

CONTAMINACIÓN POR CROMO EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE MEXICO. UN ENFOQUE INTERDISCIPLINARIO

Margarita Eugenia Gutiérrez R.*
Gerardo Bocco V.*
Silvia Castillo B. **

R E S U M E N

En el municipio de Tultitlán, Edo. de México, se acumularon residuos industriales con un alto contenido de cromo en formas químicas muy solubles, por lo que el elemento se está dispersando en el entorno. Principalmente se infiltra y contamina aguas subterráneas, pero en menor medida también está afectando la atmósfera y los suelos. En este artículo se describen los niveles de cromo en aguas profundas y suelos; los antecedentes y las causas que provocaron el problema, las características del medio, una primera estimación del área afectada; y, finalmente, se plantean posibles soluciones.

S U M M A R Y

Industrial residues, containing high concentrations of soluble chromium salts, have been accumulated in Tultitlan, Mexico. Consequently, chromium has been dispersed in the surroundings, mainly in the subsoil by percolation, and to a lesser extent it has also contaminated the atmosphere and soils. This paper presents some analytical results about the available amounts of chromium in groundwater and soils, together with a description of the circumstances which gave rise to this problem, a characterization of the environment, a first estimate of the extent of the problem, and proposals for solutions.

1. INTRODUCCIÓN

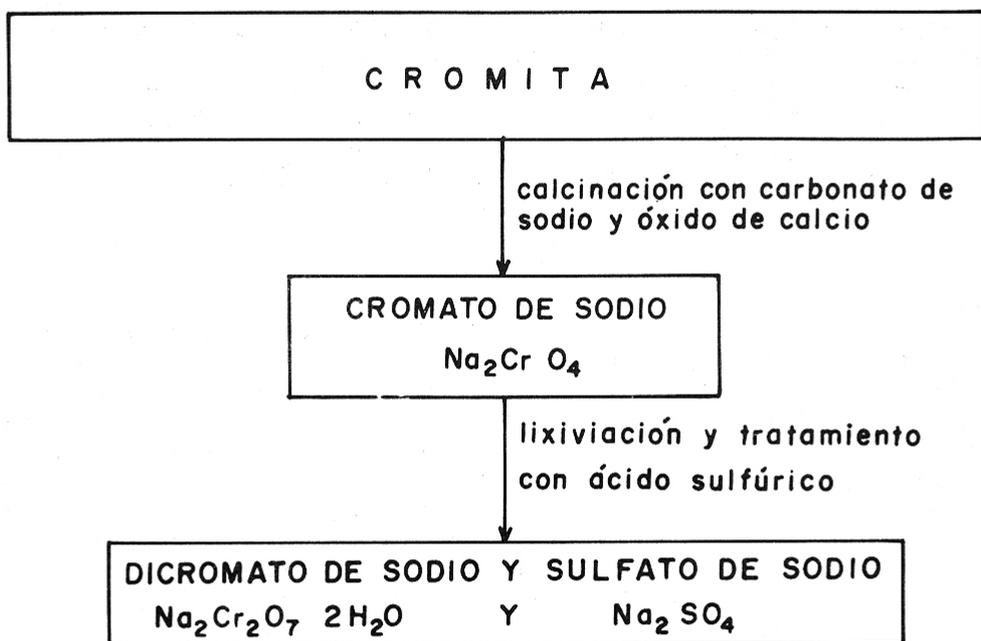
En 1958 se estableció en Lechería, municipio de Tultitlán, Edo. de México, una empresa dedicada a producir compuestos de cromo. Esta planta empleaba 160 trabajadores y producía diariamente 12 toneladas de cromato de sodio, una tonada de cromato de potasio y casi 8 toneladas de sulfato de sodio. Aunque en la fuente consultada no se especifica, también produjeron dicromatos en cantidades proporcionales a las de sulfato de sodio, ya que éste es un subproducto en el proceso de obtención de aquella sal (Fig. 1).

* Instituto de Geografía, U.N.A.M.

** División de Estudios de Posgrado, Facultad de Química, UNAM.

Figura: 1

ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA PRODUCCION DE CROMATO Y DICROMATO DE SODIO



FUENTE: Kirk and Othmer (1979)

El proceso de producción se realizaba a cielo abierto, sin control sobre las emisiones de polvos, las descargas de agua residual y la disposición de los residuos sólidos. Dado el bajo costo de la materia prima y la falta de criterios de eficiencia y seguridad, no se recirculaba el material residual y, consecuentemente, se incrementaba la cantidad de desechos por tonelada de producto y el contenido de cromo en los mismos*.

Especialmente durante la primera década, los residuos del proceso se arrojaron en cualquier sitio disponible de las zonas aledañas y simultáneamente se ofrecieron, por su apariencia de grava, como material de relleno. Por desconocimiento, los habitantes y autoridades locales lo recibieron con beneplácito y permitieron que se depositara en múltiples calles y depresiones, según información proporcionada por vecinos y extrabajadores de la fábrica.

Durante los años transcurridos, muchos de estos lugares han sido recubiertos con otros rellenos, y en algunos casos con pavimento. Pero los sitios cercanos a las vías de ferrocarril han permanecido sin cambio observables (Figura 2).

Los habitantes de la zona afectados por las emanaciones de la chimenea de la fábrica, por residuos transportados por el viento, que vivían en áreas rellenadas, observaron que el "agua amarilla", producto de la disolución del polvo contaminante, causaba la muerte de animales domésticos. Además, había mayor incidencia de enfermedades respiratorias, desde simples irritaciones hasta agresiones serias al tabique nasal de los obreros de la planta.

A partir del año 1975 se iniciaron múltiples reclamaciones por parte de los afectados. Después de un largo proceso, el 1978 se logra la clausura definitiva de la fábrica, el traslado de los terrenos de la planta de parte del relleno utilizado en la nivelación de las calles y, finalmente, la construcción de un cementerio industrial que se termina en 1982 y se inaugura en 1983. En este depósito, que consiste en un cajón cuyas paredes son de concreto reforzado, de 25 cm de espesor, cuya parte superior únicamente se cubrió con 20 cm de tepetate y asfalto, sin protección inferior que aislara el material del suelo, se almacenaron 75 000 toneladas de residuos que estaban dispuestas a cielo abierto en los terrenos de la planta (Tristán, 1984).

Dadas las características del cementerio, el agua proveniente de las precipitaciones pluviales penetra en el mismo y disuelve el cromo, distribuyéndolo lentamente en el subsuelo.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, se planeó una investigación preliminar con los siguientes objetivos:

* Datos tomados de informes de diversas dependencias públicas involucradas en la evaluación del problema. Referencias en: Secretaría de Educación, Cultura y Bienestar Social, Edo. de México, s/f, y Tristán (1984).

- Realizar una investigación de las características geográficas de la zona.
- Determinar los niveles actuales de cromo disponible en aguas subterráneas y suelos*.
- Obtener, en caso de comprobarse la dispersión del cromo, con base en los datos geográficos, una primera aproximación de las áreas afectadas, la orientación de la contaminación y la magnitud del problema.
- Proponer soluciones viables o, en su defecto, estudios posteriores más detallados que permitan obtenerlas.

2. CARACTERISTICAS GEOGRAFICAS DE LA ZONA EN ESTUDIO.

2.1 Antecedentes.

La zona en estudio se localiza en la porción occidental del municipio de Tultitlán (Fig. 2), una de las once entidades del estado de México que integran el área Metropolitana de la Ciudad de México.

Históricamente agropecuario, Tultitlán comienza a minifestar un crecimiento notable de su población a partir de la década de 1950, mismo que acompaña a un acelerado desarrollo industrial y urbano, la población pasó de 9 237 habitantes en 1950, a 52 317 en 1970, según censos del Edo. de México (Valverde *et al*, 1980). Como consecuencia, se producen intensos cambios en el uso del suelo y una disminución de las actividades primarias.

Actualmente, el municipio presenta una típica fisonomía urbano-industrial, con gran cantidad de fábricas, vías de comunicación locales y regionales, núcleos urbanos y fraccionamientos. Quedan aún, sin embargo, resabios de la explotación agropecuaria, básicamente, algunos ejidos y ranchos lecheros.

Este crecimiento no ha sido resultado de una verdadera planeación del uso del espacio. Por el contrario, presenta características anárquicas y serios problemas sociales y de alteración del medio natural.

Las colonias más importantes que se localizan en el área en estudio son Lechería y Recursos Hidráulicos, La primera es una antigua estación de ferrocarril y establecimiento ganadero que se convirtió en zona urbana e industrial, con una alta concentración de plantas fabriles.

* Cromo extraído con solución amortiguadora de acetato de amonio 0.05 M, pH 6.7. Corresponde aproximadamente al cromo enlazado reversiblemente.

Está constituida por 12 manzanas que, en su gran mayoría, están dotadas de servicios y cuentan con calles pavimentadas con concreto. La mayor parte de sus habitantes son obreros de las fábricas vecinas, y en menor medida comerciantes y empleados. No se observan rasgos importantes de hábitos rurales, y sus habitantes han logrado organizar asociaciones vecinales para la defensa de sus derechos.

La colonia recibe directamente el impacto de la contaminación vehicular e industrial. Los suelos están muy alterados y se observó que parcelas anteriormente dedicadas a la agricultura, hoy se encuentran ociosas.

La colonia Recursos Hidráulicos, localizada aproximadamente a 500 m al noroeste de la Colonia Lechería (Fig. 10), es ligeramente más pequeña y más reciente. No está dotada de servicios, muchos lotes son baldíos, las calles no están asfaltadas y varias plantas fabriles coexisten con las casas habitación. Su apariencia es más "rural" que la anterior, y está habitada por personas de menores recursos económicos.

Las industrias radicadas en la zona en estudio representan el 66.7% del total del municipio. De ellas, un 25% son químicas, un 16% metalúrgicas, otro 16% dedicadas a productos de minerales no metálicos y el resto se clasifica en diversos rubros secundarios (Valverde, et al 1980).

2.2 Características geomorfológicas.

La zona en estudio está ubicada a la salida de un pequeño valle, dispuesto de sur a norte, entre las localidades de Labor y La Quebrada, mismo que ocupa la porción sur del denominado valle de Cuautitlán (Fig. 3). Se trata de una antigua cuenca lacustre cuaternaria que forma parte de la cuenca de México.

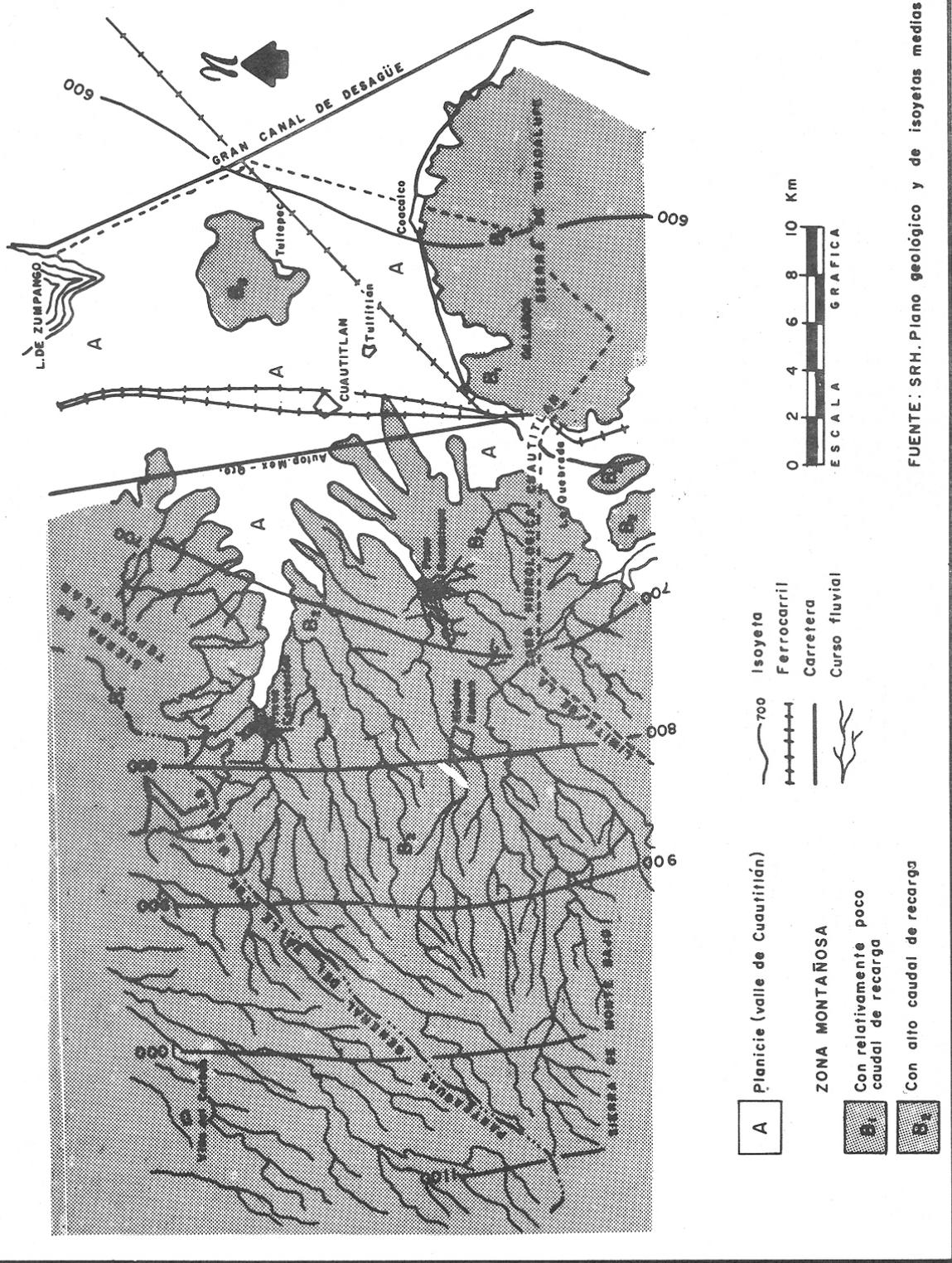
El valle de Cuautitlán es una depresión relativa, de una altitud media aproximada a 2 245 m, de relieve plano, flanqueado por la Sierra de Guadalupe al sur, y por el piedemonte de la Sierra de Monte Alto y Monte Bajo, al occidente. Al norte, la continuidad de la planicie se ve interrumpida por el lomerío basáltico de Tultepec, probablemente una isla durante la existencia del lacustre pleistocénico.

La planicie presenta una pendiente general menor de 0.5% y está ligeramente inclinada de oeste a este. Su origen se remonta a los procesos tectónicos y volcánicos que dieron lugar a la cuenca de México, cuando se generaron ambientes lacustres vinculados a diversos tipos de vulcanismo activo (Valverde et al, 1980).

Estas condiciones permitieron la acumulación de algunos centenas de metros de sedimentos arcillosos lagunares, interestratificados con depósitos de arenas y gravas provenientes de acarreo fluvial de las laderas vecinas, así como arenas y lavas volcánicas. Estas características litológicas del sustrato de la planicie son determinantes, como se verá para la hidrología superficial y subterránea de la zona.

