



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“ESTUDIO GEOLÓGICO AMBIENTAL DEL CROMO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA GEÓLOGA

P R E S E N T A:

VARELA GONZÁLEZ GRICELDA GABRIELA



DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS

Noviembre, 2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mis padres, por su amor  
Y a mis hermanos, Rafa y Chayo,  
mis compañeros eternos*

*“Si yo hablase lenguas humanas y angélicas  
y no tengo amor, vengo a ser como metal que  
resuena, o címbalo que retiñe, y si tuviese  
profecía, y entendiese todos los misterios  
y toda la ciencia y si tuviese toda la fe,  
de tal manera que trasladase  
los montes, y no tengo amor,  
nada soy”.*  
*San Pablo*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de tener educación profesional, especialmente a la Facultad de Ingeniería por brindarme las instalaciones necesarias para mi aprendizaje y a la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, gracias... ¡Por mi raza hablará el espíritu!

Al Dr. Arturo Carranza Edwards por su asesoría en el desarrollo del presente trabajo, sus comentarios y sugerencias fueron valiosas para la elaboración del mismo. Al Dr. Rafael Huizar Alvarez y al Ing. Leovigildo Javier Cepeda Dávila por su apoyo e interés brindados, por su amistad; así mismo a la M. C. Mayumi Amparo Cabrera Ramírez y al Ing. Héctor Luis Macías González gracias por destinar parte de su tiempo en la revisión de éste trabajo y por sus valiosas observaciones.

A mi familia por su cariño, sus consejos, su apoyo, sus valores, gracias por ser maravillosos. A todos aquellos a quienes con gusto puedo llamar amigos.

## INDICE

### RESÚMEN

#### CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos	4
----------------	---

#### CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

#### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS DEL CROMO

3.1. Configuración electrónica	11
3.2 Estados de oxidación del cromo	13
3.3. Familia del cromo	14
3.4. Usos del cromo	15

#### CAPÍTULO IV. EL CROMO EN LA NATURALEZA

4.1. Relación de la cromita con el grupo de la espinela	17
4.2. Rocas ultramáficas	18
4.3. Origen de las rocas ultramáficas	21
4.4. Localización de rocas ultramáficas en la República Mexicana	23
4.5. Yacimientos minerales	24
4.5.1. Tipos de depósitos y origen de la cromita	24
4.5.2. Orden de cristalización	26
4.6. Origen de los yacimientos de tipo sedimentario	27
4.7. Yacimientos de cromita en el mundo	28
4.8. Alteración de la cromita	28
4.9. Procesos hidrotermales	29

#### CAPÍTULO V. ENRIQUECIMIENTO DE CROMO POR ACTIVIDADES ANTRÓPICAS

5.1. Contaminación por cromo	33
5.2. Factores que propician el desarrollo de Cr <sup>6+</sup>	34
5.3. Cromo en el suelo	36
5.4. Cromo en el agua subterránea	38
5.5. Cromo en la atmósfera	40
5.6. Soluciones para mitigar la contaminación por cromo	41
5.7. Zonas de México con indicios de altas cantidades de cromo por actividades antropogénicas	43

#### CAPÍTULO VI. GEOLOGÍA MÉDICA DEL CROMO

6.1. Elementos traza	46
6.2. El Cr <sup>6+</sup> y el Cr <sup>3+</sup>	47
6.3. Relación del cromo con la salud	48

6.3.1. Efectos de los compuestos del cromo en la piel	50
6.3.2. Efectos de los compuestos del cromo en el aparato respiratorio	50
6.3.3. Reacciones alérgicas	51
6.3.4. Efectos de los compuestos del cromo en los ojos y oídos	51
6.3.5. Efectos de los compuestos de cromo en el aparato digestivo	51
6.4. Dosis dependencia y dosis respuesta	52
6.5. Cromo en suelos, plantas y animales	55
6.6. Cromo en la comida	56

## CAPÍTULO VII. LEGISLACIÓN AMBIENTAL

7.1. Normas para la conservación de la buena calidad del aire en México	58
7.2. Normas para la conservación de la buena calidad del agua en México	59
7.3. Normas para la conservación de la buena calidad de los suelos en México	61

## CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES

## CAPÍTULO IX. RECOMENDACIONES

## BIBLIOGRAFÍA

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.	Ubicación del cromo dentro de los metales de transición en de la tabla periódica	10
Figura 3.2.	Orden de llenado de los subniveles atómicos	13
Figura 4.1.	Clasificación IUGS de las rocas ultramáficas (faneríticas ferromagnesianas)	20
Figura 4.2.	Localización de rocas ultramáficas y máficas en la República Mexicana	25
Figura 5.1.	Abundancia de $\text{Cr}^{6+}$ en soluciones acuosas en concentraciones de $1 \times 10^{-6}$ en pH 1-14, las líneas verticales punteadas representan el rango de pH de valores que se presentan naturalmente en el agua	35
Figura 5.2.	Dispersión de cromo en suelos	38
Figura 5.3.	Dispersión del cromo en aguas subterráneas	40
Figura 6.1.	Algunas rutas que los elementos traza pueden tomar para concentrarse en el cuerpo humano y ocasionar problemas a la salud	47
Figura 6.2.	Curva dosis-respuesta generalizada	53
Figura 6.3.	Curva teórica de dosis-respuesta tóxica	54
Figura 6.4.	Toxicidad del $\text{Cr}^{6+}$ en organismos de agua dulce	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.	Propiedades Fisico-químicas del ion cromo	12
Tabla 4.1.	Principales minerales de cromo	16
Tabla 4.2.	Minerales del grupo de la espinela	17
Tabla 4.3.	Composición mineralógica del manto	19
Tabla 4.4.	Principales minerales de cromo y sus ambientes	22
Tabla 5.1.	Procesos industriales en los cuales se utiliza cromo en sus diferentes especies	32
Tabla 7.1.	Límites máximos permisibles para cromo hexavalente en descargas de agua residuale en agua y bienes nacionales en mg/l	60
Tabla 7.2.	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales hacia los sistemas de alcantarillado urbano o municipal en mg/l	60
Tabla 7.3.	Concentraciones de referencia totales para cromo hexavalente en remediación de suelos en mg/kg	61

## RESUMEN

En esta tesis se hace una investigación bibliográfica y análisis del cromo, el cual es un elemento de la tabla periódica de importancia ambiental. Este es un elemento común en rocas máficas, ultramáficas y en yacimientos minerales. Es esencial para el cuerpo humano, donde se le encuentra en concentraciones de 0.03 ppm. Su deficiencia puede producir enfermedades cardiovasculares, diabetes, arteriosclerosis y cataratas. Por sus propiedades físicas y químicas es un elemento necesario en la industria; no obstante, los residuos resultantes de los procesos industriales pueden generar enriquecimientos antrópicos del cromo dentro del ambiente. La ingesta humana del cromo se puede dar vía vegetales o animales, que a su vez lo obtendrán del aire, agua o suelo. Las especies del cromo de mayor interés ambiental son  $\text{Cr}^{6+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$ . Los efectos perjudiciales para la salud humana se pueden relacionar con ulceraciones epiteliales, daños al aparato respiratorio, sangrados nasales, cáncer en estómago y pulmón e incluso atravesar la membrana celular de los glóbulos rojos alterando códigos genéticos. Es fundamental establecer la curva dosis-respuesta del cromo, en tal forma que se establezcan sus límites benéficos y perjudiciales y aplicar las normas ambientales establecidas por la SEMARNAT.

---

## I. INTRODUCCION

El cromo es un elemento natural que se encuentra en las rocas, los animales, las plantas, el suelo en polvo y en gases volcánicos. Está presente en el ambiente en varias formas diferentes, siendo las formas más comunes el cromo metálico ( $\text{Cr}^0$ ), el cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) y el cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ). El  $\text{Cr}^{3+}$  ocurre naturalmente en el ambiente y es un elemento nutritivo esencial que el cuerpo requiere. El  $\text{Cr}^{6+}$  y el  $\text{Cr}^0$  provienen por lo general de procesos industriales. No se ha asociado ningún sabor u olor con los compuestos de cromo. El cromo metálico ( $\text{Cr}^0$ ), es un sólido de color acero-grisáceo que se derrite a temperatura muy alta (ATSDR, 2000).

El cromo se encuentra clasificado en la naturaleza dentro del grupo de los elementos traza y metales pesados (Plant y Raiswell, 1983); dentro de la tabla periódica pertenece al grupo de elementos de transición. El cromo presenta varios estados de oxidación (de +2 a +6), debido a sus propiedades electrónicas, al tipo de enlace en el que se encuentre, a la energía reticular del disolvente (si existe) y a la energía de solvatación. Los estados de oxidación más comunes para el cromo son  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$ . El  $\text{Cr}^{3+}$  es considerado como inofensivo, a diferencia del  $\text{Cr}^{6+}$  que es altamente tóxico, incluso carcinógeno .

Sus propiedades físicas y químicas determinan que tenga un uso muy amplio en diferentes actividades industriales. Los compuestos de cromo, principalmente las formas de  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$ , producidas por la industria se usan en el proceso de cromado, en donde para proteger a otros metales de la corrosión se deposita una capa protectora mediante electrodeposición. En metalurgia se emplean cromatos y óxidos impregnados en colorantes y pinturas para aportar resistencia a la corrosión y para dar un acabado brillante. El dicromato de potasio es un reactivo químico para la limpieza del vidrio de laboratorio y en los análisis volumétricos. El cromo es de uso común en sistemas de catalización, por ejemplo, en la síntesis del amoníaco, en el curtido de cuero y en la fabricación de baterías. El dióxido de cromo, que se caracteriza por sus propiedades magnéticas se usa en la fabricación de cintas magnéticas dando mejores resultados que el óxido de fierro, en equipos de video, entre otros (Udy, 1956; Gaughlofer y Bianchi, 1991; Reimann y De Caritat, 1998; Kotas y Stasicka, 2000; Zahid *et al.*, 2006).

---

Este elemento se encuentra distribuido de forma natural en la corteza terrestre, en el piso oceánico y en la corteza continental (Plant y Raiswell, 1998; Cabrera-Ramírez y Carranza-Edwards, 2002). Es un elemento petrogenético o formador de rocas, presentándose principalmente en espinelas, silicatos simples y aluminosilicatos. Rankama y Sahama (1950), ubicaron el cromo en el lugar número veinte en orden de abundancia de los elementos que constituyen a las rocas ígneas, pues se encuentra en bajas cantidades en una amplia variedad de silicatos. La espinela, los anfíboles monoclinicos, piroxenos, y cloritas son los grupos de minerales más importantes de los silicatos que contienen las mayores cantidades de cromo (Thayer 1942).

Las rocas que poseen altas cantidades de cromo son las rocas ultramáficas, principalmente y en menores cantidades existe en las rocas máficas, así como en granitos, calizas, areniscas, esquistos y gneises (Cabrera-Ramirez y Carranza-Edwards, 2002). En México existen afloramientos de rocas ultramáficas en el estado de Baja California Sur (Península de Vizcaíno, islas Magdalena, Santa Margarita y Cedros), en el estado de Guanajuato, en las costas de los estados de Guerrero y Sinaloa sobre todo al norte de Mazatlán; la edad de esas rocas varía de Jurásico Tardío al Cretácico Temprano.

La cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) y crocoíta ( $\text{PbCrO}_4$ ) son los minerales de cromo más abundantes; el primero es el más utilizado como mena de cromo, pues puede contener hasta un 65% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , mientras que la crocoíta contiene hasta un 16% (Reimann y De Caritat, 1998).

Los altos contenidos de cromo en el ambiente están asociados con las actividades industriales, de las cuales destaca la química, la electrometalurgia, la combustión de gas natural, el aceite, carbón, tabaco, la metalurgia, el tratamiento de lodos residuales, la fundición de cobre, la incineración de desperdicios, el uso de fertilizantes (Gauglhofer y Bianchi, 1991; Reimann y De Caritat, 1998). Este elemento también se encuentra en el agua, sedimentos, lluvia, aire, plantas y fluidos orgánicos (Reimann y De Caritat, 1998). Cuando, el  $\text{Cr}^{6+}$  alcanza una concentración por encima de la cantidad máxima permisible (0,05 mg/l), puede llegar a ocasionar daños adversos a la salud, que van desde ulceraciones a la piel, hasta cáncer y posteriormente la muerte. Estudios actuales (Kirpnick-Sobol *et al.*, 2006; Curtis *et al.*, 2007), han demostrado que dicho ion es capaz de alterar el código genético del ADN. Cabe señalar que, a pesar de que el  $\text{Cr}^{3+}$  se considera inofensivo, en condiciones de pH entre 1 y 6.5, puede fácilmente oxidarse y pasar a  $\text{Cr}^{6+}$ . Asimismo el  $\text{Mn}^{2+}$  puede favorecer condiciones propicias

---

para la oxidación del  $\text{Cr}^{3+}$  y este convertirse en  $\text{Cr}^{6+}$ , Por esto no debe despreciarse su presencia en el ambiente y se debe tener muchas precaución al estar en contacto con el  $\text{Cr}^{3+}$  (Zahid *et al.*, 2006). Por otra parte, el  $\text{Cr}^{6+}$  es un agente oxidante que puede ser reducido a  $\text{Cr}^{3+}$  en la presencia de un agente como la materia orgánica de origen vegetal, que es capaz de crear condiciones reductoras (Spiro *et. al.*, 2004). En México existen muy pocas investigaciones al respecto de contaminación no sólo por cromo, sino también para otros elementos traza importantes en el ambiente como el arsénico, manganeso y plomo entre otros; por esta razón no existe un registro estricto de casos de contaminación por cromo y por lo tanto hasta ahora; no se reportan en México métodos de remediación y saneamiento. Lo alarmante de esto es que a diferencia de México en otras partes del mundo existen muchos casos de daños a la salud de la población reportados, a pesar de que algunos de ellos no se detectan a tiempo y aún se carece de soluciones definitivas.

El efecto principal del cromo  $\text{Cr}^{3+}$  en el cuerpo humano parece ser una influencia sobre la tolerancia a la glucosa y su actividad está muy ligada a la de la insulina, por lo que se le considera como un elemento traza nutricional esencial para los seres vivos (Reimann y De Caritat, 1998, Montgomery, 1991). Su déficit puede ocasionar resistencia a la insulina o baja tolerancia a la glucosa, daños en el crecimiento de los organismos y puede producir diabetes, arteriosclerosis, cataratas en los ojos, y padecimientos cardiovasculares (Reimann y De Caritat, 1998). Respecto al  $\text{Cr}^{6+}$ , éste tiene efectos tóxicos en los sistemas biológicos

Los alimentos constituyen para el hombre la fuente de cromo natural más importante, cuya presencia es muy variable, pero siempre en cantidades inofensivas (Flores, 2003). Existe un límite máximo de 0,05 mg/l de cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ) que el cuerpo humano puede tolerar antes de presentar síntomas de malestar en la salud por su presencia; para poder detectar dicho nivel se recurre a la curva dosis-respuesta, donde se puede apreciar la cantidad de cromo máxima que el cuerpo humano presenta antes de tener algún padecimiento, es decir, en las diferentes fases de actividad tanto benéfica, como dañina o letal, las cuales pueden diferir ampliamente, tanto cualitativa como cuantitativamente para diferentes sustancias y se les observa sólo bajo condiciones especiales. Por otra parte, la reacción ante la deficiencia de este elemento puede causar daños en el crecimiento de los organismos (Keller, 1996; Reimann y De Caritat, 1998).

---

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004), ha propuesto guías para que los países pertenecientes a esta organización puedan determinar los límites máximos permisibles para diferentes contaminantes, como puede ser el caso de los elementos traza en agua, suelo y aire. La OMS es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas.

En México, los organismos que se encargan de dictar leyes para vigilar la presencia de cromo en el aire, agua y suelos, son la SEMARNAT y la Secretaría de Salud. La norma que sanciona específicamente la presencia de cromo en el agua potable es la NOM-127-SSA1-1994, y tiene como límite máximo permisible la presencia de 0.05mg/l de cromo hexavalente. Para la contaminación del aire, existe una norma que sanciona partículas suspendidas, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, basándose principalmente en el tamaño de la partícula y no en su composición. En cuanto a los suelos, existe una norma especial para su remediación por daños de cromo, y una más para descargas de agua residual con contenido de cromo hexavalente en humedales y suelos para uso de riego agrícola, está la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual presenta como límite máximo permisible en promedio diario en suelos los siguientes valores: 1 mg/l, promedio mensual: 0.5 mg/l; o humedales naturales: promedio diario: 1 mg/l, promedio mensual: 0.5 mg/l.

### **1.1. Objetivos**

El objetivo general de esta tesis es realizar una investigación bibliográfica que permita determinar la importancia del cromo como elemento ambientalmente importante.

Objetivos Específicos:

- Identificar las principales características del cromo.
- Investigar la abundancia del cromo en rocas, suelos, sedimentos y agua.
- Hacer una búsqueda de las industrias potencialmente importantes por el enriquecimiento antrópico del cromo.
- Conocer los daños a la salud que el cromo puede producir en el ser humano

---

## II. ANTECEDENTES

El cromo fue un elemento desconocido durante mucho tiempo. En 1765 M. Pallas, un geólogo ruso descubrió el mineral de cromo, crocoíta, describiéndolo como un “hermoso mineral de color anaranjado” que en aquel tiempo sólo fue utilizado para colección. Para 1797 el químico francés, Luis Nicolaus Vauquelin descubrió la cromita en un yacimiento ubicado en Siberia, y a principios del siglo XIX el cromo se usó por primera vez en la industria química. Para el año de 1879, en Francia comienza a ser utilizado como refractario, posteriormente, y a partir de 1906 se le empezó a utilizar en la industria metalúrgica como protector del acero y actualmente estos tres usos siguen siendo los más comunes (Udy, 1956). Vauquelin, al realizar experimentos con la cromita, reportó que cada filtrado y precipitado que obtenía de ella tenía colores muy brillantes: amarillo, rojo y verde y, a partir de esos resultados nombró a ese nuevo elemento metálico “chrome” (cromo), de la palabra griega “chroma” que significa color. Vauquelin resaltó la importancia del cromo, de sus compuestos coloridos y su importancia como metal y predijo un gran futuro para este elemento químico.

Andreas Kurtz, alumno de Vauquelin, estudió su química y posteriormente se convirtió en fabricante de pigmentos de cromo, con los cuales se comienzan a pintar carrocerías e implanta una fascinante moda en los autos (Udy, 1956).

En 1810, John y James White, comenzaron a manufacturar potasio bicromado y se especializaron en otros materiales de cromo. Otros usos de compuestos de cromo se empiezan a desarrollar para 1810, en Francia, para pinturas de paredes, de porcelana y de vidrio. Durante la Primera Guerra Mundial tuvo un gran auge, ya que fue utilizado para hacer aleaciones con otros metales para el desarrollo de armamentos, pero después de la guerra, su precio del cromo cayó, cambio que causó graves daños a la industria del cromo (Udy, 1956).

En cuanto a su importancia en la naturaleza, Rankama y Sahama (1950), ubicaron el cromo en el lugar número veinte en el orden de abundancia de los elementos de las rocas ígneas, donde se encuentra en bajas cantidades en una gran variedad de silicatos. La espinela, los anfíboles monoclinicos, los piroxenos, y las cloritas son los grupos más importantes de los silicatos que contienen mayores cantidades de cromo (Thayer 1956). En 1969, Dana describió por primera vez a la cromita rica en aluminio.

---

Palache *et al.* (1944) y Dana (1986), dividieron el grupo de la espinela en tres grupos, basándose en los elementos trivalentes: serie de la espinela, serie de la magnetita y serie de la cromita.

En México al noroeste de la península de Baja California, Rosales *et al.* (1994), reportaron altos contenidos de cromo en arenas de playa cercanas a afloramientos de gabro (cantidades entre 50 y 350 ppm), acompañados de magnetita e ilmenita, como minerales accesorios. Los rangos del tamaño de los sedimentos van de arenas medias moderadamente clasificadas a arenas finas bien clasificadas (Cabrera-Ramírez y Carranza-Edwards, 2002).

En México, tenemos uno de los ejemplos más serios de contaminación por  $\text{Cr}^{6+}$ , provocado por la empresa Cromatos de México, que comenzó a operar a partir de 1958 y permaneció activa durante veinte años en la localidad de Lechería, Tultitlán, Estado de México dicha empresa se dedicó a producir compuestos de cromo con procesos de producción a cielo abierto y sin control de sus emisiones, descargas y manejo de residuos. En 1975 se empezaron a detectar los primeros efectos graves en la salud de las personas (hemorragias nasales, perforación del tabique nasal con probabilidades de ceguera, úlceras en pies y manos hasta el hueso, cáncer y muerte) que realizaban actividades dentro de la planta y cercanas a ésta; para 1976 se confirmó la existencia de cromo hexavalente en la zona, lo que orilló a que en 1978 la planta fuera clausurada de manera definitiva. (González, 2007).

Este es el ejemplo de un grave problema de contaminación por residuos peligrosos de Cromo en México, y manifiesta que en las actividades industriales es necesario manipular con suma precaución este elemento.

Otro caso importante de contaminación por residuos de cromo en México, es el acuífero de León Guanajuato, donde como resultado de la infiltración de residuos y reactivos relacionados con la industria curtidora se detectaron cantidades elevadas de este ión. El crecimiento de esta ciudad ha originado una extracción intensiva de agua del acuífero que la subyace, pues de acuerdo con la SARH (1982), para el año 1981, el abastecimiento de agua para la ciudad provenía en 91% del agua subterránea y en un 9% de aguas superficiales. El desarrollo, de las industrias de la curtiduría y del calzado ha contribuido al incremento de la descarga de aguas residuales con altas concentraciones de cromo, directamente al drenaje. Hoy en día dichas industrias, en sus procesos de producción, utilizan el cromo en su estado reducido  $\text{Cr}^{3+}$ , que como ya se indicó anteriormente, en medios oxidantes fácilmente se oxida

---

a  $\text{Cr}^{6+}$ . En 1983 se detectó la presencia de cromo en uno de los pozos que surte de agua potable a la ciudad; posteriormente, en 1987 se detectó  $\text{Cr}^{6+}$  en los pozos de la batería Oriente, Sur y Turbio, así como en algunos dentro de la ciudad, aunque en varios de ellos se encontraron concentraciones inferiores al límite permisible para agua potable. Se había considerado como fuente principal de aporte de cromo al ambiente a las curtidurías, pero, otra fuente importante de contaminación en esa zona ha sido la empresa Química Central, que produce las sales de cromo que se utilizan en la industria curtidora local (Armienta, 1992).

