

Discusión

VI.1 Resultados

Las tablas que se presentan a continuación son el resumen de todos los datos recabados en las 45 estaciones de trabajo en campo y los resultados obtenidos a partir del procesamiento de estos datos mediante la metodología propuesta en el capítulo anterior (**Tabla 6.2** y **Tabla 6.3**). Sin embargo, también fueron necesarios otros valores que permanecen constantes de acuerdo a los parámetros físicos del analizador infrarrojo, de la cámara de acumulación y del CO_2 (**Tabla 6.1**).

Tabla 6.1: Constantes importantes para el cálculo del flujo de CO_2 en las 45 estaciones estudiadas en el CVC.		
Constantes	Valor	Descripción
R	8.31451 [Pa · m ³ · mol ⁻¹ · K ⁻¹]	Constante universal de los gases en unidades del Sistema Internacional.
V _{Total del sistema}	1.07 × 10 ⁻³ [m ³]	Es la suma total de los volúmenes de los medios a través de los cuales viaja el CO_2 durante el ciclo de acumulación.
A _{Suelo expuesto}	0.00716 [m ²]	Corresponde al área que ocupa la cámara de acumulación sobre el suelo.

$V_{\text{Cámara}}$	$9.62 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$	Es la cantidad total de gas que puede circular dentro de las tuberías de la cámara de acumulación.
$V_{\text{tubería}}$	$8.146 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]}$	Es la cantidad de gas alojado en las tuberías que van de la cámara al analizador.
$V_{\text{Analizador}}$	$3.5628 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$	Es la cantidad de gas que puede circular dentro del analizador infrarrojo.
$V_{\text{Unidad de flujo}}$	$2.2525 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]}$	Es la cantidad de gas que puede circular dentro de la unidad de flujo, encargada de bombear el aire.
1 [mol de CO_2]	44 [g de CO_2]	Es la masa molar empleada para convertir los flujos a unidades de $[\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}]$.

Respecto a las **Tabla 6.2** y **Tabla 6.3**, cabe aclarar que cuando los valores del FCO_2 son iguales a cero, es debido a que se obtuvo una pendiente negativa en la tasa de incremento de CO_2 , lo cual puede traducirse como una fuga de aire durante el ciclo de acumulación de dióxido de carbono al momento de la medición producto de la alta porosidad del medio, provocando una difusión de los gases en direcciones más horizontales que verticales.

Resulta importante aclarar que durante los cálculos de los valores de FCO_2 realizados por Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008), ellos obtuvieron los valores de la pendiente de la tasa de aumento de concentración del CO_2 en suelos mediante una regresión lineal aplicada a la curva generada durante los 600 segundos que dura la medición en suelos; es decir, la pendiente que obtuvieron no corresponde a la tasa máxima de incremento del CO_2 en suelos y esto causó que sus flujos resultaran más bajos que los que aquí se presentan. Debido a la ausencia de suficiente información, solo se pudieron corregir algunos de los puntos realizados por Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008), y aún así los resultados no variaron mucho.

Tabla 6.2: Datos y resultados de los cálculos del FCO_2 de la campaña de mediciones del 2009