Figura. 3

CARTA SINTETICA DEL MEDIO NATURAL



FUENTE: SRH. Plano geológico y de isoyetas medias

El contacto entre la planicie y las estructuras montañosas es brusco y tiene lugar aproximadamente en la cota de 2 250 msnm, donde se produce una importante ruptura de pendiente (Valverde *et al*, 1980). Las corrientes de agua superficial bajan en gran número, pero con escaso caudal, desde las porciones montañosas elevadas hacia la depresión, con rumbo oeste a este y sur a norte. Estas corrientes son estacionales, tienen sus cabeceras en las sierras vecinas y tendían a inundar la planicie lacustre, pero actualmente han sido canalizadas con fines de riego.

Estos cursos de agua aportan los materiales de acarreo ya mencionados y tienden a formar un incipiente piedemonte acumulativo, mediante abanicos aluviales que hoy sobreyacen a los depósitos lacustres (Fig. 4).

En términos evolutivos, la secuencia de depósitos de estos aluviones era controlada especialmente por los avances y retrocesos de las antiguas riberas lacustres. El, o los lagos, por su parte, fueron responsables de la presencia de los gruesos espesores de arcillas, básicamente montmorilloníticas.

En cuanto a la vegetación natural, ha sido reemplazada, inicialmente por campos de cultivo y, en la actualidad, por urbanizaciones e industrias. Quedan, como resabios, algunas especies arbóreas y maleza.

El clima es templado, con lluvias en verano (Cw, según la clasificación de Köppen). Varía gradualmente desde las montañas del occidente, donde hay mayores precipitaciones hacia la planicie, más seca (Fig. 3).

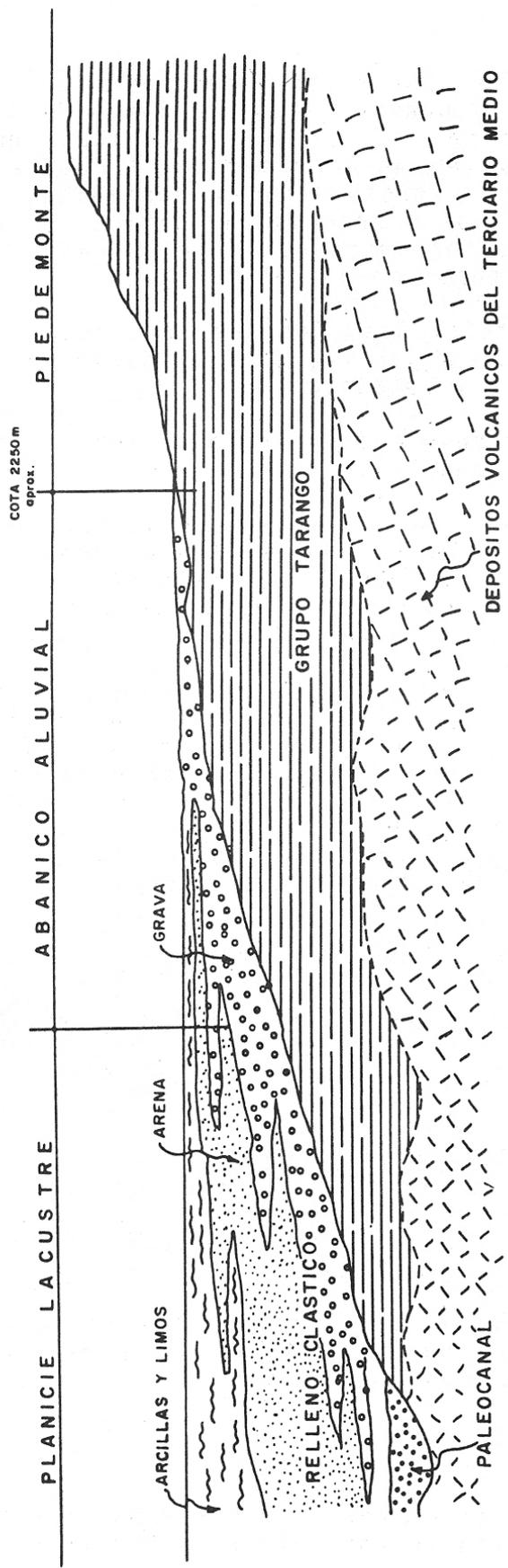
2.3 Suelos y sedimentos.

La evolución y procesos geomorfológicos señalados, aunados a la posición topográfica resultante y al tipo de clima, dan como resultado la presencia de dos clases de suelos en la zona en estudio, ambas vinculadas genéticamente con los lagos cuaternarios. Dominan los vertisoles y, en pequeñas porciones, se presentan los solonchak, con más del 15% de saturaciones de sodio intercambiable*. Ambos tipos son básicos, de textura fina. Los vertisoles, que se extienden por toda la planicie, se presentan asociados con suelos negros (feozem); se trata de suelos originalmente aptos para la agricultura, aun cuando, en este caso, presentan cierta salinidad. Actualmente se encuentran muy alterados, especialmente cerca de las plantas industriales y de los canales de drenaje, que hoy transportan aguas residuales.

De acuerdo con las características geomorfológicas reseñadas y con la información estratigráfica obtenida de diversas fuentes, se estima que, en general, los sedimentos de origen lacustre alcanzan un

* Según la carta edafológica Cuautitlán, 1: 50,000, Dirección General de Geografía (1982).

Figura: 4 CORTE TRANSVERSAL GENERAL INDICANDO LA TRANSICION ENTRE PIEDEMONTE Y EL RELLENO DE LA PLANICIE



FUENTE : SRH Hidrogeología del valle de Cuautitlán p.117 (1961)

espesor de, por lo menos, 300 m*. Estos consisten en materiales arcillosos con lentejones de arena y gravas que provinieron de los acarreos fluviales; arenas pumíticas y tobas volcánicas que muy frecuentemente fueron depositadas en agua (cineritas lacustres). En forma interrumpida se presentan a profundidades variables, pero a partir de los 50 m, cuerpos de lavas y brechas andesíticas y basálticas, muy fracturadas y alteradas, producto de las efusiones y explosiones volcánicas del terciario superior y cuaternario.

De todos los materiales señalados, los que contienen y transmiten agua en mayor cantidad y con mayor rapidez (es decir, los acuíferos) son los arenosos, gravosos y volcánicos.

Los mismos se presentan rodeados (confinados o semiconfinados) por las arcillas, mucho menos permeables.

Debe tenerse en cuenta que, debido a las condiciones estratigráficas mencionadas, las características del sustrato pueden cambiar radicalmente en cortas distancias, ya que no se trata de formaciones geológicas dispuestas de manera homogénea a lo largo de distancias considerables. Por el contrario, son heterogéneas y discontinuas.

De manera generalizada, y a juzgar por las columnas analizadas (Servicios Geofísicos, 1966), las arcillas dominan hasta los 80/100 m de profundidad, y luego las arenas y gravas permeables son más importantes (Fig. 5). Entonces, hasta los 80 m, los acuíferos están conformados por los lentejones areno-gravosos y pumíticos, semiconfinados o confinados, y discontinuos. A mayor profundidad, las condiciones de permeabilidad y transmisibilidad aumentan y, por tanto, se registra mayor presencia de corrientes subterráneas caudalosas.

2.4 Hidrología superficial.

El valle de Cuautitlán tiene una dimensión de 312 km². Constituye la planicie acumulativa de nivel de base de la zona hidrológica del mismo nombre (Fig. 3), cuya extensión total es de 1 028 km² (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1961 b).

Esta zona hidrológica está limitada al norte y occidente por el parteaguas general del Valle de México que corre por las cimas de las sierras de Monte Alto, Monte Bajo y Tepetzotlán; al sur, por el parteaguas de la Sierra de Guadalupe, y al oriente está confinada por el Gran Canal.

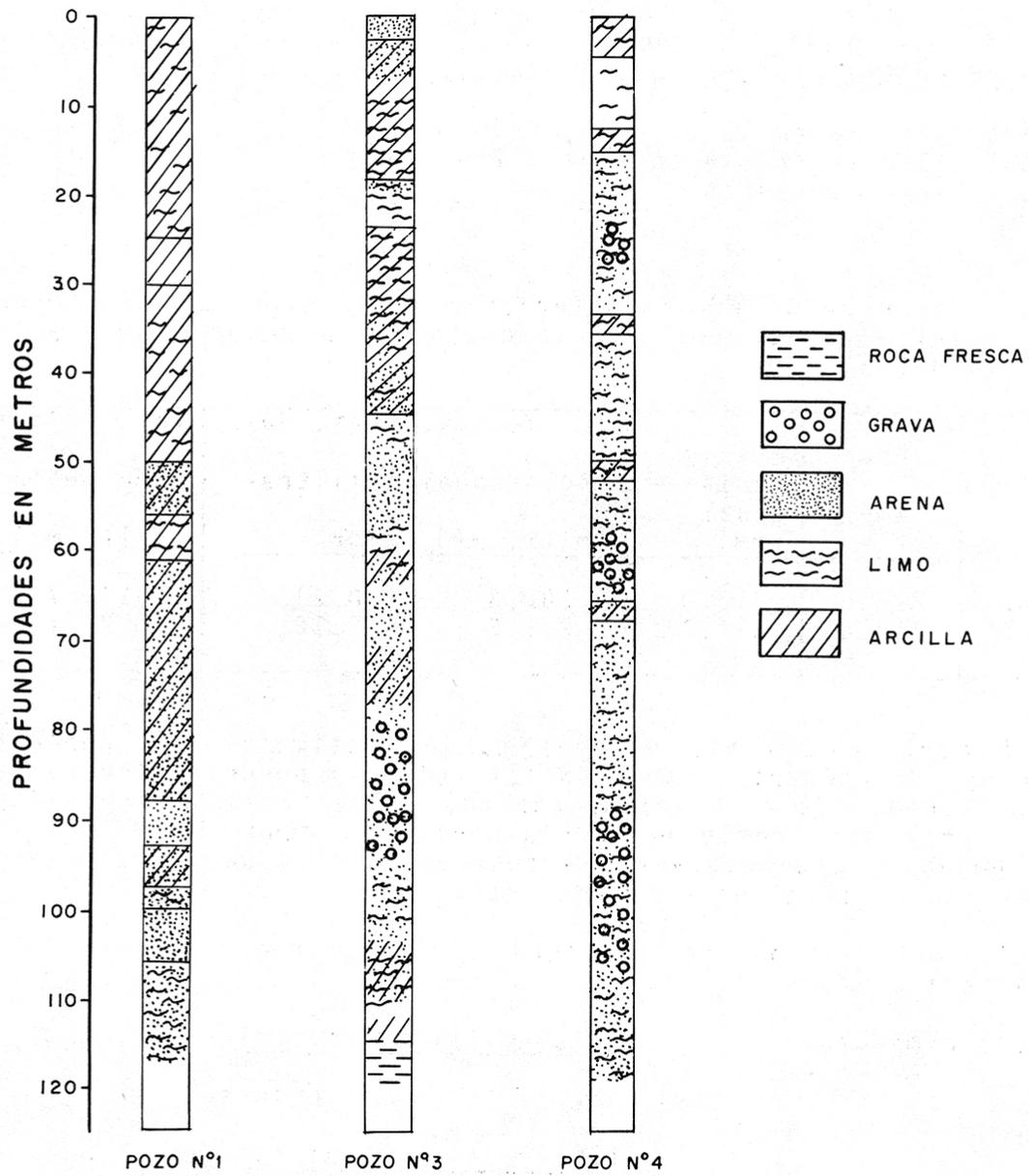
Las precipitaciones, como ya se apuntó, van disminuyendo de poniente a oriente. El promedio anual (1920-58) en la planicie era de 677 mm; ello representa un volumen medio anual de 211 millones de m³ (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1961 b).

* Columnas geológicas de pozos de agua subterráneas de CFE y exploratorios de la secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Inédito.

Figura: 5

CORTES GEOLOGICOS DE POZOS LOCALIZADOS EN
EL VALLE DE CUAUTITLAN

(ver localización en figura 6)



FUENTE: SRH Hidrogeología del Valle de Cuautitlán p.101 (1961)

En las zonas montañosas de la zona hidrológica, importantes desde el punto de vista de la recarga de acuíferos, como se verá, los valores obtenidos fueron, respectivamente, de 812 mm y 581 millones de m³ (Tabla 1).

Las corrientes superficiales más importantes son los ríos Cuautitlán y Tepetzotlán, al norte del área en estudio, que tienen origen en las fuertes precipitaciones (máximo 1 100 mm, Fig. 3) que ocurren en las sierras del poniente.

El escurrimiento medio anual aproximado (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1961 a), era el siguiente:

Río Cuautitlán (hasta la cota de 2 250 msnm)	97.0 mill. m ³
Río Tepetzotlán (hasta la cota de 2 250 msnm)	19.0 mill. m ³
Otras corrientes pequeñas	7.0 mill. m ³
	<u>123.0 mill. m³</u>

Tabla 1. Panorama de las características hidrológicas más importantes, promedio 1920-58 (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1961 b).

Subregion	Area km ²	Precip. media -- anual (mm)	Vol. equiv. medio anual (mill. m ³)	Coef. de infiltra- ción	Vol. infiltra- ción medio (mill. m ³)
Montañas	716.0	812.0	581.3	0.24	139.7
Planicie	312.0	677.0	211.2	0.10	21.1

A partir de estos valores puedes estimarse los porcentajes aproximados de escurrimiento e infiltración, y ponderar indirectamente el porcentaje de evapotranspiración. Debe tenerse en cuenta que estos valores sólo reflejan parcialmente las condiciones reales, ya que se basan en promedio y no se consideran fluctuaciones estacionales, contrastes años secos/húmedo, etc..

A continuación se presentan las estimaciones mencionadas. Para la zona montañosa:

$$\begin{aligned} \% \text{ de escurrimiento: } & \frac{123.0 \text{ mill. m}^3 \text{ escurridos}}{581.3 \text{ " " llovidos}} \times 100 = 21\% \\ & \frac{139.7 \text{ mill. m}^3 \text{ infiltrados}}{581.3 \text{ " " llovidos}} \times 100 = 32\% \end{aligned}$$

$$\% \text{ de evapotranspiración (y pérdidas) ponderado: } 100 - (21 + 24) = 55\%$$

Para la planicie

$$\% \text{ de infiltración: } \frac{21.1 \text{ mill. m}^3 \text{ infiltrados}}{211.2 \text{ " " llovidos}} \times 100 = 10\%$$

En síntesis, la infiltración es casi dos veces y media mayor en las zonas montañosas que en la planicie. Ello se explica por las condiciones geológicas: rocas fracturadas, permeables, en las elevaciones (especialmente del occidente), y sedimentos eminentemente lacustres, menos permeables, en la planicie. Asimismo, las zonas montañosas del oeste reciben, en promedio, unos 130 mm más que la presión relativa. De ello se desprende que los acuíferos en la zona en estudio sean alimentados, básicamente, en la porción occidental montañosa.

En cuando a la evapotranspiración, se carece, incluso, de datos aproximados para poder ponderarla en la planicie. Sí puede señalarse que, a condiciones térmicas y de vientos estables, la evapotranspiración disminuye con el descenso de los niveles freáticos, situación que, debido a la sobreexplotación, prevalece en la planicie.

2.5 Hidrología subterránea.

De acuerdo con la profundidad de sus acuíferos, el valle de Cuautitlán se clasifica en tres áreas (Fig. 6). La primera con acuíferos someros; una segunda con acuíferos intermedios; y una tercera, correspondiente al área en estudio, con acuíferos profundos. Estos están confinados en su mayoría, y sus rendimientos son muy variables. Los de mayor gasto se encuentran a profundidades mayores de 80 m (Servicios Geofísicos, 1966), y probablemente se extiendan hasta, por lo menos, los 300 m.