Las actividades antropogénicas antes mencionadas han tenido gran impacto en el ambiente, viéndose reflejadas principalmente en los daños a la salud de la población (ulceraciones en la piel, daños al aparato respiratorio, cáncer en estómago y pulmón e incluso atravesar la membrana celular de los glóbulos rojos alterando el código genético), así como de plantas y animales, evidencias que empezaron a ponerse de manifiesto durante la década de 1930, debido a la incidencia de cáncer del tracto respiratorio que era anormalmente alto en trabajadores de la industrias del cromo. El primer reporte de cáncer en un trabajador fue publicado en la literatura médica alemana en 1932 (Lehman, 1932). Posteriormente investigadores alemanes reportaron que la prolongada inhalación al polvo de cromo causaba irritación crónica del tracto respiratorio (Alwens y Jonas, 1938).

Actualmente países como el Reino Unido y Estados Unidos se encuentran haciendo investigaciones recientes sobre el tema de los efectos del cromo en la salud, específicamente el impacto de dicho elemento en el ADN (Kirpnick-Sobol *et al.*, 2006; Curtis *et al.*, 2007).

Para contrarrestar los daños adversos a la salud, no solamente por contaminación por cromo, sino para otros tipos de contaminantes, la Organización Mundial de la Salud (ONU) ha propuesto guías para determinar los límites máximos permisibles para diferentes elementos traza en agua, suelo y aire; en México, existen organismos gubernamentales que se encargan de analizar y promulgar normas para el cuidado de la salud pública, siendo la principal de ellas la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), que es la dependencia de gobierno que tiene como propósito fundamental "fomentar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales, y bienes y servicios ambientales, con el fin de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable" (Secretaría de la Función Pública, 2003); dicha dependencia fue creada en noviembre del año 2000, con el objetivo de impulsar una política nacional de protección ambiental que dé respuesta a las expectativas de

---

protección de los recursos naturales y que logre incidir en las causas de la contaminación y de la pérdida de ecosistemas y de biodiversidad (SEMARNAT, 2007). De dicha dependencia se deriva la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que otorga permisos para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, y que promulga leyes para un manejo adecuado del agua (CONAGUA, 2007). Además de la SEMARNAT, la Secretaría de Salud, cuya misión es contribuir a un desarrollo humano justo, incluyente y sustentable, mediante la promoción de la salud como objetivo social compartido (Secretaría de Salud, 2007), también emite leyes relacionadas con el cuidado de la salud pública y sanciona los altos contenidos de varios elementos químicos que contaminan el agua potable y se consideran perjudiciales para el ser humano como son el As, Mn, Cr, Ni, Pb, F entre otros.

Los primeros antecedentes de la política ambiental en México fueron en los años cuarenta, con la promulgación de la Ley de Conservación de Suelo y Agua. A partir de 1982, la política ambiental mexicana comenzó a adquirir un enfoque integral y se reformó la Constitución para crear nuevas instituciones y precisar las bases jurídicas y administrativas de la política de protección ambiental. En 1989 se creó la Comisión Nacional del Agua (CNA, hoy CONAGUA) como autoridad federal en materia de administración del agua, protección de cuencas hidrológicas y vigilancia en el cumplimiento de las normas sobre descargas y tratamientos del agua (SEMARNAT, 2007).

En 1992, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), cuya misión era integrar las políticas, actividades y acciones relacionadas con la protección al medio ambiente, a fin de proporcionar un marco global a la atención de los asuntos ecológicos que fuera más allá de la protección a la salud humana, se transformó en la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) con el objetivo de eliminar la pobreza, basándose en el Programa Nacional de Solidaridad y buscando establecer una nueva relación entre el Estado y la sociedad (INE, 2007). Se crearon también el Instituto Nacional de Ecología (INE) con la finalidad de apoyar la formulación de política una ambiental y la toma de decisiones que promuevan el desarrollo sustentable (INE, 2007) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) que tiene como tarea principal incrementar los niveles de observancia de la normatividad ambiental, a fin de contribuir al desarrollo sustentable y hacer cumplir las leyes en materia ambiental (PROFEPA, 2007).

---

---

### III. CARACTERÍSTICAS DEL CROMO

El cromo (Cr) es un metal plateado, brillante y maleable, con una densidad de  $7.2 \text{ g/cm}^3$  (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

Dentro de la tabla periódica, el cromo ocupa el número atómico 24, con una masa atómica de 51.996 y puede presentarse en varios estados de oxidación (desde II hasta VI). De acuerdo con Earnshaw y Harrington (1977), el estado de oxidación se define como: “La carga formal asignada a cada átomo de un elemento; como los elementos de transición generalmente tienen varios electrones en diferentes orbitales de energía comparable (pero no igual), existe la posibilidad de que un número variable de electrones participe en la formación de enlaces, originando una variedad de estados de oxidación”. Para Gauglhofer y Bianchi (1991), sólo las formas trivalente y hexavalente del cromo son de particular importancia y, como asegura Keller (1976), el cromo es uno de los elementos de importancia ambiental.

Gauglhofer y Bianchi (1991), mencionan que el cromo trivalente tiene el estado de oxidación más estable; sin embargo, Huffman (1973) comprobó que el cromo hexavalente es la forma más abundante en el agua con pH inferior a 7 y saturada en oxígeno, pero a temperatura ambiente esta combinación no ocurre con frecuencia.

El cromo pertenece al grupo de los elementos traza también llamados metales pesados, que se presentan en muy bajas concentraciones en las rocas y minerales de la corteza terrestre (Plant y Raiswell 1983). The American Geological Institute (1976), señala que los elementos traza son todos los elementos, exceptuando a los ocho abundantes formadores de rocas, a saber, oxígeno, (O), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg).

En cuanto a los metales pesados, el mismo instituto, los define como aquellos elementos con altos pesos moleculares, generalmente tóxicos para plantas y animales, aún en bajas concentraciones; a menudo aparecen como residuos en el ambiente.

El cromo, también se ubica dentro de los metales de transición (Figura 3.1), que son los que pertenecen a los grupos del 3 B al 1 B en la tabla periódica; en general, los metales de transición tienen altos puntos de fusión y ebullición (Mortimer, 1983).

Elementos representativos										Elementos representativos										Gases nobles	
1 H																					2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
11 Na	12 Mg	Metales de transición										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110 110	111 111	112 112										
Lantánidos			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
Actínidos			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

Fig. 3.1 Ubicación del cromo (sombreado oscuro) dentro de los metales de transición en de la tabla periódica (modificado de Chang, 1998).

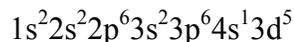
La mayoría de los metales de transición son buenos conductores del calor y de la electricidad, especialmente los elementos del grupo I B (cobre, plata y oro); además, los compuestos de los elementos de este grupo tienen propiedades colorantes y paramagnéticos debido a que sus electrones están desapareados (Mortimer, 1983), esto significa que los dos electrones del último orbital de un átomo tienen el mismo spin, es decir, spins paralelos ( $\uparrow\uparrow$  o  $\downarrow\downarrow$ ) y, cuando esto sucede se encontrarán en orbitales paralelos, a estos se les conoce como electrones desapareados y dan lugar a sustancias paramagnéticas que son aquellas a las que atrae un imán. Cuando los electrones están apareados o son antiparalelos, contrario al caso anterior ( $\uparrow\downarrow$  o  $\downarrow\uparrow$ ), los efectos magnéticos se cancelan y el átomo es diamagnético, siendo repelidos ligeramente por un imán (Chang, 2002). Esto se basa en el principio de exclusión de Pauli, el cual establece que “sólo dos electrones pueden coexistir en el mismo orbital atómico y deben tener espines opuestos” (Chang, 2002)”.

El uso de los diferentes metales pesados depende en gran medida de sus propiedades fisico-químicas, ya que éstas determinan la facilidad o dificultad para incorporarlos en los procesos industriales o en actividades agrícolas, entre otras. La tabla 3.1 muestra las propiedades fisico-químicas del ión cromo, mismas que determinan su uso tan amplio en diversos aspectos económicos.

### 3.1. Configuración electrónica

En cuanto a las características de las configuraciones electrónicas de los metales de transición, según Chang (2002) y Mortimer (1983), los subniveles *d* están parcialmente llenos, o con facilidad forman cationes que tienen este subnivel incompleto; en esta serie los electrones adicionales se acomodan en los orbitales 3d.

De acuerdo con Chang (2002), la configuración electrónica del cromo es:



que corresponde a una excepción de la regla de Hund, que establece que “la distribución electrónica más estable en los subniveles es la que tiene el mayor número de espines paralelos (estos espines se encontrarán en diferentes orbitales)” por lo tanto se esperaría que dicha configuración fuera:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^4$  (Chang, 2002)

Esta distribución se explica porque hay una estabilidad ligeramente mayor con el subnivel  $3d^5$  semilleno. Los electrones que se encuentran en el mismo subnivel (en este caso, los orbitales d), tienen la misma energía pero distinta distribución espacial y en consecuencia, la fuerza de atracción mutua (entre los electrones) es muy pequeña y el núcleo los atrae con mayor fuerza.

Tabla 3.1. Propiedades Físico-químicas del ion cromo  
(modificado de Wikimedia Foundation, Inc., 2007)

<b>Características Generales</b>	
Nombre, símbolo, número	Cromo, Cr, 24
Serie química	metal de transición
Grupo, periodo, bloque	6 , 4 , d
Densidad Mohs	7140 kg/m <sup>3</sup> , 8,5
Dureza Mohos	5.5
Apariencia	negro metálico
<b>Propiedades atómicas</b>	
Masa atómica	51,9961 u
Radio medio†	140 pm
Radio atómico calculado	166 pm
Radio covalente	127 pm
Configuración electrónica	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> 4s <sup>1</sup> 3d <sup>5</sup>
Estado de oxidación (Óxido)	6,3,2 (ácido fuerte)
Estructura cristalina	Cúbica centrada en el cuerpo
<b>Propiedades físicas</b>	
Estado de la materia	Sólido
Punto de fusión	2130 °K
Punto de ebullición	2945 °K
Magnetismo	Paramagnético
Entalpía de vaporización	344,3 kJ/mol
Entalpía de fusión	16,9 kJ/mol
Presión de vapor	990 Pa a 2130 K
Velocidad del sonido	5940 m/s a 293,15 K
<b>Información diversa</b>	
Electronegatividad	1,66 (Pauling)
Calor específico	450 J/(kg*K)
Conductividad eléctrica	7,74 10 <sup>6</sup> m-1·Ω-1
Conductividad térmica	93,7 W/(m*K)
1° potencial de ionización	652,9 kJ/mol
2° potencial de ionización	1590,6 kJ/mol
3° potencial de ionización	2987 kJ/mol
4° potencial de ionización	4743 kJ/mol
5° potencial de ionización	6702 kJ/mol
6° potencial de ionización	8744,9 kJ/mol

De acuerdo con Chang (2002), el orden de llenado de los subniveles atómicos en un átomo polielectrónico es (Figura 3.2).

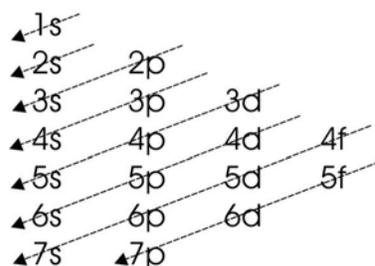


Fig. 3.2. Orden de llenado de los subniveles atómicos (tomado de Chang, 1998).

### 3.2. Estados de oxidación del cromo (Cr)

Los estados de oxidación para el Cr son: +2, +3, +4, +5 y +6, siendo los más estables +3 y +6, como ya se señaló (Chang, 2002). El cromo forma muy pocos compuestos para los estados de oxidación +4 y +5, mientras que los estados de oxidación +2 y +3 forman cationes monoatómicos. La estabilidad relativa de los distintos estados de oxidación depende de varios factores, entre ellos la estructura electrónica (reflejada en las energías de ionización y en los radios iónicos), el tipo de enlace, la energía reticular del disolvente y la energía de solvatación, que según Chang (2002), se refiere al proceso mediante el cual un ión o una molécula va rodeado por moléculas del disolvente distribuidas de una forma específica.

Para el estado de oxidación +6 ( $d^0$ ), el cloruro de cromilo ( $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$ ), es el más conocido; en general, todos los compuestos de  $\text{Cr}^{6+}$  son sólidos covalentes volátiles que se forman por reacción directa y por hidrólisis producen el trióxido (Earnshaw, 1977).

En el estado de oxidación +5 ( $d^1$ ) se forman muy pocos compuestos, entre ellos los fluoruros del cromo, que son generalmente paramagnéticos, covalentes e hidrolizables. Para el estado de oxidación +4 ( $d^2$ ) que es bastante raro, se conocen el fluoruro de  $\text{Cr}^{4+}$  y tres cloruros de cromo, que son covalentes e hidrolizables (Earnshaw *et al.*, 1977).

El estado de oxidación más estable para el cromo es el +3 ( $d^3$ ), formando compuestos que se obtienen fácilmente por reducción de  $Cr^{4+}$  en medios ácidos o con peróxidos en soluciones alcalinas. El  $Cr^{3+}$  forma un gran número de complejos, en particular cuando el átomo donador es nitrógeno. El  $Cr^{+2}$  ( $d^4$ ), es bastante reductor, pero en ausencia de catalizadores es estable en el agua y se utiliza para eliminar oxígeno de otros gases. Se forman complejos en los que participan enlaces  $\pi$ ; dicho enlace se define como “un enlace covalente formado por el solapamiento lateral de los orbitales, la densidad electrónica se concentra arriba y abajo del plano que forman los núcleos de los átomos enlazados (Chang, 2002)”; y dan origen a carbonilos, que son moléculas octaédricas monómeras diamagnéticas, que forman sólidos volátiles. Un compuesto de este tipo es el dibencenocromo ocho.

En estudios reportados en 1973 por Huffman, la mayoría de los compuestos que contienen  $Cr^{3+}$  se disuelven fácilmente en agua y tienen un pH bajo, pero en el agua de mar puede ser común el cromo hexavalente, pues es un medio donde fácilmente se dan las condiciones de sobresaturación de oxígeno en el agua, lo cual da como resultado un pH mayor que 7 y el cromo se encuentra en forma de cromato.

En cromatos y dicromatos el cromo es hexavalente pero fácilmente se reduce a su forma trivalente, constituyéndose en un fuerte agente de oxidación (Earnshaw *et al.*, 1977).

Según Reimann y De Caritat (1998), este elemento tiene una movilidad mecánica muy baja; en suelos el  $Cr^{6+}$  es más móvil que el  $Cr^{+3}$ , y generalmente en pocas semanas se reduce a  $Cr^{3+}$ .

### **3.3. Familia del cromo**

La familia del cromo consta de los elementos cromo (Cr), molibdeno (Mo) y wolframio o tungsteno (W). Su química es muy complicada, debido a la existencia de varios estados de oxidación, desde el  $Cr^{+2}$  hasta el  $Cr^{+6}$ , y a la formación de numerosos iones complejos (Reimann, y De Caritat 1998).

Los elementos de este grupo comparten las mismas características físicas y químicas: un estado de oxidación variable, forman complejos, tienen compuestos coloridos, propiedades magnéticas, naturaleza metálica y actividad catalítica; además son metales con puntos de

---

fusión y de ebullición elevados y son buenos conductores térmicos y eléctricos, por lo general son duros y resistentes y forman aleaciones entre sí (Earnshaw *et al.*, 1977).

Todos los elementos de la familia se utilizan ampliamente en la industria, el cromo en recubrimientos protectores y decorativos y en la fabricación de aceros inoxidable; el molibdeno y el wolframio en los extremos cortantes de herramientas de alta velocidad, pues conservan su dureza aún a altas temperaturas (Earnshaw *et al.*, 1977).

#### **3.4. Usos del cromo**

En particular, el cromo se emplea en la industria para galvanizar otros metales; el óxido de cromo (III) actúa como pigmento y catalizador; el óxido de cromo (IV), que se caracteriza por ser magnético, se utiliza principalmente en audio y video; los cromatos son usados para la oxidación de compuestos orgánicos, en la industria textil y en la producción de pigmentos. Además, el cromo se usa en las industrias de la construcción, pintura, y del aceite (como corrosivo), en fuegos pirotécnicos, en el tratamiento de agua residual, y en los fertilizantes (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

Existen métodos de especiación que de acuerdo con Kotas y Stasicka (2000), son procesos de análisis que consisten en identificar y cuantificar varias formas de un elemento presentes en muestras de análisis, para los que se requiere de muestreo y análisis instrumental. Hoy en día existen diversas técnicas para la evaluación de los análisis de cromo, la mayoría de las cuales permiten la determinación simultánea del cromo trivalente y hexavalente, así como el grado de incertidumbre obtenido durante la realización del análisis; sin embargo muchas de esas técnicas todavía presentan problemas en cuanto a su confiabilidad, debido a los diversos factores que influyen durante la determinación experimental de la especie; lo que si resulta claro es la importancia y la necesidad de contar con técnicas lo suficientemente confiables para detectar las especies de cromo en el ambiente.

---

#### IV. EL CROMO EN LA NATURALEZA

De acuerdo con Thayer (1956), Gaughhofer y Bianchi (1991) y Reimann y De Caritat (1998), el cromo constituye parte de muchos minerales que están distribuidos ampliamente en la corteza terrestre; en efecto Thayer (1956), lo define como un elemento petrogenético o formador de rocas, se presenta principalmente en las espinelas, aluminosilicatos y en bajas cantidades en una gran variedad de silicatos. Rankama y Sahama (1950), ubicaron el cromo en el lugar número veinte en orden de abundancia de los elementos de las rocas ígneas.

En la tabla 4.1 se enlistan los minerales más comunes que contienen cromo en su composición química y algunos que, aunque no son tan comunes, los contienen en altas concentraciones.

Tabla 4.1. Principales minerales de cromo (modificado de Weinrich, 2007 y Thayer, 1956).

Mineral	Composición	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %
Cromo nativo	Cr	100
Fercromita	Cr <sub>3</sub> Fe <sup>0+</sup> <sub>0.4</sub>	87
Carlsbergita	CrN	79
Escolaita	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	68
Magnesiocromita	MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	54
Cromita	(MgFe)(CrAlFe) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	15-65
Daubreelita	FeS*Cr <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	36
Lopezita	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	35
Cromatita	CaCrO <sub>4</sub>	33
Uvarovita	Ca <sub>3</sub> (Cr,Al) <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	27
Crocoíta	PbCrO <sub>4</sub>	16
Barbetonita	Mg <sub>6</sub> Cr <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )(OH)16*4(H <sub>2</sub> O)	16
Estitchita	Mg <sub>6</sub> Cr <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )(OH)16*4(H <sub>2</sub> O)	16
Dietzeita	Ca <sub>2</sub> (IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (CrO <sub>4</sub> )	10
Foenicrocoíta	3PbO 2CrO <sub>3</sub>	10
Vauquelinita	Pb <sub>2</sub> Cu(CrO <sub>4</sub> )(PO <sub>4</sub> )(OH)	7
Fornacita	Pb <sub>2</sub> Cu(CrO <sub>4</sub> )(AsO <sub>4</sub> )(OH)	7
Muscovita	(OH) <sub>2</sub> KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )	Variable, hasta 5
Chromo-enstatita	Mg <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Variable

\* Azufre variable

La espinela, los anfíboles monoclinicos, piroxenos, y cloritas son los grupos más importantes de los silicatos que contienen mayores cantidades de cromo (Thayer 1956).

De acuerdo con Saldaña (1977), la cromita es el único mineral cromífero que se utiliza como mena de cromo y puede contener hasta un 65% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . La cromita es una espinela, cuya mejor composición se expresa con la fórmula  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_4$  que le permite un amplio rango de composición y propiedades físicas (Thayer, 1956).

#### 4.1 Relación de la cromita con el grupo de la espinela

Palache *et al.* (1944) y Dana (1969), dividieron el grupo de la espinela en tres series, con base en elementos trivalentes, como se muestra en la tabla 4.2.

Thayer (1956), propuso que la cromita es esencialmente una solución sólida, principalmente de hierro y magnesio. Sus características físicas varían sistemáticamente con la composición química; así las cromitas ricas en hierro, siguiendo a Dana (1969), pertenecen al sistema isométrico, tienen dureza 5.5-6.5, son quebradizas, no presentan claramente un crucero, su fractura es subconcoidea a irregular, con lustre metálico y esplendente a submetálico, su color es negro fierro, tienen raya marrón a negro, son de moderadamente a fuertemente magnéticas y opacas en sección delgada.

Tabla 4.2. Minerales del grupo de la espinela, de acuerdo a Palache (1944) y Dana (1969).

Miembros de las series	Serie de la espinela	Serie de la magnetita	Serie de la cromita
	Al	Fe	Cr
Mg	Espinela	Magnesioferrita	Magnesiocromita
Fe	Hercinita	Magnetita	Cromita
Zn	Gahnita	Franklinita	Artificial
Mn	Galaxita	Jacobsita	Artificial

El mismo autor describe a la cromita rica en aluminio con las siguientes características físicas: es de color negro, con varios tonos de rojo, pasando a azul, verde, amarillo y pardo,

presenta lustre vítreo, casi mate, tiene un crucero imperfecto, fractura concoidea, quebradizo, dureza 8, presenta raya blanca, es dura y no es magnética.

En secciones delgadas, los rangos de color van de rojo cereza a marrón rojizo y las cromitas más metálicas usualmente dan una raya marrón oscuro, pero algunos ejemplares de yacimientos de cromo dan una raya púrpura; en cuanto a la forma de los cristales, la mayoría de los minerales de cromo presentan una forma anedral y una textura masiva o granular; al concentrarse los granos, nódulos y cristales pierden su forma distintiva y forman minerales masivos (Thayer, 1956).

