

27
8-23-82
CONF-810399-18

LBL-11967
CONF-810399



① I-4966
**THIRD SYMPOSIUM
ON THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD,
BAJA CALIFORNIA, MEXICO**



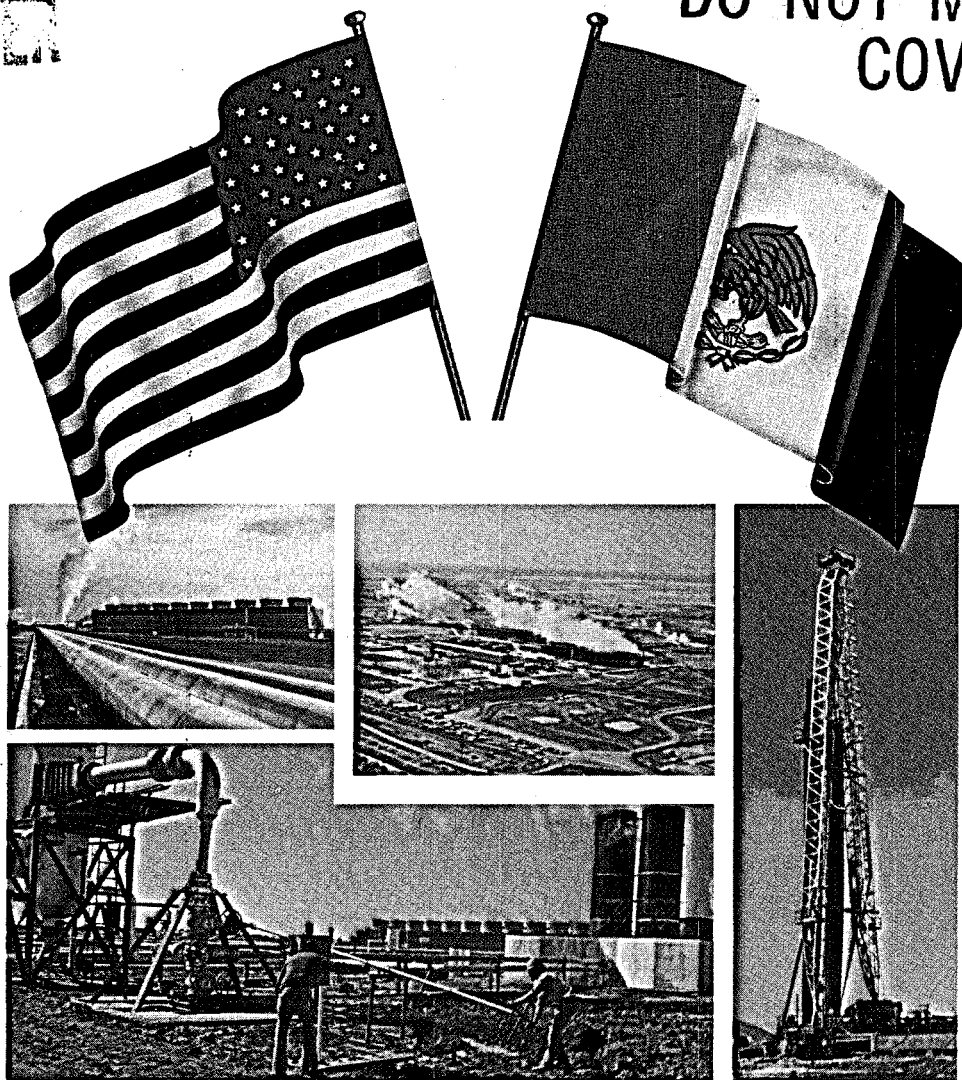
Sponsored by

United States Department of Energy, Office of Renewable Technology
Geothermal and Hydropower Technology Division

in Cooperation with
Comisión Federal de Electricidad de México

MASTER

DO NOT MICROFILM
COVER



PROCEEDINGS/ACTAS

March 24 - 26, 1981
San Francisco, California



Earth Sciences Division
Lawrence Berkeley Laboratory
University of California
Berkeley, California 94720



Coordinadora Ejecutiva
de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California,
México

Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC03-76SF00098

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS DE NIVELACION DE PRIMER ORDEN REALIZADOS EN EL VALLE DE MEXICALI Y EN EL CAMPO DE CERRO PRIETO

A. de la Peña L.
Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California, México

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del 3er levantamiento de Control Vertical realizado por la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (antes DETENAL), en los meses de Noviembre y Diciembre de 1979 y los del cálculo de los desniveles de campo, así como la graficación de los datos comparativos de los levantamientos de 1977, 1978 y 1979.

Así mismo, se exponen los resultados que se obtuvieron de una nivelación de 2do. orden llevada a cabo para verificar los posibles movimientos de la superficie del terreno como consecuencia del sismo ocurrido el día 8 de Junio de 1980, con epicentro a 15 Km. al Sureste del Poblado Guadalupe Victoria y de magnitud $ML=6.7$, que ocasionó el agrietamiento del terreno y la formación de volcancillos de arena con expulsión de agua en el campo de Cerro Prieto y sus alrededores. Dicha nivelación se realizó del banco BN-10067 ubicado en el cruce del canal Solfatara y la vía del ferrocarril Sonora-Baja California, al BN-10055 localizado en Estación Delta.

INTRODUCCION

El objetivo principal de este estudio fue el de comparar los datos que se han obtenido de las nivelaciones de precisión realizadas en el Valle de Mexicali durante los años de 1977, 1978 y 1979 y que tuvieron como propósito detectar asentamientos o levantamientos de la superficie del terreno y su variación a través del tiempo, y tratar de definir si son debidos a fallas activas que periódicamente motivan eventos sísmicos y reacomodo de las capas del subsuelo y/o por la extracción de agua de acuíferos tanto para fines agrícolas como geotérmicos.