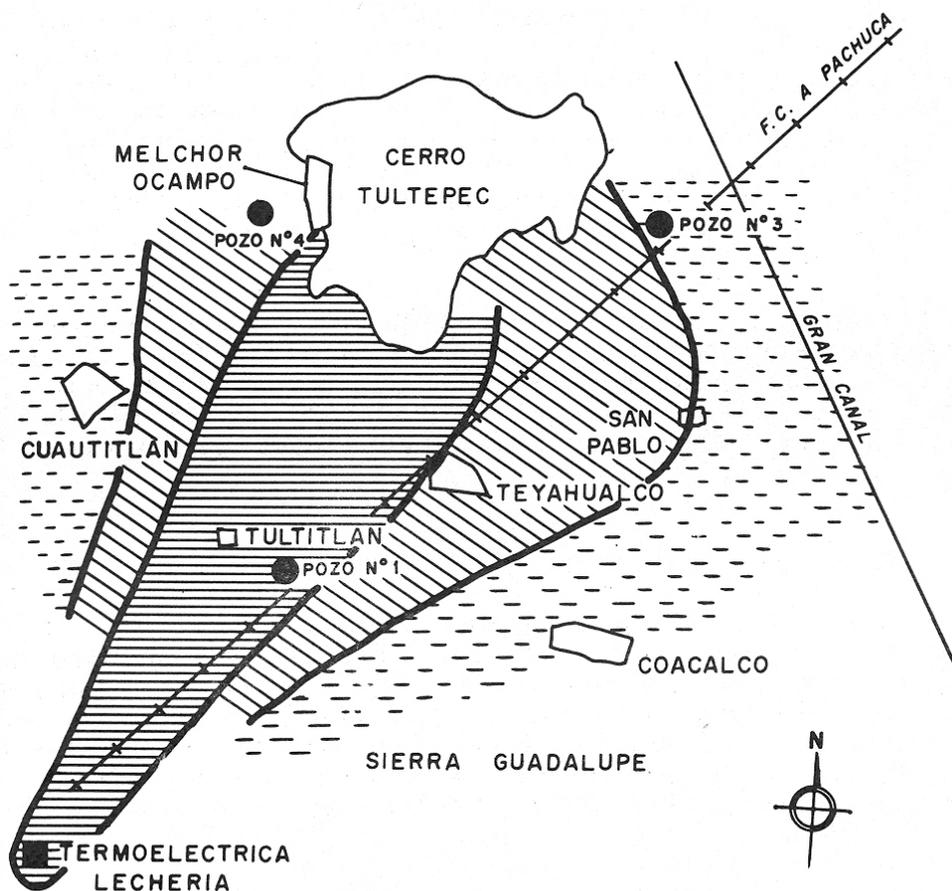
La recarga principal, como queda dicha, se produce en las montañas del poniente. Asimismo, existe una zona de captación en los materiales basálticos del Cerro de Tultepec, con flujos hacia el suroeste y noroeste. La recarga en la zona sur del valle de Cuautitlán se producía, hacia 1960, a razón de un caudal estimado en 3.66 m³ por segundo (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1961 b).

Los flujos principales del escurrimiento subterráneo (Figs. 7 y 8) se producen de occidente a oriente, es decir, de las zonas altas, con gran captación de agua meteórica, hacia la planicie.

Al comparar ambos mapas se observan algunos cambios operados en los 20 años transcurridos entre ambos. En primer lugar, los niveles estáticos se han abatido en más de 30 m. En segundo lugar, el flujo que se dirigía en 1961 hacia el pie de la Sierra de Guadalupe, ya no se presenta en 1983. En cambio, se aprecian flujos con bajos gradientes que descienden hacia una zona de descarga de agua subterránea ubicada en torno de la localidad de Tultitlán. Otra zona de descarga, pero que no afecta al área en estudio, es la planicie aluvial del río Tepetzotlán.

Figura: 6

ZONIFICACION DE ACUERDO CON LA PROFUNDIDAD DE
LOS ACUIFEROS



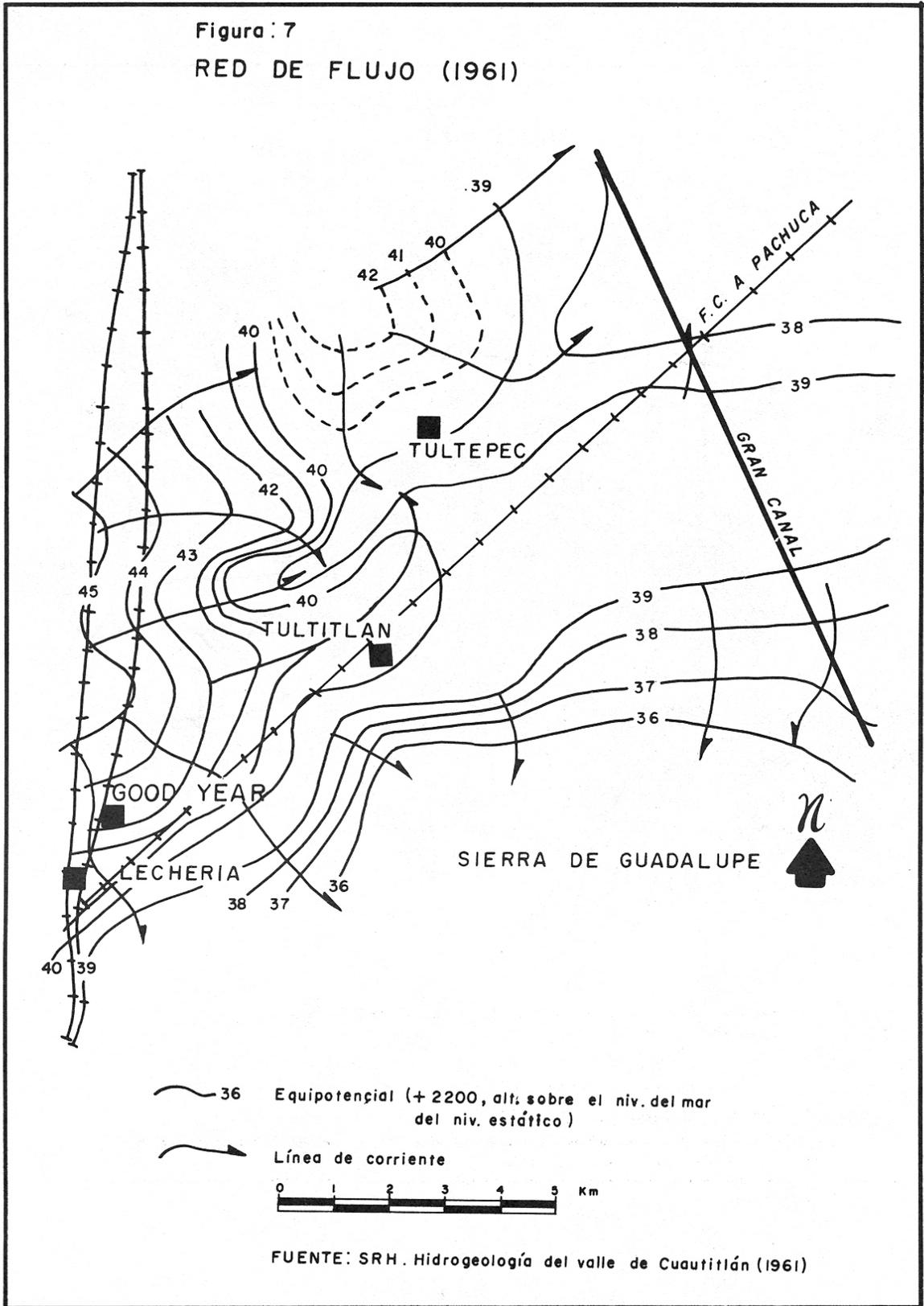
-  Zona 1 Dominan acuíferos someros
-  Zona 2 Dominan acuíferos intermedios
-  Zona 3 Dominan acuíferos profundos

0 1 2 3 4 5 Km

ESCALA GRAFICA

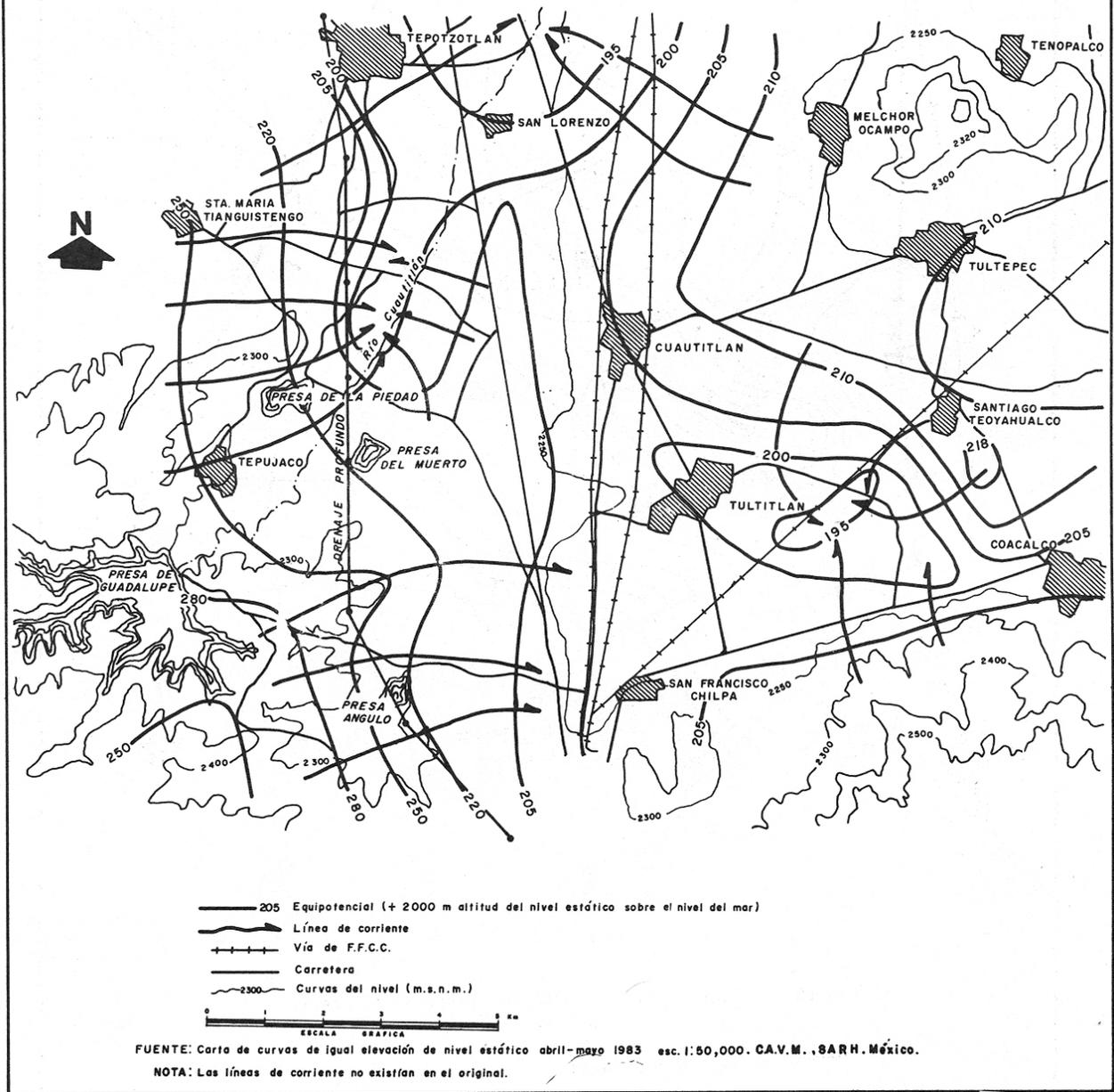
FUENTE: SRH. Hidrogeología del valle de Cuautitlán p.102 (1961)

Figura:7
RED DE FLUJO (1961)



FUENTE: SRH. Hidrogeología del valle de Cuautitlán (1961)

Figura: 8
RED DE FLUJO (1983)



Las condiciones hidrológicas subterráneas han permitido una importante y creciente explotación del recurso en los últimos 30 años, que ha abastecido la demanda local (creciente, por el aumento de industrias y fraccionamientos)*. Existen, asimismo, varios ramales de pozos de la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM, SARH) cuya producción se destina al consumo de la población de la ciudad de México.

En las Tablas 2, 3 y 4 se presentan los datos obtenidos acerca de la operación de los pozos muestreados. Como puede apreciarse, las profundidades y los gastos son muy variables. Los pozos de CFE son los más profundos y de mayores gastos. Si bien no se dispuso de todos los datos precisos solicitados, las informaciones recibidas verbalmente indicaron que los pozos de empresas son, generalmente, más superficiales que los de CAVM.

En líneas generales, la planicie es buena almacenadora de agua subterránea, con un aceptable caudal de recarga anual (ver pag. 88). Sin embargo, la sobreexplotación a la que fue sometida han hecho disminuir tanto el nivel freático general como los estáticos. A modo de ejemplo, se presentan en la tabla 5 algunos datos de la variación en los niveles de los pozos de Comisión Federal de Electricidad (Planta Jorge Luque).

3. METODOLOGÍA

3.1 Muestreo de suelos y aguas subterráneas

3.1.1 Suelos:

Dentro de la zona en estudio se plantearon seis unidades de muestreo, que presentan características comunes, a las cuales se les llaman estratos (Fig. 9).

La ubicación y extensión de estos estratos fueron determinadas con base en la situación geográfica y en la información recabada sobre la ubicación de las zonas utilizadas para tirar residuos.

De acuerdo con el tiempo disponible para efectuar el muestreo se seleccionaron 60 puntos los cuales quedaron distribuidos en la siguiente forma:

* Especialmente en la zona de Lechería, este fenómeno ya había sido advertido en 1961, (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1961 a), ya que se trata de una de las zonas más explotadas del Valle de México.

Tabla 2 -- Relación de pozos muestreados y algunos datos hidrológicos relevantes (noviembre 1984) (*)

UBICACION	NUMERO DE POZOS	NIVEL ESTÁTICO (EN m)	NIVEL DINÁMICO (EN m)	PROF. COLUMNA (EN m)	PROF. TOTAL (EN m)	GASTO EN LITROS/SEG.
FC-Los Reyes	15	35	50	72	210	54
"	14 (**)	36	-	-	200	-
"	12	35	50	72	200	27
"	10	40	90	100	200	38
"	9	33	39	96	200	18
"	8	42	65	72	202	37
"	6	36	90	105	200	35
"	4	45	90	102	200	23
"	3 (**)	45	82	-	200	33
"	2	20	32	99	201	-
ExHda. Portales	3	--	-	-	-	20
"	2	-	-	40	-	-
"	1	-	-	28	-	-
Teoloyucan	6	63	113	120	250	38
"	5	69	113	108	250	54
"	4	54	80	107	208	30
"	3	58	84	107	250	68
"	2	63	78	82	246	30
Camesa	2	-	-	50	-	2
"	1	-	-	75	-	2
Fanal	2	-	-	-	-	-
"	1	-	-	-	-	-
Bacardí	1	46	-	-	-	13
Conasupo	1	-	-	-	-	-
A. Hornos	1	-	-	-	-	-
"	3	-	-	-	-	-
CFE	2	56	67	-	300	52
"	1	52	57	-	300	55
"	5	52	77	-	325	66
"	8	72	98	-	210	72
"	3	51	58	60	300	15
"	7	59	94	-	-	22
Good Year	2	-	-	-	180	-
"	1	-	-	-	120	-
"	3	-	-	-	150	-

(*) Fuente Datos reportados por CAVM (para los ramales FC-Los Reyes y Teoloyucan) y por empresas particulares.