Las propiedades magnéticas de la cromita dependen más del estado de oxidación del hierro que de la cantidad total de éste (Thayer, 1956).

Según Thayer (1956) y Dana (1986), la composición ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) y desarrollo químico de la cromita son complejos, en contraste con el balance de la fórmula general ( $\text{RO}^*\text{R}_2\text{O}_3$ ). Para minerales del grupo de la espinela, el hierro puede sustituirse por magnesio, el cromo por aluminio y hierro férrico.

De acuerdo con Dana (1963), existe mayor ocurrencia de cromita en peridotitas y en las serpentinitas derivadas de ellas, formando vetas; es uno de los primeros minerales en cristalizar en un magma en enfriamiento y los grandes cuerpos de menas probablemente se forman durante la solidificación de rocas por el proceso de diferenciación magmática. Cuando se presenta en serpentinas, generalmente va asociada con la magnetita.

## **4.2. Rocas ultramáficas**

De acuerdo con Cepeda (1985), las rocas ultramáficas corresponden con las estimaciones de la composición del manto, como se muestra en la tabla 4.3.

Wyllie (1969), señala que los términos ultramáfico y ultrabásico se refieren, respectivamente, a clasificaciones mineralógicas y químicas, pero se han usado de manera vaga o indefinida. Para precisarlos se puede decir que las rocas ultramáficas son aquellas cuyos índices de color (función de su contenido en minerales ferromagnesianos) son mayores del 70%, mientras que las rocas ultrabásicas son las que tienen menos del 45% de  $\text{SiO}_2$ . La

---

mayoría de las rocas ultramáficas son también ultrabásicas y viceversa, pero existen excepciones, por lo que deberían conservarse ambos términos.

Tabla 4.3. Composición mineralógica del manto (Tomado de Cepeda, 1985).

<b>Mineral</b>	<b>%</b>
Olivinos	40
Piroxenos	30
Oligoclasa	10
Ferroníquel	10 a 20
Troilita	5 a 15

Las rocas ultramáficas pueden haberse derivado directamente del manto o bien indirectamente, a través de otro material procedente de él, como es el magma basáltico, su mineralogía consiste fundamentalmente de olivino y piroxenos, cuyas combinaciones en diversas proporciones son la base para su clasificación moderna, propuesta por la International Union of Geological Sciences (IUGS ) como se muestra en la figura 4.1.

A excepción de las piroxenitas, cuyo contenido en SiO<sub>2</sub> puede llegar al 51%, todas las demás rocas ultramáficas tienen menos del 45%. Sus otros constituyentes principales son los óxidos de hierro (9 a 16%), magnesio (12 a 35%) y calcio (3 a 17%), distribuidos en los minerales esenciales. El agua, en pequeñas cantidades, se aloja en las moléculas de serpentinas, anfíboles y flogopita y, si la cantidad es suficiente, la peridotita se convierte en serpentinita (Willie, 1969).

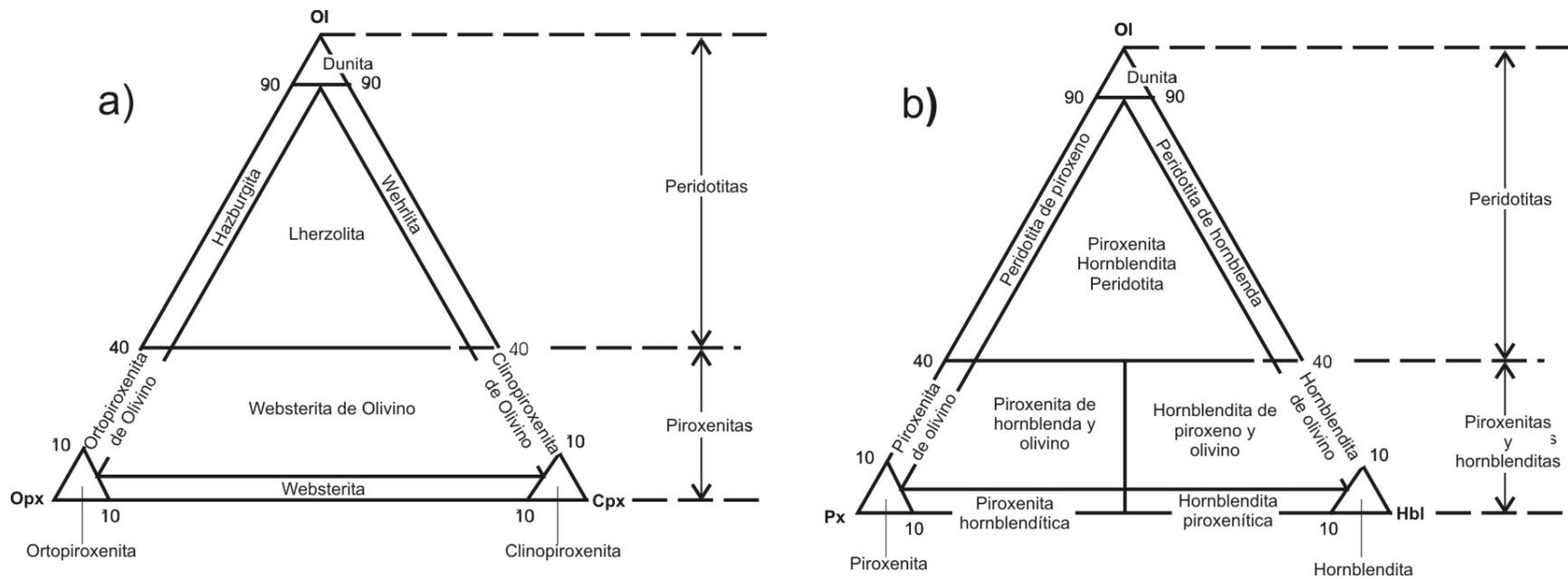


Fig. 4.1. Clasificación IUGS de las rocas ultramáficas (faneríticas ferromagnesianas). a) Para rocas con olivino y dos piroxenos. b) Para rocas con hornblenda, olivino y piroxeno. Ol = olivino, Opx = ortopiroxeno, Cpx = clinopiroxeno, Px = piroxenos, Hbl = hornblenda (Tomado de Raymond, 2002).

La mayoría de las rocas ultramáficas se originan a grandes profundidades, lo que hace difícil su afloramiento; los movimientos originados por procesos tectono-orogénicos, en muchas ocasiones logran hacer que asciendan hasta la superficie de la Tierra, por lo tanto es claro que mientras más hondo haya sido el hundimiento de los cristales, menor posibilidad hay de que alcancen la superficie (Huang, 1968).

De acuerdo con Raymond (2002), los dos tipos principales de rocas ultramáficas volcánicas son las komatiitas y algunas kimberlitas debido a la forma de emplazamiento que presentan y a la gran cantidad de CO<sub>2</sub> que liberan durante su ascenso, ambos tipos de rocas son equivalentes a las peridotitas. El término Uv-komatiita es utilizado para nombrar al grupo de rocas volcánicas ultramáficas que representan flujos de lava y son ricas en magnesio y pobres en titanio, ricas en olivino, en donde también puede estar presente la cromita; tienen una textura espinifex característica y su edad es principalmente precámbrica.

La kimberlita es una roca ultramáfica porfirítica compuesta por fenocristales de olivino, flogopita, granate, piroxenos y en menor cantidad minerales accesorios envueltos en una masa de minerales máficos como serpentina y olivino. Generalmente, las kimberlitas son brechadas y se presentan en forma de diatremas, únicamente en áreas continentales, así como en la mayoría de las komatiitas, su edad es precámbrica.

### **4.3. Origen de las rocas ultramáficas**

En la corteza terrestre, las rocas ultramáficas están presentes en seis tipos de yacimientos 1) cuerpos ígneos estratiformes, que incluye diques, lopolitos estratiformes y ofiolitas, 2) cuerpos intrusivos zonados irregulares, que incluyen a los complejos zonados tipo Alaska, a los intrusivos alcalinos y a los tipo appinita, 3) flujos de lava ultramáficos, que dan lugar a las komatiitas, 4) chimeneas de kimberlitas y estructuras relacionadas, 5) cuerpos de rocas ultramáficas tipo alpino, los cuales tienen forma irregular a elíptica y se presentan en fajas orogénicas, y 6) nódulos (incluyendo xenolitos) en rocas ígneas que incluyen piezas de una variedad de rocas félsicas máficas y ultramáficas. Cada uno de estos tipos tienen química distintiva, estructuras y petrografía características (Raymond, 2002). En la tabla 4.4 se muestran los ambientes en donde pueden estar presentes los principales minerales de cromo.

---

Tabla 4.4. Principales minerales de cromo y sus ambientes (tomado de Weinrich, 2007).

<b>Mineral</b>	<b>Ambiente</b>
Cromo	Rocas ultramáficas, algunas capas de rocas máficas, es común en meteoritos.
Fercromita	En anfibolitas y esquistos
Carlsbergita	En cuerpos precipitados de kamacita y troilita, y en meteoritos
Escolaita	En skarn de tremolita, metacuarcitas y vetas de clorita, en meteoritos condríticos.
Magnesiocromita	En serpentinitas
Cromita	En rocas ultramáficas y meteoritos.
Daubreelita	En meteoritos
Lopezita	Asociada con nitratos
Cromatita	Asociada con cromatos.
Uvarovita	Depósitos de cromita metamorfizada
Crocoíta	Mineral secundario de oxidación en vetas infiltradas con fluidos de Cr.
Barbetonita	En serpentinitas
Estitchita	Producto de alteración de la serpentina.
Dietzeita	Asociada a Iodatos.
Foenicrocoíta	Asociada a la crocoíta.
Vauquelinita	Asociada a la crocoíta.
Fornacita	En zona de oxidación de depósitos hidrotermales.
Muscovita	Granitos y pegmatitas.
Cromo-enstatita	Piroxenitas, peridotitas, gabros, serpentinas, meteoritos.

Bowen (1968), sugiere que, en ocasiones, la intrusión de estos cuerpos no se ha efectuado en la forma de magma, sino como masas cristalinas sólidas que han sido emplazadas por procesos dinámicos.

De acuerdo con Huang (1968), la causa de la serpentización de rocas ultramáficas se debe a un reemplazamiento del olivino por la serpentina, el cual se efectúa frecuentemente sin llegar a la deformación, debido a que no intervienen cambios de volumen en el proceso de transformación química.

#### **4.4. Localización de rocas ultramáficas y máficas en la República Mexicana**

En base a la carta geológica de México del Servicio Geológico Mexicano (2007), en el Estado de Baja California Sur afloran rocas intrusivas máficas del Triásico-Jurásico, distribuidas en la Península de Vizcaíno y en las islas Magdalena y Santa Margarita, denominadas Ofiolitas Península de Vizcaíno (Fig. 4.1). Su edad por fechamientos isotópicos de U/Pb en zircons de plagiogranitos que se hayan en la ofiolita es de 215.5 a 217.2 Ma. Una mezcla de matriz serpentinitica separa a esta unidad de un arco volcánico de edad pre-Jurásico Superior (Moore, 1983, 1985). Por otro lado, sus relaciones son complejas, sobre todo con el arco volcánico Jurásico-Cretácico (Kimbrough y Moore, 2003).

En la Isla Cedros, en Baja California Sur, aflora una secuencia compuesta de rocas ultramáficas, así como una unidad volcánica de lavas almohadilladas y flujos masivos, que constituyen una secuencia ofiolítica denominada Ofiolita Isla Cedros, unidad que está en contacto tectónico con la Formación Choyal. La edad de esta sucesión ha sido determinada con zircons por el método U/Pb en  $173 \pm 2$  Ma, que corresponde al Jurásico Medio (Kimbrough y Moore, 2003).

En el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, para la región de Baja California, Baja California Sur y Sinaloa, existió un magmatismo máfico y félsico; el primero de ellos, de edad Jurásico Tardío, se distribuye como pequeños afloramientos de gabro en la Península de Vizcaíno y al sur de La Paz, Baja California Sur (Kimbrough y Moore, 2003).

Para el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, en el sur de Baja California afloran rocas ultramáficas como hornblenditas, piroxenitas y serpentinitas, además de gabro, diorita y lavas almohadilladas, que se encuentran como colgantes dentro de las rocas plutónicas del Cretácico, en aparente discordancia con las rocas volcanosedimentarias de la Formación Alisitos; sin embargo, se consideran como parte de la evolución de esta última.

---

Las rocas ultramáficas del Cretácico Temprano están representadas por las unidades San Juan de Otates, en Guanajuato y el Complejo Las Ollas (Vidal-Serratos, 1983), en la costa pacífica del Estado de Guerrero. Estas unidades están compuestas, por lo regular de dunita, gabro, horblendita, serpeninita, werhlita, clinopiroxenita de olivino y diorita de hornblenda. En el Estado de Guanajuato existen algunas localidades de rocas ultramáficas que afloran se reportan edades de  $122.5 \pm 5.6$  Ma, por el método K/Ar aplicado en anfíboles (Ortiz-Hernández *et al.*, 1992).

Durante el Cretácico Temprano, en las regiones noroeste y sureste de Baja California, norte de Sinaloa, en los Cabos y al norte de Baja California Sur, se generó una faja de intrusivos ultramáficos y dioríticos. Se correlacionan con los intrusivos de Sinaloa al norte de Mazatlán, en donde afloran gabro, plagiogranito, piroxenita, anortosita y otras rocas ultramáficas (Henry y Fredrikson, 1987; Arredondo- Guerrero, 2003; Henry *et al.*, 2003). Las edades K-Ar en hornblenda varían de 133 a 138 Ma (Henry *et al.*, 2003).

En la región central de México, el magmatismo máfico del Oligoceno-Mioceno emplaza un tronco gabróico sobre la parte occidental del Graben de Villa de Reyes en el estado de Guanajuato; esta roca es denominada Gabro de Arperos (Tristán-González, 1986). En el sureste de México, Guerrero para el Mioceno, predominan los gabros y las tonalitas.

## **4.5. Yacimientos minerales**

### *4.5.1. Tipos de depósitos y origen de la cromita*

De acuerdo con Bateman (1978), la mayoría de los depósitos de cromita se forman por segregaciones magmáticas en rocas ígneas ultramáficas, compuestas principalmente de olivino y piroxeno. El término “segregación” se emplea, para designar a los depósitos magmáticos diferenciándolos de los depósitos formados por solución, inyección u otros medios, limitándose así a las concentraciones de minerales que cristalizaron *in situ*.

Las segregaciones magmáticas tempranas son concentraciones tempranas de minerales producidas como resultado de la diferenciación por cristalización gravitacional; estos minerales constituyentes del magma, tales como la cromita, pueden cristalizar pronto y quedar segregadas en masas de suficiente tamaño y riqueza para llegar a constituir depósitos de

---

importancia económica. La segregación puede tener lugar por hundimiento de los cristales pesados, formados primeramente en la parte inferior de la cámara magmática; también puede efectuarse por acumulación marginal o por flujo forzoso.

Un magma puede permanecer fluido a una temperatura inferior al punto de fusión de todos sus componentes. La cristalización comienza por debajo de este punto y, al descender la temperatura, puede producirse la cristalización completa, dando origen a minerales independientes o a mezclas isomórfas.

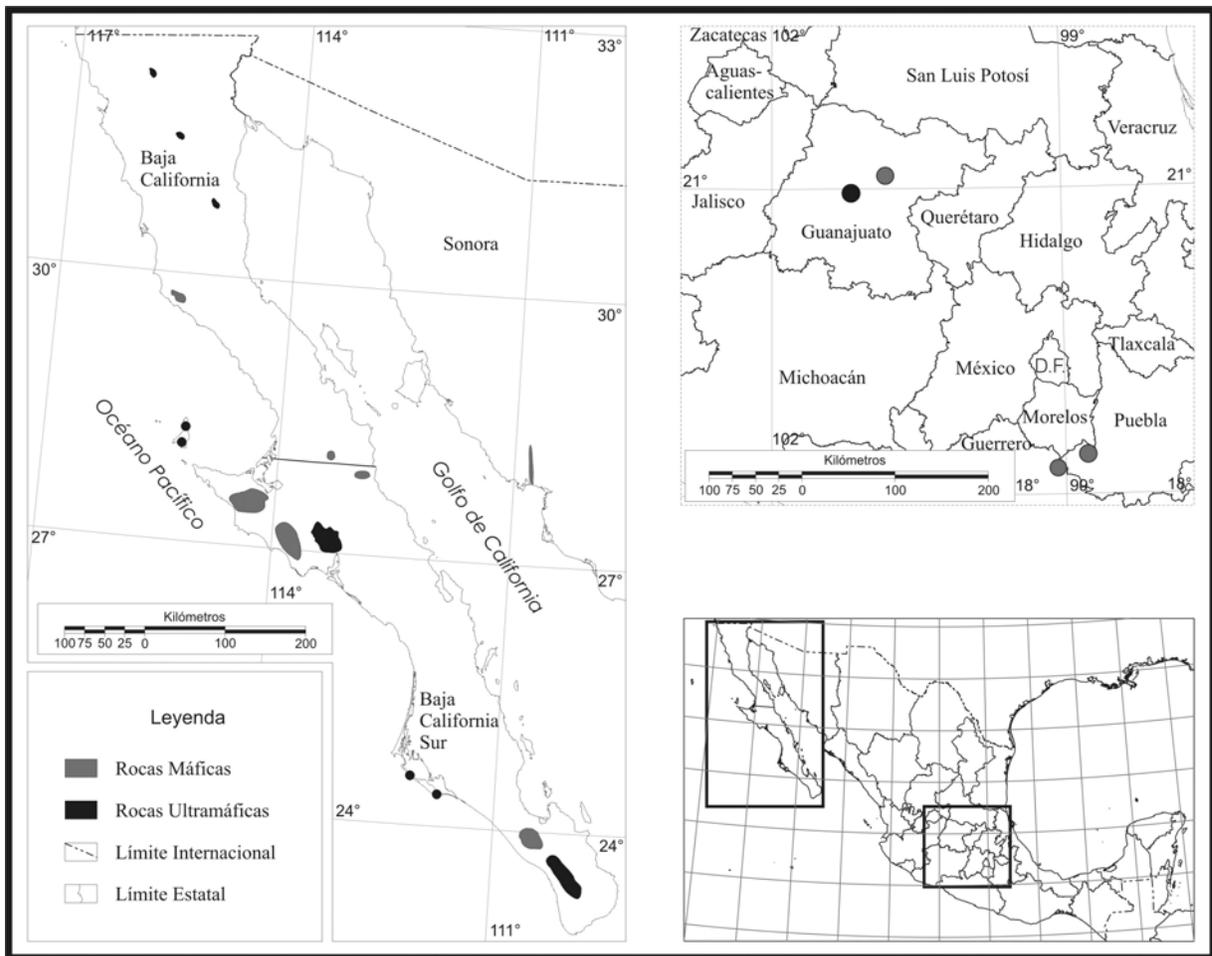


Fig.4.2 Localización de rocas ultramáficas y máficas en la República Mexicana

#### 4.5.2. Orden de Cristalización

Las sustancias más insolubles, así como las más densas, cristalizan primero, y éstas son, en general, minerales accesorios, tales como apatito, circón, titanita, rutilo, ilmenita, magnetita y cromita; en general el orden en el que cristalizan los minerales es de los más básicos a los más ácidos (basicidad decreciente). El olivino y el piroxeno ortorrómbico figuran entre los primeros minerales esenciales que cristalizan, seguidos por los clinopiroxenos, la plagioclasa cálcica, hornblenda, plagioclasa intermedia, plagioclasa sódica, ortoclasa, mica y cuarzo; naturalmente no todos los minerales están presentes en una sola roca, pero representan secuencias desde las rocas ultramáficas hasta las silícicas. Con la substracción de los minerales más básicos del magma, el magma residual, en general, se convierte progresivamente en más silíceo (Bowen, 1969; Bateman, 1978).

Según Thayer (1956), existen dos tipos principales de rocas ultramáficas, ricas en piroxeno y ricas en olivino; la mayoría de la producción mundial de cromo está asociada con dunitas, que son rocas ricas en olivino, principalmente, y en una extensión menor en masas intrusivas de peridotitas que, a su vez, también son ricas en olivino pero contienen un mayor porcentaje de piroxenos, y se derivan de un magma peridotítico primario.

De acuerdo con Saldaña (1977) y Bateman (1978), la cromita se presenta en la roca huésped en forma de masas, cuerpos tabulares a lenticulares, disseminaciones y en filones delgados de unos pocos metros de largo a masas mucho más grandes; algunos de ellos están alargados según el buzamiento y otros según la dirección e incluso, en algunos lugares, los granos disseminados han experimentado concentración residual.

Según Park y MacDiarmid (1981), en algunos depósitos minerales de cromita, predominan los minerales silicatados; pero los yacimientos económicamente atractivos contienen solamente un pequeño porcentaje de minerales de ganga. De acuerdo con Saldaña (1977), para la industria siderúrgica se necesita que la ley mínima de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sea 32%. Los minerales de ganga más comunes son el olivino serpentizado y los productos de alteración de los feldespatos. Las menas de bajo grado contienen granos individuales de cromita anedral disseminados en las dunitas, mientras que las menas de alto grado, que constituyen la mayoría de los yacimientos comerciales, aparecen casi masivas y contienen cantidades pequeñas de silicatos intersticiales.

---

Existen cuerpos de serpentinita y cromita asociados a rocas ricas en olivino y cromo, que parecen haber sido emplazadas tectónicamente durante su movimiento ascendente a través de la corteza se llevó a cabo un proceso hidrotermal, que dio origen a la serpentización, el cual ocurre, probablemente ocurre dentro de un rango de temperaturas de 350 a 450 °C (Saldaña, 1977).

Por otra parte, es importante mencionar que la cromita también puede concentrarse en depósitos de interés económico por procesos de erosión y sedimentación (placeres), debido a su resistencia al intemperismo y a su alta densidad (Thayer, 1956).