ANALISIS Y REPRESENTACION DE LAS VARIACIONES VERTICALES DETECTADAS EN LAS RES NIVELACIONES

Con la información proporcionada por las nivelaciones corridas a lo largo de los bancos de nivel construidos para tal

fin (Fig. No. 1), se construyó la tabla No. 1, en la cual se indican las discrepancias obtenidas en los años 77-78, 77-79 y 78-79. Tomando la información de esta tabla, se graficaron las diferencias de elevaciones ortométricas obtenidas durante 1977-1978 y 1977-1979, tomando como línea base ó cero, la nivelación de 1977 (línea horizontal). Para facilitar su análisis, el trabajo se dividió en 4 tramos:

TRAMO I (Fig. No. 2)

Se inicia en el BN A-1225 localizado en la ciudad de Caléxico Cal., E. U. A., y termina en el BN-DDF-65 ubicado sobre la carretera Mexicali-San Felipe al pie de la Sierra de Cucapá.

Durante el período 77-78 en este tramo se observaron asentamientos y levantamientos del terreno sin seguir una tendencia definida, detectándose un asentamiento máximo de 50mm. en el BN-10011 y un levantamiento máximo de 28mm. en el BN-10017. En 77-79, se detectó que todo este tramo sufrió un asentamiento en relación con el intervalo 77-78, con excepción del BN-10002 que continuó levantándose hasta 30mm.

TRAMO II (Fig. No. 3)

Corresponde a un circuito que se inicia en el BN-DDF-65 sobre la carretera Mexicali-San Felipe, pasa por el campo de Cerro Prieto y por las faldas del volcán de Cerro Prieto y termina en el mismo banco DDF-65

En el intervalo 1977-1978, el comportamiento del terreno fue similar al del tramo anterior con ascensos hasta de 20mm. entre los BN-10066 y 10067 y descensos máximos de 28mm. en el BN-10127 y de 48mm. en el BN-10042. En el área de explotación del campo, se observó un asentamiento entre los BN-10059 al 10062 de 8mm. En el intervalo de tiempo de 1977 a 1979 prácticamente el terreno sufrió un asentamiento general, acentuándose en el área del campo entre los BN-10054 y el BN-10064 con descenso hasta de 76mm. en el BN-10060.

DISCLAIMER

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency Thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

TRAMO III (Fig. No. 4)

Se inicia en el BN-10067 sobre la carretera Pascualitos-Pescadero cerca del cruce con el canal Solfatará y termina en el BN-10109 localizado sobre la línea Internacional México-E. U. A.

Al graficar las discrepancias obtenidas de los levantamientos 1977-1978, se observó que en este tramo la superficie del terreno sufrió un levantamiento general con máximos de 33.0mm. y 33.1 mm. en los BN-10090 y 10095 respectivamente. Así mismo, de 1977 a 1979 la gráfica correspondiente nos muestra que del BN-10067 al 10083 hubo un asentamiento del terreno con relación a 1978 que fue disminuyendo hacia el BN-10083; a partir del banco 10085 el levantamiento detectado en el período 77-78 se incrementó, con un máximo de 62.1 mm. en el BN-10100. Los bancos 10098, 10103, 10105 y 10109 sufrieron hundimientos con relación al período 77-78.

TRAMO IV (Fig. No. 5)

Este tramo ubicado en territorio de E. U., comprende del BN R-1225 que se encuentra en la ciudad de Caléxico Cal., cercano a la línea internacional al BN-10145 ubicado a 4.94 Km. Al Sur de la unión de las carreteras 98 y 115, sobre el costado este de esta última carretera que va hacia Holtville

En este tramo el terreno sufrió un levantamiento general en el período 1977-1978, con un máximo de 38.7mm. en el BN-10138. Para el período 1977-1979 con excepción del BN-10109 que descendió 25.2mm., se incrementó considerablemente el levantamiento de la superficie del terreno alcanzado hasta 90.7mm. en el BN-10139.

No se tuvo información de los BN-10110 y 10111, porque fueron destruidos y fue necesario reemplazarlos.

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL TERREMOTO DEL 8 DE JUNIO DE 1980

El día 8 de Junio ocurrió un evento sísmico cuyo epicentro se localizó en el Poblado Guadalupe Victoria a 15 Km., aproximadamente al SE del campo de Cerro Prieto; este evento tuvo una magnitud de 6.7 en la escala de Richter (Fig. No. 6). Los principales efectos se resintieron precisamente en el área de Cerro Prieto y sus alrededores, donde se formaron innumerables agrietamientos, principalmente a lo largo de caminos y bordos, así como volcancillos de arena con expulsión de agua.

Una explicación de los efectos que causó este sismo, podría ser que los sedimentos consolidados a profundidad, actuaron como colchón de las arcillas, arenas y del nivel freático somero. En respuesta a las aceleraciones generadas por el evento, se produjo la liquefacción local de los sedimentos inconsolidados, dando origen a colapsos, asentamientos y levantamientos del terreno y la formación de volcancillos.

Para verificar la magnitud de los movimientos del terreno ocasionados por el sismo, se llevó a cabo una nivelación de 2do. orden del BN-10055 localizado en Estación Delta, al BN-10131 ubicado en las faldas del volcán de Cerro Prieto.

TRAMO V

Las discrepancias que se obtuvieron de esta nivelación de 2do. orden con relación a la de 1977, se graficaron (Fig. No. 7), observándose que los asentamientos que se habían detectado en 1978 y 1979 en el área del campo entre los BN-10057 y 10063, se acentuaron considerablemente con valores hasta de 492mm. en el BN-10060.

CONCLUSIONES

1.- En la parte occidental del Valle de Mexicali, se observó que los desplazamientos del terreno varían en forma irregular sin presentar una tendencia uniforme de hundimientos o levantamientos de la superficie del terreno.