Observaciones: Los datos no reportados (guión) se debieron a que varias empresas no entregaron la información solicitada.

(**) Datos promedio 1983.

Tabla 3. Evolución del gasto y la cantidad de agua extraída mensualmente de los pozos en operación en CFE (julio-diciembre 1984) (*).

MES	JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE	
	GASTO	Q AGUA	GASTO	Q AGUA	GASTO	Q AGUA	GASTO	Q AGUA	GASTO	Q AGUA	GASTO	Q AGUA
1	61	155	61	155	60	78	58	56	55	30	34	14
2	31	70	31	70	35	88	55	143	52	136	54	87
3	-	-	-	-	37	6	34	9	15	6	-	-
5	53	141	46	122	39	100	67	175	66	175	47	123
7	30	80	25	66	35	91	23	60	22	57	33	85
8	58	148	58	138	-	-	72	98	72	21	70	NR

Tabla 4. Evolución de los niveles estático y dinámico, y del tiempo de recuperación de los pozos en operación en CFE (julio-diciembre 1984) (*).

MES	JULIO			AGOSTO			SEPTIEMBRE			OCTUBRE			NOVIEMBRE			DICIEMBRE		
	NE	ND	TR	NE	ND	TR	NE	ND	TR	NE	ND	TR	NE	ND	TR	NE	ND	TR
1	54	59	12	54	59	12	51	57	13	52	57	12	52	57	12	52	57	12
2	55	62	11	52	62	11	54	63	12	59	65	12	56	67	12	56	68	11
3	-	-	-	-	-	-	52	60	13	52	60	12	51	58	11	-	-	-
5	53	76	14	55	72	13	52	78	11	53	78	11	52	77	12	51	78	10
7	62	79	11	66	93	12	68	91	15	58	94	12	59	94	13	60	94	13
8	59	06	16	60	107	15	-	-	-	60	107	14	72	98	14	73	98	15

(*) Fuente: CFE. Datos Hidráulicos de Pozos en la Planta Termoeléctrica de Lechería.
 Observaciones: Los guiones corresponden a períodos de licencia de pozos.
 Gasto: En litros por segundo (LPS); Q de Agua: Cantidad de agua, en miles de m³; NR: No reportado.
 NE: Nivel estático, en m (aproximado); ND: Nivel dinámico, en m (aproximado); TR: tiempo de recuperación, en minutos.

Tabla 5. Cambios en los niveles estáticos en los últimos 30 años
(Fuente: CFE, datos de archivo).

POZO N°	NIVEL ESTÁTICO. EN M	
1	1949	: 8.50
	1984	: 52.50
2	1950	: 7.50
	1984	: 56.00
3	1950	: 7.50
	1984	: 51.80
5	1966	: 14.70
	1984	: 51.00
7	1965	: 9.65
	1984	: 60.00

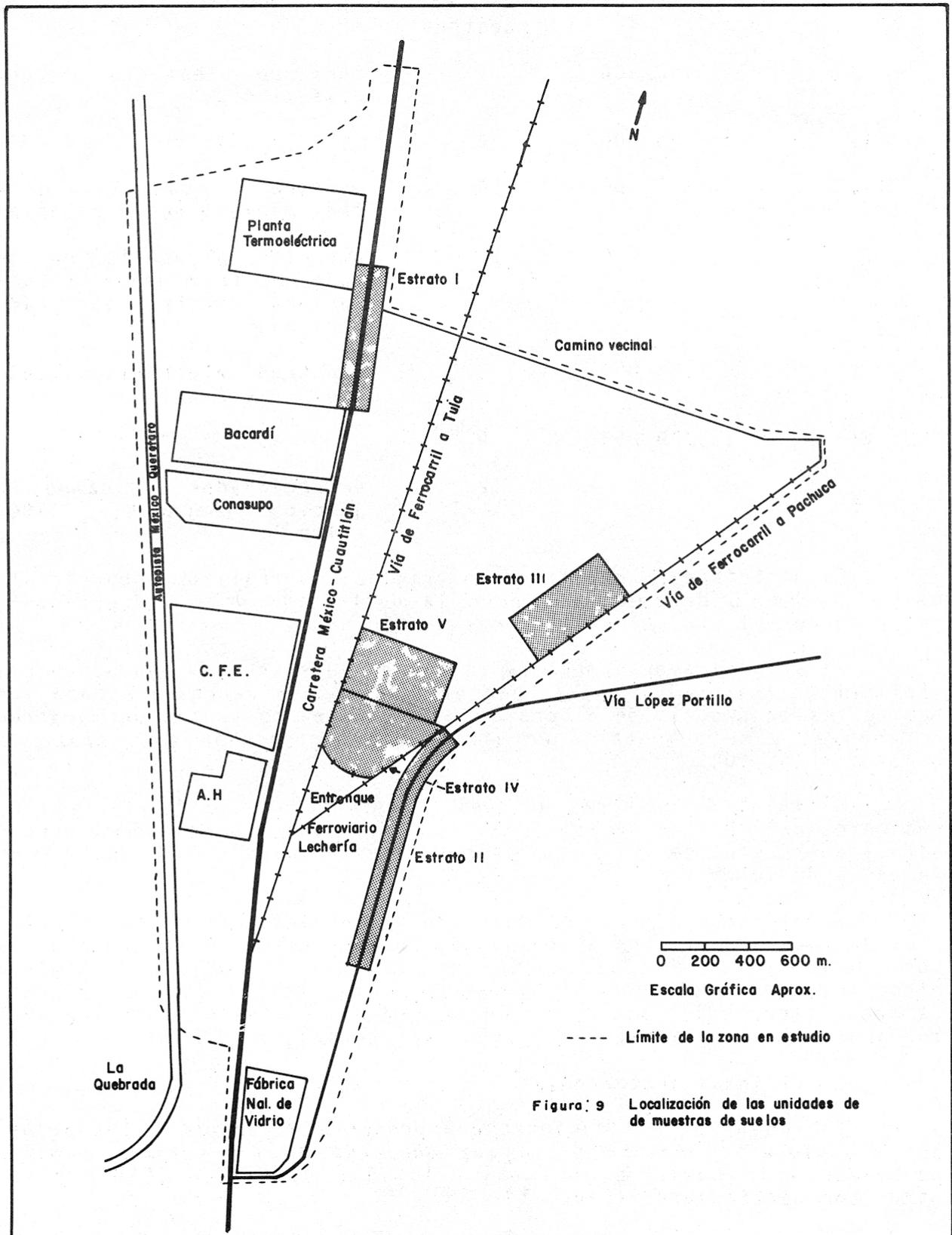


Figura 9 Localización de las unidades de de muestras de suelos

No. de estratos	Área aprox. m ²	Puntos de muestreo	Métodos de selección
I	112 500	6	muestreo aleatorio en dos dimensiones.
II	125 000	6	" " " "
III	100 000	10	muestreo en cada lado de cada manzana de la colonia
IV	77 625	14	elección aleatoria de un lado de la manzana y toma de una muestra por cada manzana.
V	135 000	3	muestreo aleatorio simple sin reemplazo.
VI	11 729 250	9	" " " "
		12	seleccionados en campo, a juicio (Barnett, 1984, reimp.).

La distribución en el diseño original se realizó proporcionalmente al tamaño del estrato, pero la definitiva se vio fuertemente influida por el uso del suelo y sus condiciones.

Se asignó mayor número de puntos a zonas urbanas con uso habitacional (estratos III y IV), por el peligro que representa para sus habitantes la exposición al cromo. Se eliminaron puntos de muestreo no viables y se aumentaron en sitios que pertenecían al estrato de control (Fig. 10).

El total de muestras de suelo recolectadas fue de 121, pertenecientes a 60 puntos de muestreo. Siempre que lo permitió el estado actual del suelo, se tomaron muestras superficiales a 0-30 cm. y profundas a 40-50 cm.

Se hicieron pozos a un metro de profundidad, en puntos aleatorios del estrato II, con el objeto de conocer el nivel de cromo a mayor profundidad. A cada muestra se le determinó pH, conductividad eléctrica, cromo disponible, manganeso y hierro extraíble. Además, se identificaron las muestras que contenían carbonatos y se realizaron análisis de rutina (Black, 1965) y (Jackson, 1964).

3.1.2 Aguas subterráneas

Debido a las limitaciones que presenta el acceso a los pozos, se seleccionaron treinta sitios de muestreo de los cuales la mitad pertenece a la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM) y los otros son particulares (Fig. 11).

Figura: 10
 LOCALIZACION DE LOS PUNTOS MUESTREADOS

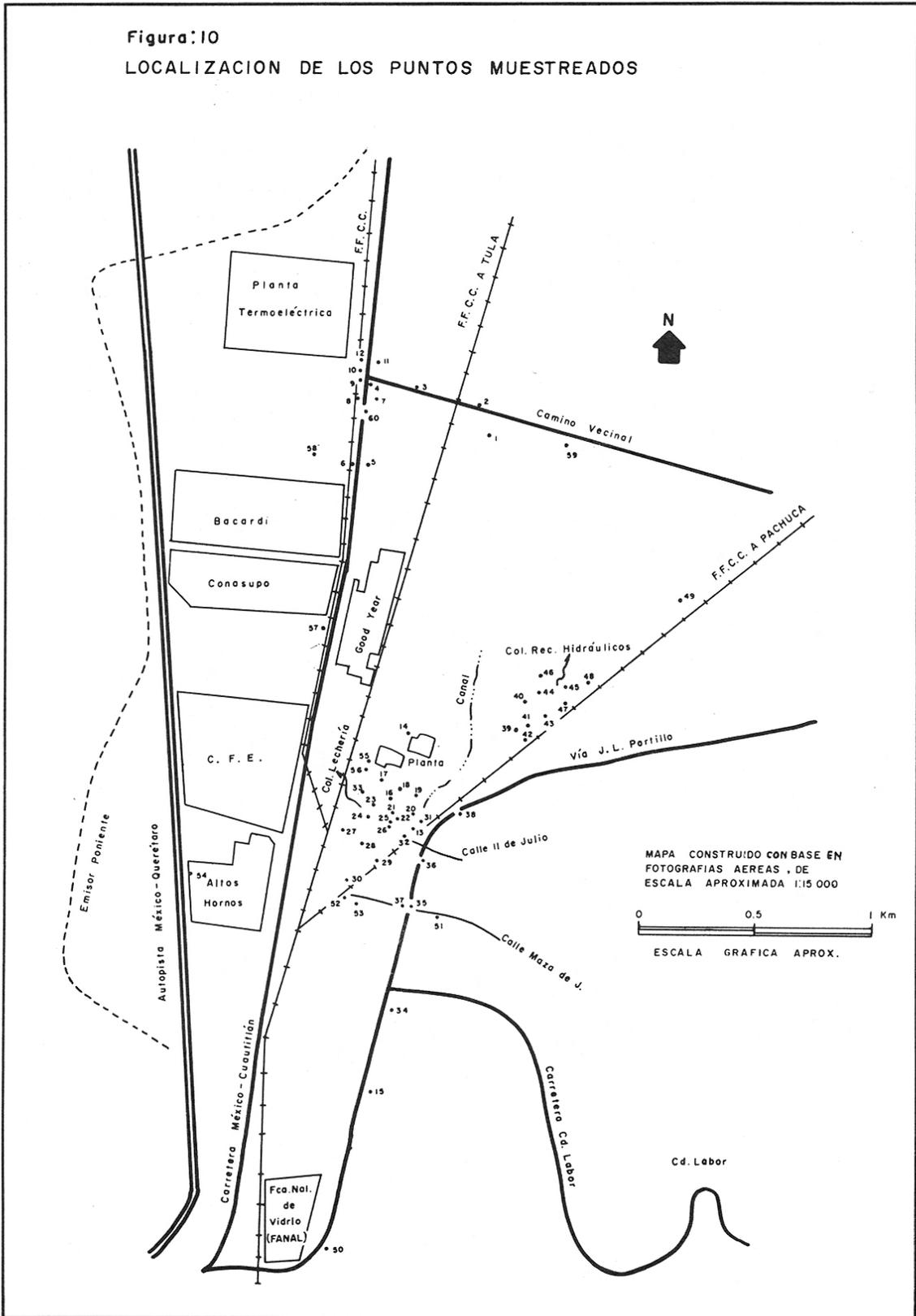
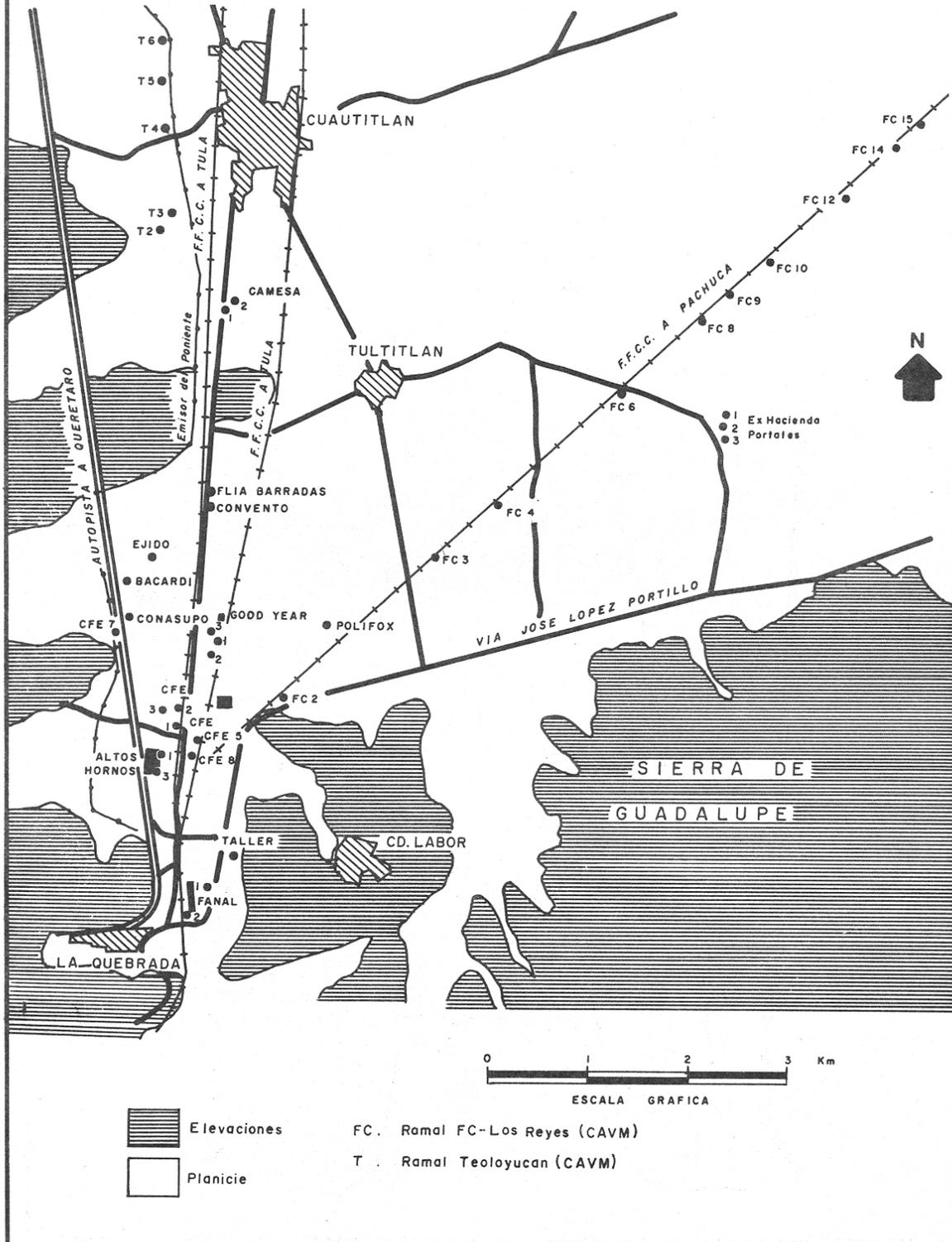


Figura: II

LOCALIZACION DE LOS POZOS DE AGUA SUBTERRANEA MUESTREADADA



Los pozos de la CAVM se encuentran ubicados en dos zonas geográficas diferentes, por lo que se consideraron dos estratos distintos. El primero quedó constituido por los catorce pozos más cercanos al foco contaminante, ubicados en paralelo a la vía de ferrocarril a Pachuca, y pertenecen al ramal FC - Los Reyes. El segundo estado se formó con los ocho pozos más cercanos del ramal Teoloyucan, ubicado entre la autopista México-Querétaro y la vía del ferrocarril a Tula.