Estación	Fecha	Hora [UTC-6:00]	T_{cam} [K]	P_{cam} [KPa]	dC/dt	F_{CO_2} [$\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$]
N01	09-04-09	15:25	312.26	83.32	3.1207	56.8724
N02	01-05-09	16:03	312.76	79.46	5.9117	102.5809
N03	09-04-09	17:06	315.34	85.09	-0.1284	0
N04	09-04-09	12:11	301.9	83.77	5.0149	95.0396
N05	09-04-09	13:31	306.71	88.43	2.5458	50.1317
N06	01-05-09	13:24	308.13	88.21	2.7102	52.9910
N07	08-04-09	12:04	302.45	79.16	7.4327	132.8665
N08	08-04-09	11:04	296.98	78.95	-1.7505	0
N09	08-04-09	16:39	306.65	76.06	11.948	202.4069
N10	01-05-09	14:41	314.5	81.7	7.2624	128.8541
N11	01-05-09	11:31	303.89	79.91	11.072	198.8509
N12	01-05-09	10:10	300.96	73.5	0.338	5.6378
N13	02-05-09	14:36	304.88	81.92	2.979	54.6699
N14	25-04-09	14:06	303.61	72.73	5.8239	95.2858
N15	25-04-09	15:52	303.05	76.58	8.893	153.4851
N16	08-04-09	17:49	303.57	76.52	2.6447	45.5312
N17	08-04-09	14:26	307.46	78.08	-0.2171	0
N18	01-05-09	10:35	302	73.92	2.4298	40.6202
N19	01-05-09	09:33	296.36	74.55	9.4012	161.5207
N20	03-04-09	17:22	305.11	67.62	2.4368	36.8855
N21	07-04-09	10:05	298.34	71.76	0.2774	4.5572
N22	30-04-09	14:59	305.72	71.01	11.642	184.6886
N23	30-04-09	15:55	307.35	75.72	8.6282	145.1825
N24	30-04-09	17:09	307.32	75.57	2.5832	43.3844
N25	07-04-09	12:46	304.46	75.91	0	0
N26	07-04-09	11:17	300.01	75.84	4.8139	83.1144
N27	25-04-09	16:43	305.09	78.97	2.2625	39.9981
N28	25-04-09	18:12	303.85	72.03	19.363	313.5044
N29	25-04-09	18:43	298.49	71.73	6.6451	109.0660

N30	26-04-09	16:21	306.16	75.12	10.863	182.0429
N31	26-04-09	13:31	311.42	86.03	28.859	544.5045
N32	26-04-09	14:27	309.17	79.71	0.1162	2.0462
N33	07-04-09	14:37	305.69	79.09	2.9285	51.7490
N34	30-04-09	12:58	303.79	73.15	12.198	200.6071
N35	07-04-09	18:43	308.3	75.12	1.2765	21.2432
N36	07-04-09	16:12	312.97	77.28	0	0
N37	26-04-09	12:06	307.26	84.86	-0.2223	0
N38	26-04-09	19:27	306.56	86	-1.3243	0
N39	26-04-09	17:48	303.65	81.91	2.2548	41.5421
N40	03-04-09	14:42	311.56	77.02	7.7189	130.3269
N41	30-04-09	10:16	298.86	70.86	25.521	413.2833
N42	25-04-09	11:43	299.21	72.36	0.6964	11.5027
N43	25-04-09	09:43	295.07	72.83	3.5267	59.4526
N44	08-04-09	12:54	304.55	79.05	81.996	1453.6261
N45	03-04-09	13:26	307.92	78.2	7.9075	137.1592

Tabla 6.3: Datos y resultados de los cálculos del FCO_2 de la campaña de mediciones del 2010

Estación	Fecha	Hora [UTC-6:00]	T_{cam} [K]	P_{cam} [KPa]	dC/dt	F_{CO_2} [$\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$]
N01	26-03-10	13:47	308.38	83.50	0.4209	7.7858
N02	26-03-10	16:53	310	79.43	3.1353	54.8774
N03	26-03-10	15:54	310.8	84.93	0.2946	5.4996
N04	26-03-10	10:48	298.2	83.63	17.021	326.1045
N05	26-03-10	11:50	303.85	88.24	4.4492	88.2726
N06	02-04-10	12:21	302.71	87.96	0.0454	0.9013
N07	29-03-10	14:32	302.84	78.41	1.6517	29.2152
N08	29-03-10	13:45	298.41	78.17	14.234	254.7309
N09	29-03-10	17:13	300.07	75.82	0.9929	17.1382
N10	02-04-10	14:15	306.28	81.66	0.2727	4.9668
N11	02-04-10	11:12	299.41	79.85	0.8603	15.6743
N12	02-04-10	10:12	297.56	73.56	5.0981	86.1016