2.- En el circuito que abarca el campo de Cerro Prieto, (Tramo II) en forma general, prevalecen las mismas condiciones que las mencionadas en el párrafo anterior, con excepción de la zona del campo en explotación donde los asentamientos del terreno se han ido incrementando a través del tiempo, acentuándose considerablemente como consecuencia del sismo "Victoria" ocurrido el día 8 de Junio de 1980.

3.- Una posible explicación del asentamiento registrado en el área del campo podría ser la extracción de agua geotérmica, la cual se incrementó considerablemente a raíz de la puesta en operación de las Unidades 3 y 4 de C. P., habiéndose extraído hasta el año de 1980 aproximadamente 176 millones de m³ de agua, esta extracción debe de haber propiciado los hundimientos registrados que posiblemente fueron intensificados como consecuencia del sismo del 8 de Junio.

4.- En la porción Norte y Nor-Oriental del Valle, se ha detectado que la superficie del terreno ha sufrido un levantamiento general que se va

incrementando hacia la frontera con E. U. A., y que bien puede ser ocasionado por fallas activas como la Imperial que periódicamente provocan eventos telúricos el reacomodo de las capas del subsuelo.

5.- En vista de la importancia que tienen para el campo de Cerro Prieto y otras posibles zonas geotérmicas en el Valle de Mexicali los movimientos de la corteza terrestre detectados, se ha decidido continuar con las mediciones anuales de nivelación de precisión por un período mínimo de 3 años.

REFERENCIAS

García, J. R., "Estudios de Nivelación de primer orden en Cerro Prieto". Actas 2do. Simposio sobre el Campo de Cerro Prieto (pags. 274 a 293). Dirección General de Geografía del Territorio Nacional, México D. F., Diciembre de 1980, Control Geodésico de Nivelación de primer orden en la Zona Geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California Norte.

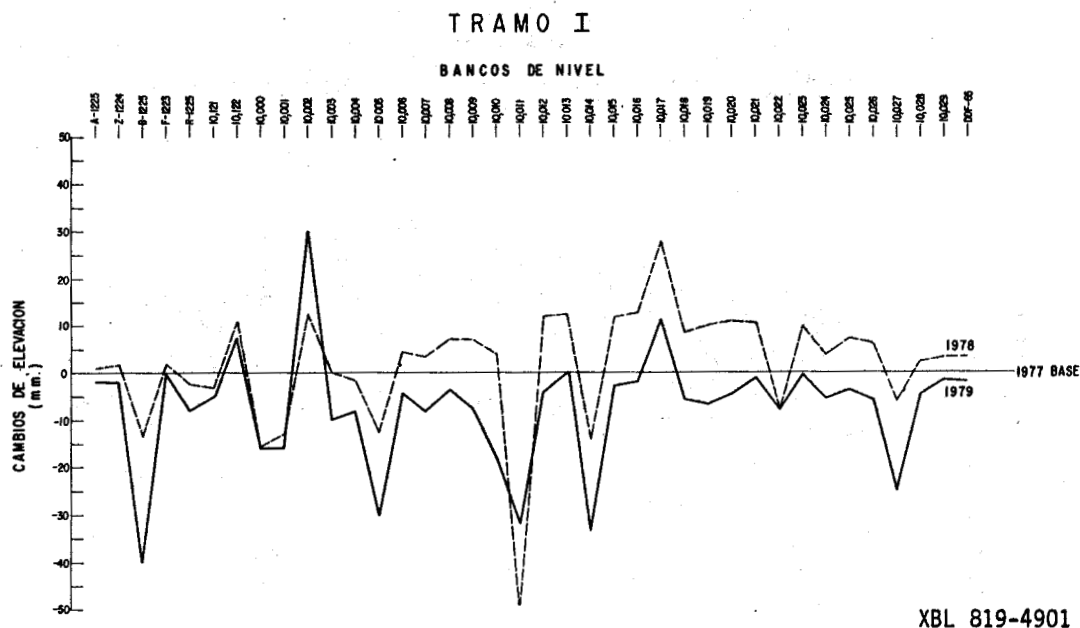


Figura 2. Diferencia de elevaciones ortométricas obtenidas durante 1977-1978 y 1977-1979 tomando como base la nivelación de 1977 (línea horizontal). Tramo I.

Figure 2. Differences in ortometric elevations measured between 1977-1978 and 1977-1979 using the 1977 data as datum (horizontal line). Section I.

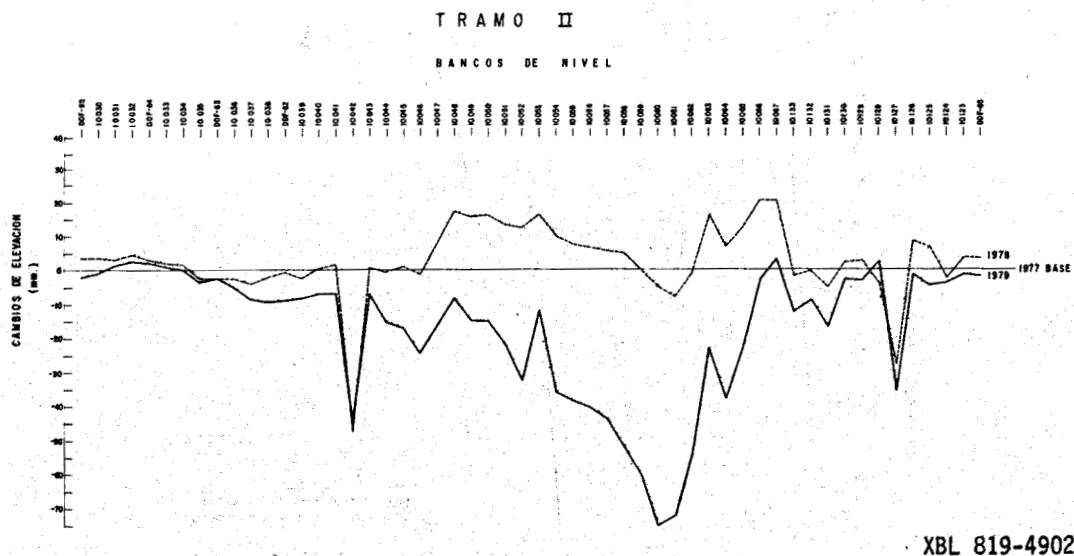


Figura 3. Diferencia de elevaciones ortométricas obtenidas durante 1977-1978 y 1977-1979 tomando como base la nivelación de 1977 (línea horizontal). Tramo II.

