Figura 46. Mapa de dispersión de níquel en el municipio de León.

9. CONCLUSIONES

9.1 GENERALES

1. El análisis de la distribución de los metales pesados en las zonas de estudio, con base en muestreos de suelos y sedimentos, constituye una fuente de invaluable valor en la conformación de la base de datos, de manera que permite estimar, a nivel regional, el estado actual de los elementos pesados en relación al medio ambiente.
2. Los resultados de los estudios de los suelos y sedimentos tanto móviles como estables, conforman una matriz sólida para determinar la distribución y seguimiento de los metales pesados tanto a nivel de subcuenca como de cuenca, así como el impacto que tiene cada subcuenca sobre el río Lerma.
3. Los mapas de distribución, confirman una presencia heterogénea de cada uno de los elementos en cuestión, mostrando al mismo tiempo, áreas marginales, áreas con problemas actuales, así como riesgos potenciales para el medio ambiente debido a actividades antropogénicas actuales y pasadas.
4. En relación a los contenidos de elementos en suelos y sedimentos, los resultados obtenidos en este trabajo dan una idea clara de los procesos de su distribución, planteando al mismo tiempo, bases sólidas para un seguimiento de tendencias de contaminantes en cada cuenca y en su conjunto.
5. Los procesos de retención o almacenamiento de los metales pesados han variado ampliamente a través del tiempo y del espacio debido a que, también, la incorporación de estos elementos han variado considerablemente.
6. Los valores medios obtenidos ofrecen una discriminación invaluable en el comportamiento de los parámetros del medio ambiente, ya que pueden moderar desde un punto de vista objetivo, las condiciones reales del sistema.

9.2 CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO

1. La mayor contribución de metales pesados en aguas de ríos, arroyos y presas, se presenta en la proximidad con minas y áreas de mineralización. El agua de estos lugares tiende a ser ácida por la oxidación de los sulfuros, lo que contribuye a incrementar la solubilidad de algunas especies de metales (Bertine *et al.*, 1979).
2. Los efectos de las actividades mineras se dejan sentir en los contenidos altos de metales pesados en sedimentos y suelos, tal como sucede con el intemperismo del FeA_3 en minas de oro y plata.
3. Los resultados de **As** en suelos y sedimentos sugieren que la dispersión de este elemento está concentrado en primer lugar, en los sedimentos de los arroyos de la sierra, en especial los influenciados por las actividades mineras, con niveles de As por arriba del rango medio mundial (Clase 3). En la región de El Bajío, al norte de Irapuato y en la desembocadura del río Guanajuato con el río Lerma, se localizan dos zonas con Clase 3 (Mapa 5.1), lo que sugiere una movilidad del elemento a través de los sedimentos del río Guanajuato con una influencia moderada hacia el río Lerma.
4. No se detectaron trazas de **Cd** en suelos y sedimentos debido a las concentraciones tan bajas de la cuenca y al método utilizado para su análisis.
5. Con respecto al **Co**, la mayor parte de la cuenca está ubicada dentro de los rangos medios mundiales considerados como normales. Las 2 concentraciones elevadas encontradas en esta cuenca probablemente se asocian a actividades mineras.
6. Los contenidos de **Cu** por arriba de $100.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, fuera de los rangos medios mundiales considerados como normales, se ubican en la terraza de inundación del río Guanajuato y del

- arroyo Yerbabuena, probablemente asociados con actividades mineras. En el sur de la cuenca el contenido alto de Cu se relaciona con las actividades industriales de Irapuato. Probablemente exista un transporte moderado de Cu a través de los sedimentos del río Guanajuato, movimiento que puede llegar hasta el inicio de la presa La Purísima.
7. Las concentraciones altas de **Cr** (Clase 3, 100.0-800.0 mg·kg⁻¹) se relacionan con las actividades mineras en la sierra. También existe una dispersión media a través de los sedimentos del río Guanajuato que se ubica a la altura de Cajones (Mapa 5.5).
 8. En el caso del **Mn**, las concentraciones que se encuentran por arriba del rango medio mundial se restringe a áreas relacionadas con actividades mineras.
 9. La **Clase 2** de **Ni** es la más extendida en la cuenca del río Guanajuato (Figura 10). La dispersión de la Clase 3 está muy restringida, pero con niveles muy superiores al rango medio mundial, como puede verse en el mapa correspondiente (Figura 10).
 10. En cuanto al **Pb**, evidentemente que los jales en primer y, los sedimentos de los arroyos en segundo, están por arriba del promedio medio reportado en otras partes del mundo.
 11. Los resultados del **Zn** en suelos y sedimentos de la cuenca asociados a actividades mineras, sugieren que existe una aportación media de Zn hacia el río Lerma a través de los sedimentos del río Guanajuato
2. Excepto Cu y Ni, los demás metales pesados en los sedimentos de San Juan Otates, se encuentran todavía en el sistema de la red de drenaje así como en los planos de inundación y en las presas, por lo que puede considerarse que no han trascendido a cuencas vecinas.
 3. La distribución del **As** en sedimentos no muestra una relación estrecha con el sistema de drenaje de la cuenca al no existir transporte del elemento a través del movimiento de sus sedimentos. Tampoco existe una diferencia estadística significativa entre los contenidos de As de suelos y de sedimentos de la cuenca. Los contenidos de As en la cuenca de San Juan de Otates se encuentran muy por abajo de los rangos medios reportados para suelos normales a nivel mundial (entre 9 y 85 mg·kg⁻¹ in McBride, 1994) ya que la media de arsénico de toda esta cuenca hidrográfica es de 7.7 ppb.
 4. En la cuenca San Juan de Otates existen áreas con **concentraciones de Cd que van de 3.0 a 5.10 mg·kg⁻¹**. Si se comparan las máximas permisibles de **Cd** en suelos de Estados Unidos, Canadá y la Comunidad Económica que varían de 1.0 a 1.6 mg·kg⁻¹, entonces los niveles encontrados en San Juan de Otates señalan algunas áreas con riesgos de toxicidad (Figura 15).
 5. El promedio de **Co** tanto en suelos como en sedimentos de la cuenca es de 22.8 mg·kg⁻¹; sólo resaltan áreas pequeñas con contenidos por arriba de 50 mg·kg⁻¹ que pueden considerarse superiores a las máximas, según las referencias ya mencionadas (Figura 16).
 6. En relación al **Cu** y, dependiendo de la referencia que se tome, parte de las zonas que se refieren al intervalo de 24.1-100.0 mg·kg⁻¹ en el mapa correspondiente (Figura 17), podría considerarse como de riesgo.
 7. Los rangos para **Cr** propuestos por diferentes autores difieren ampliamente, por lo que resulta difícil compararlos con otras latitudes. De cualquier manera, las regiones descritas anteriormente con