N13	24-03-10	19:05	303.75	81.23	3.3067	60.4121
N14	30-03-10	15:30	298.11	72.77	1.2487	20.8233
N15	30-03-10	16:56	299.65	77.09	12.001	210.9169
N16	26-03-10	17:42	305	76.35	0.3033	5.1866
N17	29-03-10	16:19	302.01	77.48	0.0222	0.3891
N18	02-04-10	10:31	298.74	73.86	2.5196	42.5576
N19	02-04-10	09:43	293.7	74.49	1.257	21.7783
N20	22-03-10	11:31	295.38	67.56	0.3237	5.0578
N21	22-03-10	12:14	298.98	70.97	0.9447	15.3186
N22	22-03-10	15:58	303.84	70.25	15.208	240.2163
N23	22-03-10	16:57	303.57	75.40	0.5986	10.1573
N24	22-03-10	18:25	299.65	75.35	6.8747	118.0934
N25	23-03-10	10:53	297.92	75.72	4.857	84.3349
N26	22-03-10	14:33	303.13	74.90	6.6693	112.5789
N27	30-03-10	17:36	301.16	78.93	0.318	5.6938
N28	30-03-10	18:27	298.88	72.14	6.5533	108.0590
N29	30-03-10	19:04	295.56	71.91	1.9691	32.7293
N30	24-03-10	14:24	307	74.94	18.144	302.5532
N31	24-03-10	11:32	301.25	85.97	17.657	344.2241
N32	24-03-10	10:28	298.31	79.86	8.596	157.2022
N33	23-03-10	13:53	304.49	78.46	-0.0833	0
N34	22-03-10	13:23	300.82	72.61	1.6249	26.7927
N35	23-03-10	12:54	301.83	74.92	0.0206	0.3493
N36	23-03-10	15:48	306.79	76.75	2.002	34.2156
N37	24-03-10	12:38	305.59	84.52	-0.1125	0
N38	24-03-10	17:19	307.76	85.97	1.3782	26.3003
N39	24-03-10	15:56	306.53	81.75	0.837	15.2495
N40	02-04-10	15:23	304.28	77.00	0.5246	9.0694
N41	22-03-10	09:26	292.99	70.53	19.772	325.1311
N42	30-03-10	14:06	300.39	72.23	3.7865	62.1959
N43	30-03-10	12:23	299.72	73.22	4.2755	71.3553
N44	29-03-10	15:16	304.79	78.31	7.9189	138.9955
N45	01-04-10	11:40	302.21	78.82	3.8114	67.9099

Posteriormente con los datos de posición GPS recabados en los sitios de medición (bajo la proyección UTM), se procedió a cartografiar los mapas de contornos de iso-flujos de dióxido de carbono utilizando los valores de Z como los valores de FCO_2 , tal como lo muestra la **Tabla 6.4**.

Los mapas de iso-flujos de CO_2 de las **Figura 6.5** y **Figura 6.6** muestran la distribución de flujos de CO_2 a lo largo del CVC en los años 2009 y 2010, respectivamente. En la **Figura 6.5** pueden observarse dos zonas donde el FCO_2 es mayor. La principal de éstas se ubica al SE de la Ciudad de México, en las inmediaciones de San Andrés Mixquic, D. F. con flujos cuyos valores ascienden a $1.4 [\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}]$ y la segunda en la estación Pueblo Nuevo ubicada al SE de Malinalco, Edo. de México., cuyos valores ascienden a $0.54 [\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}]$. Por otro lado, en la **Figura 6.6** pueden observarse diversas anomalías distribuidas sobre los bordes Norte y Sur del campo volcánico, siendo la máxima de $0.34 [\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}]$ también en la estación de Pueblo Nuevo, y las segundas en magnitud en la estación Tepoztlán, Mor. y Los Dinamos, D.F., ambas con $0.32 [\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}]$. Otras anomalías de menor magnitud pueden ser observadas en Huexoculco, Edo. de México., San Juan Atzingo, Edo. de México. y sobre la Carretera Federal México – Cuernavaca, siendo estas dos últimas correlacionables con los sistemas de falla de Chalma y La Pera, respectivamente.