La distribución de la muestra en los dos estratos fue proporcional al número de pozos que conforman los ramales. El tamaño de la muestra para el ramal FC - Los Reyes fue de nueve* y para el ramal Teoloyucan de cinco.

La selección de pozos en cada estrato se realizó con muestreo aleatorio simple sin reemplazo.

De los pozos particulares de los cuales se obtuvo autorización de sus propietarios para ser muestreados, se seleccionaron los más cercanos al foco de contaminación y algunos más alejados como puntos de control (Fig. 11):

-	Bacardí	1 pozo
-	Fábrica Nacional de Vidrio	3 pozos
-	Comisión Federal de Electricidad	6 pozos
-	CONASUPO	1 pozo
-	Ex-hacienda Portales	3 pozos
-	CAMESA	2 pozos
-	Good Year Oxo	3 pozos

Se muestrearon los pozos una vez al mes, durante noviembre, diciembre de 1984, y enero de 1985.

En cada muestra se determinaron los siguientes parámetros: alcalinidad, acidez, dureza total, cloruros, conductividad, pH, sodio, hierro, manganeso y cromo.

3.2. Métodos y técnicas químicas utilizadas

Equipo:

Se utilizó un medidor de pH CONDUCTRONIC, modelo pH 20, con un electrodo Sargent-Welch S30072.

El fotómetro de flama usado es un CORNING modelo 400, el espectrofotómetro de absorción atómica es un VARIAN, modelo A 440.

* Se adicionó el pozo 2 FC - Los Reyes, que no quedó seleccionado en el proceso aleatorio, pero que es el más cercano al foco contaminante. Por tanto, el número total de muestras en ese estrato fue de diez.

Las medidas de conductividad eléctrica se realizaron con un puente de conductividad COLE PARMER 1481-00.

Las determinaciones fotocolorimétricas en un espectrofotómetro ZEISS modelo PM 2K.

Determinación de cromo en agua:

De acuerdo con el tipo de matriz y las interferencias presentes, y con base en la información bibliográfica publicada, se diseñó una metodología analítica que, en forma esquemática, se presenta en la Fig. 12. En las demás determinaciones efectuadas se utilizaron procedimientos de rutina (APHA 1955 p. 117-121).

Selección de la solución para extraer cromo de los suelos:

Se realizó un experimento para determinar cuál era la solución óptima para extraer el cromo disponible en suelos, que corresponde al cromo potencialmente más peligroso. Se probaron cuatro tipos de solución, en suelos de la región en estudio (vertisoles).

- Solución amortiguadora de ($\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{K}_2\text{HPO}_4$) 0.05 M, pH 7.2
- Solución amortiguadora de oxalato de calcio 0.05 M, pH 6.3
- Solución amortiguadora de acetato de amonio 0.05 M, pH 6.7
- Agua.

Se seleccionó la solución de acetato de amonio, ya que, al igual que la de fosfato ácido de potasio, extrajo la mayor cantidad de cromo, pero menor cantidad de materia orgánica que este último.

Procedimiento de extracción y cuantificación de cromo:

- Se pesaron 5 g de suelo de cada muestra, se añadieron 4 ml de agua y se dejaron equilibrar durante 12 horas.
- A continuación se les adicionó 50 ml de solución de acetato de amonio 0.05 M y se agitaron durante 24 horas.

4. RESULTADOS.

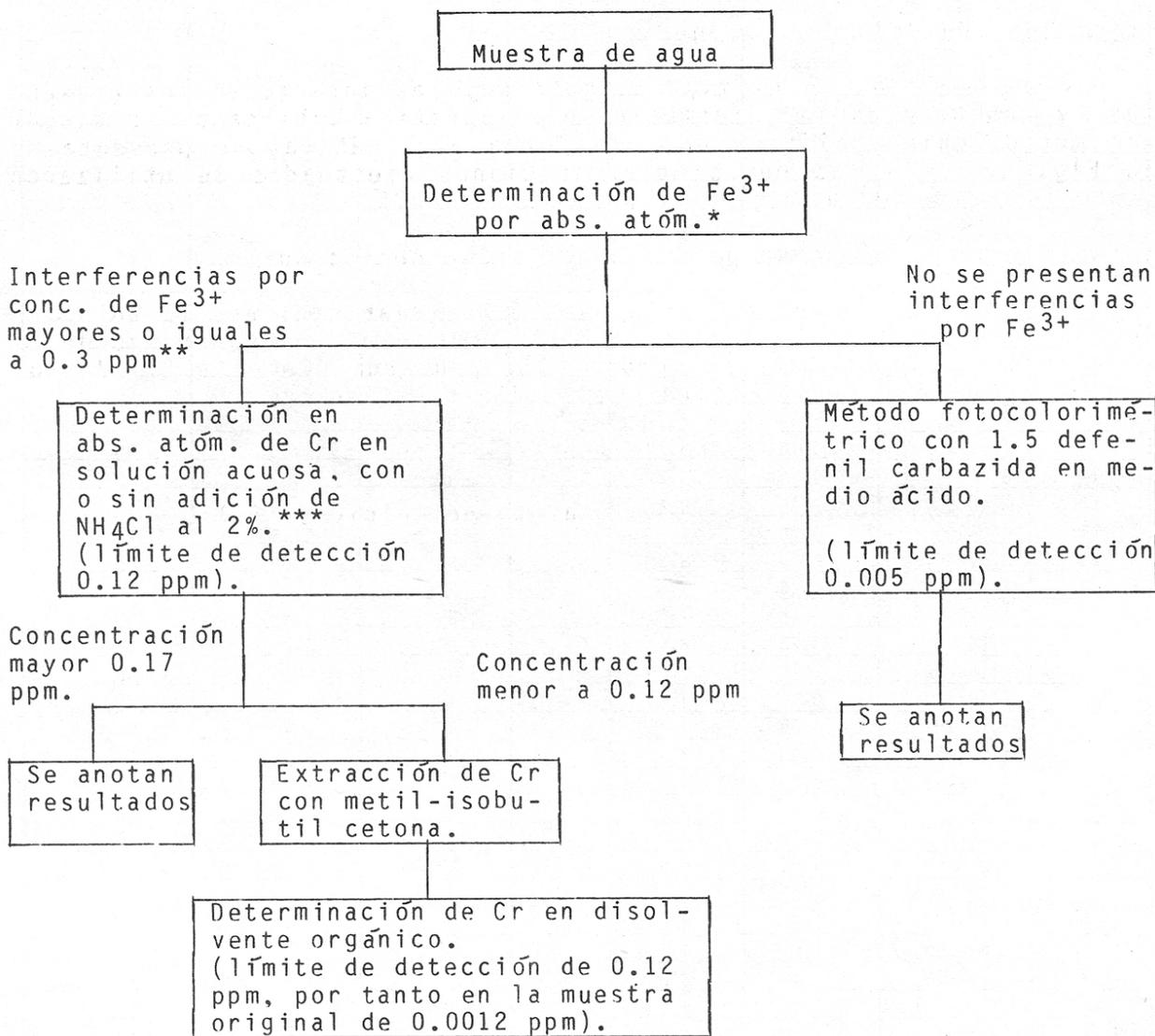
4.1 Análisis de los datos de suelos (tabla 6):

El 15.7% del total de muestras contenía cromo disponible (1 - 6480 ppm). En suelos de esta región, en condiciones normales se debió haber detectado un máximo de 3 ppm de cromo disponible (Aubert, 1980) y (Gutiérrez, 1982)

Del total de puntos muestreados de suelos, el 16.7% resultó contaminado. Su distribución por estratos está indicada en la Tabla 7 y se presenta esquemáticamente en la Fig. 13.

FIGURA 12

Técnicas analíticas



* Los límites de detección se determinaron experimentalmente de acuerdo con las condiciones del equipo y técnica de trabajo.

** Aparte del hierro interfieren los iones del mercurio y del vanadio, pero las aguas de pozo analizadas en este estudio no contienen estas sustancias.

*** Esta adición se realiza cuando la concentración de iones Fe^{3+} es igual o mayor a diez veces la concentración de iones cromo presentes.

RESULTADOS SUELOS

TABLA NO. 6

Fecha de muestreo = 8-15 de enero de 1985.

ESTRATO	LUGAR Y PROFUNDIDAD cm	CONDUCTIVIDAD MOHMS ⁻¹ CM ⁻¹	pH SUELO AGUA (1:5)	PRESENCIA CO ₃ =	Cr (VI) DISPONIBLE ppm	Mn EXTRAIDO ACETATO DE NH ₄ ppm	Fe EXTRAIDO ACETATO DE NH ₄ ppm
VI	1(0-20)	0.39	7.7	"	ND	51.84	ND
VI	1(40-50)	0.58	8.1	"	ND	3.24	ND
VI	2(0-20)	0.65	8.8	"	ND	3.24	ND
VI	2(40-50)	0.76	8.4	"	ND	6.48	ND
VI	3(0-20)	0.39	7.0	"	ND	12.96	ND
VI	3(40-50)	0.28	8.5	"	ND	1.08	ND
VI	3(grava)	0.41	7.1	-	ND	18.36	ND
VI	4(0-20)	0.58	8.0	"	ND	4.32	ND
VI	4(40-50)	0.52	7.7	"	ND	3.24	ND
I	5(0-20)	0.23	7.7	-	ND	6.48	ND
I	5(40-50)	0.25	8.3	"	ND	2.16	ND
I	6(0-20)	0.35	7.6	"	ND	6.48	ND
I	6(40-50)	0.30	7.5	-	ND	2.16	ND
I	7(0-20)	0.34	8.2	"	ND	3.24	ND
I	7(40-50)	0.26	8.7	"	ND	1.08	ND
I	8(0-20)	0.24	8.7	"	ND	1.08	ND
I	8(40-50)	0.29	8.1	"	ND	1.08	ND
VI	9(0-20)	0.30	7.6	"	ND	6.48	ND
VI	9(40-50)	0.29	8.1	"	ND	1.08	ND
VI	10(0-20)	0.56	7.3	-	ND	1.08	ND
VI	10(40-50)	0.48	7.3	-	ND	6.48	ND
I	11(0-20)	0.23	8.4	"	ND	1.08	ND
I	11(40-50)	0.16	8.6	"	ND	ND	ND
I	11(grava)	0.18	7.8	-	ND	5.4	ND
I	12(0-20)	0.35	7.7	"	ND	5.4	ND
I	12(40-50)	0.23	8.3	"	ND	2.16	ND
VI	13(0-20)	0.64	8.0	"	ND	2.16	ND
VI	13(40-50)	0.58	7.9	"	ND	3.24	ND
V	14(0-20)	0.28	8.8	"	ND	ND	ND
V	14(40-50)	0.27	8.9	-	ND	ND	ND
IV	15(50-70)	0.53	8.5	"	35.64	ND	ND
IV	16(0-20)	1.23	8.0	"	ND	2.16	ND
IV	16(40-50)	1.2	7.3	-	ND	4.32	ND
IV	17(0-20)	0.18	8.2	-	ND	1.08	ND
IV	17(40-50)	0.2	8.3	-	ND	1.08	ND
IV	18(0-20)	0.28	7.7	-	ND	5.4	ND
IV	18(40-50)	0.22	7.6	"	ND	1.08	ND
IV	19(0-20)	0.21	7.7	"	ND	2.16	ND
IV	19(40-50)	0.13	8.0	-	ND	1.08	ND
IV	20(0-20)	0.77	8.2	"	ND	2.16	ND
IV	20(40-50)	0.49	7.8	"	ND	1.08	ND
IV	21(0-20)	0.45	8.4	"	ND	ND	ND
IV	21(40-50)	0.35	8.2	"	ND	1.08	ND
IV	22(0-20)	0.48	8.4	"	ND	2.16	ND
IV	22(40-50)	0.32	8.0	"	ND	12.96	ND
IV	23(0-20)	0.33	8.0	"	1.08	2.16	ND
IV	23(40-50)	0.24	8.6	"	1.08	1.08	ND

RESULTADOS SUELOS

TABLA No. 6 (CONTINUACION)