9.3 CUENCA SAN JUAN DE OTATES

1. La fuente inicial y natural de los elementos pesados en los suelos y sedimentos superficiales de la cuenca de San Juan de Otates, la constituyen las rocas ultramáficas y básicas (piroxenita, serpentinita y basalto) enclavadas principalmente en la parte alta de la cuenca.

- niveles superiores a $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, se consideran por arriba de los promedios mundiales, cuya procedencia es geológica y no antropogénica. Por otro lado, existe una dispersión de Cr de nivel bajo hacia la cuenca del río Turbio.
8. No existen problemas con el **Fe**
 9. No existen problemas con el **Mn**
 10. En relación al contenido de **Hg** total puede inferirse que, en la subcuenca San Juan de Otates las concentraciones relativamente más significativas se encuentran con una distribución geográfica dispersa y escasa; no existe una diferencia estadística significativa en los contenidos de mercurio, tanto en suelos como sedimentos. Esta dispersión sugiere que no hay transporte o movimiento superficial del elemento y por lo tanto, se encuentran confinados a los límites de la cuenca.
 11. El análisis de **Ni** de comparaciones múltiples mostró que la subcuenca de San Juan de Otates es diferente a las demás subcuencas, lo que indica una contribución significativa del elemento hacia el resto de la cuenca a través de sistema de drenaje natural y modificado. Aunque la estadística no señala una diferencia significativa entre el contenido de Ni en suelos y sedimentos, el mapa correspondiente de dispersión de Ni, muestra una relación estrecha con el sistema de drenaje, lo que hace pensar que existe un cierto movimiento del Ni, siendo su concentración mayor, en las proximidades de la fuente del elemento y, tendiendo a disminuir de manera errática con la distancia. Como ya se mencionó, el valor del Ni en los sedimentos de la confluencia con el río Silao-Guanajuato es medio, lo que sugiere un posible movimiento y aportación baja de Ni hacia la cuenca vecina.
 12. De acuerdo al mapa de dispersión de **Pb** en la cuenca de San Juan de Otates, existen tres áreas que pueden ser consideradas como conflictivas por sus contenidos arriba de las $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Figura 23).
 13. Para el **Zn**, sólo algunas áreas restringidas y relacionadas con la zona de mineralización en San Juan de Otates sobrepasan los rangos medios mundiales.
- #### 9.4 CUENCA DEL RÍO TURBIO
1. La mayor parte de los metales pesados de origen antropogénico que han entrado al sistema del río Turbio, lo han hecho desde la década de los 50, cuando se inició la industrialización de León, San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos.
 2. Las obras de ingeniería que se han llevado a cabo en la cuenca del río Turbio han modificado sustancialmente los procesos de sedimentación, al controlar parcialmente el destino de los metales pesados en el sistema.
 3. Con la construcción de canales o la transformación del curso de un río, la remoción de los materiales y de los metales pesados se torna más activa; como consecuencia de ello, el área que recibe estos sedimentos ve incrementar sus contenidos de metales pesados. Tal es el caso al noreste de la presa San Germán.
 4. Las concentraciones de metales pesados de origen antropogénico, disminuyen con la distancia de la fuente de emisión al diluirse por el transporte, en mayores volúmenes de sedimentos. Por ejemplo, en el caso de la cuenca del río Turbio, el área más contaminada por Cr la constituye la región comprendida entre el sur de la ciudad de León y el sur de San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos, tendiendo a disminuir la concentración del elemento con la distancia. Después de la población El Toro, los sedimentos tienden a ser una mezcla de materiales introducidos antropogénicamente, con los sedimentos que conservan las características normales derivadas de la geología y mineralogía de la región. Los contenidos altos de Cr en sedimentos al sur de la cuenca son más espaciados (Figura 32).
 5. La dispersión de las mayores concentraciones relativas de **As** (Clase 3) se asocia en primer lugar,

a las zonas de mineralización de la cuenca y a los sedimentos derivados de granitos; en segundo lugar, se dispersan con un patrón geográfico muy irregular en una zona que abarca, desde el sur de León hasta San Roque de Montes, con una influencia probable de origen antropogénico. La Clase 2 con niveles entre 10.0 y 20.0 mg·kg⁻¹ está restringida a áreas pequeñas. En la confluencia de los ríos Turbio y Lerma existe un área pequeña con contenidos medios de As que sugieren una escasa aportación hacia el Lerma (Figura 25).