Figure 3. Differences in ortometric elevations measured between 1977-1978 and 1977-1979 using the 1977 data as datum (horizontal line). Section II.

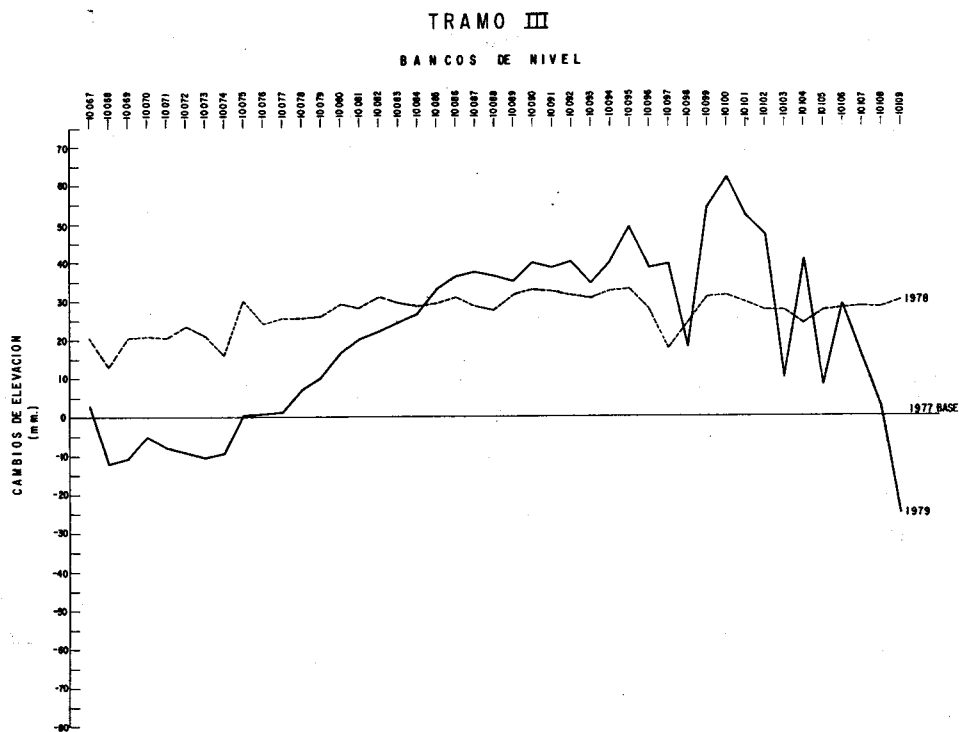


Figura 4. Diferencia de elevaciones ortométricas obtenidas durante 1977-1978 y 1977-1979 tomando como base la nivelación de 1977 (línea horizontal). Tramo III.

Figure 4. Differences in ortometric elevations measured between 1977-1978 and 1977-1979 using the 1977 data as datum (horizontal line). Section III.