#### **4.6. Origen de los yacimientos de tipo sedimentario**

Según Bateman (1978), para la formación de depósitos sedimentarios se requieren cuatro condiciones principales: i) una fuente adecuada de materiales; ii) que se lleve a cabo la reunión de estos por erosión e intemperismo u otros procesos; iii) en caso de ser necesario, un transporte de los mismos al lugar de acumulación y iv) el depósito de los materiales en receptáculos sedimentarios, que pueden ser pantanos, lagos, marismas, depresiones continentales y, en algunos casos, condiciones marinas.

La solución de los constituyentes de los depósitos sedimentarios de importancia económica se realiza, en parte, durante la meteorización, donde los principales disolventes son el agua carbonatada, el ácido húmico y demás ácidos orgánicos, así como también las soluciones de los sulfatos.

El depósito de los minerales se puede llevar a cabo a partir de soluciones bicarbonatadas, sulfatadas, orgánicas y por la acción bacteriana o catalítica. Las condiciones en que se produce el depósito determinan en gran parte la composición mineralógica de los yacimientos resultantes, su volumen, su pureza y su distribución tanto superficial como estratigráfica.

En México se tiene un registro del año 1977, en el cual se llevó a cabo una exploración geológico-minera para localización de yacimientos de cromita en la porción noroccidental del estado de Baja California Sur, está representado por rocas de metamorfismo regional de las facies de esquistos verdes y de esquistos de glaucófano asociadas a rocas ultramáficas tales

---

como las serpentinitas y volcánicas de tipo ofiolítico. La mineralización de cromita se encontró principalmente en las serpentinitas derivadas de un magma primario ultrabásico. Los dos tipos de alteración hipogenética que se presentan en el área son serpentización y carbonatación, ambas producto del hidrotermalismo (Saldaña, 1977).

#### **4.7. Yacimientos de cromita en el mundo**

El primer lugar en producción mundial de cromita ha sido desplazada de los Estados Unidos (1860) por Turquía, Rusia, Nueva Caledonia y Zimbabwe. Otros productores importantes son: África del Sur, Cuba, Filipinas, India, Grecia, Japón, Brasil, Bulgaria y Canadá.

#### **4.8. Alteración de la cromita**

Según Thayer (1956), la cromita alterada presenta al microscopio petrográfico orillas y pequeñas vetas oscuras de material opaco, que es lo que se conoce como alteración u oxidación de la cromita y que se asocia principalmente con la clorita, uvarovita, anfíbol o diópsido. Amin (1948) y Miller (1953), presentaron datos que indican que, como efecto de la alteración, la espinela decrece y la magnetita se incrementa.

En cuanto al yacimiento, de acuerdo con Saldaña (1977), los tipos de alteración hipogenéticos más importantes de las rocas ultrabásicas son la serpentización y la carbonatación, ambas producto de alteración hidrotermal de antiguas rocas ultrabásicas que dieron lugar a la formación de minerales serpentínicos y magnesita.

La completa destrucción de la cromita, en algunos depósitos, ha sido un efecto completo de hidrotermalismo; Wijkerslooth, en 1942, descubrió en un yacimiento de cromo localizado en Turquía, una secuencia genética que comienza con la separación del óxido de hierro de la cromita en forma de hematita a lo largo de las fracturas y de la dirección de la cristalización, con desarrollo de magnetismo; bajo un ataque más severo del hidrotermalismo, la cromita es envuelta por una capa de silicatos, que contienen MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de la misma cromita. El producto final es un agregado recristalizado de hematita, magnetita, clorita,

---

glaucófano, actinolita, epidota, en ocasiones granate y andalucita, así como silicatos cromíferos y uvarovita.

El reemplazamiento de la cromita rica en cromo por magnetita rica en hierro indica claramente la adición de hierro y titanio por soluciones que transforman a las serpentinas en esquistos de clorita. La génesis de la cromita está estrechamente relacionada con la asociación de cromita opaca, rica en hierro y minerales hidrotermales (Thayer, 1956).

Según Park y MacDiarmid (1981), un producto de alteración frecuente es el granate (grosularita), el cual rellena las diaclasas en la mena o forma anillos de reacción entre el piroxeno y la cromita.

Para que se pueda llevar a cabo la serpentinitización en rocas ultrabásicas, es necesario: a) la adición del agua al olivino y b) un incremento del volumen, con un rango que varía de un 20% hasta un 70%, o por otra parte, la expulsión del sistema de MgO y SiO<sub>2</sub> en cantidades considerables (Saldaña, 1977).

#### **4.9. Procesos hidrotermales**

Bateman (1978), señala que la diferenciación magmática da origen a un producto final de fluidos magmáticos en el cual pueden estar concentrados los metales que originariamente estaban presentes en el magma. Estas soluciones hidrotermales transportan los metales desde la intrusión hasta el lugar del depósito, y se considera el factor de mayor importancia en la formación de yacimientos minerales epigenéticos, que son aquellos que se forman después de la roca encajonante.

En su trayectoria a través de las rocas, las soluciones hidrotermales pueden perder su contenido mineral por depósito en las distintas clases de aberturas de las rocas, formando yacimientos de relleno de cavidades o por sustitución metasomática de las rocas, formando yacimientos de sustitución o reemplazamiento.

Los factores esenciales para la formación de depósitos hidrotermales son: 1) disponibilidad de soluciones susceptibles de disolver y transportar materia mineral; 2) presencia de aberturas en las rocas por las cuales puedan canalizarse las soluciones; 3) presencia de lugares de emplazamiento para el depósito del contenido mineral; 4) reacción

---

química cuyo resultado sea el depósito; y 5) suficiente concentración de materia mineral depositada para llegar a constituir depósitos explotables (Bateman, 1978).

En resumen, se puede decir que el cromo es un mineral común en rocas máficas y ultramáficas como peridotitas y serpentinitas, en rocas félsicas puede existir pero en menores cantidades, también puede formar yacimientos minerales, ya sea de segregación magmática o de origen sedimentario, bajo condiciones muy particulares para cada uno, estos yacimientos son raros en nuestro país y por lo tanto no representan una amenaza de contaminación ambiental por los factores que implicaría el proceso de minado, del mismo modo las rocas que lo contienen abundantemente son muy escasas en el territorio mexicano, por lo que tampoco implica una alta posibilidad de encontrarlo disuelto de manera natural en acuíferos o formando parte de las partículas de suelos

---

## V. ENRIQUECIMIENTO DE CROMO POR ACTIVIDADES ANTRÓPICAS

El cromato es un compuesto del cromo que se produce en la industria mediante oxidación de la cromita con oxígeno atmosférico a altas temperaturas y se utiliza ampliamente como agente oxidante o como un componente de pigmentos, en cromatos y dicromatos; en estos compuestos el cromo se presenta en su forma hexavalente y se reduce fácilmente a su forma trivalente, lo que confirma que es un fuerte agente de oxidación (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

En la industria metalúrgica los productos de cromo se utilizan sobre todo en la elaboración de acero inoxidable y durante la producción de éste, pequeñas partículas de cromo en forma de polvo pueden escapar hacia la atmósfera (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

De acuerdo con Tscherwitschke (1979), en la industria de la galvanización, varios metales son revestidos con una capa de cromo, mediante un proceso electrolítico en que el cromo se deposita en una solución sulfúrica ácido-cromada. Durante dicho proceso se generan grandes volúmenes de agua con residuos de cromo, la cual debe ser tratada, porque es muy probable que contenga  $\text{Cr}^{6+}$ , el cual puede ser reducido a cromo trivalente y precipitado como hidróxido.

En los procesos que se llevan a cabo en la industria del bronce, el sulfato de  $\text{Cr}^{3+}$  es el compuesto más importante, el cual escapa en grandes cantidades principalmente en forma de polvo, pero también está presente en los líquidos provenientes del proceso y otros desechos que contienen alrededor de 2% de cromo que es depositado en el ambiente en forma de residuos sólidos. Cabe mencionar que durante estos procesos existe el peligro constante de que los líquidos o aerosoles que contienen cromo, escapen hacia el ambiente (Gauglhofer y Bianchi, 1991). La tabla 5.1 muestra los procesos industriales en los cuales se utiliza el cromo en sus diferentes especies (ATSDR, 2000).

De acuerdo con Wälchli *et al.* (1979), el cromo se impregna fácilmente a la madera de los árboles y puede ser “lavado” parcialmente por el agua de lluvia, lo que puede dar lugar a una infiltración del cromato en la superficie terrestre y posteriormente llegar hasta el agua subterránea, la lluvia también puede transportar este contaminante hasta ríos y ahí ser ingerido por la fauna local. Los mismos autores sugieren que en el transcurso de 20 a 50 años el cromo alcanzará por completo a todo el ambiente circundante.

---

Tabla 5.1 Procesos industriales en los cuales se utiliza el cromo en sus diferentes especies, de acuerdo con ATSDR (2000).

<b>Industria</b>	<b>Especie de Cr</b>
Soldadura de acero inoxidable	Cr <sup>6+</sup>
Manufactura de cromato	Cr <sup>6+</sup>
Cromado de metales	Cr <sup>6+</sup>
Industria de ferrocromo	Cr <sup>3+</sup> y Cr <sup>6+</sup>
Pigmentos de cromo	Cr <sup>3+</sup> y Cr <sup>6+</sup>
Curtido de cuero	Cr <sup>3+</sup> y Cr <sup>6+</sup>
Fabricantes de baterías	Cr <sup>6+</sup>
Pinturas	Cr <sup>3+</sup> y Cr <sup>6+</sup>
Fabricantes de velas	Cr <sup>3+</sup> y Cr <sup>6+</sup>
Fabricantes de caucho	Cr <sup>3+</sup> y Cr <sup>6+</sup>
Cemento	Cr <sup>3+</sup> y Cr <sup>6+</sup>

Los efluentes con cromo se enriquecen con lodos de aguas residuales de los desechos sólidos de las plantas de tratamiento y en ocasiones estos lodos se usan directamente en la agricultura como fertilizantes, lo que permite que el cromo se introduzca en los suelos, por otra parte, cuando el cromo que va en disuelto en el agua no se sedimenta, y puede llegar al mar. Anualmente cerca de 100 000 toneladas de cromo llegan al océano donde permanece en forma coloidal o disuelto en promedio 11 000 años (Bowen, 1979). Durante la incineración de los residuos con contenidos de cromo, éste llega a escapar en forma de ceniza volátil y puede ser oxidado parcialmente a su forma hexavalente.

De las industrias que utilizan el cromo como materia prima, se encuentran: la industria de la construcción (como pigmento), las imprentas (procesos fotomecánicos y de reproducción), la industria del aceite (como anticorrosivo), la industria textil (tinte), la industrias que elaboran juegos pirotécnicos y cerillos (mezclas inflamables), curtidoras (curtido de pieles). Debido a estos procesos industriales, grandes cantidades de cromo en forma de desechos líquidos, sólidos y gaseosos se descargan en el ambiente y pueden, en última instancia, tener un gran impacto en los procesos biológicos y ecológicos Fitch y Franke (1975), Gaughofer y Bianchi, (1991), Kotas y Stasicka, (2000), Zahid *et al.*, (2006).

De acuerdo con Kotas y Stasicka *et al.* (2000), las descargas de desechos industriales aportan cantidades importantes de cromo al suelo y al agua subterránea, bajo la forma de Cr<sup>6+</sup> que es el isótopo más móvil del cromo, mientras que el Cr<sup>3+</sup>, generalmente no se transporta a

grandes distancias, debido a su baja solubilidad en el agua y su tendencia a ser adsorbido en el suelo .

### 5.1. Contaminación por cromo

De acuerdo con Nriagu and Pacyna (1988), la mayor fuente de contaminación de elementos traza para el mar y ríos es el agua residual de uso doméstico y plantas de hierro y acero especialmente para metales como: arsénico, cromo, cobre, manganeso y níquel.

En sistemas acuáticos, los metales están presentes como iones disueltos y complejos, coloides, sólidos suspendidos y sólidos en sedimentos (Larocque y Rasmussen, 1998). Considerando el equilibrio entre  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$  en soluciones aireadas y la concentración de estos metales depende fuertemente de procesos biológicos, reacciones redox, pH, fuerzas iónicas, actividades orgánicas (Kotas y Stasicka, 2000).

La presencia de  $\text{Cr}^{3+}$ , su concentración y su forma, en el ambiente, depende de diferentes procesos químicos y físicos así como de hidrólisis y reacciones redox, como ya se mencionó anteriormente.

Los complejos  $\text{CrOH}^{2+}$  y  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , son los compuestos más comunes que forman el  $\text{Cr}^{3+}$  en el ambiente. El  $\text{Cr}^{3+}$  posee una fuerte acidez que tiene tendencia a formar complejos hexacoordinados con una variedad de enlaces con agua, amonio y compuestos orgánicos (Kotas y Stasicka, 2000).

Los mismos autores señalan que los complejos de  $\text{Cr}^{3+}$  que forman enlaces con moléculas  $\text{OH}^-$  incrementan su solubilidad cuando los enlaces están en forma de iones.

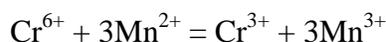
El potencial de  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$  es bastante alto, pero solo algunos oxidantes están presentes en los sistemas naturales, capaces de oxidar el  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$ , por ejemplo, mediante óxido de manganeso (Kotas y Stasicka, 2000).

De acuerdo con Pérez-Benito *et al.* (2001), el  $\text{Mn}^{2+}$  puede reducir el  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$ , mientras que el bióxido de manganeso coloidal ( $\text{MnO}_2$ ) oxida el  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$  en una reacción reversible.

El  $\text{Mn}^{2+}$  reacciona con el  $\text{Cr}^{6+}$ , en algunos ambientes en donde se encuentran presentes reductores orgánicos, actuando como un catalizador en lugar de inhibidor, como generalmente

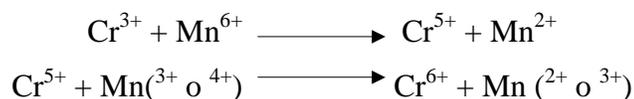
lo hace en otras reacciones, esto sucede cuando el sustrato orgánico participante para reducir al  $\text{Cr}^{6+}$  es capaz de actuar también como un enlace estabilizador para el  $\text{Mn}^{3+}$  y entonces requerirá una baja energía para formar el estado de transición correspondiente a la oxidación de un electrón de  $\text{Mn}^{2+}$  por  $\text{Cr}^{6+}$ .

En una reacción química un solo mol de  $\text{Cr}^{6+}$  puede ser reducido a tres moles de  $\text{Mn}^{2+}$ :



Un incremento en la concentración de una de las dos especies ( $\text{Cr}^{6+}$  o  $\text{Mn}^{3+}$ ) siempre está asociado con una disminución en la concentración de la otra.

Por otra parte, el bióxido de manganeso ha sido reportado como capaz de oxidar  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$ , participación que generalmente se da en reacciones inversas.



En las ecuaciones anteriores, el  $\text{Mn}^{6+}$  actúa como un oxidante en la reacción, (oxida dos electrones) para la conversión directa de  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$ . El  $\text{Cr}^{5+}$  es oxidado a  $\text{Cr}^{6+}$  por  $\text{Mn}^{3+}$  o  $\text{Mn}^{6+}$ .

En resumen, de acuerdo con Kotas y Stasicka (2000), Pérez-Benito *et al.* (2001) y Jonson *et al.* (1992), las reacciones de oxidación y reducción pueden convertir el  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$  y viceversa.

Existen dos formas en las que el cromo se mueve de sistemas terrestres a sistemas de aguas: superficial (escurrimiento) y transporte a través del suelo al agua subterránea.

## 5.2. Factores que propician el desarrollo del $\text{Cr}^{6+}$

Generalmente, los metales son más móviles en agua con pH bajo (Domenico y Schwartz, 1997). Los medios con pH bajo pueden incrementar la solubilidad del cromo, las altas concentraciones en los efluentes pueden deberse a un pH relativamente bajo que decrece en

---

canales de agua con pH más alto, así que de acuerdo con Kotas y Stasicka (2000), el desarrollo de las especies de cromo depende en gran medida del pH. Según los mismos autores, el  $\text{H}_2\text{CrO}_4$  pertenece a un nivel de alta acidez, con un  $\text{pH} > 1$ , el  $\text{CrO}_4^{2-}$  prevalece alrededor del pH 7; en un pH entre 1 y 6 frecuentemente se encuentra el  $\text{HCrO}_4^-$ , que es la forma predominante del  $\text{Cr}^{6+}$  (Figura 5.1).

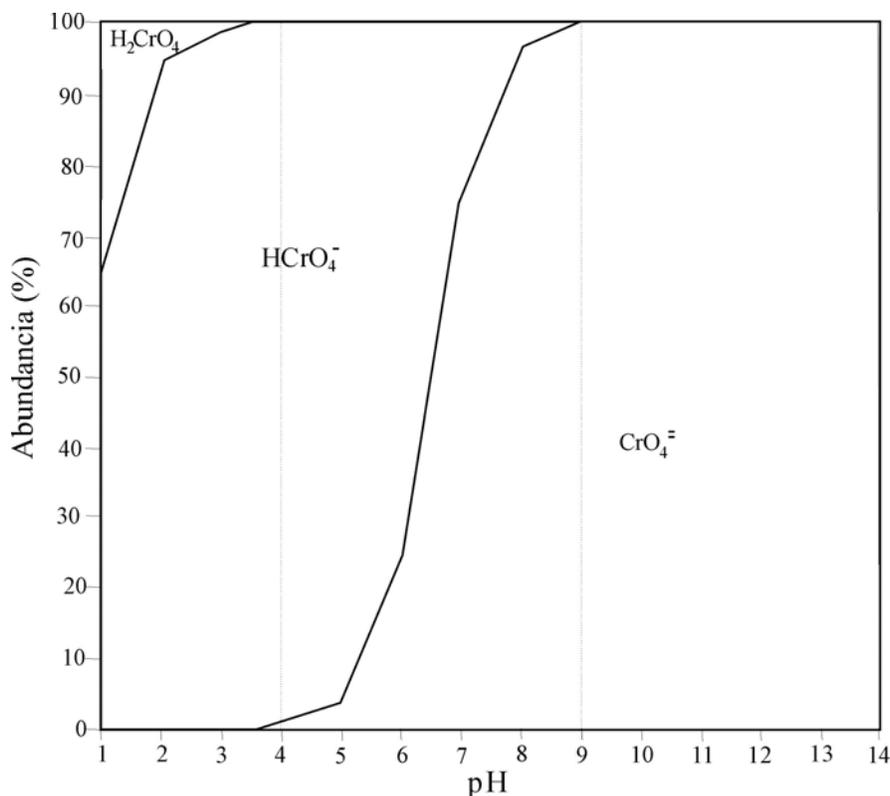


Fig. 5.1 Abundancia de  $\text{Cr}^{6+}$  en soluciones acuosas en concentraciones de  $1 \times 10^{-6}$  en pH 1-14, las líneas verticales punteadas representan el rango de pH de valores que se presentan naturalmente en el agua, (modificado Kotas y Stasicka (2000)).

Las formas más comunes del  $\text{Cr}^{6+}$  en el pH normal del agua son  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCrO}_4^-$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , moléculas que constituyen muchos compuestos que son muy solubles y por lo tanto móviles en el ambiente; sin embargo, los oxianiones de  $\text{Cr}^{6+}$  son fácilmente reducidos a su forma trivalente por donar electrones a la materia orgánica o reducir especies inorgánicas que se encuentran en el suelo, agua y atmósfera (Kotas y Stasicka, 2000).

Es importante señalar que la oxidación de la materia orgánica conduce al desarrollo de condiciones anaerobias y puede liberar metales pesados. La absorción de metales pesados sobre sustancias orgánicas o inorgánicas con frecuencia es una condición temporal (Zahid *et al.*, 2006).

En ambientes moderadamente alcalinos (pH 7.8-9.0), los carbonatos, precipitan por lo general y con ellos, parcialmente, los elementos traza, mientras que en un ambiente neutral (pH 6.5-7.8) los bicarbonatos a menudo son los aniones dominantes y los cationes principales son el Ca y Mg (Hounslow, 1995).

En un ambiente reductor con pH en el rango de 4-9, el  $\text{Cr}^{3+}$  es estable e insoluble, mientras que en un medio oxidante se forma  $\text{Cr}^{6+}$ , estable y muy soluble (Zahid *et al.*, 2006).

En suelos con pH mayor que 6, el cromo se precipita para contaminarlos y absorber  $\text{Cr}^{3+}$  en el horizonte A (Stewart *et al.*, 2003). La reducción del  $\text{Cr}^{6+}$  por disolución de compuestos orgánicos con valores de pH que van de 4 a 8 por lo general es un proceso lento, un suelo con comunidad microbiana puede promover la reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$  bajo condiciones aerobias y anaerobias (Wang *et al.*, 1989).

### 5.3. El cromo en el suelo

La mayor fuente de transporte de cromo en el ambiente es el intemperismo y la erosión de materiales que lo contienen (Kotas y Stasicka, 2000). Los ciclos biogeoquímicos se completan por los procesos de sedimentación y enterramiento de los metales en la corteza terrestre. La duración del ciclo es de millones de años, y queda bastante claro que la actual extracción y dispersión de metales ha provocado un incremento de la cantidad de metales en circulación (Spiro, 2004).

De acuerdo con Kotas y Stasicka (2000), un incremento local de la concentración de cromo en el suelo se debe al polvo con contenido de cromo que es arrojado al ambiente por industrias, así como por el aporte de lodos. En los suelos, la especie de cromo más frecuente se presenta como  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , o  $\text{Cr}^{3+}$ , que es adsorbido por los componentes del suelo, puede ser lavado e introducido al agua subterránea o absorbido por las plantas, ya que según Reyes (1998), el suelo puede retener al cromo que percóle a través del mismo; por lo tanto, el grado

de retención depende de manera importante de la composición del suelo, de la presencia de materia orgánica, de su pH y del grado de oxidación del elemento. En suelos ácidos ( $\text{pH} < 4$ ) estará presente el  $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  y donde el  $\text{pH} < 5.5$ , será frecuente el  $\text{CrOH}^{2+}$ ; ambas formas son adsorbidas por arcillas, proceso que se intensificará por un incremento en el pH y puede ser interrumpido por un incremento en la carga negativa de las arcillas. El proceso de adsorción para inmovilizar al  $\text{Cr}^{3+}$  por ácido húmico, es más efectivo en un rango de pH de 2.7 a 4.5. El ácido cítrico y el ácido fúlvico forman complejos de  $\text{Cr}^{3+}$  solubles, los que mediante procesos de reorganización y oxidación dan origen al  $\text{Cr}^{6+}$ ; los iones  $\text{CrO}_4^{2-}$  y  $\text{HCrO}_4^-$  son las formas más móviles en el suelo, pueden ser tomados por plantas e introducidos a capas más profundas y contaminar el agua subterránea, dependiendo por supuesto, todo esto depende de la composición mineralógica y pH del suelo (Kotas y Stasicka, 2000).