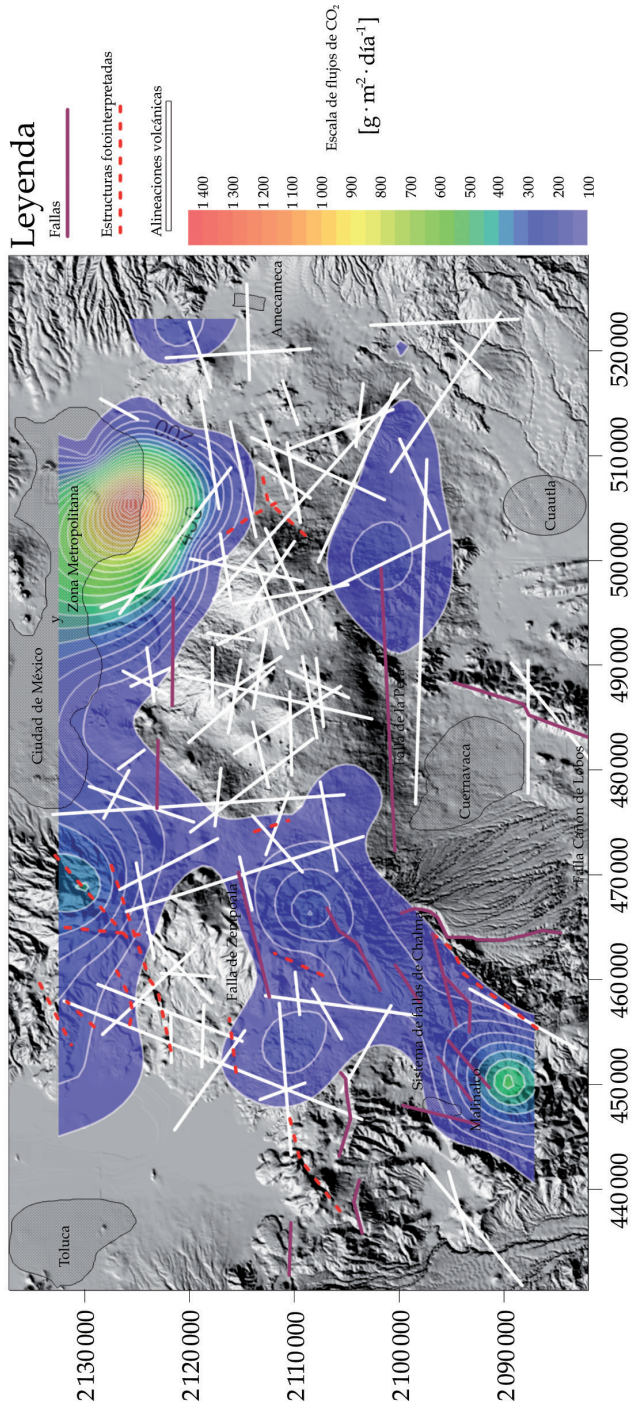


Figura 6.5: Mapa de isoflujos de CO₂ para la campaña de mediciones del año 2009. El valor más alto fue de 1,453 [g · m² · día⁻¹] ubicado en las inmediaciones de Mixquic, D.F.; y el valor más bajo fue de 2 [g · m² · día⁻¹] ubicado al NE de la comunidad de Malinalco, Edo. de México. Se muestran las trazas de las fallas (en morado) y fracturas fotointerpretadas (en líneas punteadas rojas), así como las alineaciones volcánicas de la **Figura 3.3**.