ESTRATOS	LUGAR Y PROFUNDIDAD CM	CONDUCTIVIDAD MOHMS-1 CM-1	pH SUELO AGUA (± 5)	PRESENCIA CO ₃ =	Cr (VI) DISPONIBLE ppm	Mn EXTRAIDO ACETATO DE NH ₄ ppm	Fe EXTRAIDO ACETATO DE NH ₄ ppm
IV	24(0-20)	0.24	7.0	"	ND	1.08	ND
IV	24(40-50)	0.31	8.1	"	ND	1.08	ND
IV	25(0-20)	0.71	7.6	"	ND	4.32	ND
IV	25(40-50)	0.66	7.5	"	ND	4.32	ND
IV	26(0-20)	0.21	8.3	"	ND	1.08	ND
IV	27(0-20)	1.05	9.3	"	324.0	ND	ND
IV	27(40-50)	0.63	7.8	"	10.8	1.08	ND
IV	28(0-20)	0.79	7.9	"	ND	1.08	ND
IV	28(40-50)	0.38	8.4	-	ND	ND	ND
VI	29(0-20)	0.43	7.6	"	ND	2.16	ND
VI	29(40-50)	0.26	8.4	"	ND	ND	ND
VI	30(0-20)	0.16	7.9	-	ND	ND	ND
VI	30(40-50)	0.14	7.7	-	ND	2.16	ND
VI	31(0-20)	0.20	7.3	-	ND	4.32	ND
VI	31(40-50)	0.19	8.0	-	ND	ND	ND
VI	32(0-20)	6.20	9.5	"	5400	ND	ND
VI	32(40-50)	1.75	9.7	"	1080	ND	ND
II	33(sup)	9.68	7.8	"	6480	1.08	ND
II	33(0-20)	1.16	7.9	-	216	ND	ND
II	33(1 m)	0.49	8.7	"	108	ND	ND
II	34(0-20)	0.23	7.4	-	ND	11.88	ND
II	34(1 m)	0.32	7.9	"	ND	1.08	ND
II	35(1 m)	0.20	7.3	-	ND	2.16	ND
II	36(0-15)	1.62	8.7	"	1296	ND	ND
II	36(30-50)	0.48	8.8	-	216	ND	ND
II	36(1m)	0.92	9.6	"	270	ND	ND
II	37(0-20)	3.58	11.1	"	ND	ND	2.16
II	37(40-50)	0.43	8.9	-	ND	ND	ND
II	38(1 m)	0.14	8.5	"	ND	1.08	ND
III	39(0-20)	0.87	8.5	"	108	ND	ND
III	39(40-50)	0.49	8.8	"	21.6	ND	ND
III	40(0-20)	0.79	8.4	"	32.4	ND	ND
III	40(40-50)	0.66	7.7	"	1.08	ND	ND
III	41(0-20)	0.17	8.3	"	ND	1.08	ND
III	41(40-50)	0.26	9.1	"	ND	ND	ND
III	42(0-20)	0.40	9.4	"	ND	3.24	ND
III	42(40-50)	0.23	8.4	"	ND	1.08	ND
III	43(0-20)	0.39	8.0	"	ND	2.16	ND
III	43(40-50)	0.45	8.4	"	ND	ND	ND
III	44(0-20)	0.46	8.1	"	ND	1.08	ND
III	44(40-50)	0.39	8.4	"	ND	ND	ND
III	45(0-20)	1.31	7.6	"	ND	ND	ND
III	45(40-50)	1.29	9.5	"	ND	ND	ND
III	46(0-20)	0.20	7.0	-	ND	1.08	ND
III	46(40-50)	0.38	6.7	"	ND	2.16	ND
III	47(0-10)	0.47	9.2	"	ND	ND	ND
III	47(40-50)	0.59	9.4	"	ND	ND	ND

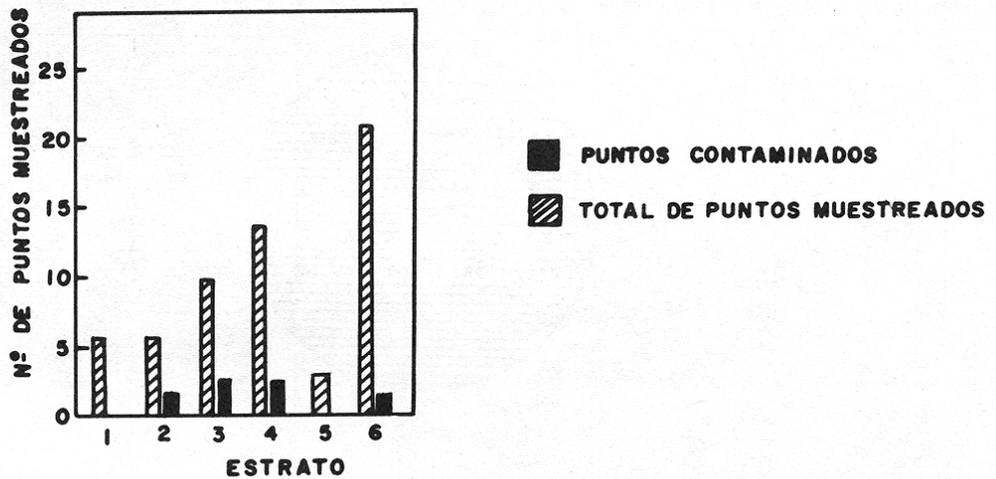


Figura:13 DISTRIBUCION POR ESTRATO DE LOS PUNTOS CONTAMINADOS

De las muestras con cromo, el 15.8% presentó valores menores de 10 ppm, el 31.6% valores comprendidos entre 10 y 100 ppm, un 31.6% mayores de 100 y menores de 200 ppm, y el resto, 21.05%, correspondió a cantidades comprendidas entre 500 y 6480 ppm, (Fig. 14).

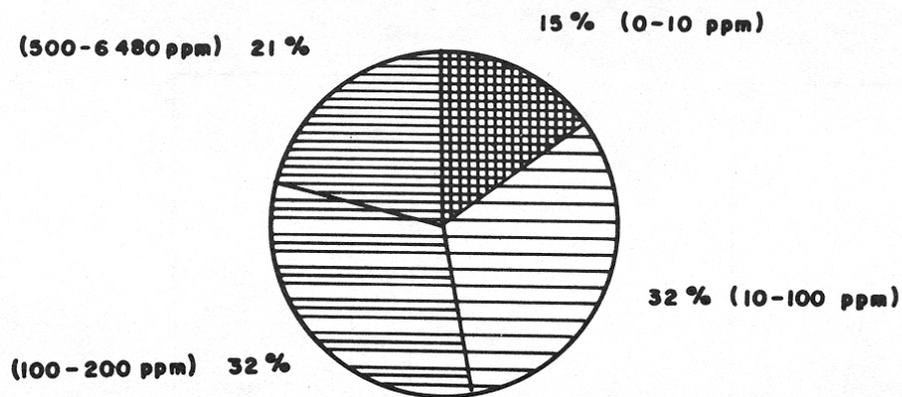


Figura:14 NIVELES DE CROMO EN SUELOS CONTAMINADOS

El 80% de los puntos en que se comprobó la presencia de cromo soluble pertenece a los estratos II, III y IV. El área aproximada de esta zona es de 30 hectáreas (Fig. 15).

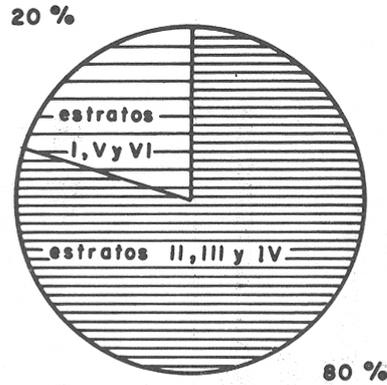


Figura:15 UBICACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO CONTAMINADOS

Se confirmó la presencia de cromo en los estratos II (vía López Portillo), III (colonia Recursos Hidráulicos) y IV (colonia Lechería). De los dos puntos que correspondieron al estrato VI, uno de ellos está ubicado junto a la colonia Lechería y el otro se localiza a la vera de un camino vecinal cerca del estrato I (carretera México-Cuautitlán).

Los análisis de muestras de suelos que pertenecen al mismo punto, pero de diferente profundidad, presentan valores significativamente diferentes. En la mayoría de los casos el valor más alto correspondió a la muestra superficial (Figura 16 y Tabla 6).

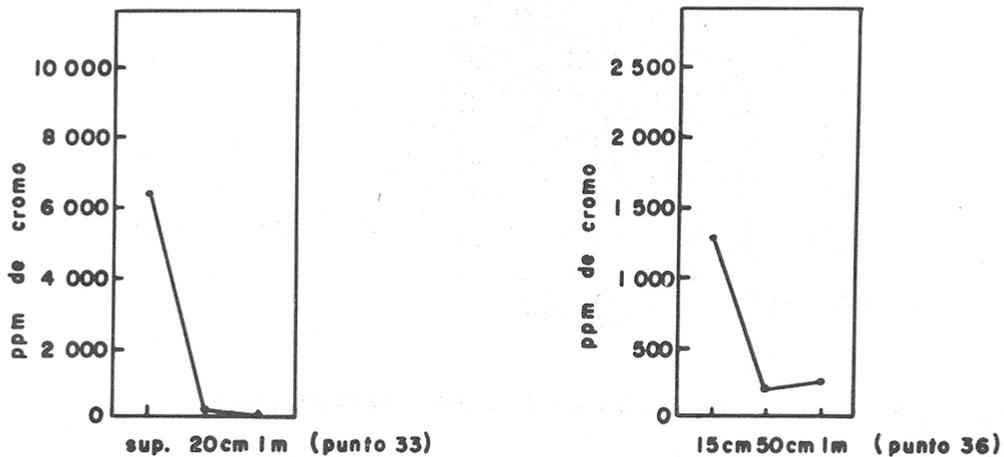


Figura:16 DISTRIBUCION DE CROMO POR PROFUNDIDAD EN SUELOS CONTAMINADOS

4.2 Análisis de los datos de aguas subterráneas (Tablas 7 y 8)

Del total de pozos muestreados, únicamente se encontró cromo en concentraciones mayores de 0.05 ppm (nivel máximo permisible, National Research Council of Canada, 1962) en el agua de los pozos uno, dos, cinco y ocho de la Comisión Federal de Electricidad, y en el de los pozos dos y tres de Good Year Oxo.

Las muestras de agua que contienen cantidades menores de 0.05 ppm, pero mayores al límite de detección del método de análisis químico (0.007 ppm), pertenecen a los pozos tres y siete de la Comisión Federal de Electricidad y al uno de Good Year Oxo.

Los valores promedio obtenidos, expresados en parte por millón de cromo, son para la Comisión Federal de Electricidad: pozo uno, 0.95; pozo dos, 1.97; pozo cinco, 0.57; y para Good Year Oxo: pozo dos, 3.5 y pozo tres, 0.26.

Los datos obtenidos coinciden satisfactorialmente con los resultados del estudio realizado, para uso interno, por la Comisión de Aguas del Valle de México, entre 1976 y 1978 (tabla 10). En el, la mayor concentración correspondió a un pozo ubicado dentro del foco contaminante, actualmente clausurado; los valores mayores al límite sanitario, a pozos de la Comisión Federal de Electricidad y Good Year Oxo; y los niveles muy bajo (= 0.01 ppm) a pozos de Bacardí, Conasupo y Altos Hornos. Estos últimos valores no se detectaron en este estudio, pero hay que tomar en consideración que están muy cercanos al límite de detección del equipo, y las interferencias pueden alterar fácilmente los resultados.

Los análisis realizados para uso interno por la Comisión Federal de Electricidad, durante 1984 (tabla 11), indican datos muy similares a los informados en este estudio (tabla 9).

No. POZO	Promedio CFE Cr (ppm)	Promedio Inst. Geg. Cr (ppm)
1	1.6	0.95
2	1.03	1.97
5	0.57	0.60

Tabla 9. Promedios del contenido de cromo en pozos 1, 2 y 5 de la Comisión Federal de Electricidad, Planta Jorge Luque, 1984.

La zona de contaminación queda circunscrita a un área con un radio no mayor de 500 m desde el sitio que ocupó la empresa que produjo los residuos, hacia el noroeste, oeste y suroeste, y no ha aumentado en los últimos años.

RESULTADOS ANALISIS AGUA

Tabla No. 7
Muestreo 1

Noviembre 1984

UBICACION	NUMERO DE POZO	CONDUCT. MOHMS-1 CM-1	Na ⁺ ppm	pH	Fe ³⁺ ppm (1)	Mn ²⁺ ppm (2)	Cr ⁶⁺ ppm (3)
FC-Los Reyes.	15	0.69	94	7.7	ND	0.1	ND
"	14	-	-	-	-	-	-
"	12	0.60	80	7.6	0.1	0.5	ND
"	10	0.55	67	7.4	ND	0.3	ND
"	9	0.44	57	7.3	0.1	0.4	ND
"	8	0.51	67	7.2	ND	0.2	ND
"	6	0.43	58	7.1	0.1	0.2	ND
"	4	0.40	57	7.2	ND	ND	ND
"	3	-	-	-	-	-	-
"	2	0.75	86	6.9	1.43	ND	ND
ExHda. Portales	3	1.14	180	7.6	ND	1.30	ND
"	2	1.53	346	7.9	0.03	0.4	ND
"	1	1.55	389	7.8	ND	0.2	ND
Teoloyucan	6	0.28	28	7.2	ND	ND	ND
"	5	0.32	34	7.5	ND	ND	ND
"	4	0.31	38	7.6	ND	ND	ND
"	3	0.32	47	7.7	ND	ND	ND
"	2	0.39	55	7.3	ND	ND	ND
Camesa	2	3.2	228	7.1	ND	ND	ND
"	1	0.5	69	7.4	ND	ND	ND
Fanal	2	0.6	105	7.6	ND	ND	ND
"	1	0.5	92	7.5	ND	ND	ND
Bacardi	1	0.5	65	7.3	ND	ND	0.007
Conasupo	1	0.45	57	7.7	ND	ND	ND
A. Hornos	1	0.65	99	7.0	ND	ND	ND
"	3	-	-	-	-	-	-
CFE	2	0.55	85	7.4	ND	ND	ND
"	1	0.6	95	7.0	ND	ND	ND
"	5	1.00	153	6.7	ND	ND	0.6
"	8	-	-	-	-	-	-
"	3	0.41	60	7.7	ND	ND	ND
"	7	-	-	-	-	-	-
Good-Year	2	0.48	58	7.7	0.8	ND	5.6
"	1	0.49	61	7.7	ND	0.05	0.04
"	3	0.48	67	7.5	ND	ND	0.3

(1) Límite de detección Fe³⁺ - 0.01 ppm

(2) Límite de detección Mn²⁺ - 0.01 ppm

(3) Límite de detección Cr⁶⁺ - 0.007 ppm

RESULTADOS ANALISIS AGUA

Tabla No. 7 (CONTINUACION)
Muestreo 2

Diciembre 1984

UBICACION	NUMERO DE POZO	CONDUCT. MOHMS-1 CM-1	Na ⁺ ppm	pH	Fe ³⁺ ppm (1)	Mn ²⁺ ppm (2)	Cr ⁶⁺ ppm (3)
FC-Los Reyes.	15	0.67	87	7.7	ND	0.13	ND
"	14	-	-	-	-	-	-
"	12	0.60	65	7.8	ND	0.50	ND
"	10	0.56	60	7.3	ND	0.28	ND
"	9	0.46	55	7.4	ND	0.44	ND
"	8	0.52	58	7.4	ND	0.22	ND
"	6	0.52	58	7.0	0.13	0.53	ND
"	4	0.42	53	7.3	ND	0.01	ND
"	3	-	-	-	-	-	-
"	2	-	-	-	-	-	-
ExHda. Portales	3	1.12	208	7.2	1.26	1.37	ND
"	2	1.55	370	7.6	ND	0.31	ND
"	1	1.53	370	7.8	0.35	0.3	ND
Teoloyucan	6	0.29	23	7.4	ND	ND	0.006
"	5	0.35	29	7.6	ND	ND	ND
"	4	0.35	35	7.2	ND	ND	ND
"	3	0.37	38	7.3	ND	0.005	ND
"	2	0.50	55	7.2	ND	ND	ND
Camesa	2	0.51	101	7.3	ND	ND	ND
"	1	3.22	174	7.0	ND	ND	ND
Fanal	2	0.60	101	7.5	ND	ND	ND
"	1	0.49	93	7.2	ND	ND	ND
Bacardi	1	0.51	49	7.5	ND	ND	ND
Conasupo	1	0.44	50	7.6	ND	ND	ND
A. Hornos	1	0.44	155	7.0	ND	ND	0.007
"	3	-	-	-	-	-	-
CFE	2	0.53	77	7.2	ND	ND	1.95
"	1	0.62	68	6.9	ND	ND	0.41
"	5	1.01	153	6.7	ND	ND	0.41
"	8	0.99	131	6.9	3.44	ND	0.42
"	3	0.41	46	7.4	ND	ND	0.006
"	7	0.40	41	7.3	ND	ND	0.01
Good-Year	2	0.53	1	7.2	0.32	ND	4.11
"	1	0.48	48	7.1	ND	ND	0.04
"	3	0.58	51	7.1	ND	ND	0.32