En estudios realizados por Gutiérrez *et al.* (1986), en Tultitlán, Edo de México, la empresa Cromatos de México se dedicó a producir compuestos de cromo empleando métodos a cielo abierto y sin control de sus emisiones, descargas y manejo de residuos, observándose poco movimiento de cromo en el suelo, y no se encontraron evidencias de desplazamientos laterales ni a estratos inferiores; sin embargo, como consecuencia de la evaporación del agua, causada por la alternancia de estaciones secas y húmedas, el cromo soluble puede viajar hacia la superficie y depositarse sobre ella, desde donde puede ser transportado a la atmósfera por el viento (Figura 5.2).

Por otra parte, el hecho de que no exista gran movilidad del elemento en los suelos, no quiere decir que sea nula, pues depende mucho del tipo de material del cual están constituidos y de una u otra forma siempre habrá movilidad, por lo menos, a nivel capilar.

El cromo que permanece en el suelo puede dañar a plantas y bacterias, pero el peligro de la contaminación aérea es mayor por la facilidad de este elemento para introducirse dentro de los organismos vivos (Gutiérrez *et al.*, 1986).

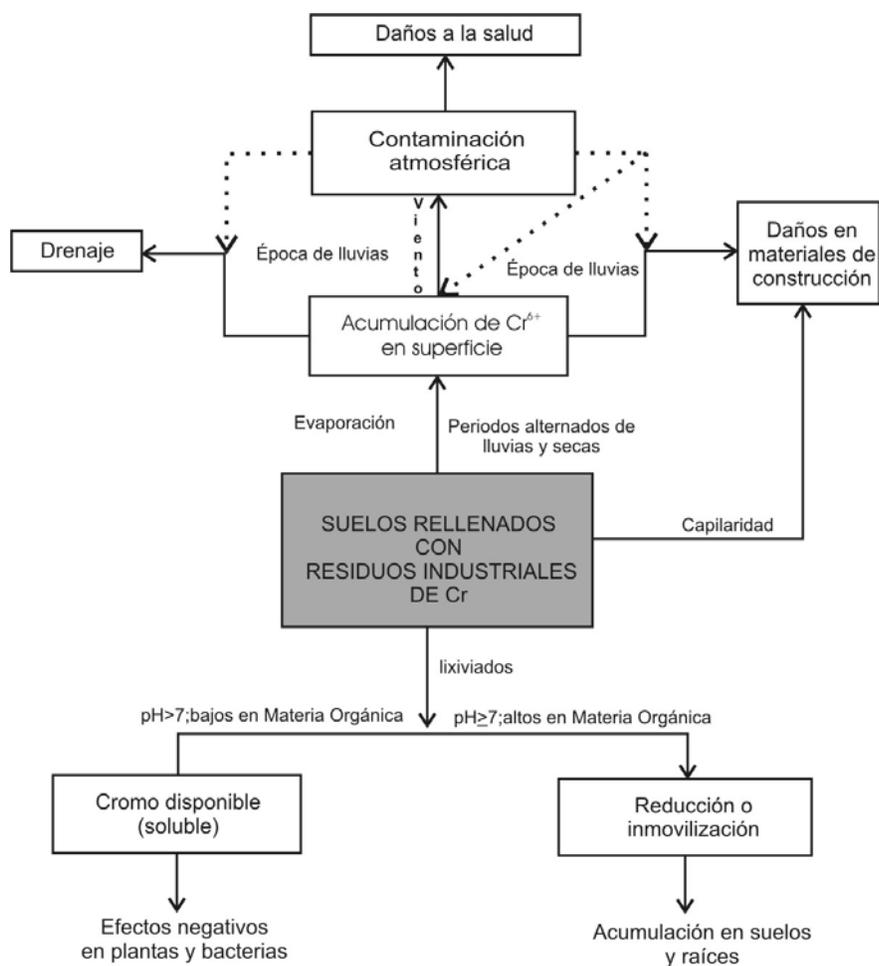


Fig. 5.2 Dispersión del cromo en suelos (modificado de Gutiérrez *et al.*, 1986)

#### 5.4. El cromo en el agua subterránea

Existen dos formas en las que el cromo se mueve desde los sistemas terrestres a acuosos. Esas formas son; superficial (escurrimiento) y transporte a través del suelo hasta el agua subterránea. Los mecanismos de transporte de metales en los ríos están asociados principalmente a partículas suspendidas, las cantidades disueltas decrecen durante su paso a través de corrientes turbidíticas (Kotas y Stasicka *et al.*, 2000). De acuerdo con Reyes (1995), el  $\text{Cr}^{6+}$  entra al agua subterránea a partir de una fuente puntual continua, dentro de la zona saturada y la migración del  $\text{Cr}^{6+}$  está influenciada por la advección, la dispersión mecánica, la difusión molecular y por la transferencia de masa. De acuerdo con el mismo autor, la degradación del agua subterránea local se debe al resultado del movimiento del lixiviado hacia

el acuífero de los desechos de cromo depositados en la superficie del suelo o enterrados. A medida que la solución del contaminante migra hacia el acuífero, se incorporará al agua subterránea del lugar; entonces la composición química de la zona contaminada cambiará continuamente debido a los procesos de dispersión, difusión y reacciones químicas que comenzarán a presentarse, dichas reacciones químicas, serán reguladas por las condiciones del medio granular. Los procesos de adsorción, dilución, precipitación, oxidación y reducción, normalmente ocurren simultáneamente en el agua subterránea contaminada (Reyes, 1995).

Una vez en el acuífero, la dirección del desplazamiento del cromo está estrechamente relacionado, con la dirección de flujo del agua subterránea. Pero si existe extracción de agua el desplazamiento de este contaminante puede verse influido y cambiar la dirección de movimiento, pues se puede dar el fenómeno conocido como inversión de flujo que se refiere al hecho en el que el agua viaja (y con ella el cromo) en dirección inversa al sentido del flujo debido al bombeo excesivo de pozos. Gutiérrez *et al.* (1986), señalan que en zonas donde existe sobreexplotación de acuíferos, la probabilidad de que el Cr viaje a estratos más profundos es poca, sin embargo esto no se podrá evitar si el agua viaja a través de medios fracturados o compuestos de arenas y gravas.

En zonas urbanas, donde existe la problemática de contaminación por cromo, éste se desplaza hacia zonas con pozos de caudales altos y finalmente llega hasta el drenaje, donde puede reaccionar con la materia orgánica y depositarse en forma de sales insolubles o, debido a condiciones de alcalinidad fuertes, mantenerse soluble y pasar a formar parte del caudal de riego de distritos agrícolas cercanos (Figura 5.3).

El cromo entra al océano de dos formas: por ríos y por la atmósfera, pero su distribución es diferente, ya que las entradas atmosféricas lo esparcen más uniformemente que los ríos, sujetos a los procesos y circulación del océano. Los organismos vivos juegan un papel importante en el transporte de metales, por ejemplo, el plancton en las áreas costeras puede tener una fuerte influencia en el transporte de cromo al océano y otras variedades de plankton pueden absorber partes de este metal, también puede ser floculado con pellets fecales o por organismos muertos e incorporarse en los sedimentos (Kotas y Stasicka, 2000).

Por otra parte, el cromo en el agua se puede originar de diversas formas, una de ellas es de forma natural, así como por procesos de intemperismo y erosión en rocas que estén

---

constituidas por cromo, por precipitación de polvo en la atmósfera por la lluvia y por escurrimiento a los sistemas terrestres.

El incremento local de cromo en las aguas superficial (principalmente en ríos) es causado por descargas de desechos industriales; el número y tipo de especies de cromo presentes en los afluentes dependen del carácter del proceso industrial utilizado, pero el cromo hexavalente se encontrará principalmente en desechos de industrias metalúrgicas, refractarias, productoras y de aplicación de pigmentos, de inhibición de corrosión y decorativas (Kotas y Stasicka *et al.*, 2000).

En agua superficial oxigenada, no sólo el pH y la concentración de O<sub>2</sub> juegan un papel importante, sino también la concentración de agentes reductores y medios de oxidación (Kotas y Stasicka, 2000).

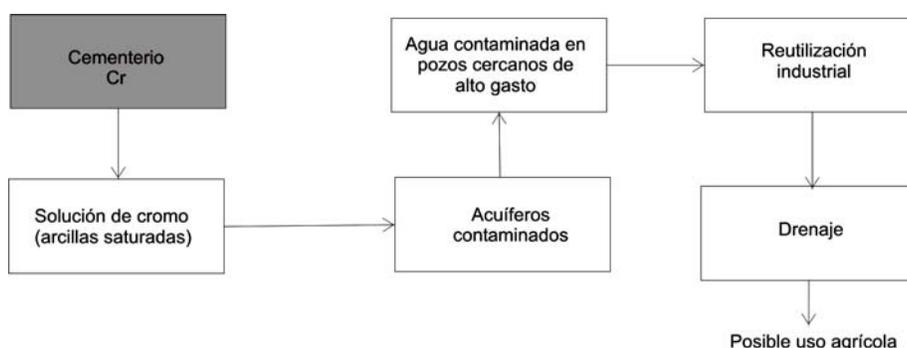


Fig. 5.3 Dispersión del cromo en aguas subterráneas (modificado de Gutiérrez *et al.*, 1986).

### 5.5. El cromo en la atmósfera

La atmósfera se ha convertido en la mejor vía para transportar cromo a diferentes ecosistemas, ya que contiene partículas que son transportadas a diferentes lugares por el viento, antes de caer al suelo y en algunos casos son lavadas por la lluvia y transportadas hacia estratos inferiores (Kotas y Stasicka, 2000).

La cantidad de cromo presente en la atmósfera originado por fuentes antropogénicas es de 60-70% y el de fuentes naturales es de 30-40%, aproximadamente (Seigneur y Constantino,

1995). Las actividades humanas que contribuyen al incremento de cromo en la atmósfera son: industrias metalúrgicas, refractarias, de producción de ladrillos, galvanizado, quema de combustibles y producción de químicos de cromo, principalmente cromatos y dicromatos, pigmentos, trióxidos de cromo y sales de cromo, cementerio de cromo, producción de ácido fosfórico en procesos termales, combustión de basura y lodos que contienen cromo que también son fuentes de contaminación por cromo en la atmósfera (Nriagu *et al.*, 1988).

Las fuentes naturales de transporte de cromo a la atmósfera, son sobre todo las erupciones volcánicas y la erosión de suelos y rocas, y menos importantes, los aerotransportes de partículas disueltas en las sales del mar, y el humo de incendios forestales; se presenta en forma de polvo o gotas y el diámetro de sus partículas va de 0.2-50 nm. Las más pequeñas son las generadas por la combustión de residuos o por la producción de cromatos y ladrillos y pueden ser transportadas a grandes distancias, cuando su tamaño es mayor, generalmente se depositan cerca de la fuente que las produjo (Kotas y Stasicka *et al.*, 2000).

De acuerdo con la NOM-025-SSA1-1993, es importante el tamaño de las partículas, ya que las de diámetros de 0.2 nm-10 nm son respirables y su retención en los pulmones puede provocar cáncer.

La presencia de  $\text{Cr}^{6+}$  en la atmósfera se debe sobre todo a los procesos de oxidación en partículas de aerosoles emitidos a la atmósfera, las condiciones predominantes en la misma favorecen la reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$  (Kotas y Stasicka, 2000).

### **5.6. Soluciones para mitigar la contaminación por cromo**

Aún existen problemas para la atenuación de contaminación por cromo en suelo y agua, sin embargo, al momento se conocen los siguientes. Pueden ser aprovechados los intercambios iónicos y catiónicos que ocurren en suelos de una manera natural, los intercambios iónicos ocurren primordialmente en arcillas y suelos con materia orgánica, aunque todos los suelos y sedimentos tienen la capacidad de efectuar intercambio iónico (Mitchell, 1931). Las arcillas tienen una carga eléctrica especial debido al remplazamiento isomorfo, es decir, son capaces de romper enlaces que forman enrejados, y tienden a absorber grandes cantidades de agua debido a su gran área superficial por unidad de volumen y a su

---

significativa carga eléctrica en la superficie (Fetter, 1994), por lo que pueden ser utilizadas como impermeabilizante y así evitar la contaminación de estratos subyacentes. De acuerdo con Zahid *et al.* (2006), una gruesa capa de arcillas en zonas contaminadas pueden jugar un rol muy importante en el control de los elementos en el agua subterránea.

Cabe considerar que la capacidad de absorción del hidróxido de manganeso e hidróxido de fierro, es mucho mayor que la de las arcillas, en un momento dado esto podría ser de gran utilidad como capa aislante (Zahid *et al.*, 2006).

En cuanto a la capacidad de adsorción (que es la adherencia de un líquido al medio sólido poroso que lo contiene), está ligada a las arcillas, minerales arcillosos, materia orgánica (%C), contenido de óxido e hidróxido (Zahid *et al.*, 2006).

De acuerdo con Perez-Benito *et al.* (2001), el  $Mn^{2+}$  puede reducir el  $Cr^{6+}$  a  $Cr^{3+}$ , mientras que el bióxido de manganeso coloidal ( $MnO_2$ ) oxida  $Cr^{3+}$  a  $Cr^{6+}$  en una reacción reversible.

El cromato también puede ser reducido en una escala de tiempo de minutos a horas por el azufre( $S^{2-}$ ), fierro ( $Fe^{2+}$ ) en procesos llamados “descromificación” (James and Bartlett, 1988), o agentes reductores orgánicos. La reacción de oxidación de  $Cr^{3+}$  a  $Cr^{6+}$  ha sido observada con  $O_2$ , pero las reacciones son relativamente lentas, las reacciones con óxido de manganeso son relativamente más rápidas, pero la velocidad depende de la química de la solución y el óxido de manganeso usado (Jonson *et al.*, 1992, Kotas y Stasicka, 2000).

En lo que concierne al agua subterránea, cuando es imposible remover el material confinado con altas cantidades de cromo, se puede diseñar un sistema de bombeo que mantenga la zona seca y no permita a los lixiviados viajar hacia los mantos profundos. El agua obtenida por este método, debe ser sometida a un tratamiento para eliminar el cromo (Gutiérrez *et al.*, 1986).

Arcillas, óxidos metálicos y coloides orgánicos, pueden absorber y acumular iones metálicos en su superficie y entonces proveer alguna protección para el agua subterránea, pero en el caso de cambios en la química del ambiente, los iones metálicos adsorbidos pueden ser liberados nuevamente (Spiro *et al.*, 2004).

Gutiérrez *et al.* (1986), proponen como una posible alternativa remover el material y tratarlo químicamente para inmovilizar el cromo (reducirlo) y confinarlo en un cementerio

Donde no es posible la remoción, deben ser acidificados los suelos y añadir materia orgánica de origen vegetal con el fin de contribuir a la reducción natural del cromo.

---

Es conveniente plantar la mayor cantidad de árboles, ya que cerca de las raíces existen ambientes favorables a la reducción. Las plantas que crecen en suelos minerales han desarrollado mecanismos de transporte activo de los metales desde la raíz hasta unos compartimentos especiales situados en las hojas donde se almacenan. Este mecanismo de defensa está siendo aplicado para la extracción de metales de sitios contaminados, en un proceso denominado fitoremediación (Spiro, 2004).

En ciertas ocasiones dependiendo del tipo de litología y de la cantidad de contenido y forma del cromo, la atenuación natural puede disminuir el riesgo de contaminación al agua subterránea ya que los principales mecanismos de dilución, adsorción, filtración, reacciones químicas que son capaces de retardar o reducir el movimiento de contaminantes hacia el agua subterránea. y transformación .

### **5.7. Zonas en México con indicios de altas cantidades de cromo por actividades antropogénicas**

En México existió uno de los ejemplos más serios de contaminación por residuos del ion cromo, representado por Cromatos de México, empresa que comenzó a operar a partir de 1958 y permaneció activa durante veinte años en Lechería, Tultitlán, estado de México; casi veinte años después se empezaron a detectar los primeros efectos graves (hemorragias nasales, perforación del tabique nasal con probabilidades de ceguera, úlceras en pies y manos hasta el hueso, cáncer y muerte) en la salud de la gente que realizaba actividades dentro de la planta y cercanas a ésta. Se estima que durante las 2 décadas de operación de Cromatos de México, generó 75 mil toneladas de residuos y tierra contaminada con cromo hexavalente; este gran volumen de contaminantes peligrosos fue depositado en el mismo predio que ocupara la planta industrial, a través de un sarcófago, abierto en el subsuelo y sellado en la superficie. Sin embargo, al paso del tiempo el sarcófago se fracturó, propiciando la filtración de material contaminado hacia el exterior, y lixiviados de cromo hacia la parte basal del contenedor. Este problema originó la contaminación del suelo y del agua subterránea que alimentaba a los pozos cercanos de la empresa (González, 2007).

Otro caso es el reportado en estudios realizados por Rosales y Carranza (1998), reportan altas concentraciones de cromo en el río Coatzacoalcos aparentemente debido a descargas industriales ya que en los últimos años esa área ha tenido un gran desarrollo industrial. La contaminación se vuelve excesiva durante las estaciones secas, debido a que se reduce la capacidad de dilución del río, además los sedimentos cambian su granulometría y composición química de acuerdo con cada estación del año, una de las zonas más afectadas es el puerto Pajaritos, que se encuentra ubicado en la parte baja del río (Rosales *et al.*, 2000). Estos mismos autores han reportado la existencia de altas concentraciones de cromo en el lago de Chapala, ubicado en el altiplano central del país, las que fueron detectadas cerca del Río Santiago, en cantidades de hasta 81.94 ppm; cabe señalar que el lago de Chapala muestra dos zonas: el delta, situado al oriente, con sedimentos contaminados por metales transportados por el Río Lerma, y la zona lacustre, ubicada en el centro-oeste, con bajas concentraciones de metales.

Armienta (1992) y Reyes (1995) reportan contaminación por cromo en el estado de León Guanajuato. El crecimiento de la ciudad de León, Gto., ha originado una explotación intensiva del acuífero que la subyace, pues de acuerdo con la SARH (1982) en el año 1981, el abastecimiento de agua para la ciudad provenía en un 91% del agua subterránea y en un 9% de aguas superficiales; además el desarrollo industrial, principalmente de la industria de la curtiduría y del calzado han contribuido al incremento de descarga de aguas residuales en las cañerías, con altas concentraciones de cromo, cabe señalar que actualmente dichas industrias utilizan el cromo en su estado reducido  $\text{Cr}^{3+}$ , pero sin embargo se sabe que en medios oxidantes fácilmente se oxida a  $\text{Cr}^{6+}$ . En 1983 se detectó la presencia de cromo en uno de los pozos que surte de agua potable a la ciudad; posteriormente, en 1987 se detectó  $\text{Cr}^{6+}$  en los pozos de la batería Oriente, Sur y Turbio así como en algunos pozos dentro de la ciudad, aunque en algunos de ellos se encontraron concentraciones inferiores al límite permisible para el agua potable. Se había considerado a las curtidurías como fuente principal de aporte de cromo al ambiente, pero, otra fuente importante de contaminación en esa zona es la empresa Química Central que produce las sales de cromo que se utilizan en la industria curtidora local (Armienta, 1992).

---

Debido a la importancia que tiene el cromo en la industria, es importante conocer, no sólo el ambiente propicio para la oxidación de  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$ , sino también los elementos que reaccionan con las diferentes especies del Cr y propician su transformación a  $\text{Cr}^{+6}$ , así como aquellas industrias que lo generan. Se sabe que los ambientes ricos en oxígeno o carentes de él favorecen a las reacciones de óxido-reducción del cromo y por ello se tratan de controlar. Actualmente se estudian elementos químicos como el Mn o Fe que son capaces de contrarrestar dichas reacciones para evitar la peligrosidad del Cr, estas investigaciones son importantes ya que en un momento dado, el  $\text{Mn}^{2+}$  puede actuar como remediación.

El desarrollo de las especies de cromo dependen en gran medida del pH y de ahí su movilidad en los medios. Los organismos vivos desempeñan un papel importante en el transporte de metales, ya que tienen la capacidad de absorber parcialmente el metal, del agua y de los suelos, ya que tanto estos como el aire son excelentes medios de transporte y propagación de cromo.

---

## VI. GEOLOGÍA MEDICA DEL CROMO

Las sociedades industriales han combatido exitosamente enfermedades tales como el cólera, la tifoidea, disentería, etc., pero ahora se sufre y enfrenta enfermedades aún más peligrosas como cáncer de pulmón y otros padecimientos relacionados con un mayor grado de contaminación del aire, agua y suelo.

Muchas observaciones realizadas a lo largo de los años han sugerido que en algunas regiones del mundo, dichos padecimientos están relacionados con los ambientes geológicos; sin embargo, es muy poco lo que se sabe sobre la influencia de la geología en los padecimientos crónicos, si se compara con las contribuciones de otros factores ambientales tales como el clima o hábitos alimenticios. Para contrarrestar algunos de estos problemas, es necesario estudiar los aspectos geológicos de la salud ambiental y considerarlos junto con los factores climáticos y culturales asociados (Keller, 1996). De ello se deriva la geología médica, que es un campo de ésta disciplina, en el cual se estudian los efectos de los elementos químicos en el ambiente, especialmente los elementos traza, en la salud humana y los animales (Murck *et al.*, 1996).

### 6.1. Elementos traza

Los elementos traza desempeñan un papel muy importante en el campo de la geología médica. Se pueden definir como aquellos elementos que se encuentran en la Tierra en concentraciones de alrededor de 10 ppm o menos, y una cantidad elevada de estos elementos en el cuerpo humano pueden ser críticos para la vida y la salud (Montgomery, 1991).