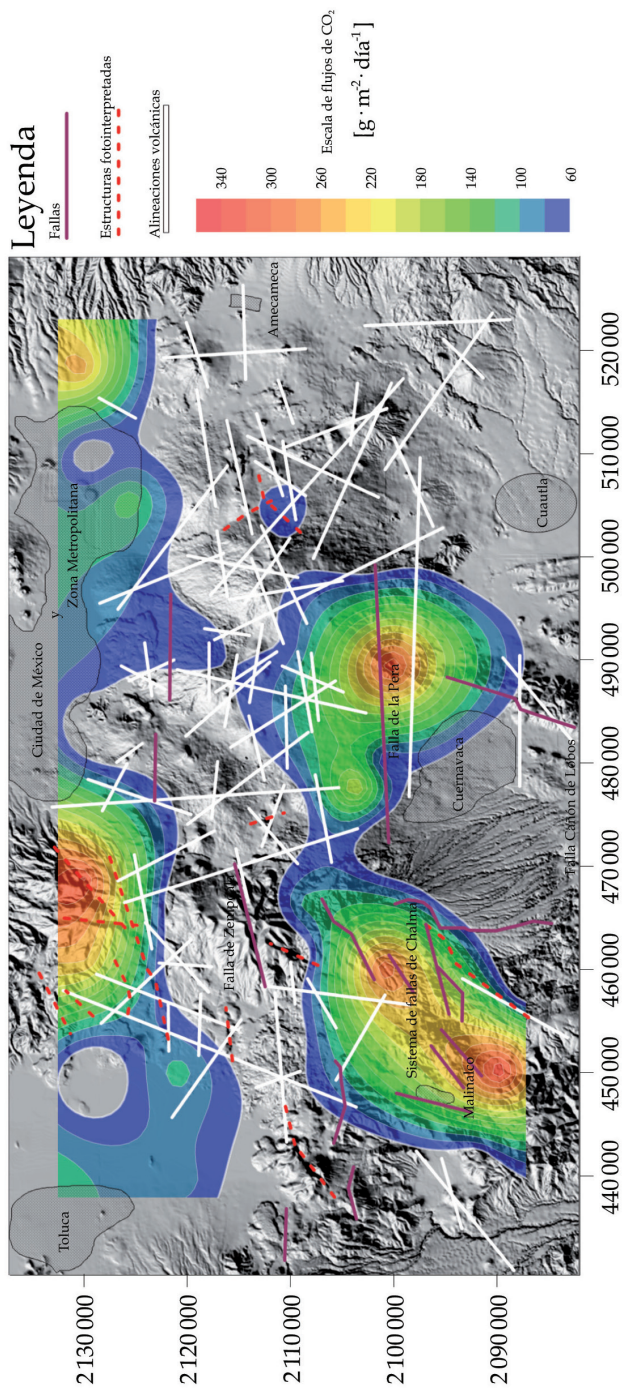


Figura 6.6: Mapa de isoflujos de CO₂ , obtenido para la campaña de mediciones del año 2010. El valor más alto fue de 344 [g · m⁻² · día⁻¹] ubicado dentro del Sistema de Fallas de Chalma; y el valor más bajo fue de 0.3 [g · m⁻² · día⁻¹] ubicado al SE de la ciudad de Tenango, Edo. De México. Se muestran las trazas de las fallas (en morado) y fracturas fotointerpretadas (en líneas punteadas rojas), así como las alineaciones volcánicas de la **Figura 3.3**.

Tabla 6.4: Datos empleados para elaborar los mapas de isoflujos de CO₂ de ambas campañas de medición. Coordenadas UTM 14Q - WGS84