6. La Clase 3 para **Cd** queda catalogada muy por arriba de los rangos normales mundiales, en especial la zona norte de la cuenca del río Turbio, donde existen minas de Au, Ag, Cu, Pb y Zn, asociadas a ignimbritas, basaltos, complejo vulcano-sedimentarias y granitos (Figura 28).
7. Probablemente el **Co** esté asociado a la geología de la cuenca y a los suelos derivados de estas rocas. Sólo en contados casos, el cobalto se encuentra relacionado con sedimentos del río Turbio y río Lerma, lo que puede llevar a pensar que estas concentraciones son producto de la contaminación.
8. Aparentemente no existe un movimiento de **Cu** hacia el río Lerma, a través de los sedimentos del río Turbio.
9. En cambio, parece que existe transporte de **Cr** en los sedimentos del río Turbio; esta dispersión es geográficamente errática y fluctuante. En general, las concentraciones más significativas de Cr se ubican desde el sur de la ciudad de León hasta lo que es propiamente dicho, el inicio del río Turbio conformado por los ríos Santiago y León. Otro segmento significativo aunque de menor intensidad, se tiene desde el último punto mencionado, hasta El Tecolote.
10. Para que el **Fe** presente problemas reales de contaminación en suelos, éstos deben estar relacionados con salinidad y con contenidos bajos de P, en especial en suelos áridos o tropicales (Johnston y Proctor, 1977). De acuerdo al mapa de Fe (Figura 35) el movimiento de este elemento a través de los sedimentos del río Turbio es de baja intensidad; esto es, la Clase 2 (2.51-5.0%) está muy ligada a la trayectoria del río Turbio. La Clase 3 se asocia al complejo vulcano-sedimentario de la sierra de Guanajuato, así como a los sedimentos del río Lerma. Por último, la Clase 4 se asocia a los basaltos de los Altos de Jalisco.
11. **Mn**; no presenta problemas, en realidad no es considerado por muchos autores como contaminante de suelos.
12. Las regiones clasificadas como Clase 2 y 3 para **Hg** se encuentran por arriba de los niveles medios mundiales. Las concentraciones más relevantes están confinadas al sur de la ciudad de León, a las márgenes de la confluencia de los ríos Turbio y Lerma y a los sedimentos y terrazas aluviales del Lerma. Se sugiere un estudio más detallado para determinar su comportamiento (Figura 38).
13. Las concentraciones de **Ni** en la Clase 3 que se ubican al sur de la sierra Cuatralba, exceden de los niveles normales. En tanto que el resto de la cuenca no presenta riesgos de acumulación. La Clase 2 (de 30.1 a 100.0 mg·kg⁻¹) sólo muestra un patrón de distribución irregular y muy disperso asociado con los sedimentos del río Turbio.
14. Existe sólo una área de dispersión de **Pb** con Clase 3 a nivel significativo en la cuenca del río Turbio y que se ubica alrededor de Todos Santos. También aunque a un nivel más bajo, en Guadalupe perteneciente a los Altos de Jalisco al oeste de Purísima de Bustos. Otra zona de dispersión pero de más baja intensidad asociada con los sedimentos del río Turbio, es el lugar conocido como Las Adjuntas.
15. En relación al **Zn**, una buena parte de la Clase 3 (300.1-3100.0 mg·kg⁻¹) cae como suelo catalogado por arriba de las normas internacionales consideradas como no aceptables. En tanto que la Clase 2 se confina básicamente a la zona de San José del Potrero, presa El Salto y El Saúco así como los alrededores de Estación San Joaquín.

9.5 MUNICIPIO DE LEÓN

1. Existe una escasa aportación natural de *As* desde una pequeña parte al norte de la cuenca de San Juan de Otates hacia el Turbio a través de los arroyos El Salto y Puerto Colorado que se unen con el arroyo La Tinaja que llega a los límites de la ciudad de León. El arsénico encontrado en San Juan de Otates es de origen geológico.
 2. Los altos contenidos de *Cr* en suelos y sedimentos de San Juan de Otates son también de origen geológico. Existe un transporte con baja concentración de cromo hacia la cuenca del río Turbio a través de los sedimentos móviles del drenaje de San Juan de Otates. En el caso de la cuenca del río Turbio, la inmensa mayoría del *Cr* es de origen antropogénico.
 3. Las concentraciones de *Hg* en los suelos y sedimentos de la cuenca San Juan de Otates, expresadas en $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, son motivo para que no presenten ningún riesgo en la parte este y sur del municipio de León. No así al sur de la ciudad que, aunque restringida, si se presentan áreas que representan riesgos ambientales de origen antropogénico.
 4. En la parte correspondiente a la cuenca de San Juan de Otates del municipio de León, el *Ni* presenta un patrón de dispersión parecido al del *Cr* con contenidos altos del elemento. Su origen es geológico, aunque su distribución no tiene influencia hacia el río Turbio. En el caso de la cuenca del Turbio los contenidos medios de níquel en suelos y sedimentos, probablemente sean una mezcla de origen natural y antropogénico.
-