La fuente original de los elementos traza son generalmente las rocas (Figura 6.1). De acuerdo con el tipo de roca y su localización, las concentraciones de esos elementos son modificadas por una gran variedad de procesos naturales o actividades humanas, ya sean deliberadas o accidentales (Montgomery, 1991).

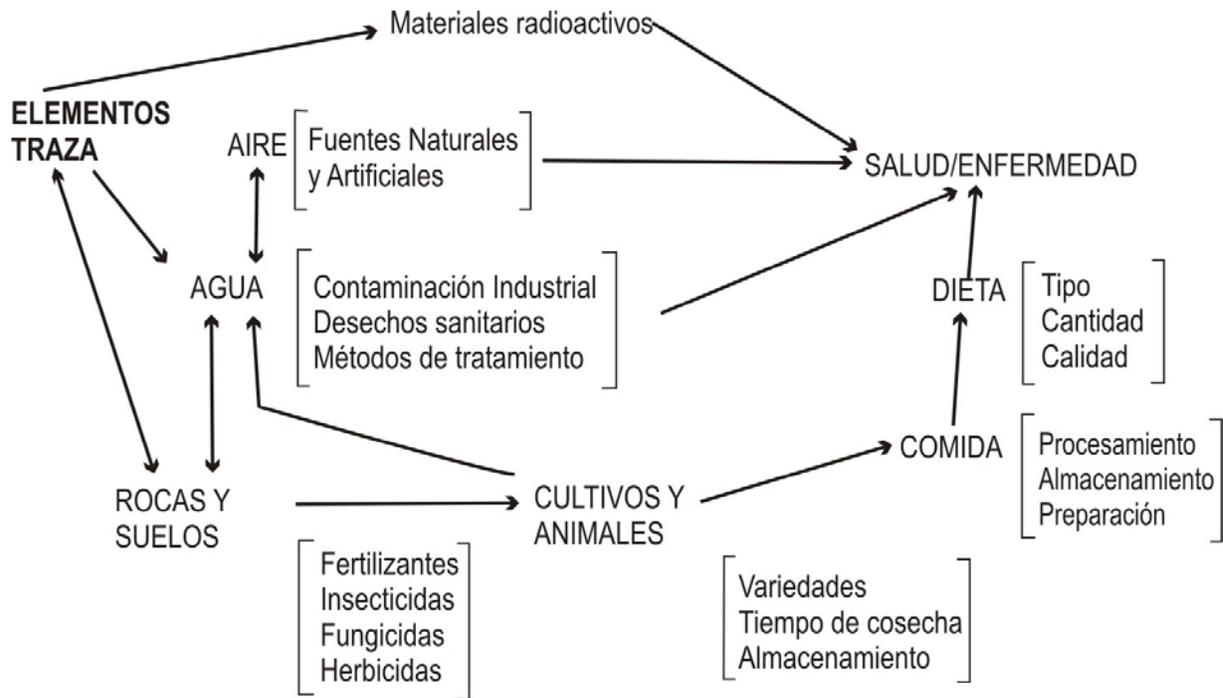


Fig. 6.1 Algunas rutas los elementos traza pueden tomar para concentrarse en el cuerpo humano y ocasionar problemas a la salud (Modificado de Keller, 1996).

## 6.2. El $\text{Cr}^{6+}$ y el $\text{Cr}^{3+}$

El cromo es un elemento ambientalmente importante, cuya forma trivalente es la más estable en la naturaleza, razón por la cual, los organismos distribuyen mayormente los compuestos de  $\text{Cr}^{3+}$  que encuentran en el suelo y en la comida, mientras que las plantas pueden acumular cromo, mostrando una especie específica en altos niveles de acumulación. Los animales excretan el exceso de cromo presente en su dieta (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

Los compuestos de  $\text{Cr}^{6+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  difieren fuertemente en sus efectos cuando entran en contacto con las células. El  $\text{Cr}^{6+}$  es genotóxico y citotóxico para bacterias y células eucariontes, aún en cortos tiempos de exposición y a bajas dosis. La actividad genética del  $\text{Cr}^{6+}$  se define como genotóxica, ya que causa daños en el ADN, que consiste en la sustitución y fragmentación de los cromosomas pares que forman la base del ADN.

Esos daños también afectan a células eucariontes y de mamíferos (Gauglhofer y Bianchi, 1991). De acuerdo con autores como Gale y Bunch (1979) y Knudsen (1980), el  $\text{Cr}^{6+}$  puede provocar alteraciones genéticas que incluso pueden ser hereditarias.

Gauglhofer y Bianchi (1991), sugieren que el  $\text{Cr}^{6+}$  en el ADN puede ser reducido a  $\text{Cr}^{3+}$  para interactuar con los ácidos nucleicos; actualmente, se han hecho experimentos in vitro, que sugieren que si el  $\text{Cr}^{3+}$  alcanza al ADN, es incapaz de dañar al material genético (Kirpnick-Sobol *et al.*, 2006).

De acuerdo con Petrilli *et al.* (1985), se ha demostrado que las células y los tejidos tienen diferente capacidad para reducir el cromo. La eficiencia más baja ha sido encontrada en el tejido pulmonar, que es propicio para la formación de tumores tanto en humanos como en animales. Gauglhofer y Bianchi (1991), proponen que el  $\text{Cr}^{3+}$  no puede ser oxidado a  $\text{Cr}^{6+}$  por el metabolismo celular.

### **6.3. Relación del cromo con la salud**

De acuerdo con Montgomery (1991), el cromo es uno de los elementos esenciales en el cuerpo humano, encontrándose en una concentración de 0.03 ppm. Su función es envolver a la insulina, así que su deficiencia puede ocasionar resistencia a la insulina o baja tolerancia a la glucosa, daños en el crecimiento de los organismos (Reimann y Caritat, 1998) y puede producir diabetes, arteriosclerosis y cataratas en los ojos, así como algunos padecimientos cardiovasculares.

Los animales con dieta ausente de cromo muestran reducción de peso y un intervalo corto de vida. Las deficiencias en cromo son poco frecuentes en el humano y generalmente se limitan a personas de edad avanzada y en raros casos con déficit nutricional (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

El peligro del cromo en el ambiente depende del estado de oxidación en que se encuentre, pues en su forma hexavalente es de 100 a 1000 veces más tóxico que el cromo trivalente, que es más común (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

La absorción, distribución y eliminación del cromo ha sido estudiada en animales y en humanos. El grado de absorción varía de acuerdo con el tipo de compuesto de cromo introducido, como asegura Reimann y Caritat (1998).

El isótopo  $\text{Cr}^{6+}$  es considerado altamente tóxico, incluso carcinógeno. Gray y Sterling (1950), realizaron diversos estudios con cromo hexavalente inyectado por vía intravenosa, pasando fácilmente a través de las membranas de los glóbulos rojos de la sangre y fue sintetizado rápidamente por la hemoglobina. Según Kotas y Stasicka (2000), las propiedades tóxicas de los cromatos se deben a su facilidad de libre difusión para atravesar la membrana celular y a su fuerte oxidación potencial.

Una vez absorbido el cromo, es transportado en el cuerpo a través de la sangre; el  $\text{Cr}^{3+}$  es ligador del plasma proteínico (Langard, 1982), y el  $\text{Cr}^{6+}$  se acumula dentro de los glóbulos rojos, donde puede ser reducido a  $\text{Cr}^{3+}$ . El cromo transportado por la sangre es distribuido a tejidos y órganos que tienen diferentes capacidades de retención (Guthrie, 1982; Langard, 1982; Weber, 1983; Gregus y Klaassen, 1986; Gauglhofer y Bianchi, 1991 y Kirpnick-Sobol *et al.*, 2006). Los más altos niveles de cromo se encuentran en el hígado, riñones, bazo y pulmones, ya que son órganos que tienen mayor capacidad para retenerlo (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

El transporte del cromo por medio de la placenta depende en gran medida del tiempo de exposición durante el embarazo. En estudios realizados en fetos de ratones por Diab y Soedemark (1972) y actualmente por Kirpnick-Sobol *et al.* (2006), se ha demostrado que la mayor cantidad de cromo se encuentra presente cuando se suministra en la etapa tardía del embarazo.

De acuerdo con Gray y Sterling (1950), el cromo trivalente es incapaz de penetrar la membrana celular pero es sintetizado por la hemoglobina cuando ésta ha sido liberada por los glóbulos rojos; estudios muy reciente realizados en levaduras y ratones, ha encontrado que el  $\text{Cr}^{3+}$  en ambientes de oxidación dentro del cuerpo podría llegar a ser incluso más peligroso que la especie  $\text{Cr}^{6+}$  (Kirpnick-Sobol *et al.*, 2006). El cromo trivalente se combina rápidamente con las proteínas.

Los dicromatos se reducen a óxidos de cromo en el cuerpo y se depositan parcialmente en los tejidos y los excretados en la orina. De acuerdo con EPA (1998), los restos de cromo

---

hexavalente son muy solubles con el pH del cuerpo, a diferencia del cromo trivalente que es relativamente insoluble con el pH del cuerpo y que no muestra efectos tóxicos.

La exposición al cromo hexavalente proveniente de residuos industriales tiene como efecto el daño a la piel y al aparato respiratorio, ya que existe contacto directo con dicho metal. La irritación gastrointestinal ocurre por la ingestión de este compuesto (EPA, 1998).

### *6.3.1. Efectos de los compuestos del cromo en la piel*

En la piel se presentan de dos tipos de alteraciones: úlceras y dermatitis. Las úlceras por cromo por lo general se deben al cromato en forma de polvo y a soluciones que no atacan de inmediato a la piel, pero lentamente se acumulan en los poros (EPA, 1998; Reimann y Caritat, 1998).

El tiempo de exposición a estos materiales, la susceptibilidad individual y la higiene personal, son factores importantes que determinan la frecuencia de las úlceras; muchas de ellas pueden ocurrir al mismo tiempo y se localizan principalmente en manos, brazos y pies, es decir, en lugares donde existe contacto directo con el polvo o la solución, así como en las cavidades nasales (EPA, 1998).

En cuanto a la dermatitis, ésta la provoca por el contacto con el cromo hexavalente, pues este isótopo resulta muy irritante al contacto con la piel y puede causar un tipo de dermatitis inflamatoria; sin embargo, una buena higiene personal puede prevenirla. Estos casos son mucho menos comunes que los casos de úlceras.

### *6.3.2. Efectos de los compuestos de cromo en el aparato respiratorio*

Uno de los efectos más comunes que resulta de la inhalación de polvo de cromato o ácido crómico es la ulceración o perforación del conducto nasal y la frecuencia depende del grado de exposición, pues este daño aparece después de seis a doce meses de exposición a los cromatos (Baetjer, 1956; Gad, 1989; Lee *et al.*, 1989; EPA, 1998). Si la exposición es continua, la reacción avanza a lo largo del cartílago, siempre acompañado por sangrado, ya que las membranas mucosas se destruyen.

Otro efecto común del cromo en el aparato respiratorio es el cáncer, principalmente el cáncer de pulmón, también pueden presentarse carcinomas broncogénicos, pero la mayoría de

los tipos de cáncer se sitúan en el aparato respiratorio superior, incluyendo las cavidades nasales, la faringe y la región oral.

Además de los diferentes tipo de cáncer, pueden haber irritaciones crónicas, dando como resultado congestiones nasales, catarro crónico, congestión de laringe, inflamaciones crónicas de los pulmones, enfisema, traquítis, bronquitis crónica, faringitis crónica, bronconeumonía (Baetjer, 1956; Langard y Norseth, 1986; Gad, 1989; Lee *et al.*1989; EPA, 1998).

### *6.3.3. Reacciones alérgicas*

De acuerdo con Gad (1989), Lee *et al.*(1989), y EPA (1998), existen evidencias considerables de que el cromo hexavalente es capaz de desarrollar cierta susceptibilidad en las personas, haciendo que las reacciones alérgicas se presenten principalmente como dermatitis, aunque ocasionalmente como espasmos bronquiales y ocurrencia asmática.

### *6.3.4. Efectos de los compuestos de cromo en los ojos y oídos*

Pueden originarse úlceras en los párpados e irritación conjuntiva en los ojos como resultado del contacto con el ácido crómico y sus sales. En cuanto al oído, puede ocurrir corrosión en la membrana del tímpano y úlceras del canal del oído externo (Gauglhofer y Bianchi, 1991 y EPA, 1998).

### *6.3.4. Efectos de los compuestos de cromo en el aparato digestivo*

La ingestión oral de compuestos de cromo hexavalente puede conducir a una intensa irritación de la región gastrointestinal, originando violentos dolores gástricos, náuseas, vómito, diarrea severa y hemorragias, síntomas que pueden variar desde ligeros hasta graves (EPA, 1998).

Además, entre otros efectos asociados con la exposición prolongada al cromo hexavalente se incluyen las hemorragias en el área intestinal, en bronquios y cavidades, mucosa fibrinoide purulenta en la región respiratoria, daños en el hígado, hiperglicemia (poca tolerancia a la glucosa), leucocitosis que, de acuerdo con López y Suárez (2006), se debe a un aumento en el valor de los leucocitos en la sangre, así como anemia, calambres musculares, pérdida de peso, parálisis y muerte.

---

#### 6.4. Dosis dependencia y dosis respuesta

Hace algunos años fue reconocido que los efectos de los elementos traza en un organismo particular dependen de la dosis o concentración del elemento. Esta dependencia de dosis se puede representar por una curva de dosis-respuesta, cuando varias concentraciones de un elemento presentes en un sistema biológico llegan a presentar los siguientes efectos en los organismos.

1) grandes concentraciones, que pueden ser tóxicas, perjudiciales o eventualmente letales (puntos D, E y F de la Figura 6.2), cuando las concentraciones de los elementos traza son benéficas e incluso necesarias para la vida se representan en los puntos A y B de la Figura 6.2, 2) los puntos de la curva de dosis-respuesta que produce un umbral de concentraciones óptimas y de máximo beneficio para la vida se ubican en B y C, 3) las dos concentraciones máximas (umbrales) en que los efectos son nocivos para el inicio de la vida, una de ellas se encuentra en el punto A y D, un decremento en la concentración de A y un incremento en la concentración de D causa el incremento de daños a la salud.

Los puntos E y F (Figura 6.2) están en el umbral de concentraciones. Desafortunadamente, para pocas sustancias se conocen esos puntos (así como sus efectos en los humanos) y la verdadera importancia del punto D es completamente desconocido.

El ancho de la curva en la porción de máximo beneficio (puntos B y C) para un organismo particular, depende de las características propias de cada organismo, de las diferentes fases de actividad tanto benéfica, dañina o letal, pueden diferir ampliamente cualitativa y cuantitativamente para diferentes sustancias y son completamente observables solo bajo condiciones especiales.

En la figura 6.3 el punto ED-50 representa la concentración en la cual el 50% de la población muestra la respuesta, que puede ser un síntoma particular, el comienzo de una afección o la muerte. De ser así, la dosis efectiva es llamada dosis letal y el ED-50 es la dosis ó concentración en que el 50% de la población puede morir.

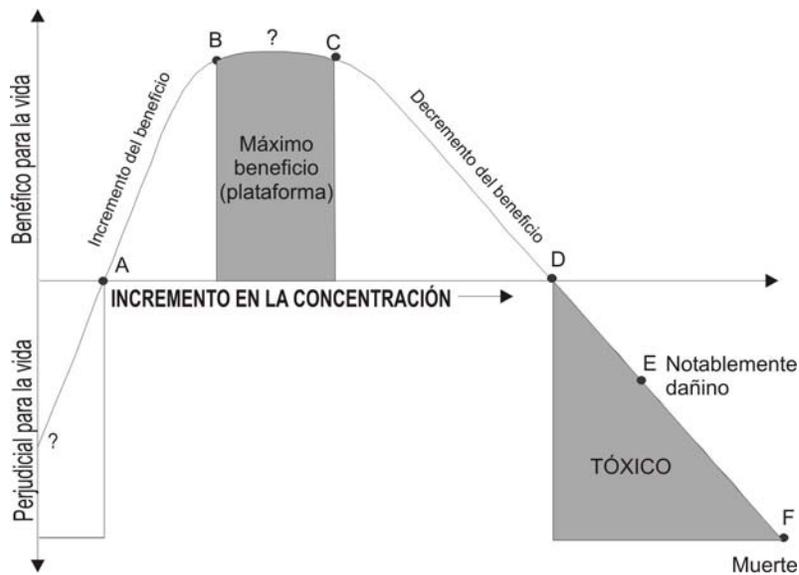


Fig.6.2 Curva dosis-respuesta generalizada (Tomada de Keller,1996 ).

Las tres curvas en la figura 6.3 pueden representar el número de personas que desarrolla un salpullido en respuesta a tres diferentes sustancias tóxicas. La curva A es una curva lineal que sugiere una relación directa entre la dosis del tóxico y el porcentaje de población que muestra una respuesta; en este caso se duplica la dosis inicial y se dañará al doble de gente que desarrolle salpullido. La curva B es una respuesta no lineal en donde los incrementos más rápidos en el porcentaje de personas que muestra una respuesta ocurre entre 25 y 75% de la población. La curva C es una respuesta no lineal que muestra un umbral en el efecto (punto T), lo que significa que las dosis o incrementos en la concentración se han alcanzado después de que el porcentaje de población da una respuesta al incremento.

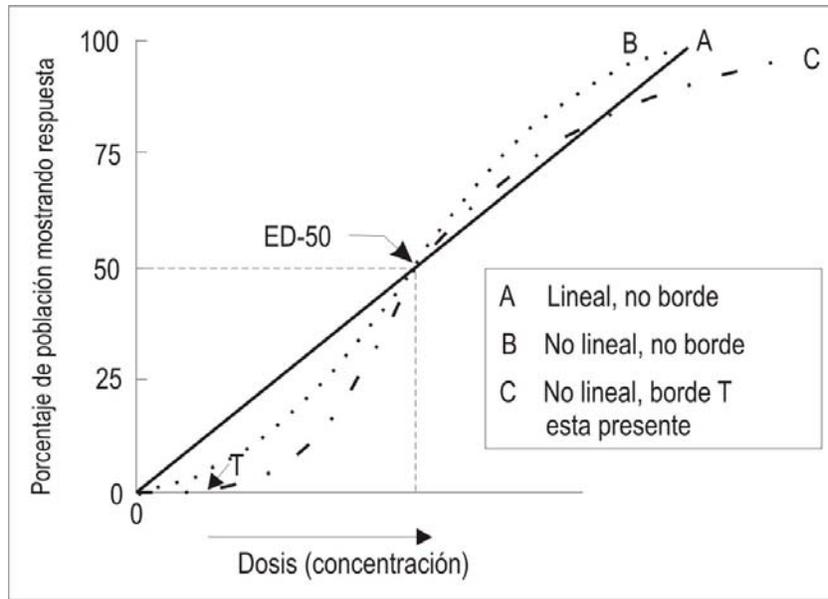


Figura 6.3. Curva teórica de dosis-respuesta tóxica (Tomada de Keller,1996).

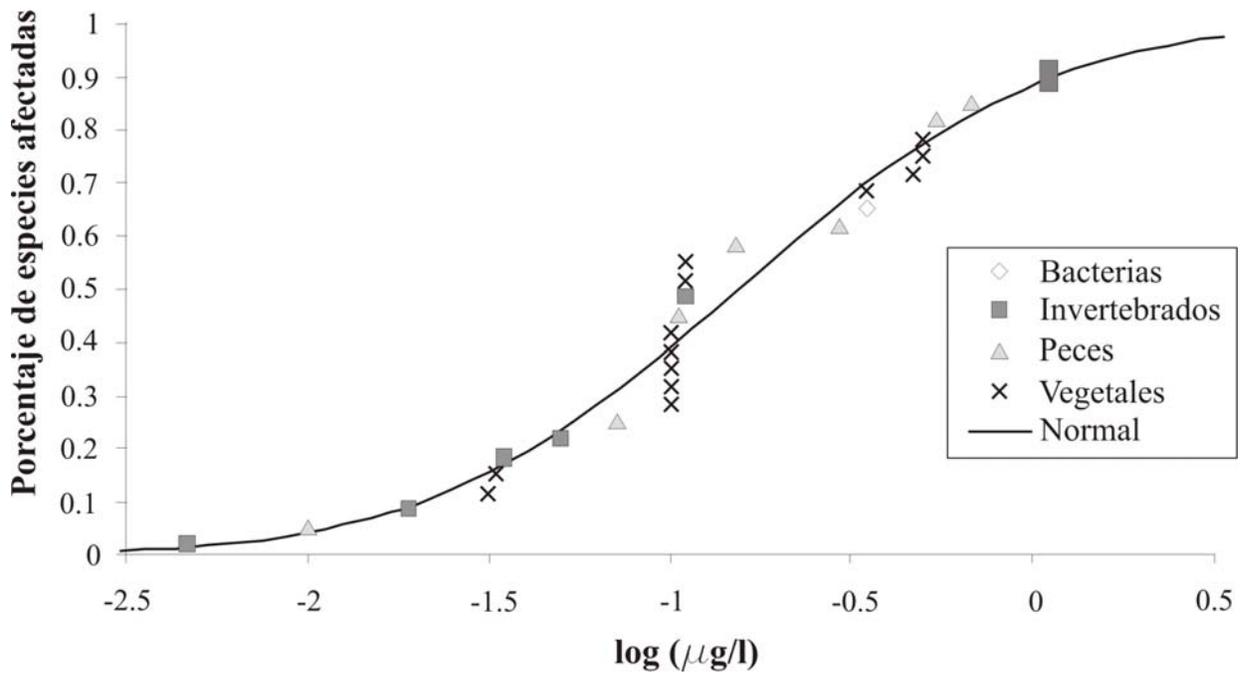


Fig. 6.4 Toxicidad del  $\text{Cr}^{6+}$  en organismos de agua dulce (Modificado de INERIS, 2005).

### 6.5. Cromo en suelos, plantas y animales

De acuerdo con Davis (1956), los efectos del cromo en el crecimiento de las plantas parece estar relacionado con la absorción de cromo del suelo, ya que éste es muy soluble y fácilmente absorbido por las plantas.