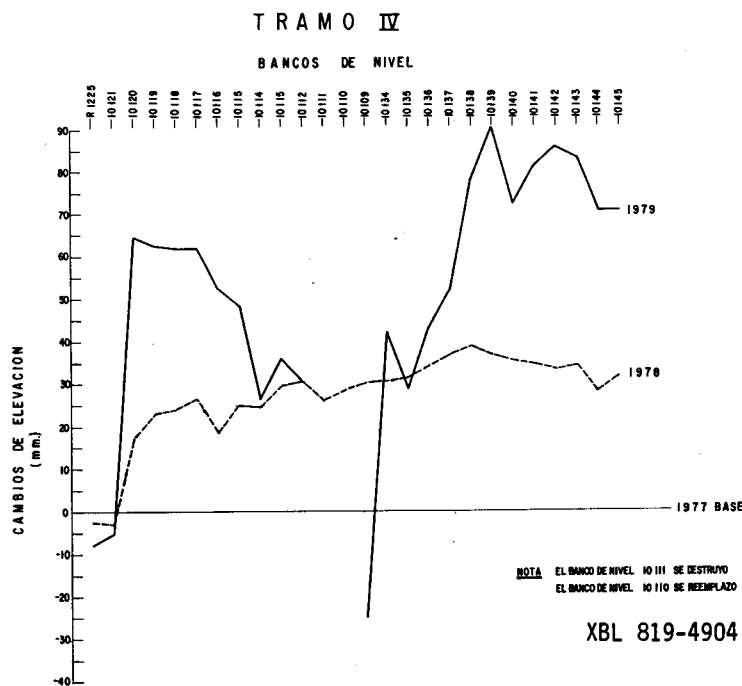
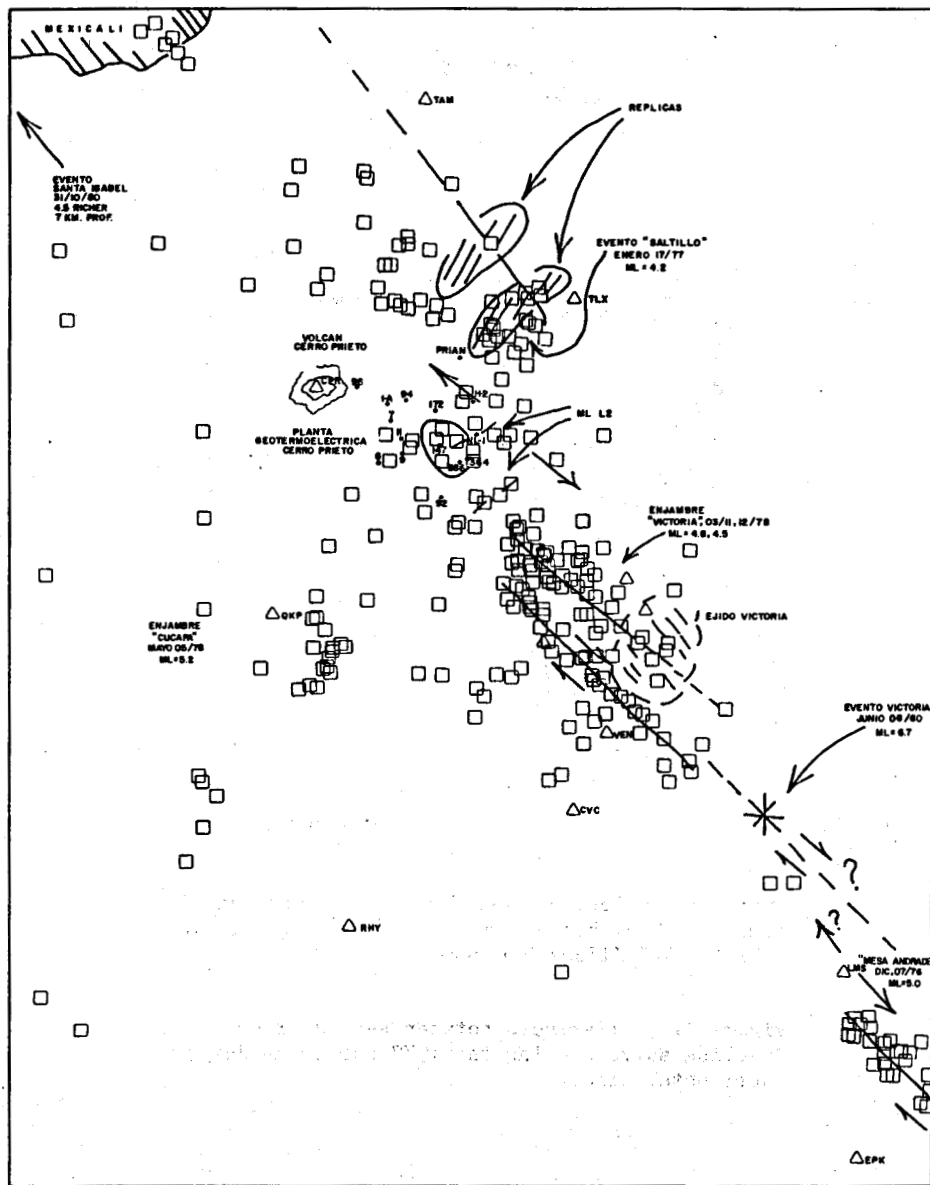


Figura 5. Diferencia de elevaciones ortométricas obtenidas durante 1977-1978 y 1977-1979 tomando como base la nivelación de 1977 (línea horizontal). Tramo IV.

Figure 5. Differences in ortometric elevations measured between 1977-1978 and 1977-1979 using the 1977 data as datum (horizontal line). Section IV.



XBL 819-4905

Figura 6. Mapa sísmico del Valle de Mexicali de 1977-1980 (jun. 1980).

Figure 6. Seismic activity map of the Mexicali Valley for the 1977-1980 period (June 1980).

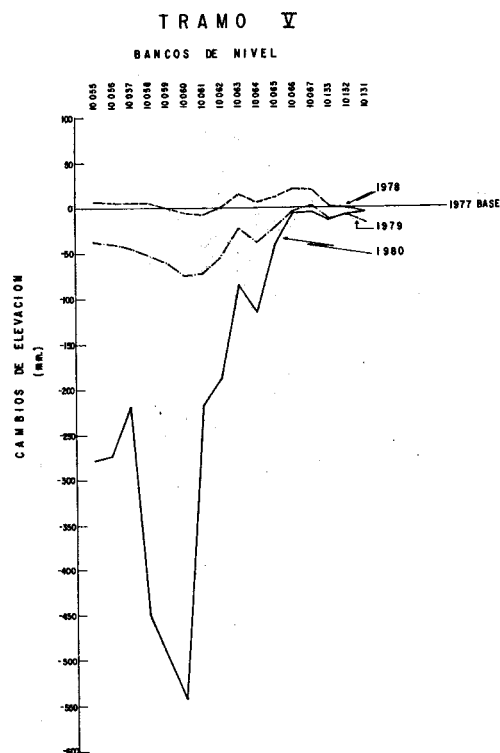


Figura 7. Diferencia de elevaciones entre nivelaciones de 2do. orden tomando como base la nivelación de 1977 (línea horizontal).

Figure 7. Differences between second-order leveling surveys using the 1977 survey as datum (horizontal line).