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aller, A.J., y Bernal, J.L., 1986, Elementos traza esenciales para las plantas: Ing. Téc. Eco. Agraria (España), v. 63, p. 27–44.
- Aller, A.J.; Bernal, J.L.; y Nozal, M., 1989, Geoquímica de elementos traza: España, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, p. 5–28.
- Alloway, B.J., 1990, Cadmium, in Alloway, B.J., ed., Heavy metals in soils: Londres, Wiley, p. 100–121.
- Antúñez-Echegaray, Francisco, 1964, Monografía histórica y minera sobre el distrito de Guanajuato: Consejo de Recursos Naturales no Renovables (México), Publicación 17E, 588 p.
- Aubert, Huguet, y Pinta, Maurice, 1977, Trace elements in soils: Amsterdam, Elsevier, 395 p.
- Barghigiani, C.; Gioffré, D.; y Bargali, R., 1987, Mercury content in *Pinus* sp. of the Mt. Etna volcanic area, in Lindberg, S.E., y Hutchinson, T.C., eds., Heavy metals in the environment, v. 2: Edinburg, CEP Consult., p. 51.
- Berrow, M.L., y Reaves, G.A., 1986, Total chromium and nickel of Scottish soils: Geoderma, v. 37, p. 15–17.
- Berth, D.; Berlin, A.; Engel, R.; Recht, P.; y Smeets, J., 1973, Environmental health aspects of lead: Proceedings of the International Symposium, C.E.C. Luxemburg.
- Bertine, K.K.; Walawender, S.J.; y Koide, M., 1979, Chronological strategies and metal fluxes in semi-arid lake sediments: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 42, núm. 10, p. 1559–1571.
- Blaszczynki, J., 1992, Regional soil loss prediction utilizing the RUSLE/GIS interface, in Johnson, A.I.; Petterson, C.B.; y Fulton, J.L., eds., Geographic information system (GIS) and mapping: Filadelfia, Pa., American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 1126.
- Bloomfield, C., y Pruden, G., 1980, The behavior of Cr(VI) in soils under aerobic and anaerobic conditions: Environmental Pollution, v. 23, p. 97–103.
- Bohn, H.L.; McNeal, B.L.; y O'Connor, G.A., 1985, Soil chemistry, 2.ª edición: Nueva York, Wiley, 341 p.
- Bolter, Ernst; Hemphill, D.D.; Wixson, B.; Butherus, D.; y Chen, R., 1972, Geochemical and vegetative studies of trace substances from lead smelting, in Hemphill, D.D., ed., Trace Substances in Environmental Health, núm. 5: Columbia, MO, University of Missouri.
- Bowen, H.J., 1979, Environmental chemistry of the elements: Londres, Academic Press, p. 234–245.
- British Geological Survey-CNA-SEPAL-UACH, 1995, Effects of wastewater reuse on urban groundwater resources, León, Mexico: Londres, British Geological Survey Technical Report WD/95, Final report (inédito).
- Brooks, R.R., 1987, Serpentine and its vegetation—a multidisciplinary approach: Londres, Croom-Helm, 454 p.
- Brown, H.J., 1969, Metal chelation in soils: Soil Science Society of America Proceedings, v. 33, p. 55–61.
- CETENAL, 1973a, [Hoja] Irapuato (F14 C-62), Guanajuato: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Comisión de Estudios del Territorio Nacional (actualmente Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), Carta geológica, escala 1:50,000.
- 1973b, [Hoja] Silao (F14 C-52), Guanajuato: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Comisión de Estudios del Territorio Nacional (actualmente Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), Carta geológica, escala 1:50,000.
- 1975, [Hoja] San Roque de Torres (F14 C-51), Guanajuato: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Comisión de Estudios del Territorio Nacional (actualmente Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), Carta geológica, escala 1:50,000.
- Cheshire, V., y Berrow, M.L., 1977, Metal distribution and nature of Cu, Mn and complexes in humic and fulvic acid fractions of soils organic matter: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 41, p. 1131–1139.
- Comisión Nacional de Ecología, 1988, Informe general de ecología: México, D.F., Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 195 p.
- CNA, 1991, Técnicas para el control de la erosión: Comisión Nacional del Agua, Consejo Lerma-Chapala, v. 1, núm. 6, 48 p.
- Czarnowska, K., y Gworek, B., 1987, Heavy metals in some soils of the central and northern regions of Poland: Roczn. Glebozn., v. 5, p. 41.
- Davies, B.E., 1976, Mercury content of soils in western Britain with special reference to contamination from base metal mining: Geoderma, v. 16, p. 183–192.
- 1977, Heavy metal pollution of British agricultural soils with special reference to the role of lead and copper mining: Seminar on soil environment and fertility management in intensive agriculture, Japón, p. 190–197.
- 1980, Base metal mining and heavy metal contamination of agricultural land in England and Wales: Londres, Inorganic Pollution and Agriculture MAFF Reference Book 326, HMSO, p. 142–156.
- 1983, A graphical estimation of the normal lead content of some British soils: Geoderma, v. 29, p. 67–75.
- 1990, Lead, in Alloway, B.J., ed., Heavy metals in soils: Londres, Wiley, p. 177–196.
- Dávila-Alcocer, V.M., y Martínez-Reyes, Juventino, 1987, Una edad cretácica para las rocas basales de la sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre la geología de la sierra de Guanajuato, Resúmenes, p. 19–20.
- de Groot, A.; Zsuppe, K.; y Salomons, W., 1982, Standardization of methods of analysis for heavy metals in sediments: Hydrobiologia, v. 92, p. 689–695.
- Dekock, R.C., 1981, Iron nutrition under conditions of stress: Journal Plant Nutr., v. 3, p. 513–524.
- DeRoo, A.P.J.; Hazelhoff, L.; y Burrough, P.A., 1989, Soil erosion modeling using answers and geographical information systems: Earth Surface Processes and Landforms, v. 14, p. 517–532.
- DETENAL, 1978, Cartas de suelos, hojas F14-C43, F14-C53 y F14-C62, escala 1:50,000.
- Dudas, M.J., y Pawluk, S., 1977, Heavy metals in cultivated soils and cereal crops in Alberta: Canadian Journal of Soil Science, v. 57, 329 p.