Geicke (1943), experimentó aplicando cromo  $C^{3+}$  (baja toxicidad) en compuestos de baja solubilidad, o en suelos relativamente alcalinos en reacciones, y encontró que se pueden aplicar compuestos de cromo en suelos para observar los efectos en las plantas, y demostró que se produce un incremento en el rendimiento de casi todas las plantas cuando pequeñas cantidades de cromo en forma de fosfato, cromita u óxido son utilizadas como fertilizantes.

Los efectos tóxicos del cromo en plantas, fueron reportados desde 1935 por Scharrer y Schropp, (1935) donde los niveles detectados en los suelos excedía los  $10^{-4}$  mg por kg de suelo. El pH del suelo tiene mucho que ver con la distribución de cromo, de acuerdo con Gaughofer y Bianchi (1991), el cromo hexavalente puede reducir el crecimiento de las plantas. Hamence y Taylor (1948) mostraron evidencias que en suelos con valores de pH arriba de 4 se encuentra muy poco cromo en las plantas y no hay gran posibilidad de envenenamiento.

Cuando las plantas y animales carecen de este elemento como requerimiento nutricional, da como resultado la incorporación de materia que contenga cromo en fertilizantes o nutrientes. La estimulación de las plantas depende principalmente de los niveles de cromo así como de la acidez o alcalinidad del suelo. En muchos casos, la aplicación del cromo en plantas se ha llevado a cabo con fines de producción (Davis, 1956).

Por otra parte, existen plantas que adicionan cromo al suelo, cuando eliminan este elemento (papa, maíz, arroz, trigo, avena) (Scharrer y Schropp, 1935; Bertrand y De Wolf, 1986; Gaughofer y Bianchi, 1991).

La naturaleza inerte del óxido de cromo ha conducido a su uso en la nutrición animal, como un medio para la asimilación de otros nutrientes asociados (Davis, 1956).

La baja actividad de algunos compuestos de cromo en animales ha permitido su uso en estudios de constituyentes en la sangre.

### 6.7. Cromo en la comida

En la comida consumida por humanos y animales es importante la forma en la que el cromo esté presente. Biológicamente, el cromo activo puede encontrarse en azúcar refinada, jarabe de betabel y caña, en germen de trigo y de maíz, pimienta, levadura de cerveza, pescado de mar, carne de mamíferos, todos estos alimentos son usados para prevenir la deficiencia de cromo.

En alimentos derivados de animales, los más ricos en cromo de origen biológico son el queso y el hígado. En el cuerpo humano de un adulto la máxima cantidad de cromo se almacena principalmente en el bazo y en el hígado, en cantidades entre 5 y 20 mg.

La cantidad de cromo requerida diariamente por un humano es de 0.01 a 0.04 mg de complejo de cromo orgánico y de alrededor de 0.1-0.3 mg en su forma inorgánica (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

Los efectos del cromo en la salud tienen un importante impacto, ya que carecer de él puede causar daños, como sería incapacidad para sintetizar la glucosa. La especie  $\text{Cr}^{6+}$  tiene una alta peligrosidad, ya que es capaz de causar enfermedades que van desde ulceraciones en la piel, daños al aparato respiratorio, cáncer en el estómago y pulmón, hasta atravesar la membrana celular de los glóbulos rojos. El  $\text{Cr}^{3+}$  considerado menos violento, no está exento de peligrosidad ya que el cuerpo humano es un ambiente propicio para que se lleven a cabo las reacciones de oxidación que permiten su conversión a  $\text{Cr}^{6+}$ . Cabe señalar que también como sistema de defensa se pueden llevar a cabo reacciones de reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$ .

Otro aspecto de gran importancia es conocer las dosis de concentración que puede soportar un organismo antes de presentar daños a la salud para evitar padecimientos en la población; en nuestro país, no existe una curva dosis-respuesta para el elemento cromo que sea de dominio público, lo cual puede indicar la carencia de investigación en este campo.

---

## VII. LEGISLACIÓN AMBIENTAL

Las concentraciones máximas de una sustancia en el medio son aquellas que se han verificado a nivel internacional y en las que no se han detectado efectos adversos en la salud de la población expuesta (Armienta, 1992).

En el aire no contaminado el cromo se encuentra en concentraciones comprendidas entre 0.01 y 0.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que no causa daño a la salud. La contaminación de origen industrial puede elevar las concentraciones de cromo en la atmósfera hasta valores peligrosos.

En el agua, las concentraciones naturales de cromo son bajas. En los ríos varían de 0.1 a 5  $\mu\text{g}/\text{l}$ , mientras en el océano son inferiores a 5 $\mu\text{g}/\text{l}$  (Mertz, 1974).

La presencia de cromo en los alimentos varía considerablemente con rangos entre 20 y 600  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Se encuentran valores de 20-50  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en las verduras, 20  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en frutas, 40  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en los cereales y 20-200  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en alimentos marinos. Se estima que la ingestión diaria de cromo en condiciones normales puede variar de 5 a 500 microgramos, con un valor promedio diario de 100-300  $\mu\text{g}$  (Hatherrill, 1981).

En nuestro país, la SEMARNAT es el organismo gubernamental que se encarga de emitir una serie de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que regulan las emisiones de contaminantes provenientes de fuentes fijas (como por ejemplo, la industria química, la industria del vestido, la industria mineral metálica, etc.) y fuentes móviles (por ejemplo, autos particulares, camiones, etc.); dichas normas están dirigidas a restringir a ciertos niveles las emisiones de óxidos de azufre, óxido de nitrógeno, partículas, compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono. También establece la normatividad que regula la calidad de los combustibles y establece los requerimientos técnicos de los métodos empleados para medir los contaminantes más comunes en el aire (Instituto Nacional de Ecología, 2006). Otro organismo gubernamental mexicano que emite normas es la Secretaría de Salud, que como su nombre lo indica, su principal objetivo es cuidar la salud de la población.

En cuanto al cromo, es importante controlar la presencia de éste, fundamentalmente  $\text{Cr}^{6+}$ , en el ambiente, así como las alteraciones en el equilibrio ecológico.

### 7.1. Normas para la conservación de la buena calidad de aire en México

En México se norman los siguientes contaminantes atmosféricos: bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM10) y plomo (Pb).

Específicamente para el cromo, existe la Norma Oficial Mexicana (NOM-005-SSA1-1993) que establece el método de prueba para la extracción y la determinación del contenido de plomo "soluble" en pigmentos de *chromato* de plomo y cromomolibdato de plomo (Secretaría de Salud, 1994), sin embargo no establece un límite máximo permisible para la emisión de estos compuestos al ambiente.

En cuanto a las emisiones atmosféricas, la sanción por presencia de cromo quedaría inmersa en la NOM-025-SSA1-1993, donde se sanciona la concentración de partículas de 10 micras (tamaño máximo permisible), como contaminantes atmosféricos, debido a que las partículas suspendidas son producto de una gran cantidad de procesos naturales o antropogénicos principalmente del proceso de industrialización, así como de las grandes concentraciones urbanas, primordialmente por la emisión de humos, polvos y gases procedentes de fuentes móviles y fijas.

A dichas partículas se les considera capaces de bloquear los mecanismos de defensa del aparato respiratorio, a nivel de las vías aéreas superiores y alvéolos. Por su contenido de metales pesados, si es el caso, dan lugar a los cuadros específicos correspondientes.

Esta Norma se genera para prevenir, restablecer y mantener la calidad de aire, para reducir la emisión de contaminantes y consecuentemente el riesgo que constituye, el cual depende de algunas de sus múltiples características.

Por esta razón, la norma establece que estas partículas no deben rebasar el límite permisible de 150 µg/m<sup>3</sup>, en 24 horas una vez al año y 50 µg/m<sup>3</sup> en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible de ser afectada (Secretaría de Salud, 1994).

## **7.2. Normas para la conservación de la buena calidad del agua en México**

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas (Secretaría de Salud, 1994).

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, el límite permisible es la concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua sea agradable a los sentidos y no cause efectos nocivos a la salud del consumidor. Esta norma, sanciona al cromo total con un límite máximo permisible de 0.05 mg/l. Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud, en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia (Secretaría de Salud, 1995).

El Instituto Nacional de Ecología y la Comisión Nacional del Agua han expedido en forma coordinada tres Normas Oficiales Mexicanas para la prevención y control de la contaminación del agua.

La NOM-001-SEMARNAT-1996, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Tabla 7.1) SEMARNAT (2003) .

Tabla 7.1. Límites máximos permisibles para cromo hexavalente en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales en mg/l (modificado de SEMARNAT, 2003).

RIOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Protección de vida acuática		Uso en riego agrícola		Uso público Urbano		Explotación pesquera, navegación y otros usos		Recreación		Estuarios		Uso en riego agrícola		Humedales naturales	
P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D
1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0

P. M. = Promedio mensual, P.D. = Promedio diario

La NOM-002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (Tabla 7.2), SEMARNAT, (2003).

Tabla 7.2. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales hacia los sistemas de alcantarillado urbano o municipal en mg/l (modificado de SEMARNAT, 2003).

	PROMEDIO MENSUAL	PROMEDIO DIARIO	INSTANTÁNEO
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1.0

**Nota:** Los límites máximos permisibles establecidos en la columna instantáneo, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.

La NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 2003), establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público y enuncia lo siguiente: “El agua residual tratada y reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola en la tabla (7.1) de la NOM-001-SEMARNAT-1996”.

### 7.3. Normas para la conservación de la buena calidad de los suelos en México

La NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2003) tiene un apartado dedicado a la descarga de aguas residuales en suelos, ya sea de uso en riego agrícola (promedio diario: 1 mg/l, promedio mensual: 0.5 mg/l); o humedales naturales (promedio diario: 1 mg/l, promedio mensual: 0.5 mg/l) (Tabla 7.1).

Por otra parte, se cuenta con la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Esta norma se aplica cuando el suelo se presume contaminado y las especificaciones generales son para extensiones menores o iguales que 1000 m<sup>2</sup> (SEMARNAT, 2007).

Tabla 7.3. Concentraciones de referencia totales para cromo hexavalente en remediación de suelos en mg/kg (extraído de SEMARNAT, 2007).

CONTAMINANTE	USO AGRÍCOLA/RESIDENCIAL/ COMERCIAL	USO INDUSTRIAL
Cromo hexavalente	280	510

Estas cantidades propuestas cambian debido a ciertas especificaciones que cita la norma, como pueden ser las siguientes: extensiones mayores de 1000 m<sup>2</sup>; existencia, origen, naturaleza y extensión de la contaminación; casos en que se determina que existe transporte vertical de los contaminantes y si hay población humana potencialmente expuesta. En tales casos se tomará en consideración la metodología establecida en el Anexo Normativo 2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003).

Cabe destacar que la ONU publica Guías para la ejecución de normas que tengan como objetivo conservar la calidad de aire, agua y suelo con la finalidad de no dañar la salud humana, señalando un límite máximo permisible.

Sobre la calidad del aire urbano, la Organización Panamericana de la Salud-Oficina Sanitaria Panamericana-Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud (2000), propone un Plan Regional Sobre Calidad del Aire Urbano y Salud para el Período 2000-2009, cuyo objetivo es establecer o fortalecer programas nacionales y locales de manejo de la calidad del aire en exteriores e interiores.

En lo referente a agua, las Guías de la OMS para la calidad del agua potable, como base para la elaboración de reglamentos y normas orientados a garantizar la inocuidad del agua potable, han sido utilizadas por países de todo el mundo, en desarrollo y desarrollados. Nacen a partir de la necesidad de prestar atención prioritaria a la garantía de la inocuidad microbiológica, proporcionan valores de referencia correspondientes a numerosos peligros de origen químico en el agua potable, así como en el agua residual. Estas guías abordan las funciones y responsabilidades de los diferentes interesados, incluidas las funciones complementarias de los órganos nacionales de reglamentación, los proveedores de agua, las comunidades y los organismos de vigilancia independientes (ONU, 2004).

Para el contenido de cromo total en el agua potable, la OMS, en su Guía para la calidad del agua potable (2004), sanciona, como un valor provisional, 0,05 mg/l (p) para cromo total como límite máximo permisible, valor provisional ya que se han encontrado evidencias de que el elemento es peligroso pero existe escasa información disponible relativa a sus efectos en la salud.

Como se puede inferir de lo expuesto, en nuestro país no existe una norma que sancione particularmente a la emisión de cromo en el aire, como es el caso del plomo, ozono, CO<sub>2</sub>,

---

monóxido de carbono; la norma que más se apega es la NOM-025-SSA1-1993, que sanciona la concentración de partículas suspendidas.

Con respecto a los suelos, la NOM-001-SEMARNAT-1996 sanciona la descarga de aguas residuales en los suelos, ya sea de uso de riego agrícola o en humedales naturales, para ambos las cantidades máximas permisibles son: promedio diario 1 mg/l, promedio mensual 0.5 mg/l, cantidades que varían si se considera que el suelo es la zona no saturada, donde se lleva a cabo la recarga de acuíferos, y en donde principalmente se puede llevar a cabo la contaminación del agua subterránea.

Las normas establecidas por la ONU, así como las de nuestro país, dan un énfasis particular y un mayor cuidado en lo referente al agua potable.

En las normas existentes que censuran de alguna manera el cromo, ya sea en aire (como partícula), agua o suelo, solamente lo hacen para el cromo hexavalente, ya que se considera la forma más peligrosa de dicho elemento; sin embargo sabemos que el cromo trivalente, que aunque no está considerado como de alta peligrosidad, reacciona fácilmente bajo condiciones oxidantes a cromo hexavalente.

---

## VIII. CONCLUSIONES

Este estudio bibliográfico sobre el cromo permite confirmar la importancia de este elemento en el ambiente debido a su origen, abundancia e impacto en la salud pública.

### Característica del cromo

El cromo es un elemento que puede presentar cinco diferentes estados de oxidación, debido a su química particular, pero únicamente los estados  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$  tienen gran importancia en el ambiente debido a sus propiedades reactivas y su capacidad para cambiar de estado de oxidación. Es importante conocer dicho estado ya que define la peligrosidad del elemento.

### Abundancia del cromo

El cromo es un elemento común principalmente en rocas máficas y ultramáficas como peridotitas y serpentinitas; es abundante en espinelas cromíferas, la más común es la cromita que llega a formar yacimientos minerales, que en nuestro país son escasos. Puede estar presente en el suelo y haber sido adquirido por procesos de intemperismo y/o erosión de rocas que lo contengan y estén aflorando en la superficie terrestre. El agua subterránea, difícilmente lo adquiere a partir de la concentración de las rocas. Las altas concentraciones de este elemento, se debe más comúnmente en nuestro país a actividades antrópicas, de industrias que utilizan el cromo en sus procesos.

### Contaminación por industrias

Las industrias más comunes que procesan con cromo son las siguientes: construcción, pintura, del aceite, textil, fuegos pirotécnicos, en el tratamiento de agua residual, fertilizantes, curtido de pieles, galvanizado de otros metales, materiales de audio y video, oxidación de compuestos orgánicos y como catalizador químico. Debido a su importancia en la industria es importante controlar los ambientes propicios para las reacciones de oxidación de  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$ . Actualmente se estudian métodos de remediación para contrarrestar el  $\text{Cr}^{6+}$ , entre ellos se encuentran principalmente aquellos que aprovechan el intercambio iónico y catiónico que ocurre de forma natural en suelos; otros métodos aprovechan la acción remediadora de plantas y animales que son capaces de absorber cromo.

### Daños a la salud

Los efectos del cromo en la salud tienen un importante impacto ya que carecer de él ( $\text{Cr}^{3+}$ ) puede causar daños, como sería incapacidad para sintetizar la glucosa. La especie  $\text{Cr}^{6+}$  tiene una alta peligrosidad ya que en altas concentraciones es capaz de causar enfermedades que van desde ulceraciones en la piel, daños al aparato respiratorio, cáncer en estómago y pulmón e incluso atravesar la membrana celular de los glóbulos rojos alterando el código genético. En el cuerpo humano existen ambientes propicios para la oxidación de  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$ , por lo que la presencia de  $\text{Cr}^{3+}$  puede ser un peligro potencial, a pesar de que se considera inofensivo.

Es importante conocer la dosis de concentración que puede tolerar un organismo antes de presentar padecimientos ante el déficit o exceso de cromo, que se representa con la curva dosis-respuesta, en nuestro país no existe una curva para éste elemento que sea de dominio público, lo cual puede indicar la carencia de investigación en este campo.

Dentro de las normas que se encargan del cuidado de la salud, censurando de alguna manera las altas concentraciones de cromo en el aire, agua o suelo, solamente lo hacen para el cromo hexavalente sin considerar el potencial del  $\text{Cr}^{3+}$ .

---

## IX. RECOMENDACIONES

Es recomendable incrementar y apoyar investigación relativa a conocer las especies que del ión cromo existen, así como las condiciones oxido-reducción, para evitar conversiones del elemento a una forma más peligrosa

- Debido a que las rocas ultramáficas difícilmente afloran se recomienda hacer estudios geológicos a detalle en zonas donde existan estas rocas para detectar concentraciones naturales de Cr en agua o suelo, que pueda tener un efecto nocivo en la salud de la población de la zona elegida, esto también puede conducir a encontrar nuevos yacimientos minerales.
- Para tener cuantificada la abundancia aproximada de cromo por actividades antrópicas se recomienda tener un censo de las industrias que lo utilizan en alguno de sus procesos y saber el procedimiento y destino de sus residuos. También es importante mantener supervisión gubernamental para evitar el mal manejo de residuos tóxicos. Ya que las reacciones redox son agentes muy importantes para la reacción:  $\text{Cr}^{3+}$  a  $\text{Cr}^{6+}$  y viceversa, es recomendable controlarlas.
- Sancionar la presencia de fábricas que dentro de su proceso de manufactura utilicen elementos contaminantes como el cromo en zonas densamente pobladas.
- Mientras no se logre una gran eficiencia en la reducción de las emisiones del cromo al ambiente, se recomienda evitar la instalación de industrias que emiten desechos de este elemento en las inmediaciones de zonas urbanas.
- En nuestro país existe una urgente necesidad de investigaciones a detalle de contaminación por cromo en localidades donde se realizan actividades industriales donde interviene el cromo y en general de elementos traza importantes en el ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR ). 2000. Reseña Toxicológica de los Cromo (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios humanos de EE. UU., Servicio de Salud pública.  
[http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs7.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html)
- Alwens, W. and W. Jonas, 1938. Chrome lung cancer, *Acta Unio Internationalis contra Cancrum*, 3:1-114. Cited in Udy, M. J., 1956. *Chromium*. Volume I, Williams & Heintz, Washington, 109 pp.
- Amin, M.S., 1948. *Economic Geology*, 43, 133. Cited in Chapter 2, *Mineralogy and Geology of Chromium*, Thayer, T.P., U.S.Geol. Survey Bull., in Udy, M. J., 1956. *Chromium*. Volume I. Williams & Heintz, Washington, (14-52 pp.).
- Armienta, M. A. 1992. Contribución al estudio de los mecanismos de transporte del cromo en el acuífero de León Guanajuato. Ph.D. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, 208 pp.
- Arredondo-Guerrero, P., 2003, *Geology of the Mazatlan Region Southern Sinaloa State, Mexico (resumen)*, in *Geological Society of America, Cordilleran Section, Guide book for the field trips of the 99th annual meeting: Puerto Vallarta, Jalisco, México, Abstracts with Programs*, 35(4), 71 p.
- Baetjer, A. M., 1956. Relation of Chromium to Health. in Udy, M. J., 1956. *Chromium*. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 77-109 pp.
- Bateman, A. M. y J. L. Amorós (traductor), 1978. *Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico*. Ediciones Omega, S.A, Barcelona, 975 pp.
- Bertrand, D. y de Wolf, A., 1986. Nécessité de l'oligo-élément chrome pour la culture de la pomme de terre. *C.R. Acad. Sci. Ser. D.*, Paris, 266, 1494-1495.
- Bowen, N.L., 1969. *The Evolution of the Igneous Rocks*. Princeton University Press, Princeton, N.Y., 332 pp.
- Bowen, N. L., 1979, *Environmental Chemistry of the Elements*. Academic Press, London-New York-Toronto-Sydney-San Francisco.
- Cabrera-Ramirez, M. and A. Carranza-Edwards., 2002. The Beach Environment in México as a Potential Source of Placer Minerals. *Marine Georesources and Geotechnology*, 20:187-198, 2002.
- Cepeda, D. L., 1985. *Apuntes de Petrología Ígnea*. UNAM, Facultad de Ingeniería, Departamento de Yacimientos Minerales, México, 363 pp.

- Chang, R., 2002. Química. Séptima Edición McGraw-Hill, Colombia, 1064 pp. CONAGUA, 2007. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua.  
<http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>
- Curtis, A., J. Morton., Ch. Balafa., S. MacNeil., D. Gawkrödger., N. D. Warren., G. Evans. 2007. The effects of nickel and chromium on human keratinocytes: Differences in viability, cell associated metal and IL-1 $\alpha$  release. Toxicology in Vitro 21:809-819.
- Dana, E.S., 1969. Tratado de mineralogía; con un tratado extenso sobre cristalografía y mineralogía física. 4ª Edición. Continental, México 912 pp
- Dana, E.S. y W.E. Ford, 1986. Tratado de Mineralogía. 4ª Edición. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México 912 pp.
- Davis, G. K., 1956. Chromium in Soils, Plants and Animals Capitulo 5. in Udy, M J, 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, (105-109 pp.)
- Diab, M., and R. Soedermark. 1972. Nucl. Med. 11, 419-429. cited in Gaughlofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and their compounds in the environment, occurrence, analysis and biological relevance. VCH, USA, New York.
- Domenico, P. A., F. W., Schwartz. 1997. Physical and Quematical Hydrogeology. Wiley, New Cork, 506 pp., cited in Zahid, A., K. D. Balke, M. Qumrul Hassan, M. Flegr. 2006. Evaluation of aquifer environment under Hazaribagh leather processing zone of Dhaka city. Environ Geol 50: 495-504.
- Earnshaw, A, T.J. Harrington y G. Garduño (traductor), 1977. Química de los Elementos de Transición. Serie Oxford de Química. Editorial El Manual Moderno, S.A, México, D.F.
- EPA, 1998. Toxicological Review of Hexavalent Chromium. U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC. <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0144-tr.pdf>
- Fetter, C. W. 1994. Applied hydrogeology, Prentice may, New Yersey, 691 pp., cited in Zahid, A. K. D. Balke, M. Qumrul Hassan, M. Flegr. 2006. Evaluation of aquifer environment under Hazaribagh leather processing zone of Dhaka city. Environ Geol 50: 495-504.
- Fichte , R. and Franke, H. 1975. Chromium and ferrochrome (in German), in: Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 4<sup>th</sup> Ed., Vol. 9, pp. 589-623. Verlag Chemie, Weinheim.
- Flores, R. A., 2003. Presencia de Pb, Cr, Co, Ni, y Cd en las aguas residuales de la presa Manuel Ávila Camacho, Edo de Puebla y sus efectos en la agricultura. M. en C. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 178 pp.
- Gad, C. S., 1989. Acute and chronic systemic chromium toxicity. Sci. Tot. Environ. 86, 149-157pp.

- Gaughlofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and their compounds in the environment, occurrence, analysis and biological relevance. VCH, USA, New York.
- Gale, T. F., and J. D., Bunch. 1979. Teratology. Cited in Gaughlofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and their compounds in the environment, occurrence, analysis and biological relevance. VCH, USA, New York.
- Geicke, C. 1943. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. Cited in Baetjer, A. M. 1956. Relation of Chromium to Health. in Udy, M J, 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, (77-109 pp).
- Gethrie, B. E. 1982. Chapter 6: The Nutritional Role of Chromium. Cited in Gaughlofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and their compounds in the environment, occurrence, analysis and biological relevance. VCH, USA, New York.
- González, M, J. A. Banderas, C. Raya, A. Báez, R. Belmont. 1997. Cuantificación de plomo, cadmio y cromo mediante sialoquímica. Salud Pública Méx; Vol. 39(3):179-186.
- Gray, S. J. and K. Sterling. 1950. Clin. Invest. Cited in Baetjer, A. M. 1942. Relation of Chromium to Health. in Udy, M J, 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, (77-109 pp.)
- Gregus, Z., and C. D. Klaassen, 1986. Deposition of Metals in Rats: A Comparative Study of Fecal, Urinary, and Biliary Excretion and Tissue Distribution of Eighteen Metals. Cited in Gaughlofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York.
- González Calderón, Martha H., 2007. Con Punto de Acuerdo, por el que se Exhorta a la SHCP y a la SEMARNAT a Programar y Coordinar la Inversión de Recursos para el Proyecto Integral de Saneamiento Ambiental en la Zona del Depósito de Residuos Industriales que Ocupaba la Empresa Cromatos de México, en Tultitlán, México, a Cargo de la Diputada Martha Hilda González Calderón, del Grupo Parlamentario del PRI.  
[http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2007/04/asun\\_2341828\\_20070426\\_1179774506.pdf](http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2007/04/asun_2341828_20070426_1179774506.pdf)
- Gutiérrez, R. M. E., V. G. Bocco, B. S. Castillo, 1986. Contaminación por Cromo en el Norte de la Ciudad de México. Un Enfoque Interdisciplinario. Boletín Instituto de Geografía, UNAM, 16 (1986) 77-125 pp.
- Hatherrill, J. R., 1981. Drug and Chemical Toxicol. 4(3): 185-195. En Pollution Abstracts, 82: 5530 pp. cited in Armienta, M. A. 1992. Contribución al estudio de los mecanismos de transporte del cromo en el acuífero de León Guanajuato. Ph.D. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Hamence, J. H., and G. Taylor, 1948. F. Feed J. Cited in Baetjer, A. M. 1956. Relation of Chromium to Health. in Udy, M.J, 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 77-109 pp.
- Henry, C. D., G. Fredrikson, 1987. Geology of Southern Sinaloa Adjacent to the Gulf of California: Geological Society of America, Map and Chart Series, 1 Sheet.
- Henry, C.D., F.W. McDowell, L.T., Silver, 2003. Geology and geochronology of granitic batholithic complex, Sinaloa, México; implications for cordilleran magmatismo and tectonics, in Johnson, S.E., Paterson, S.R., Fletcher, J.M., Girty, G.H., Kimbrought, D.L., Martín-Barajas, A. (eds.), Tectonic evolution of northwestern México and southwestern USA: Boulder, Colorado, EE.UU., Geological Society of America, Special Paper 374, p. 237-273.
- Hess, H. H., 1955. Geol. Soc. Am. Spec. Paper 62. Cited in Huang, W. y R. García (traductor), 1968. Petrología. Unión Topográfica Editorial Hispano Americana, México, D.F, 546 pp.
- Heumann, K. G., S. M. Gallus, G. Rädlinger y J. Vogl, 1998. Accurate determination of elements species by on-line coupling of chromatographic systems with ICP-MS using isotope dilution technique. Spectrochim. Acta B 53, 273-287. Cited in Kotas, J, Z. Stasicka, 2000. Chromium occurrence in the environment and methods on its speciations. Environ. Pollut. 107:263-283.
- Hounslow, A. W., 1995. Water quality data-analysis and interpretation. Lewis Publishers, New York, 432 pp.
- Huang, W. y R. García (traductor), 1968. Petrología. Unión Topográfica Editorial Hispano Americana, México, D.F. 546 pp.
- Huffman, E. W. D., 1973. Ph. D. Thesis, Cornell University, Ithaka, N.Y. Cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York.
- INERIS, 2005. Crome et ses Derives.  
[www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=143](http://www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=143)
- Instituto Nacional de Ecología, 1996. Experiencias Derivadas del Manejo Inadecuado de Residuos Peligrosos.  
<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/139/experiencias.html>
- INE, 2006. Normatividad. <http://www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/normatividad.html>
- INE, 2007. Instituto Nacional de Ecología. <http://www.ine.gob.mx/about.html>
- Johnson, C. A., L. Sigg, U. Lindauer, 1992. The chromium cycle in a seasonally anoxic lake. Limnol. Oceanogr. 37:315-321.

- Keller, E. A., 1996. Environmental Geology. Seventh Edition. Prentice Hall, Nueva Jersey, USA, 560 pp.
- Kieffer, F., 1979. Spurenelemente steuern die Gesundheit. Sandoz Bull. 52, 18-19, cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York..
- Kimbrough, D.L., Moore, T.E., 2003. Ophiolite and volcanic arc assemblages on the Vizcaíno Peninsula and Cedros Island, Baja California Sur, México, en Servicio Geológico Mexicano, 2007. Texto Explicativo de la Carta Geológica de México.  
[http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto\\_explicativo.pdf](http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto_explicativo.pdf)
- Kingston, H. M., D. Huo, Y. Luy y S. Chalk, 1998. Accuracy in species analysis: speciated isotope dilution mass spectrometry (SIDMS) exemplified by the evaluation of chromium species. Spectrochim. Acta B 53, 299-309. Cited in Kotas, J, Z. Stasicka, 2000. Chromium occurrence in the environment and methods on its speciations. Environ. Pollut. 107:263-283.
- Kirpnick-Sobol, Z., R. Reliene y R. H. Schiestl, 2006. Carcinogenic Cr(VI) and the nutritional supplement Cr(III) induce DNA deletions in east and mice. Cancer Res. 66: 3480-3484 pp.  
<http://cancerres.aacrjournals.org/cgi/content/full/66/7/3480#FIG4>
- Kotas, J, Z. Stasicka, 2000. Chromium occurrence in the environment and methods on its speciations. Environ. Pollut. 107:263-283.
- Knudsen, I., 1980. The Mammalian Spot Test and its Use for the Testing of Potential Carcinogenicity of Welding Fume Particles and Hexavalent Chromium. Cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York..
- Langard, S., 1980. Biological and environmental aspects of chromium, Elsevier Biomedical 149-146 pp. Cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York.
- Langard, S. and T. Norseth, 1986. Chapter 8: Chromium. Handbook on the Toxicology of Metals, Vol. II., 185-210 pp. Cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York..
- Larocque, A. C. L. and P. E. Rasmussen, 1998. An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation. Environ. Geol., 33:85-90 pp.
- Lee, K. P., C.E. Ulrich, R.G. Geil, y H. J. Trochimowicz, 1989. Inhalation toxicity of chromium dioxide dust to rats after two years exposure. Sci. Tot. Environ. 86, 83-108.

- Leege, T.M., 1924. Lesions Resulting from Manufacture and Use of Potassium and Sodium Bichromate cited in Baetjer, A. M., 1942. Relation of Chromium to Health. in Udy, M. J., 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 77-109 pp.
- Lehmann, K. B., 1932. Zentr. Gewerbehyg. Unfallverhüt, 19, 168. Cited in Udy, M.J., 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 132 pp.
- López, C. S., Ma J. Suarez, M, 2006. Leucocytosis.  
<http://www.fisterra.com/guias2/PDF/leucocitos.pdf>
- Machle, W. and F. Gregorius, 1948. Public Health Repts cited in Baetjer, A. M., 1942. Relation of Chromium to Health, in Udy, M. J., 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 77-109 pp.
- Mertz, W. , 1974. Chromium. In Geochemistry and the Environment. A Report of the Workshop at the Asilomar Conference Grounds Pacific Grove, Calif. V.I. National Academic of Sciences. Washington D.C., 29-35 pp.
- Miller, R., J. Am, 1953. Studies in Petrology and Mineralogy. Cited in Thayer, T.P, 1942. U.S. Geol. Survey Bull, in Udy, M. J., 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 14-52 pp.
- Mitchel, J., 1932. The origin, nature and importance of soils organic constituents having base exchange properties. J Am. Soc. Agron., 24: 256-275.
- Moore, T.E., 1983. Geology, Petrology and Tectonic Significance of Paleocene Terranes of the Vizcaino Peninsula, Baja California Sur, Mexico. Tesis Doctoral, Stanford University, 376 pp. Cited in Servicio Geológico Mexicano, 2007. Texto Explicativo de la Carta Geológica de México.  
[http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto\\_explicativo.pdf](http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto_explicativo.pdf)
- Moore, T.E., 1985. Stratigraphic and tectonic significance of the Mesozoic tectonostratigraphic terranes of the Vizcaino Peninsula, Mexico, in Howell, D. (ed.), Tectonostratigraphic terranes of the Circum Pacific region: Houston, Texas, EE.UU., Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources, p. 315-329. Cited in Servicio Geológico Mexicano, 2007. Texto Explicativo de la Carta Geológica de México.  
[http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto\\_explicativo.pdf](http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto_explicativo.pdf)
- Mortimer, E. Ch., 1983. Química. Muchlenberg College. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 768 pp.
- Montgomery, C. W., 1991. Environmental Geology. Third Edition. Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, USA, 465 pp.
- Murck, B.W, B. J. Skinner y S. C. Porter, 1996. Environmental Geology. Jhon Wiley & Sons, Inc, Toronto, 535 pp.

- Nriagu J. O., J. M. Pacina, 1998. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water, and soils by trace metals. *Nature* 333:134-140.
- Nusko, R., Heumann, K. G., 1994. Chromium speciation with isotope dilution mass spectrometry. *Analyt. Chim. Acta* 286, 283-290.
- OMS, 2004. Guías para la Calidad del Agua Potable, Tercera edición. Organización Mundial de la Salud. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3rev/es/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/es/index.html)
- OMS, 2007. Acerca de la OMS. Organización Mundial de la Salud. <http://www.who.int/about/es/>
- Organización Panamericana de la Salud-Oficina Sanitaria Panamericana-Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. 2000. Plan Regional Sobre Calidad del Aire Urbano y Salud para el Período 2000-2009. <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/planreg/planes05.pdf>
- Ortíz-Hernández, L.E., Chiodi, M., Lapierre, H., Monod, O., Calvet, P., 1992, El arco intraoceanico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato. Características geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas; implicaciones geodinámicas: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(1): 27-40.
- Palache, C., H. Berman, C. Frondel, 1944. Dana's System of mineralogy. Vol. 1, 7<sup>th</sup> Ed. Wiley, New York cited in Thayer, T.P, 1942. U.S.Geol. Survey Bull, in Udy, M.J., 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 1819 pp.
- Park, Ch. F, R. A. MacDiarmid, 1981. Yacimientos Minerales. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, 512 pp.
- Plant, J. A. y R. Raiswell, 1983. Principles of Environmental Geochemistry. En: I. Thornton (ed.). *Applied Environmental Geochemistry*. Academic Press Geology Series, Londres, 501 pp.
- Pérez-Benito, J. F., L. Arias, 2001. The pyrophosphate assisted reduction of chromium (VI) by manganese (II) and its reverse reaction. *New J. Chem.* 25:1438-1446.
- Petrilli, F., A. Camoirano, C. Bennicelli, P. Zancchi, M. Astengo y S. De Flora, 1985. Specification and inducibility of metabolic reduction of chromium(VI). Mutagenicity by subcellular fractions of rats tissues. *Cancer Research*, 45, 3179-3187.
- PROFEPA, 2007. ¿Qué es la PROFEPA? <http://www.profepa.gob.mx/PROFEPA/Conozcanos/QuienesSomos/QueEsLaPROFEPA.htm>
- Rankama, K., Th.G. and Sahama, 1950. Geochemistry. University of Chicago Press, Chicago, 911 pp.

- Raymond, L. A., 2002. Petrology. The Study of Igneous Sedimentary & Metamorphic Rocks. Second Edition. Mc Graw Hill, New York, 720 pp.
- Reimann, C. y P. De Caritat, 1998. Chemical Elements in the Environment Factsheets for the Geochemist and Environment Scientist. Springer, Berlín, 397 pp.
- Robinson, W. O., G. Edgington and W. Z. Schropp, 1935. Pflanzenernähr u. Düng Bodenk. Cited in Baetjer, A. M., 1956. Relation of Cromium to Health. in Udy, M.J., 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 132 pp.
- Rosales Hoz, L., A. Carranza-Edwards and S. Santiago Pérez, 1994. Heavy metals in rocks and stream sediments from the Northwestern part of Baja California, México. Rev. Int. Contam. Ambient. 10(2):77-82.
- Rosales Hoz, L. y A. Carranza-Edwards, 1998. Heavy Metals in Sediments from Coatzacoalcos River, México. Hull Environ. Contam. Toxicol. 60: 553-561
- Rosales Hoz, L. y A. Carranza-Edwards, M. López-Hernández, 2000. Heavy metals in sediments of a large, turbid tropical lake affected by anthropogenic discharges. Environmental Geology 39 (3-4) January. Spring Verlag.
- Saldaña, M. A, 1977. Exploración Geológica-Minera para la Localización de los Yacimientos de Cromita en la Porción Noroccidental del Edo. Sur de Baja California. Tesis. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. IPN, D.F., 50 pp.
- Scharrer, K., y W. Schropp, 1935. Die Wirkung von Chromi-und Chromet-Ion auf Kulturpflanzen. Z. Cited in Gauglhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Ocurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York..
- SARH, 1982. Estudio Geohidrológico del Valle de León, en el estado de Guanajuato. Ariel Construcciones S. A., Tomo I, 168 pp.
- Secretaría de la Función Pública, 2003. Ley Orgánica de la Administración Pública, Artículo 32 bis reformada en el DOF del 25 de febrero de 2003.  
<http://www.funcionpublica.gob.mx/leyes/loapf2000.htm>
- Secretaría de Salud, 2007. Misión, visión y valore.  
[http://portal.salud.gob.mx/contenidos/secretaria/mision\\_vis\\_valores.html](http://portal.salud.gob.mx/contenidos/secretaria/mision_vis_valores.html)
- Secretaría de Salud, 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para Evaluar la Calidad del Aire Ambiente, con Respecto a las partículas Menores de 10 Micras (Pm10). Valor Permisible Para la Concentracion de Particulas Menores de 10 Micras (Pm10) en el Aire Ambiente, Como Medida de Proteccion a la Salud de la Poblacion.

[http://bibliotecas.salud.gob.mx/greenstone/collect/nomssa/index/assoc/HASH01bd.dir/doc.pdf#search="limite%20maximo%20permisible%20cromo"](http://bibliotecas.salud.gob.mx/greenstone/collect/nomssa/index/assoc/HASH01bd.dir/doc.pdf#search=)

Secretaría de Salud, 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-005-SSA1-1993. "Salud Ambiental. Pigmentos de Cromato de Plomo y de Cromomolibdato de Plomo. Extracción y Determinación de Plomo Soluble. Método de Prueba".

<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/005ssa13.html>

Secretaría de Salud, 1995. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Limites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que Debe Someterse el Agua para su Potabilización".

[http://bibliotecas.salud.gob.mx/greenstone/collect/nomssa/index/assoc/HASH01c9.dir/doc.pdf#search="limite%20maximo%20agua%20potable"](http://bibliotecas.salud.gob.mx/greenstone/collect/nomssa/index/assoc/HASH01c9.dir/doc.pdf#search=)

SEMARNAT, 2003. Anexo Normativo 2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. en Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece los Requisitos para la Caracterización del Sitio, Proyecto, Construcción, Operación y Postoperación de Presas de Jales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

<http://www.economia.gob.mx/work/normas/noms/kpronoman/p141semarnat.pdf>

SEMARNAT, 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales a los Sistemas de Alcantarillado Urbano o Municipal. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

<http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-001-ECOL.pdf>

SEMARNAT, 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-002- SEMARNAT -1996. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales a los Sistemas de Alcantarillado Urbano o Municipal. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

<http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-ECOL-002.pdf>

SEMARNAT, 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para las Aguas Residuales Tratadas que se Reusen en Servicios al Público. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

[http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/normasoficialesmexicanasvigentes/Calidad%20del%20agua%20residual/NOM\\_003.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/normasoficialesmexicanasvigentes/Calidad%20del%20agua%20residual/NOM_003.pdf)

SEMARNAT, 2007. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece Criterios para Determinar las Concentraciones de Remediación de Suelos Contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y/o Vanadio. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

[http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/normasoficialesmexicanasvigentes/Elaboracion%20conjunta%20con%20otras%20secretarias/NOM\\_147\\_SEMARNAT\\_SSA1\\_2004.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/normasoficialesmexicanasvigentes/Elaboracion%20conjunta%20con%20otras%20secretarias/NOM_147_SEMARNAT_SSA1_2004.pdf)

SEMARNAT, 2007. ¿Qué es SEMARNAT ?. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.semarnat.gob.mx/queessearnat/Pages/inicio.aspx>

SGM, 2007, Texto Explicativo de la Carta Geológica de México. Servicio Geológico Mexicano. [http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto\\_explicativo.pdf](http://www.coremisgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/Texto_explicativo.pdf)

Shand, S. J., 1947. Eruptive Rocks, 3a ed., Jhon Wiley & Sons, Inc., New York , 488 pp.

Spiro, T. G., W. M. Stigliani, y M. Albarrán (traductor), 2004. Química medioambiental, Segunda edición. Pearson Prentice Hall, Madrid, 504 pp.

Stewart, M. A., P. M. Jardine, M. O. Barnett, T.L. Mehlhorn, L. K. Hyder, L.D. Mckay, 2003. Influence in soil geochemical and physical properties on the sorption and bioaccessibility of chromium (III). *J Environ. Qual.* 32:129-137.

Thayer, T. P, 1942. Mineralogy and Geology of Chromium. In Udy, M.J, 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 14-52 pp.

The American Geological Institute, 1976. Dictionary of Geological Terms. Anchor Press Doubleday, New York, 472 pp.

Tinelli, R., 1948. Relation of Chromium to Health. *Compt. rend.* Cited in Baetjer, A. M., 1956. In Udy, M.J, 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 77-109 pp.

Tscherwitschke, R., 1979. Abwasserfreier Chrom-Trakt in Einem Modernen Kupfer-Nickel-Chrom-Automaten. *Galvanotechnik* 70 (7) 620-625. Cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). *Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance.* VCH., USA., New York.

Udy, M. J., 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 132 pp.

Van Raaphorst, J. G., H. M. Haremaker, P. A. Deurloo, B. Beemsterboer, 1994. Accurate and precise determination of chromium by isotope dilution mass spectrometry in some environmental materials. *Analyt. Chem. Acta* 286, 291-296.

Vidal-Serratos, R., 1983. Estratigrafía y tectónica de la región de Zihuatanejo, Estado de Guerrero, Sierra Madre del Sur. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 45(1):1-20.

Wälchli, O., Ott, R., Hunger, R., Graf, E., and Lieberherr, B., 1979. Selektive Chromat-Eleimination im Lagerplatz-Drainage-Wasser eines Holzimprägnierwerkers. *Gas Wasser Abwasser* 59, 410-412. Cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E.

- Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York..
- Wang, P. C., T. Mori, K. Komori, M. Sasatsu, K. Toda y H. Ohatake, 1989. Isolation and characterization of an enterobacter cloacae strain that reduces hexavalent chromium under anaerobic conditions. Appl Environ Microbiol 55:1665-1669
- Weber, H., 1983. Long-term Study of the Distribution of Soluble Chromate-51 in the Rat after a Single Intra-tracheal Administration. Cited in Gaughhofer, J. y V. Bianchi, 1991. Chromium. In: E. Merian (editor). Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH., USA., New York..
- Weinrich, D., 2007. Chemistry. <http://webmineral.com/chem/Chem-Cr.shtml>
- Wijkerslooth, P. de, 1942. Maden Tetkik Arama Enstitüsü Mecmuasi (Ankara), sene 7 cited in Thayer, T.P, 1942. U.S.Geol. Survey Bull, in Udy, M.J, 1956. Chromium. Volume I. Williams & Heintz, Washington, 14-52 pp.
- Wyllie, P.J., 1979. The origin of ultramafic and ultrabasic rocks, Krieger Huntington, New York, 464 pp.
- Wikimedia Foundation, Inc., 2007. Wikipedia, La enciclopedia libre. <http://es.wikipedia.org/wiki/Cromo>
- Zahid, A., K. D. Balke, M. Qumrul, M. Flegr, 2006. Evaluation of aquifer environment under Hazaribagh leather processing zone of Dhaka city. Environ. Geol. 50: 495-504.