Estación	Nombre	X	Y	2009 F _{CO₂} [g m ⁻² día ⁻¹]	2010 F _{CO₂} [g m ⁻² día ⁻¹]
N01	Xochitlán	519942.24	2088426.47	56.8724	7.7858
N02	Tlacotitlán	520675.22	2099988.68	102.5809	54.8774
N03	Yecapixtla	509851.26	2089569.98	0	5.4996
N04	Tepoztlán	489549.74	2100119.47	95.0396	326.1045
N05	Yautepec	492607.39	2090154.90	50.1317	88.2726
N06	Oaxtepec	500010.72	2091139.31	52.9910	0.9013
N07	Chalco	510124.44	2129577.86	132.8665	29.2152
N08	Huexoculco	518292.65	2130066.17	0	254.7309
N09	Tlalmanalco	522002.66	2121116.95	202.4069	17.1382
N10	Totolapan	510311.68	2098850.58	128.8541	4.9668
N11	Tlalnepantla	500363.67	2102612.19	198.8509	15.6743
N12	CICITEC-IPN 1	506203.68	2110656.28	5.6378	86.1016
N13	Autopista 95	480402.97	2101053.35	54.6699	60.4121
N14	C.F. Mex-Cuer 1	476150.37	2109956.40	95.2858	20.8233
N15	C.F. Mex-Cuer 2	477721.20	2103542.86	153.4851	210.9169
N16	Zoyatzingo	523100.47	2109828.32	45.5312	5.1866
N17	Temamatla	514028.46	2120212.92	0	0.3891
N18	CICITEC-IPN 2	507617.28	2110946.64	40.6202	42.5576
N19	Milpa Alta	500875.29	2118707.50	161.5207	21.7783
N20	El Capulín	466949.20	2120235.45	36.8855	5.0578
N21	Xalatlaco	460816.22	2120069.65	4.5572	15.3186
N22	Atlapulco	460881.99	2129635.68	184.6886	240.2163
N23	San Pedro Cholula	450189.46	2129532.90	145.1825	10.1573
N24	Metepéc	439821.97	2132489.15	43.3844	118.0934
N25	San Antonio La Isla	439413.31	2119463.07	0	84.3349
N26	Santiago Tlanguistenco	450268.80	2120822.76	83.1144	112.5789

N27	San Pedro	472452.49	2101120.89	39.9981	5.6938
N28	Zempoala	466506.01	2108663.21	313.5044	108.0590
N29	Santa Martha	461663.30	2108907.80	109.0660	32.7293
N30	San Juan Atzingo	460328.78	2100853.74	182.0429	302.5532
N31	Pueblo Nuevo	450343.58	2089678.61	544.5045	344.2241
N32	Malinalco	450052.18	2100407.72	2.0462	157.2022
N33	Tenancingo	439436.99	2100905.94	51.7490	0
N34	La Esperanza	453674.16	2110375.07	200.6071	26.7927
N35	Tenango	437965.84	2109926.69	21.2432	0.3493
N36	Desierto del Carmen	442004.71	2091993.05	0	34.2156
N37	Tlajotla	458387.38	2087111.86	0	0
N38	CIVAC	481098.32	2090922.09	0	26.3003
N39	Buenavista del Monte	467682.51	2093844.46	41.5421	15.2495
N40	H. Colegio Militar	483018.07	2129132.00	130.3269	9.0694
N41	Los Dinamos	468829.55	2129907.39	413.2833	325.1311
N42	Chichinautzin	491449.07	2110282.28	11.5027	62.1959
N43	Oztotepec	492426.50	2119426.14	59.4526	71.3553
N44	Mixquic	505578.18	2125536.19	1453.6261	138.9955
N45	Tepepan	487631.73	2128565.06	137.1592	67.9099

VI.2 Significado de los Resultados

Todas las mediciones se realizaron de manera similar. Sin embargo, el comportamiento de los flujos de dióxido de carbono en todas las estaciones de trabajo varió de una u otra forma. A continuación se discutirán las mediciones más sobresalientes.