TABLA 1. DISCREPANCIA ENTRE LOS TRES LEVANTAMIENTOS

TABLE 1. DIFFERENCES BETWEEN THE THREE FIRST-ORDER LEVELING SURVEYS

ELEVACIONES (m)				DISCREPANCIAS (mm)			ELEVACIONES (m)				DISCREPANCIAS (mm)		
BNP	AÑO 1977	AÑO 1978	AÑO 1979	AÑOS 77-78	AÑOS 77-79	AÑOS 78-79	BNP	AÑO 1977	AÑO 1978	AÑO 1979	AÑOS 77-78	AÑOS 77-79	AÑOS 78-79
Y1224	6.1330	6.1330	6.1330				10056	10.3613	10.3680	10.3209	6.7	-40.4	-47.1
A1225	0.7861	0.7871	0.7842	1.0	-1.9	-2.9	10057	11.1471	11.1525	11.1030	5.4	-44.1	-49.5
Z1224	0.6317	0.6335	0.6297	1.8	-2.0	-3.8	10058	12.7849	12.7897	12.7326	4.8	-52.3	-57.1
H1225	1.3144	1.3010	1.2746	-13.4	-39.8	-26.4	10059	12.3831	12.3831	12.3225	0.0	-60.6	-60.6
F1223	1.6313	1.6334	1.6310	2.1	-0.3	-2.4	10060	11.4626	11.4573	11.3873	-5.3	-75.3	-70.0
R1225	1.3342	1.3319	1.3263	-2.3	-7.9	-5.6	10061	10.1361	10.1281	10.0637	-8.0	-72.4	-64.4
10121	0.9149	0.9119	0.9098	-3.0	-5.1	-2.1	10062	9.7717	9.7708	9.7170	-0.9	-54.7	-53.8
10122	1.0301	1.0410	1.0374	10.9	7.3	-3.6	10063	10.6334	10.6492	10.6104	15.8	-23.0	-38.8
10000	-0.5090	-0.5246	-0.5251	-15.6	-16.1	-0.5	10064	11.4466	11.4533	11.4086	6.7	-38.0	-44.7
10001	1.4799	1.4670	1.4639	-12.9	-16.0	-3.1	10065	11.9597	11.9720	11.9367	12.3	-23.0	-35.3
10002	2.7931	2.8056	2.8233	12.5	30.2	17.7	10066	11.4440	11.4644	11.4409	20.4	-3.1	-23.5
10003	2.3282	2.3284	2.3182	0.2	-10.0	-10.2	10067	11.8762	11.8968	11.8790	20.6	2.8	-17.8
10004	2.5398	2.5384	2.5318	-1.4	-8.0	-6.6	10068	13.7444	13.7574	13.7323	13.0	-12.1	-25.1
10005	3.3414	3.3287	3.3117	-12.7	-29.7	-17.0	10069	12.6243	12.6451	12.6141	20.6	-10.4	-31.0
10006	3.0168	3.0212	3.0125	4.4	-4.3	-8.7	10070	13.7663	13.7871	13.7612	20.8	-5.1	-25.9
10007	4.9077	4.9111	4.8990	3.4	-8.7	-12.1	10071	13.9803	13.9806	13.9523	20.3	-8.0	-28.3
10008	4.0565	4.0636	4.0529	7.1	-3.6	-10.7	10072	14.2110	14.2343	14.2555	23.3	44.5	21.2
10009	4.7038	4.7110	4.6963	7.2	-7.5	-14.7	10073	13.8614	13.8822	13.8509	20.8	-10.5	-31.3
10010	5.0460	5.0501	5.0279	4.1	-18.1	-22.2	10074	14.3363	14.3523	14.3267	16.0	-9.6	-25.6
10011	5.2351	5.1850	5.2034	-50.1	-31.7	18.4	10075	10.7774	10.8073	10.7777	29.9	0.3	-29.6
10012	5.6354	5.6452	5.6313	11.8	-4.1	-15.9	10076	13.2209	13.2448	13.2457	23.9	24.8	0.9
10013	6.4272	6.4399	6.4272	12.7	0.0	-12.7	10077	11.5810	11.5564	11.5320	25.4	1.0	-24.4
10014	6.5004	6.4864	6.4666	-14.0	-33.8	-19.8	10078	12.5899	12.6155	12.5969	25.6	7.0	-18.6
10015	6.1263	6.1383	6.1234	12.0	-2.9	-14.9	10079	12.3019	12.3280	12.3118	26.1	9.9	-16.2
10016	6.6214	6.6342	6.6196	12.8	-1.8	-14.7	10080	11.5212	11.5503	11.5379	29.1	16.7	-12.4
10017	7.1038	7.1318	7.1152	28.0	11.4	-16.6	10081	13.4990	13.5273	13.5192	28.3	20.2	-8.1
10018	7.7839	7.7922	7.7782	8.3	-5.7	-14.0	10082	13.9099	13.9408	13.9321	30.9	22.2	-8.7
10019	7.6387	7.6489	7.6321	10.2	-6.6	-16.8	10083	14.5029	14.5322	14.5325	29.3	29.6	0.3
10020	8.2582	8.2692	8.2536	11.0	-4.6	-15.6	10084	14.3202	14.3461	14.3468	25.9	26.6	0.7
10021	8.2072	8.2178	8.2062	10.6	-1.0	-11.6	10085	15.0857	15.1150	15.1188	29.3	33.1	3.8
10022	8.3678	8.3598	8.3605	-8.0	-7.3	0.7	10086	15.7310	15.7620	15.7673	31.0	36.3	5.3
10023	9.3358	9.3459	9.3352	10.1	-0.6	-10.7	10087	14.5530	14.5816	14.5905	28.6	37.5	8.9
10024	8.8361	8.8401	8.8308	4.0	-5.3	-9.3	10088	15.0070	15.0344	15.0435	27.4	36.5	9.1
10025	8.9290	8.9365	8.9253	7.5	-3.7	-11.2	10089	14.7185	14.7500	14.7536	31.1	35.1	3.6
10026	9.3212	9.3275	9.3156	6.3	-5.6	-11.9	10090	14.5894	14.6324	14.6392	33.0	39.8	6.8
10027	8.9224	8.9162	8.8975	-6.2	-24.9	-18.7	10091	14.3961	14.4285	14.4347	32.4	38.6	6.2
10028	8.4818	8.4844	8.4775	2.6	-4.3	-6.9	10092	13.8376	13.8691	13.8778	31.5	40.2	8.7
10029	10.4797	10.4833	10.4780	3.6	-1.7	-5.3	10093	13.9520	13.9824	13.9866	30.4	34.6	4.2
DDF65	11.3709	11.3746	11.3688	3.7	-2.1	-5.8	10094	15.5138	15.5463	15.5539	32.5	40.1	7.6
10030	12.7570	12.7604	12.7559	3.4	-1.1	-4.5	10095	15.2135	15.2466	15.2627	33.1	49.2	16.1
10031	27.1991	27.2023	27.2005	3.2	1.4	-1.8	10096	15.8148	15.8428	15.8531	28.0	38.3	10.3
10032	29.2495	29.2538	29.2522	4.3	2.7	-1.6	10097	15.0047	15.0224	15.0443	17.7	39.6	21.9
DDF64	35.5873	35.5903	35.5895	3.0	2.2	-0.8	10098	13.7651	13.7500	13.7832	-15.1	18.1	33.2
10033	37.1971	37.1990	37.1983	1.9	1.2	-0.7	10099	14.5423	14.5733	14.5963	31.0	54.0	23.0
10034	44.5047	44.5061	44.5048	1.4	0.1	-1.3	10100	12.8990	12.9304	12.9611	31.4	62.1	30.7
10035	46.2079	46.2054	46.2044	-2.5	-3.5	-1.0	10101	12.0026	12.0321	12.0552	29.5	52.6	23.1
DDF63	46.4960	46.4934	46.4933	-2.6	-2.7	-0.1	10102	11.0500	11.0775	11.0977	27.5	47.7	20.2
10036	40.2500	40.2475	40.2451	-2.5	-4.9	-2.4	10103	12.2044	12.2318	12.2153	27.4	10.1	-17.3
10037	28.8627	28.8588	28.8541	-3.9	-8.6	-4.7	10104	13.7209	13.7448	13.6805	23.9	40.4	-64.3
10038	23.4897	23.4875	23.4801	-2.2	-9.6	-7.4	10105	12.8799	12.9070	12.8877	27.1	7.8	-19.3
DDF62	20.0070	20.0062	19.9979	-0.8	-9.1	-8.3	10106	8.8882	8.9164	8.9174	28.2	29.2	1.0
10039	18.8009	18.7983	18.7924	-2.6	-8.5	-5.9	10107	10.7093	10.7377	10.7252	28.4	15.9	-12.5
10040	19.9498	19.9501	19.9428	0.3	-7.0	-7.3	10108	10.9049	10.9329	10.9024	28.0	2.5	-30.5
10041	9.8994	10.0011	9.9926	1.7	-6.8	-8.5	10109	11.2005	11.2305	11.1753	30.0	-25.2	-55.2
10042	10.9333	10.8860	10.8891	-47.3	-44.2	3.1	10110R	12.4589	12.4876	11.9722	28.7		
10043	9.8865	9.8870	9.8745	0.5	-12.0	-12.5	10111R	13.1276	13.1536	9.5925	26.0		
10044	10.2870	10.2864	10.2717	-0.6	-15.3	-14.7	10112	6.6447	6.6750	6.6748	30.3	30.1	-0.2
10045	9.9632	9.9643	9.9462	1.1	-17.0	-18.1	10113	5.8730	5.9024	5.9088	29.4	35.8	6.4
10046	10.9272	10.9259	10.9027	-1.3	-24.5	-23.2	10114	5.2311	5.2554	5.2577	24.3	26.6	2.3
10047R	11.1475	11.1557	11.1312			-24.5	10115	4.8800	4.9050	4.9287	25.0	48.7	23.7
10048	11.4861	11.5033	11.4776	17.2	-8.5	-25.7	10116	3.7189	3.7376	3.7716	18.7	52.7	34.0
10049	12.0243	12.0397	12.0092	15.4	-15.1	-30.5	10117	2.9705	2.9969	3.0324	26.4	61.9	35.5
10050	12.2808	12.2967	12.2656	15.9	-15.2	-31.1	10118	2.5224	2.5462	2.5846	23.8	62.2	38.4
10051	12.3930	12.4061	12.3708	13.1	-22.2	-35.3	10119	1.6356	1.6584	1.6979	22.8	62.3	39.5
10052	11.8650	11.8773	11.8323	12.3	-32.7	-45.0	10120	1.2582	1.2765	1.3235	17.3	64.3	47.0
10053	12.5655	12.5814	12.5534	15.9	-12.1	-28.0	10121	0.9081	0.9126	0.9612	4.5	53.1	48.6
10054	11.3187	11.3289	11.2825	10.2	-36.2	-46.4	10123	8.7283	8.7318	8.7270	3.5	-1.3	-4.8
10055	10.7061	10.7138	10.6875	7.7	-38.6	-46.3	10124	8.9099	8.9072	8.9059	-2.7	-4.0	-1.3