- Edwards, D.J., 1955, Studies of some early Tertiary red conglomerates of Central Mexico: U.S. Geological Survey Professional Paper 264-H, p. 153–185.
- Elfving, D.C.; Hasschek, W.M.; Stehn, R.A.; Bache, C.A.; y Lisk, D.J., 1978, Heavy metals residues in plants cultivated on old orchard soils and in small mammals indigenous: Archives of Environmental Health, núms. 3–4, 95 p.
- Erdman, J.A.; Shacklette, H.T.; y Keith, J.R., 1976, Elemental composition of selected native plants and associated soils from major vegetation-type areas in Missouri: U.S. Geological Survey Professional Paper 954-C, 87 p.
- FAO, 1990, Mapa mundial de suelos con leyenda revisada: Roma, Food and Agricultural Organization of the United Nations, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; International Soil Reference and Information Centre, 142 p.
- Feltz, H., 1980, Significance of bottom material data in evaluating water quality, in Baker, R., ed., Contaminants and sediments, v. 1: Ann Arbor, Mich., Ann Arbor Science Publishers, p. 271–287.
- Fergusson, E.J., 1989, The heavy metals—chemistry, environmental impact and health effects: Nueva York, Pergamon Press, 620 p.
- Finney, E.E., y Pearce, K.K., 1986, Land contamination and reclamation, in Hester, R.E., ed., Understanding our environment: Londres, Royal Society of Chemistry, p. 329–337.
- Fleming, G.A., y Ryan, P., 1964, Transaction Congr. Soil Science, 8, IV, p. 297–308.
- Fleming, G.H.; Walsh, T.; y Ryan, P., 1968, Some factors influencing the contents and profile distribution of trace elements in Irish soils: Australia, Oric. 9th Int. Congr. Soil Sci., p. 178–182.
- Förstner, Ulrich, 1982, Chemical forms of metal enrichment in recent sediments, in Amstutz, G., ed., Ore genesis: Nueva York, Springer-Verlag, p. 191–199.
- Förstner, Ulrich, y Wittmann, G.T.W., 1979, Metal pollution in the aquatic environment: Nueva York, Springer-Verlag, 486 p.
- Förstner, Ulrich; Wittmann, G.T.W.; Prosi, F.; van Lierde, J.H.; y Goldberg, E.D., 1981, Metal pollution in the aquatic environment, 2ª edición: Nueva York, Springer-Verlag, 496 p.
- Foy, C.D.; Chaney, R.L.; y White, M.C., 1978, The physiology of metal toxicity in plants: Annual Review of Physiology, v. 29, 511 p.
- Frank, R.; Ishida, K.; y Suda, P., 1976, Metals in agricultural soils of Ontario: Canadian Journal of Soil Science, v. 56, p. 181–196.
- Frissel, M.J.; Poelstra, P.; Ryan, P.; y van der Klugt, N., 1974, The contamination of Dutch soils with mercury and a few other heavy metals: Geologie en Mijnbouw, v. 53, p. 163–170.
- García, Enriqueta, 1981, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: México, D.F., Offset Larios, 251 p.
- García-Arizaga, M.T.L., 1992, Mapas topográficos representativos de la geomorfología de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis profesional Licenciado en Geografía, 82 p. (inérita).
- Garnett, K.; Kirk, P.W.; y Lesater, J.N., 1987, Assessment of the interactions of metals and nitroacetic acid in soil/sludge mixtures: Water, Air and Soil Pollution, v. 34, núm. 14, p. 55–69.
- Gough, L.P.; Shacklette, H.T.; y Case, A.A., 1979, Element concentrations toxic to plants, animals, and man: U.S. Geological Survey Bulletin 1466, 80 p.
- Gibbs, R.J., 1973, Mechanisms of trace metal transport in rivers: Science, v. 180, p. 71–73.
- 1977, Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon rivers: Geological Society of America Bulletin, v. 88, p. 829–843.
- Gilkes, R.J., y McKenzie, R.M., 1988, Geochemistry of manganese in soil, in Graham, R.D.; Hannam, R.J.; y Uren, N.C., eds., Manganese in soils and plants: Dordrecht, Holanda, Kluwer Academic Publishers, p. 23–35.
- Goldschmidt, V.M., 1937, The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks: Chemical Society Journal (Londres), part 1, p. 655–673.
- Graf, W.L., 1994, Plutonium and the Rio Grande—environmental change and contamination in the nuclear age: Londres, Oxford University Press, 329 p.
- Graf, W.L.; Clark, M.T.; Lehman, T.; Randall, K.; Tempe, R.; y Schroeder, A., 1991, Geomorphology of heavy metals in sediments of Queen Creek, Arizona, USA: CATENA, v. 18, p. 567–582.
- Green, Jack, 1959, Geochemical table of the elements for 1959: Geological Society of America Bulletin, v. 70, p. 1127–1184.
- Grove, J.H., y Willis, B.G., 1980, Extractable chromium as related to soil pH and applied chromium: Soil Science Society of America Journal, v. 44, p. 238–243.
- Hakanson, T.E.; Watters, R.L.; y Hanson, W.C., 1981, The transport of plutonium in terrestrial ecosystems: Health Physics, v. 40, p. 63–69.
- Halliday, S.L., y Wolfe, M.L., 1991, Assessing groundwater pollution potential from nitrogen fertilizer using a geographic information system: Water Resources Bulletin, núm. 2, v. 27, p. 237–245.
- Hammock, J.K., y Lorenz, R., 1992, Using a GIS to manage data from a groundwater remediation program, in Johnson, A.I.; Petterson, C.B.; y Fulton, J.L., eds., GIS and mapping—practices and standards: Filadelfia, Pa., American Society for Testing and Materials, p. 247–250.
- Heenan, D.P., y Campbell, L.C., 1980, Transport and distribution of manganese in two cultivars of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.): Australian Journal of Agricultural Research, v. 31, p. 943–949.
- Hernández-Laloth, Noel, 1991, Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero del valle de León, Guanajuato: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional Ingeniero Geólogo, 129 p. (inérita).
- Hernández-Silva, Gilberto; Flores-Delgadillo, Lourdes; Solorio-Munigua, Gregorio, y Aranda-Gómez, J.J., 1990a, Estudio pedogenético de los suelos en función de algunas unidades litoestratigráficas de la sierra de Guanajuato: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Contribuciones a la Edafología Mexicana 1990, p. 25–48.