La **Figura 6.7** muestra los resultados obtenidos por Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008). En su caso, la anomalía principal puede observarse al Sur de la Ciudad de México, en la estación N40 – Colegio Militar, alcanzando valores de $16.064 \text{ [g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}]$ que representan tan solo el 1.1% del flujo máximo calculado durante el presente estudio respecto a la estación N44 – Mixquic medida el 8 de abril del 2009, con un valor de $1,453.626 \text{ [g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}]$. Este flujo rebasa incluso los valores reportados para volcanes activos como el Vesubio o el Etna (Fron dini et al, 2004; D’Alessandro et al, 1997)

La región circundante a la estación N44 – Mixquic se encuentra densamente poblada pues corresponde a la Zona Metropolitana oriente de la Ciudad de México y los valores tan altos de FCO_2 reportados en este punto pueden estar influenciados por los siguientes factores:

1. La existencia de antiguos tiraderos de basura en los alrededores de Chalco, Estado de México y el mismo desarrollo urbano han provocado la contaminación de aguas subterráneas en la zona, que puede generar una producción de CO_2 adicional.
2. La estación se encuentra en lo que fuere el Lago de Texcoco y por lo tanto la presencia de materia orgánica en el lecho del lago puede estar aún en estado de descomposición y liberar CO_2 .
3. La presencia de una estructura geológica oculta y a profundidad que está permitiendo la ventilación de CO_2 proveniente de una posible fuente volcánica.

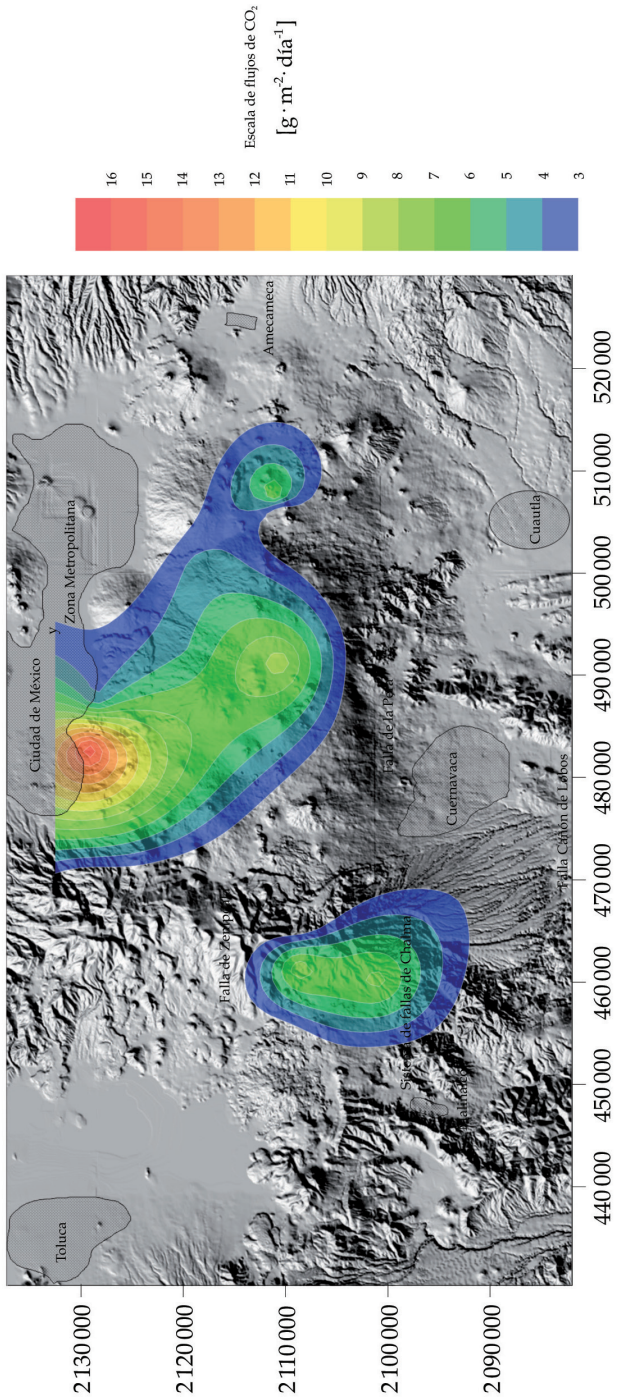


Figura 6.7: Mapa de isoflujos de CO₂ obtenidos por Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008).