RESULTS OF THE FIRST ORDER LEVELING SURVEYS IN THE MEXICALI VALLEY AND AT THE CERRO PRIETO FIELD

ABSTRACT

This paper presents the results obtained from the third leveling survey carried out by the Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (previously DETENAL) during November and December 1979. Calculations of the changes in field elevation and plots showing comparisons of the 1977, 1978, and 1979 surveys are also presented.

Results from a second order leveling survey performed to ascertain the extent of ground motion resulting from the 8 June 1980 earthquake are presented. This magnitude $M_L = 6.7$ earthquake with epicenter located 15 km southeast of the Guadalupe Victoria village, caused fissures on the surface, the formation of small sand volcanos, and the ejection of ground water in the vicinity of the Cerro Prieto field. This leveling survey was carried out between benchmark BN-10067 at the intersection of the Solfatara canal and the Sonora-Baja California railroad, and benchmark BN-10055 located at the Delta station.

INTRODUCTION

The main objective of this study was to compare the data obtained from the precision leveling surveys that have been made in the Mexicali Valley during 1977, 1978, and 1979, whose purpose was the detection of ground subsidence or uplift and their variations with time. We hoped to define whether these ground movements were due to active faults which periodically cause seismic events and the rearrangement of subsurface layers, and/or whether they are the result of the extraction of water from aquifers, both for agricultural and geothermal uses.