- Hernández-Silva, Gilberto; Cram-Heydrich, Silke; Noguez-Gálvez, A.M.; Guajardo-Viera, Rubén, y Sommer-Cervantes, Irene, 1990b, Evaluación de la aptitud de los suelos para tres de los principales cultivos del municipio de Salamanca, Guanajuato, México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Contribuciones a la Edafología Mexicana 1990, p. 119–138.
- Hernández-Silva, Gilberto; Solorio-Munguía, Gregorio; Vassallo-Morales, L.F.; Flores-Delgadillo, Lourdes; Maples-Vermeersch, Mireya; Hernández-Santiago, D.; y Alcalá-Martínez, René, 1997, Distribución de Ni y Cr en suelos y sedimentos superficiales derivados de rocas del basamento de una parte de la sierra de Guanajuato: Actas INAGEQ (Instituto Nacional de Geoquímica), v. 3, p. 173–186.
- Hession, C.W., y Shanholtz, V.O., 1988, A geographic information system for targeting nonpoint source agricultural pollution: Journal of Soil and Water Conservation, v. 43, p. 264–266.
- Hirst, D.M., 1962, The geochemistry of modern sediments from the Gulf of Paria; [Part] 2, The location and distribution of trace elements: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 26, p. 1147–1187.
- Horowitz, A.J., 1974, The geochemistry of sediments from the northern Reykjanes Ridge and the Iceland-Faeroes Ridge: Marine Geology, v. 17, p. 103–122.
- 1985, A primer on trace metal-sediment chemistry: U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2277, 67 p.
- Huang, P.M., 1975, Retention of arsenic by hydroxy-aluminium on surface of micaceous mineral colloids: Soil Science Society Am. Proc., v. 39, p. 271.
- IMPLAN, 1997, Plan estratégico urbanístico municipal; medio físico natural del municipio: León, Gto., Presidencia Municipal de León, 32 p.
- Izaguirre-Mendoza, M., y Domínguez-Corona, E., 1987, Mesoclimas de cada municipio del estado de Guanajuato: Guanajuato, Universidad de Guanajuato, 124 p.
- Jenkins, D.A., y Jones, G.W., 1980, Trace elements in rocks, soils, plants and animals—introduction, in Davies, B.E., ed., Applied soil trace elements: Nueva York, Wiley, p. 1–20.
- Jenne, E., 1976, Trace element sorption by sediments and soils—sites and processes, in Chappell, W., y Peterson, K., eds., Symposium of molybdenum, v. 2: Nueva York, Marcel-Dekker, p. 425–553.
- Johansson, K.; Lindqvist, O.; y Timm, B., 1988, Mercury—occurrence and turnover of mercury in the environment: Progress Report 4E, SNV, Solna.
- John, M.K., 1971, Lead contamination of some agricultural soils in western Canada: Environmental Science and Technology, v. 5, núm. 12, p. 1199–1203.
- Johnston, W.R., y Proctor, J., 1977, Metal concentrations in plants and soils from two British serpentine sites: Plant and Soils, v. 46, p. 275–278.
- Jones, K.C.; Symon, C.J.; y Johnston, A.E., 1987, Long-term changes in soils and cereal grain cadmium; studies at Rothamsted Experimental Station, in Hemphill, D.D., ed., Trace Substances in Environmental Health, núm. 21: Columbia, MO, University of Missouri, 450 p.
- Juste, C., y Mench, M., 1992, Biogeochemistry of trace elements, in Adriano, D.C., ed., Advances in trace substances research: Boca Raton, Florida, Lewis, 159–193 p.
- Kabata-Pendias, Alina, 1981, Heavy metal concentrations in arable soils of Poland: Pamiet Pulawy, 74, 101
- Kabata-Pendias, Alina, y Adriano, D.C., 1995, Trace metals, in Recheigl, J.E., ed., Soil amendments and environmental quality: Boca Raton, FL, CRC Press, p. 139–167.
- Kabata-Pendias, Alina, y Pendias, Henryk, 1992, Trace elements in soils and plants: Boca Raton, FL, CRC Press, 365 p.
- Kabata-Pendias, Alina, y Piotrowska, Maria, 1971, Total contents of trace elements in soils of Poland: Materialy IUNG Pulawy, Poland 8s. 7.
- Koeppel, D.E., 1981, Lead—understanding of the minimal toxicity of lead in plants, in Lepp, N.W., ed., Effects of heavy metal pollution on plants; v. 1, Effects of trace metals on plant function: N.J., Applied Science Publishers, p. 55–76.
- Kononova, M.M., 1966, Soil organic matter, 2.^a ed.: Nueva York, Pergamon Press, 404 p.
- Korte, N.E.; Kopp, J.S.; Niebla, E.E.; y Fuller, W.H., 1975, A base line study on trace-metal elution from diverse soil types: Water, Air and Soil Pollution, v. 5, p. 149–156.
- Kovda, V.A., 1974, Biosphere, soils and their utilization: URSS Academy of Sciences, Soil Science International Congress, 10, Moscú, Proceedings.
- Krauskopf, K.B., 1972, Geochemistry of micronutrients, in: Mortvedt, J.J.; Giordano, P.M.; y Lindsay, W.L., eds., Micronutrients in agriculture: Madison, WI, Soil Science Society of America, p. 7–40.
- Kubota, J., 1968, Distribution of cobalt deficiency in grazing animals in relation to soils and forage plants of United States: Soil Science, v. 106, p. 122–130.
- Lagerwerff, J.V.; Brower, D.L.; y Biersdorf, G.T., 1973, Accumulation of cadmium, copper, lead and zinc in soil and vegetation in the proximity of a smelter, in Hemphill, D.D., ed., Trace Substances in Environmental Health, núm. 6: Columbia, MO, University of Missouri, p. 71–78.
- Lapierre, H.; Ortiz, E.; Abouchami, W.; Monod, O.; Coulon, C., y Zimmermann, J. OL., 1992, A crustal section of an intra-oceanic island arc—The Late Jurassic-Early Cretaceous Guanajuato magmatic sequence, Central Mexico: Earth and Planetary Science Letters, v. 108, p. 61–77.
- Larsen, S., y Widdowson, A.E., 1971, Soil fluorine: Journal of Soil Science, v. 22, p. 210–221.
- Lawton, K., 1955, Chemical composition of soils, in Bear, F.E., Chemistry of the soil: Nueva York, Reinhold, p. 53–84.
- Lindsay, W.L., 1979, Chemical equilibria in soils: Nueva York, Wiley, 449 p.
- Linn, C.H., y Jackson, M.L., 1982, Dissolution for total elemental analysis: Agronomy No. 9; 7S.S.S.A. p. 1–11.
- Lewin, J.R.; Cryer, R.; y Harrison, D.I., 1974, Sources for sediments and solutes in mid-Wales, in Fluvial Processes in Instrumental Watersheds: I.B.G. Special Publication 6, p. 73–85.
- López-Ramos, Ernesto, 1979, Geología de México: México, D.F., 2.^a ed., 3 v.
- Martínez-Reyes, Juventino, 1992, Mapa geológico de la sierra de Guanajuato, con resumen de la geología de la sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras 8, escala 1:100,000.
- McBride, M.B., 1994, Environmental chemistry of soils: Londres, Oxford University Press, 406 p.