(1) Límite de detección Fe³⁺ - 0.01 ppm

(2) Límite de detección Mn²⁺ - 0.01 ppm

(3) Límite de detección Cr⁶⁺ - 0.007 ppm

RESULTADOS ANALISIS AGUA*

Tabla No. 8
Muestreo 1

Noviembre 1984

UBICACION	NUMERO DE POZO	TEMP. °C	ALCA-LINI-DAD mg/1 (1)	ACIDEZ mg/1 (2)	DUREZA TOTAL mg/1 (3)	DUREZA CALCIO (4)	CLORUROS ppm
FC-Los Reyes.	15	24	336	3.7	197	86.4	28.9
"	14	-	-	-	-	-	-
"	12	23	222	3.7	208	72.0	51.6
"	10	26	266	7.1	169	64.8	54.4
"	9	21	226	5.5	131	46.8	39.1
"	8	20	226	5.5	117	54	28.9
"	6	23	228	5.5	172	57.6	34.0
"	4	23	220	7.4	133	46.8	34.0
"	3	-	-	-	-	-	-
"	2	26	260	3.7	216	10.8	54.4
ExHda. Portales	3	20	290	12.0	185.4	117	99
"	2	19	300	14.0	82.8	45	108
"	1	19	110	14.0	61.2	36	54
Teoloyucan	6	27	324	7.4	144	39.6	17
"	5	26	366	3.7	127	43.2	17
"	4	27	370	3.7	135	39.6	20.4
"	3	29	300	3.7	144	32.4	25.5
"	2	26	246	12.95	144	45	25.5
Camesa	2	20	140	38.0		48.6	979.8
"	1	19	200	12	181.8	72	33.2
Fanal	2	19	94	4.0	66.6	36.0	14.9
"	1	19	52	5.0	46.6	23.4	9.9
Bacardi	1	22	170	4	330	36	24.9
Conasupo	1	22	166	9.25	126	37.8	11.9
A. Hornos	1	21	206	14	80.4	54	41.5
"	3	-	-	-	-	-	-
CFE	2	20	188	20.0	108	41.4	41.5
"	1	21	180	24.0	126	54.0	56.4
"	5	21	220	74.0	198	90	145.7
"	8	-	-	-	-	-	-
"	3	21	160	10.0	90.0	27.0	24.9
"	7	-	-	-	-	-	-
Good-Year	2	21	170	18.0	144	59.4	33.2
"	1	20	170	14	126	54	36.5
"	3	20	170	14.0	162	57.6	39.8

* Análisis realizados en la planta potabilizadora de MADIN, CAVM, SARH.

(1) Límite de detección Fe³⁺ - 0.01 ppm

(2) Límite de detección Mn²⁺ - 0.01 ppm

(3) Límite de detección Cr⁶⁺ - 0.007 ppm

RESULTADOS ANALISIS AGUA*
RUTINA

Tabla No. 8

Muestreo 2 (CONTINUACION)

Diciembre 1984

UBICACION	NUMERO DE POZO	TEMP. °C	ALCA-LINI-DAD mg/1 (1)	ACIDEZ mg/1 (2)	DUREZA TOTAL mg/1 (3)	DUREZA CALCIO (4)	CLORUROS ppm
FC-Los Reyes.	15	25	249.6	4.0	211	68.2	26.5
"	14	-	-	-	-	-	-
"	12	25	243.6	8.0	230.4	106.4	49.8
"	10	25	209	8.0	222.3	68.2	58.1
"	9	22	121.8	6.0	117.3	46.1	38.1
"	8	15	172.5	4.0	136.5	54.6	41.5
"	6	22	172.5	6	164	51.8	49.8
"	4	24	142.1	4	109.2	27.3	13.2
"	3	-	-	-	-	-	-
"	2	-	-	-	-	-	-
ExHda. Portales	3	19	304.5	14.0	108	41.4	-
"	2	26	304.5	12.0	67	45	108
"	1	19	110	14.0	61.2	36	54
Teoloyucan	6	27	324	7.4	144	39.6	17
"	5	26	366	3.7	127	43.2	17
"	4	27	370	3.7	135	39.6	20.4
"	3	29	300	3.7	144	32.4	25.5
"	2	26	246	12.95	144	45	25.5
Camesa	2	20	140	38.0		48.6	979.8
"	1	19	200	12	181.8	72	33.2
Fanal	2	19	94	4.0	66.6	36.0	14.9
"	1	19	52	5.0	46.6	23.4	9.9
Bacardi	1	22	170	4	330	36	24.9
Conasupo	1	22	166	9.25	126	37.8	11.9
A. Hornos	1	21	206	14	80.4	54	41.5
"	3	-	-	-	-	-	-
CFE	2	20	188	20.0	108	41.4	41.5
"	1	21	180	24.0	126	54.0	56.4
"	5	21	220	74.0	198	90	145.7
"	8	-	-	-	-	-	-
"	3	21	160	10.0	90.0	27.0	24.9
"	7	-	-	-	-	-	-
Good-Year	2	21	170	18.0	144	59.4	33.2
"	1	20	170	14	126	54	36.5
"	3	20	170	14.0	162	57.6	39.8

* Análisis realizados en la planta potabilizadora de MADIN, CAVM, SARH.

- (1) Límite de detección Fe³⁺ - 0.01 ppm
 (2) Límite de detección Mn²⁺ - 0.01 ppm
 (3) Límite de detección Cr⁶⁺ - 0.007 ppm

RESULTADOS ANALISIS AGUA*
RUTINA

Tabla No. 8
Muestreo 3 (CONTINUACION)

Enero 1985

UBICACION	NUMERO DE POZO	TEMP. °C	ALCA- LINI- DAD mg/1 (1)	ACIDEZ mg/1 (2)	DUREZA TOTAL mg/1 (3)	DUREZA CALCIO (4)	CLORU- ROS ppm
FC-Los Reyes.	15	24	302	10.2	178.2	72.9	31.5
"	14	26	283.5	7.1	232.2	72.9	33
"	12	24	283.5	7.1	216	54.4	46.4
"	10	24	229.5	10.2	189	86.4	99.9
"	9	22	265.5	12.4	170.1	86.4	46.6
"	8	24	207.9	12.4	167.4	78.3	41.5
"	6	27	229.5	14.8	170.1	51.8	49.8
"	4	26	202.5	17.2	143.1	35.1	26.5
"	3	25	210.6	14.8	189	40.5	38.1
"	2	23	183.6	14.28	248.4	70.1	58.1
ExHda. Portales	3	18	437.0	13.93	221.1	72	99.1
"	2	22	589.4	9.95	118.8	31.2	113.1
"	1	20	623.2	19.9	264	86.4	146.6
Teoloyucan	6	22	172.8	8.1	145.4	27	16.6
"	5	22	174.6	7.1	205.2	40.5	16.6
"	4	24	189.0	8.1	194.4	43.2	16.6
"	3	29	300	3.7	144	32.4	25.5
"	2	25	205.2	12.4	162	45.9	28.9
Camesa	2	22	377.7	15.9	1369.5	540	95.7
"	1	25	288.5	11.9	214.5	72	55.6
Fanal	2	21	368.4	19.9	188.1	48	43.5
"	1	20	260.9	9.95	132	40.8	26.1
Bacardi	1	-	260.9	13.9	112.3	31.2	40.0
Conasupo	1	20	210.6	10.25	148.5	51.3	24.9
A. Hornos	1	-	291.6	69.6	179.5	75.9	55.6
"	3	-	291.6	15.9	168.3	75.9	48.7
CFE	2	-	254.8	15.9	165	45.6	69.6
"	1	-	245.6	11.9	165	40.8	55.6
"	5	-	343.8	99.5	240.9	76.8	144.4
"	8	-	307.0	59.7	141.9	38.4	69.6
"	3	-	214.9	13.9	174.9	69.3	26.1
"	7	-	245.6	7.96	141.9	38.4	29.5
Good-Year	2	-	251.7	9.95	188.1	72	43.5
"	1	-	230.2	19.9	214.5	72	31.5
"	3	-	251.7	19.9	825	69.3	46.9

* Análisis realizados en la planta potabilizadora de MADIN, CAVM, SARH.

Tabla No. 10
 CONCENTRACIONES DE CROMO HEXVALENTE (*)
 Promedios por año

LOCALIZACION	1976 CROMO VI	1977 CROMO VI	1978 CROMO VI
Cromatos, S.A.	22.33	24.47	24.40
Good Year 1	0.25	0.27	0.24
Good Year 2	0.35	0.17	0.25
Good Year 3	0.30	0.20	0.23
Conasupo 1	0.011**	0.01**	0.01**
Conasupo 2	0.013	0.01**	0.01**
Bacardi	0.011**	0.01**	0.01**
Termoeléctrica (CFE) 4	0.15	-	0.14
Termoeléctrica (CFE) 2	0.57	-	0.87
Termoeléctrica (CFE) 6	0.010**	-	0.01**
Altos Hornos 3	0.010**	0.01**	0.01**

Análisis realizados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de sus dependencias Comisión de Aguas del Valle de México y dirección general de Protección y Ordenación Ecológica.

(*) Únicamente se indican los datos de pozos en los cuales el nivel del cromo era superior al límite recomendado, o son puntos muestreados en este estudio

(**) Aunque no está especificado en el documento original, los valores cercanos a 0.01 no son exactos pues se encuentran en el límite de detección del método analítico.

TABLA No. 11
CONCENTRACIONES DE CROMO PRESENTE EN
POZOS DE LA TERMoeLECTRICA (CFE).

1983

	No. pozo	mes XI	mes XII
CFE	1	1.7	1.6
CFE	2	-	-
CFE	3	0.05	0.03
CFE	4	0.60	0.60
CFE	5	2.30	0.40
CFE	6	-	-
CFE	7	1.30	0.01
CFE	8	-	-

1984

No. pozo	mes I	mes II	mes III	mes IV	mes VII	mes VIII	mes IX
1	2.1	2.0	1.5	1.70	1.80	1.90	1.10
2	1.8	1.7	-	1.10	1.20	1.10	0.80
3	0.01	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05
4	0.6	0.7	0.60	0.90	1.20	-	-
5	1.4	1.6	1.20	1.20	0.20	0.20	0.40
6	-	-	-	-	-	-	-
7	0.02	0.03	-	0.70	0.80	0.80	0.02
8	-	-	0.03	-	0.03	0.03	-

(*) la concentración de cromo esta expresada en ppm.
Fuente: C F E
Laboratorio de la Planta Jorge Luque (uso interno).

La profundidad total de los pozos contaminados es variable, los de la Comisión Federal de Electricidad fluctúan entre 210 y 300 m, y los de Good Year Oxo, entre 120 y 180 m (tabla 2).

Los datos de los niveles estáticos y dinámicos de los pozos de la Comisión Federal de Electricidad también son variables. Los primeros fluctúan entre 52 y 72 m y los segundos entre 57 y 98 m (tabla 2). La empresa Good Year Oxo no proporcionó ninguna información al respecto.

La posibilidad de que los pozos se contaminen desde el exterior es remota, ya que no se detectó manganeso ni hierro en agua, a excepción del pozo 2 de Good Year Oxo. Se esperaría, en este caso, la presencia de vestigios de esos elementos, en especial de hierro, ya que está presente en los polvos procedentes de las industrias de la zona en estudio.

5. PROPOSICIONES Y CONCLUSIONES

5.1 Cromo depositado en suelos superficiales.

Las zonas afectadas por el relleno, con los residuos contaminantes, son las colonias Lechería, Recursos Hidráulicos y la vía López Portillo. El área contaminante no rebasa las 35 hectáreas. Una definición más precisa de esta zona obligaría a un muestreo exhaustivo el cual, bajo las condiciones actuales (múltiples construcciones, otros rellenos, etc.), y por la forma de azar en que fue depositado el material, no resultaría costeable.

El poco movimiento de cromo observado en suelos, hacia horizontes más profundos, hace pensar que el material dispersado no presenta riesgos de contaminación de los acuíferos en explotación (situados a más de 30 m de profundidad). Los mantos superficiales que podrían haber sido afectados se han secado.

No hay evidencias de desplazamientos laterales, ni a estratos inferiores, de este elemento. Sin embargo, como una consecuencia de la evaporación del agua, causada por la alternancia de estaciones seca y húmeda, el cromo soluble viaja hacia la superficie y se deposita sobre ella, de manera análoga al comportamiento del sodio en suelos salinos (tabla 6 y Fig. 16).

Se propone un diagrama de los movimientos e interacciones del cromo que fue depositado en suelos superficiales (Fig. 17). La hipótesis que se plantea indica que el cromo viaja preferentemente a la superficie, de donde puede ser transportado a la atmósfera por el viento, y producir daños en la salud de los habitantes, animales y plantas (absorción foliar); además, puede causar problemas en las construcciones y en el drenaje. El cromo que permanece en el suelo puede dañar a plantas y bacterias, pero el peligro de la contaminación vía aire es mayor por su facilidad para introducirse dentro de los organismos vivientes.

La profundidad total de los pozos contaminados es variable, los de la Comisión Federal de Electricidad fluctúan entre 210 y 300 m, y los de Good Year Oxo, entre 120 y 180 m (tabla 2).

Los datos de los niveles estáticos y dinámicos de los pozos de la Comisión Federal de Electricidad también son variables. Los primeros fluctúan entre 52 y 72 m y los segundos entre 57 y 98 m (tabla 2). La empresa Good Year Oxo no proporcionó ninguna información al respecto.

La posibilidad de que los pozos se contaminen desde el exterior es remota, ya que no se detectó manganeso ni hierro en agua, a excepción del pozo 2 de Good Year Oxo. Se esperaría, en este caso, la presencia de vestigios de esos elementos, en especial de hierro, ya que está presente en los polvos procedentes de las industrias de la zona en estudio.

5. PROPOSICIONES Y CONCLUSIONES

5.1 Cromo depositado en suelos superficiales.

Las zonas afectadas por el relleno, con los residuos contaminantes, son las colonias Lechería, Recursos Hidráulicos y la vía López Portillo. El área contaminante no rebasa las 35 hectáreas. Una definición más precisa de esta zona obligaría a un muestreo exhaustivo el cual, bajo las condiciones actuales (múltiples construcciones, otros rellenos, etc.), y por la forma de azar en que fue depositado el material, no resultaría costeable.