ANALYSIS AND GRAPHIC REPRESENTATION OF VERTICAL CHANGES MEASURED IN THE THREE SURVEYS

Table 1 shows the discrepancies in the elevations obtained in the years 1977-78, 1978-79, and 1979-80. This information was obtained from the leveling surveys made along benchmarks expressly built for that purpose, whose location is shown in Figure 1. Using the information in Table 1, we plotted the differences in orthometric elevations between 1977 and 1978, and between 1977 and 1979, taking the data from the 1977 survey as the datum or zero line. To facilitate the analysis of this data, the work was divided into four sections.

SECTION I (Figure 2)

This section extends from benchmark BN-A-1225 located in the city of Calexico, California, to benchmark BN-DDF-65 located on the Mexicali-San Felipe highway at the foot of the Cucapá Range.

During the 1977-78 period, subsidence and uplift without a clearly defined tendency were

observed, with a maximum subsidence of 50 mm at BN-10011 and a maximum uplift of 28 mm at BN-10017. During the 1977-79 period all this section experienced subsidence relative to the 1977-78 period, with the sole exception of BN-10002, which continued to rise up to 30 mm.

SECTION II (Figure 3)

This section extends along a circuit starting at benchmark BN-DDF-65 on the Mexicali-San Felipe highway, passing through the Cerro Prieto field and the sides of the Cerro Prieto volcano, ending at the same BN-DDF-65 benchmark.

During the 1977-78 period, the pattern of ground movement was similar to that of Section I, with uplifts of up to 20 mm between benchmarks BN-10066 and BN-10067, and maximum subsidence of 28 mm and 48 mm at benchmarks BN-10127 and BN-10042 respectively. Within the field's production area, a subsidence of 8 mm was observed between benchmarks BN-10059 and BN-10062. Between 1977 and 1979, the ground experienced widespread subsidence which was most pronounced in the area of the field between BN-10054 and BN-10064, with subsidence of up to 76 mm at BN-10060.

SECTION III (Figure 4)

This section begins at benchmark BN-10067 on the Pascualito-Pescadero highway, near the crossing with the Solfatara canal, and ends at BN-10109 located on the Mexico-US border.

The plot of the differences between the 1977 and 1978 surveys shows that this section experienced a general uplift with maxima of 33.0 mm and 33.1 mm at benchmarks BN-10090 and BN-10095 respectively.

During the 1977-79 period, there was subsidence in relation to 1978 between benchmarks BN-10067 and BN-10083, decreasing towards the latter. Starting at benchmark BN-10085, the uplift observed for the 1977-78 period continued to increase, reaching a maximum of 62.1 mm at benchmark BN-10100. Benchmarks BN-10098, 10103, 10105, and 10109 experienced subsidence in relation to the 1977-78 period.

SECTION IV (Figure 5)

This section is located in US territory, and extends from benchmark BN-R-1225 in the city of Calexico, California, near the international border, to benchmark BN-10145, located 4.94 km south of the junction of highways 98 and 115, on the east side of highway 115 going towards Holtville.

During the 1977-78 period, this section

experienced a general uplift with a maximum of 38.7 mm at BN-10138. For the 1977-79 period, with the exception of benchmark BN-10109 which sunk 25.2 mm, this section underwent a considerable uplift, reaching 90.7 mm at BN-10139.

There was no information on benchmarks BN-10110 and BN-10111 since they were destroyed and had to be replaced.

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE 8 JUNE 1980 EARTHQUAKE

On 8 June 1980, a seismic event took place, with epicenter located at the village of Guadalupe Victoria, approximately 15 km SE of the Cerro Prieto field. This event had a magnitude of 7.6 on the Richter scale (Figure 6). The main effects of this earthquake were felt in the area of Cerro Prieto and its environs, where numerous fissures appeared, mostly along roads and levees, as well as small sand volcanos and sand boils.

A plausible explanation for the effects of this earthquake could be that consolidated sediments at depth acted as a sort of cushion for the overlying sands, clays and shallow water table. In response to the acceleration generated by the event, local liquefaction of the unconsolidated sediments took place, giving rise to collapses, subsidence and ground uplift, and to the creation of the small sand volcanos.

In order to ascertain the magnitude of the ground movement caused by the earthquake, a second-order leveling survey was carried out from benchmark BN-10055, located at the Delta Station, to benchmark BN-10131, located on the sides of the Cerro Prieto volcano.

SECTION V

The differences in elevation between 1977 and this second order survey were plotted (Figure

7), showing that the subsidence that had been observed in 1978 and 1979 in the area of the field between benchmarks BN-10057 and BN-10063 had increased considerably, reaching values of up to 492 mm at benchmark BN-10060.

CONCLUSIONS

1. In the western portion of the Mexicali Valley, it was observed that ground movements exhibit irregular trends, without a uniform uplift or subsidence tendency.

2. Over the circuit covering the Cerro Prieto field (Section II), in general, the same conditions described in the preceding paragraph prevail, with the exception of the production zone of the field, where ground subsidence has increased with time. This subsidence was considerably increased as a result of the "Victoria" seismic event of 8 June 1980.

3. A possible explanation of the subsidence recorded in the area of the field could be the extraction of geothermal fluid, which increased considerably when Units 3 and 4 of Cerro Prieto came into operation. Up until 1980, $176 \times 10^6 \text{ m}^3$ of water had been extracted at the field. This may have favored the observed subsidence, which was further intensified as a result of the 8 June 1980 earthquake.

4. In the northern and north-eastern portions of the Mexicali Valley, the ground surface has experienced a general uplift, increasing toward the US border, which may well be due to active faults, such as the Imperial fault, which periodically cause seismic movements and the rearrangement of subsurface layers.

5. In view of the importance that the measured crustal movements have for the Cerro Prieto field and other geothermal zones of the Mexicali Valley, the decision has been made to continue with yearly precision leveling surveys for a minimum of three more years.