- McLean, K.S.; Robinson, A.R.; y McConnell, H., 1987, The effect of sewage-sludge on the heavy metal content of soils and plant tissue: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 18, núm. 11, p. 1303-1316.
- McGrath, S.P., y Smith, S., 1990, Chromium and nickel, *in* Alloway, B.J., ed., *Heavy metals in soils*: Nueva York, Wiley, p. 125-150.
- Medina-Ruvalcaba, F.J., 1982, Estudio geológico-minero regional del área La Virgen-Manzanilla, municipio de León, Gto.: Universidad de Guanajuato, tesis profesional, 107 p. (inérita).
- Miller, W.P.; McFee, W.W.; y Kelly, J.M., 1983, Mobility and retention of heavy metals in sandy soils: *Journal of Environmental Quality*, v. 12, núm. 14, p. 579-584.
- Mitchell, R.L., 1964, Trace elements in soils, *in* Bear, F.E., ed., *Chemistry of the soil*: Nueva York, Van Nostrand Reinhold, p. 320-368.
- Müller, W.H.; Schwaighfer, B.; Santschi, P.H., and Bianchi, T.S., 1992, Heavy metal contents in river sediments: *Water, Air and Soil Pollution*, v. 72, p. 191-203.
- Monod, O.; Lapierre, H.; Chiodi, M.; Martínez, J.; Calvet, P.; Ortiz, E.; y Zimmermann, J.L., 1990, Reconstitution d'un arc insulaire intraocéanique au Mexique Central; la séquence volcano-plutonique de Guanajuato (Crétacé Inférieur): *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 310, p. 45-51.
- Mortvedt, J.J., 1983, Micronutrientes en la agricultura: México, Giordano, 742 p.
- Nair, K.P., y Cottenie, A., 1971, A statistical evaluation of the inter-relationships between particle-size fractions, free iron oxide, and trace elements: *Journal of Soil Science*, v. 22, p. 203-209.
- Narwal, R.P.; Singh, B.R.; y Panhwar, A.R., 1983, Plant availability of heavy metals in a sludge-treated soil—effect of sewage sludge and soil pH on the yield and chemical composition of rape: *Journal of Environmental Quality*, v. 12, núm. 3, p. 358-365.
- Nieto-Samaniego, A.F.; Macías-Romo, Consuelo; y Alaniz-Álvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 13, núm. 1, p. 117-122.
- Norrish, K., 1975, The geochemistry and mineralogy of trace elements, *in* Nicholas, D.J., y Egan, A.R., eds., *Trace elements in soil-plant-animal system*: Nueva York, Academic Press, p. 55-82.
- Nriagu, J.O., ed., 1978, *The biogeochemistry of lead in the environment*: Amsterdam, Elsevier, 237 p.
- 1980, *Nickel in the environment*: Nueva York, Wiley, 833 p.
- Nriagu, J., y Cooker, R., 1980, Trace metals in humic and fulvic acids from Lake Ontario sediments: *Environmental Science and Technology*, v. 14, p. 443-446.
- Nriagu, J.O., y Nieboer, E., eds., 1988, *Chromium in the natural and human environments*: Nueva York, Wiley, 571 p.
- Ortiz-Hernández, L.E., y Martínez-Reyes, Juventino, 1993, Geological structure, petrological and geochemical constraints for the central most segment of the Guerrero terrane (sierra de Guanajuato, Central Mexico): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference, Guidebook of Field Trip C, p. 1-25.
- Page, A.L.; Chang, A.C.; y Adriano, D.C., 1988, Land application of municipal sewage sludge: Guidelines—trace elements, *in* Kumazawa, K., ed., *Proceedings of Second International Symposium on Land Application of Sewage Sludge (ISOLASS)*: Tokio, Association for Utilization of Sewage Sludge, p. 154-182.
- Purves, D., 1977, *Trace element contamination of the environment*: Amsterdam, Elsevier, 260 p.
- Ramanathan, A.L.; Subramanian, V.; y Das, B.K., 1996, Sediment and heavy metal accumulation in the Cauvery basin: *Environmental Geology*, v. 27, p. 155-163.
- Ramos, R.E., 1991, Reconstrucción mineralógica de jales de Guanajuato y el estudio sobre el seguimiento de las especies químicas contenidas en sus componentes metálicos: Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Facultad de Ciencias Químicas, tesis de maestría, 135 p. (inérita).
- Răută, C.; Cârstea, S.; Milhăilescu, A.; y Lacatusu, R., 1985, Some aspects of pedochemical and biogeochemical research in Romania, *in* Thornton, I., ed., *Proceedings 1st International Symposium on Geochemistry and Health*: Londres, Imperial College, 236 p.
- Ragaini, R.C.; Ralston, H.R.; y Roberts, N., 1977, Environmental trace metal contamination in Kellogg, Idaho near a lead smelting complex: *Environmental Science and Technology*, v. 11, p. 773-781.
- Ribaud, M.O., 1992, Options for agricultural nonpoint source pollution control: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 47, p. 42-46.
- Ridgway, J.; Fligh, D.; Martiny, Barbara; Gómez-Caballero, J.A.; Macías-Romo, Consuelo; y Grealley, K., 1994, Overbank sediments in contamination assessment and regional geochemistry mapping: BGT Technical report WC794/4: Overseas Geology Series, 48 p.
- Rodríguez, R.; Armienta, M.A.; Villanueva, S.; Díaz, P.; y González, T., 1991, Estudio hidrogeoquímico y modulación matemática del acuífero del río Turbio, Gto.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Contrato SARH CC-88-306 D, Informe interno, 167 p. (inérito).
- Soltanpour, P.N., 1985, Use of ammonium bicarbonate-DTPA soil test to evaluate elemental availability and toxicity: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 16, núm. 3, p. 323-338.
- Sapek, A., 1971, The role of the humus substances in podzol soil development: *Studia Societas Scientiarum Torunensis (Polonia)*, v. 7, I.
- Sarukhán, José, y Maas, J.M., 1990, El sistema de cuencas hidrológicas, *in* Enrique Leff, ed., *Medio ambiente y desarrollo en México*: CIIH-UNAM, p. 81-114.
- Schalscha, E.B.; Morales, M.; y Pratt, P.F., 1987, Lead and molybdenum in soils and forage near an atmospheric source: *Journal of Environmental Quality*, v. 16, núm. 4, p. 313-315.
- Schnitzer, M., y Khan, S.U., 1978, *Soil organic matter*: Amsterdam, Elsevier, p. 147-156.