A partir de datos sísmicos recabados del Servicio Sismológico Nacional se construyó el mapa de la **Figura 6.8**, el cual muestra los contornos de isoflujos del año 2009 y epicentros de los sismos que han sido detectados dentro del CVC desde 1996 hasta el 2010. De este mapa resulta interesante la alta concentración de sismos en el sector NE del campo volcánico, muy cerca de la estación de trabajo N44 – Mixquic, y que permite pensar que los fenómenos sísmicos de la zona pudieran estar relacionados con esa gran cantidad de CO₂.

Sin embargo, existen otras anomalías no tan altas dentro del Sistema de Fallas de La Pera, Chalma y Zempoala, así como en el Parque Nacional de Los Dinamos ubicado al SW de la Ciudad de México, en las que se puede apreciar claramente que estas estructuras geológicas regionales actúan como ventilas de CO₂ a través de sus planos de debilidad al ser zonas de mayor permeabilidad.

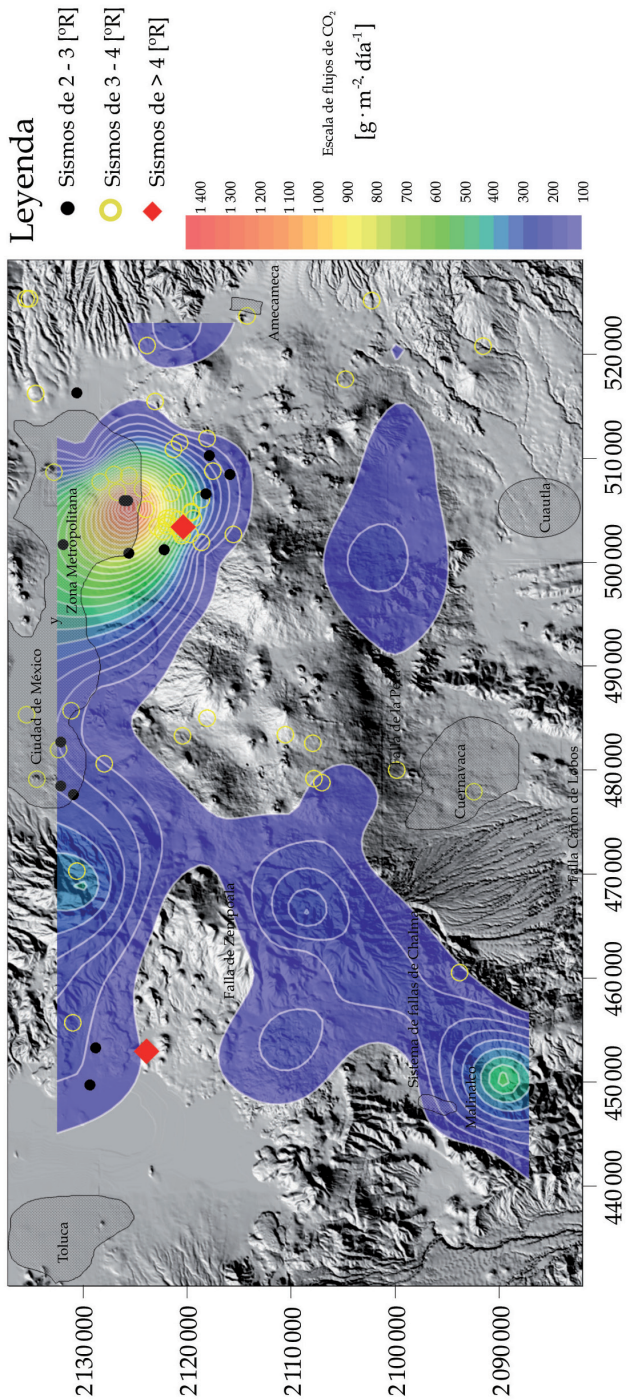


Figura 6.8: Mapa de isoflujos de CO₂ para la campaña de mediciones del 2009 con la ubicación de sismos registrados en la zona desde 1996 hasta el 2010.