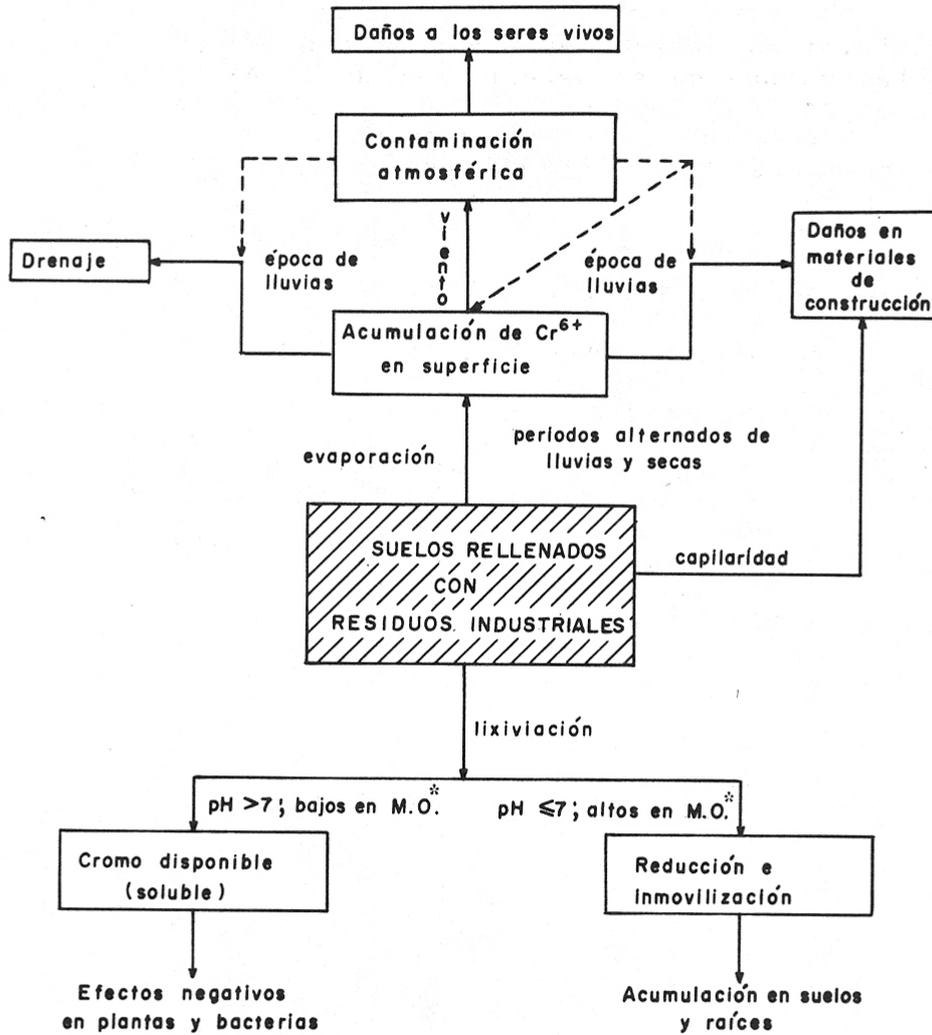
El poco movimiento de cromo observado en suelos, hacia horizontes más profundos, hace pensar que el material dispersado no representa riesgos de contaminación de los acuíferos en explotación (situados a más de 30 m de profundidad). Los mantos superficiales que podrían haber sido afectados se han secado.

No hay evidencias de desplazamientos laterales, ni a estratos inferiores, de este elemento. Sin embargo, como una consecuencia de la evaporación del agua, causada por la alternancia de estaciones seca y húmeda, el cromo soluble viaja hacia la superficie y se deposita sobre ella, de manera análoga al comportamiento del sodio en suelos salinos (tabla 6 y Fig. 16).

Se propone un diagrama de los movimientos e interacciones del cromo que fue depositado en suelos superficiales (Fig. 17). La hipótesis que se plantea indica que el cromo viaja preferentemente a la superficie, de donde puede ser transportado a la atmósfera por el viento, y producir daños en la salud de los habitantes, animales y plantas (absorción foliar); además, puede causar problemas en las construcciones y en el drenaje. El cromo que permanece en el suelo puede dañar a plantas y bacterias, pero el peligro de la contaminación vía aire es mayor por su facilidad para introducirse dentro de los organismos vivientes.

Figura: 17

DISPERSION DEL CROMO DEPOSITADO EN SUELOS



* M.O. = materia orgánica

5.2 Cromo contenido por las aguas subterráneas.

El cromo se está desplazando en dirección inversa a la del flujo general (oeste/este). Este hecho confirma la hipótesis de que está ocurriendo una inversión de flujos a nivel local, por sobreexplotación (Fig. 8), y que el agua se está extrayendo del almacenamiento.

El cromo depositado en el cementerio, lentamente está viajando a los estratos más profundos, ya que el material contiene amorfos y arcillas. Los primeros lo retienen directamente, pues tienen afinidad con los iones negativos, y los segundos indirectamente, pues dificultan el paso del agua, por interacciones electrostáticas con ésta. A pesar de estas condiciones, ya se detectó, a 50 metros de profundidad del cementerio, cromo que se mueve hacia el poniente, junto con el flujo de agua causado por la extracción en los pozos cercanos, que tienen los gastos más elevados de la zona.

Mientras se mantengan las condiciones actuales de explotación y los pozos vecinos sigan con tan elevados gastos, es poca la probabilidad de que la solución que contiene al cromo viaje a mantos más profundos, lo que no invalida que, debido a la heterogeneidad del sustrato geológico, el agua pueda encontrar medios rápidos para su desplazamiento, como las zonas de fracturas y arenas/gravas.

El confinamiento de los residuos fue una solución adecuada; los problemas se deben a que no se tomó en cuenta la composición y el comportamiento químico del residuo, ni se aisló de la humedad y del subsuelo.

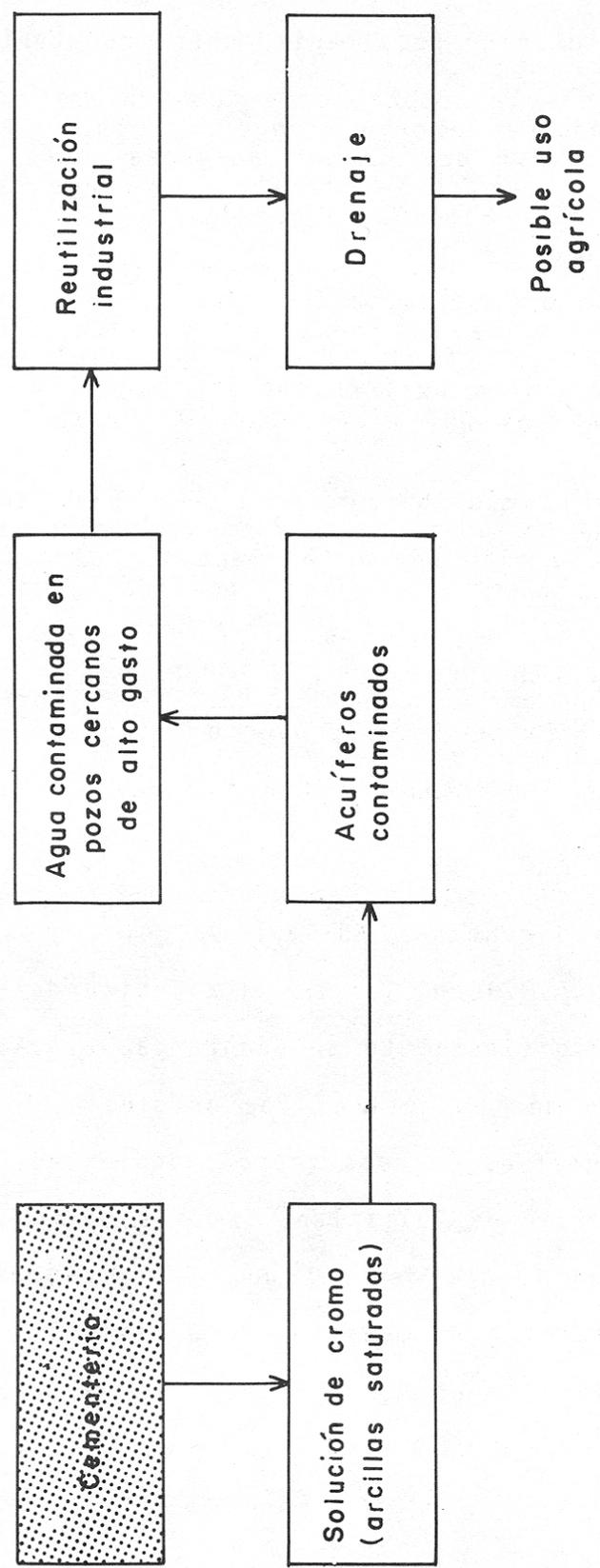
Se propone un diagrama del movimiento del cromo que fue depositado en el cementerio, o inyectado, o ambas cosas (Fig. 18), en el que se indica que el cromo está preferentemente localizado en el cementerio y en los primeros 50 m de material arcilloso del subsuelo. Está desplazándose hacia los pozos vecinos con alto gasto, y, finalmente, pasa al sistema de drenaje en donde puede reaccionar con la materia orgánica y depositarse en forma de sales insolubles o, debido a condiciones de basicidad fuertes, mantenerse soluble y pasar a formar parte del caudal de riego de los distritos agrícolas cercanos.

5.3 Proposición de soluciones

Muchas de las ideas y resultados de este trabajo son ya tema de una segunda etapa de estudio en la que se ha mantenido la colaboración de especialistas de diferentes disciplinas, y el enfoque interdisciplinario inicial, en el que se revisa profundamente la viabilidad de las soluciones que a continuación se proponen:

En las zonas afectadas con relleno, que aún no están cubiertas con pavimentos o construcciones, por ejemplo, la colonia Recursos Hidráulicos, se debe remover el material, tratarlo químicamente para inmovilizar el cromo (reducirlo) y confinarlo en el cementerio. Si esto último no es posible, se recomienda distribuirlo en áreas con suelos básicos, aunque hay que hacer notar que si no se realiza la

Figura 18 DISPERSIÓN DEL CROMO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS



reducción química, esta solución resultaría contraproducente.

Donde no sea posible la remoción, se deben acidificar los suelos y añadir materia orgánica de origen vegetal, con el fin de coadyuvar a la reducción natural del cromo: adicionalmente, convendría plantar la mayor cantidad de árboles posibles, ya que cerca de las raíces existen ambientes favorables a la reducción.

En el caso del material confinado, se estima que la solución implica una reducción con alguna sustancia barata, como podría ser la materia orgánica procedente de los desagües o alguna otra como el ácido sulfúrico. Si las características del material resultante lo permite, éste podría utilizarse posteriormente, por ejemplo, para ladrillos, o, en su defecto, se podría revolver a confinar sin problemas.

En caso de que sea imposible mover el material confinado, 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 procedimiento debe ser sometida a un tratamiento para eliminar al cromo.

A G R A D E C I M I E N T O S

Este trabajo forma parte de un proyecto elaborado con apoyo de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, SEDUE.

Se agradece a la licenciada Adriana Ducquing y a la maestra Belem Trejo (IIMAS - U.N.A.M.), el diseño estadístico del muestreo; a la maestra Carmen Valverde (Instituto de Geografía, U.N.A.M.), el haber puesto a disposición de los autores los originales, la cartografía base y las fotografías aéreas correspondientes al estudio realizado sobre el municipio de Tultitlán, Edo. de México; a la ingeniera Leonor Berrones, residente general de la planta potabilizadora de Madín, la ayuda prestada en el muestreo de aguas y los análisis de rutina; y, finalmente, al técnico Moisés García la elaboración de las figuras de este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apha, Awwa, FSIWA. 1955. Métodos normales para los exámenes de aguas, aguas negras y desechos industriales. México: División de Salubridad, Bienestar y Habitación, Instituto de Asuntos Internacionales.
- Artiole, J. y W. Fuller. 1979. Effect of chromium attenuation in soils. Journal of Environmental Quality, 8 (4): 503-509.
- Aubert, H. y M. Pinta. 1980. Trace elements in soils; development in soil science. 7th ed. New York: Elsevier.
- Báez Pedrajo, Armando, Irma Rosa Pérez, Raúl Belmont Dávila. 1977. Determinación de cromo en dos poblaciones humanas no ocupacionalmente expuestas. An. Inst. Biol. Ser. Biol. Exp. 48 (1): 77-93.
- Barnett, Vic. 1984. Reimp. Elements of sampling theory. London: Hodder Stoushton.
- Bartlett, R.J. 1979. Behavior of chromium in soils: III Oxidation. Journal of Environmental Quality, 8 (1): 31-34.
- _____. 1976 a. Behavior of chromium in soils: II Hexavalent forms. Journal of Environmental Quality, 5 (1): 283-386.
- _____ y J.M. Kimble 1976 b. Behavior of chromium in soils: I trivalent forms. Journal of Environmental Quality, 5 (4): 379-382.
- Batley, F.E. y D. Gardner. 1977. Sampling and storage of natural waters for trace metal analysis. Water research, 11 (9): 745-756.
- Black, C.A. ed. 1965. Methods of Soil Analysis. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy.
- Chapman, H.D. ed. 1965. Diagnostic criteria for plants and soils. Riverside, Cal: Department of Soils and Plant Nutrition, University of California.

- Departamento del Distrito Federal. 1975. Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal. México: Talleres Gráficos de la Nación.
- Federal Security Agency, 1953. Health of workers in chromate producing industry. Washington, D.C.: the Agency (Public Health Service Publications, No. 192).
- Gómez Arroyo Sandra y Rafael Villalobos Pietrini. 1983. Chromosoma alterations induced by some chromium salts. Cytologia 48:185-193.
- Gutiérrez Ruíz Margarita Eugenia. 1982. Estudio del contenido de iones inorgánicos y sus interacciones en suelos y plantas de los distritos de riego 03 y 88. México. Tesis (maestría en Química). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Barcelona: Omega.
- James, B. y R.J. Bartlett. 1983 a. Behavior of chromium in soils. VI. Interaction between oxidation, reduction and organic complexation. Journal of Environmental Quality, 12 (2):173-176
- _____. 1983 b. Behavior of chromium in soils. VII. Adsorption and reduction of hexavalent forms. Journal of Environmental Quality, 12 (2): 177-180.
- Kirk y Othmer. 1979. Encyclopedia of chemical technology 3rd. ed. New York: J. Wiley. V.G., p. 54-56, 82-120.
- National Research Council, Canada. Associate committee on Scientific Criteria for Environmental Quality. 1976. Effects of chromium in the Canadian environment. Ottawa: The Committee (Pub. No. 15017).
- Purves, D. 1977. Trace elements contamination of the environment. Amsterdam: Elsevier.
- Rosas Pérez, Irma. 1984. Aspectos ecotoxicológicos del cromo en una zona industrial del estado de México. Tesis (doctorado en Ciencias). Universidad Nacional Autónoma de México.

_____, Armando Baéz Pedrajo y Raúl Belmont Dávila. 1977. Cuantificación de cromo en el suelo y vegetales de una zona contaminada por cromo residual de origen industrial. An. Inst. Biol. ser. Biol. Exp. 48 (1):95 - 112.

Ross, D.F., R.E. Sjogren y R.J. Bartlett. 1981. Behavior of Chromium in soils: IV. Toxicity to microorganisms. Journal of Environmental Quality, 10 (2): 145-148.

Secretaría de Educación, Cultura y Bienestar Social del Estado de México. S.A. Resumen del asunto relativo a la industria Cromatos de México, S.A. México: la Secretaría.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. 1961 a. Estudio geoquímico de las aguas subterráneas en el valle de Cuautitlán. México: la Secretaría.

_____. 1961 b. Hidrogeología del valle de Cuautitlán. México: la Secretaría.

Servicios Geofísicos. 1966. Estudio hidrogeológico y geofísico de la zona de Cuautitlán. México: los Servicios.

Tristán, L.A. 1984. Estudio general del proyecto: Sulfato de aluminio reciclado de los desechos de la planta Cromatos de México, S.A. México: CINADI.

Valverde Valverde Carmen, Adrián Guillermo Aguilar Martínez y Ma. Luisa García Amaral. 1980. Geografía urbana del municipio de Tultitlán, estado de México. Mecanografía.