- Schroeder, D.C., y Lee, G.F., 1975, Potential transformation of chromium in natural water: *Water, Air and Soil Pollution*, v. 4, p. 355–365.
- Shacklette, H.T., y Boerngen, J.G., 1984, Element concentrations in soils and other surficial material of the conterminous United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1270, 106 p.
- Sheppard, M., y Thibault, D.H., 1991, A four year mobility study selected trace elements and heavy metal: *Journal of Environmental Quality*, v. 20, p. 101–114.
- Singh, B.R., y Narwal, R.P., 1984, Plant availability of heavy metals in sludge treated soil. II, Metal extractability compared with plant metal uptake: *Journal of Environmental Quality*, v. 13, núm. 3, p. 344–349.
- Smith, K.A., 1990, Manganese and cobalt, in Alloway, B.J., ed., *Heavy metals in soils*: Londres, Wiley, p. 197–221.
- Smith, D.G., 1985, Sources of heavy metal input to the New Zealand aquatic environment: *Journal of the Royal Society of New Zealand*, v. 15, núm. 4, p. 371–384.
- Soon, Y.K., y Bates, T.E., 1982, Chemical pools of Cd, Ni, and Zn polluted soils and some preliminary indications of their availability to plants: *Journal of Soil Science*, v. 33, p. 477–488.
- SPP, 1980, Síntesis geográfica del estado de Guanajuato: México, Secretaría de Programación y Presupuesto, 198 p.
- Stein, G.; Lapiere, H.; Monod, O.; Zimmermann, J.L.; y Vidal, R., 1993, Petrology of some Mexican Mesozoic plutons; sources and tectonic environments: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 7, núm. 1, p. 1–7.
- Temple, P.J.; Linzon, S.N.; y Chai, B.L., 1977, Contamination of vegetation and soils by arsenic emissions from secondary lead smelters: *Environmental Pollution*, v. 12, p. 311.
- Terrones, R.R., y Mejía, A.C., 1989, Estratificación agroclimática del estado de Guanajuato: *TERRA*, v. 7, núm. 1, p. 40–49.
- Thorne, L., y Nickless, G., 1981, The relation between heavy metals and particle size fractions: *Total Environment*, v. 19, p. 207–213.
- Thornton, I., y Webb, J.S., 1975, Trace elements in soils and surface waters contaminated by past metalliferous mining in parts of England, in Hemphill, D.D., ed., *Trace Substances in Environmental Health*, núm. 9: Columbia, MO, University of Missouri, p. 77–85.
- Thornton, I., y Webb, J.S., 1980, Regional distribution of trace element problems in Great Britain, in Davies, B.E., ed., *Applied soil trace element*: Londres, Wiley, p. 382–439.
- Tim, U.S., y Jolly, R., 1994, Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic systems and hydrologic/water quality model: *Journal of Environmental Quality*, v. 23, p. 25–35.
- Ure, A.M., y Berrow, M.L., 1982, The elemental constituents of soils, in Bowen, H.J.M., ed., *Environmental chemistry*: Londres, Royal Society of Chemistry, v. 2, p. 94–204.
- Valdares, J.M.A.S.; Gal, M.; Mingelgrin, Uri., y Page A.L., 1983, Some heavy metals in soils treated with sewage sludge, their effects on yield and their uptake by plants: *Journal of Environmental Quality*, v. 12, núm. 1, p. 49–57.
- van Faassen, G.H., 1973, Effects of mercury compounds on soil microbes: *Plant Soil*, v. 38, p. 485.
- Vassallo-Morales, L.F., y Martínez-Reyes, Juventino, 1988, Metamorfismo de contacto en la porción sudoriental del batolito granítico de la sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre Geología Regional de México, 3, p. 78–80.
- Ward, N.I.; Brooks, R.R.; y Reeves, R.D., 1974, Effect of lead from motor-vehicle exhausts on trees along a major thoroughfare in Palmerston North, New Zealand: *Environmental Pollution*, v. 6, p. 149–158.
- Warren, H.V., y Delavault, R.E., 1960, Observations of the biogeochemistry of lead in Canada: *Trans. Roy. Soc. Canada*, v. 54, p. 11–20.
- Wedepohl, K.H., ed., 1969, *Handbook of Geochemistry*, v. 1: Berlín, Springer Verlag, 442 p.
- Whitton, J.S., y Wells, N., 1974, A pedochemical survey; 2, Zinc: *New Zealand Journal of Science*, v. 17, núm. 3, p. 351–367.
- Williams, C.H., y David, D.J., 1976, The accumulation in soils of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants: *Soil Science*, v. 121, p. 86.
- Wixson, B.G., y Jennett, J.C., 1975, The New Lead Belt in the forested Ozarks of Missouri: *Environmental Science and Technology*, v. 9, p. 1128–1133.
- Young, R.A.; Onstad, C.A.; Bosch, D.D.; y Anderson, W.P., 1989, AGNPS, a nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 44, p. 168–173.
- Zaragoza, L.M., 1978, Análisis agropecuario del estado de Guanajuato, v. 2: México, D.F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 142 p.
- Zhang, H.; Haan, C.T.; y Nofziger, D.L., 1990, Hydrologic modeling with GIS—an overview: *Applied Engineering in Agriculture*, v. 6, p. 453–458.