

# FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES DE UN EDIFICIO DE NUEVE NIVELES LOCALIZADO EN LA VECINDAD DE LA ZONA RÍO DE TIJUANA, BC, MÉXICO<sup>1</sup>

Carlos I. Huerta López<sup>2,6</sup>, Daniel Salvador Lomelí Limón<sup>3</sup>, Manuel Esparza Fuentes<sup>4</sup>, Fortunato Espinoza Barreras<sup>5</sup>, Rosalba Sofía Contreras Porras<sup>6</sup> y Yuriam Baltazar Cifuentes<sup>7</sup>

Resumen: Se estudió la vibración teórica y experimental de un edificio de nueve niveles localizado en la ciudad de Tijuana, México. Para la estimación teórica se utilizó el programa SAP2000 V.10, y para la estimación experimental se usaron mediciones de vibración ambiental. Mediante el cálculo de los espectros de potencia, se estimaron las frecuencias de vibración experimental y las teóricas mediante los espectros de PSA (0%) ante la incidencia del temblor de Northridge-1994. También fueron estimados los cocientes espectrales entre Azotea y Planta Baja. Estos resultados son el punto de partida de futuros trabajos para determinar sus modos de vibración y características dinámicas. Los resultados muestran buena correlación entre ellos.

**Palabras claves:** características dinámicas, cocientes H/V, edificios multipisos, vibraciones ambientales.

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL VIBRATION FREQUENCIES OF A NINE-STORY BUILDING CONSTRUCTED NEAR THE TIJUANA B.C., MEXICO RIVER ZONE

Abstract: Theoretical and the experimental vibrations of a building located in Tijuana, Mexico, were studied. The computer program SAP2000 V.10 and ambient vibration measurements were used to estimate the theoretical and experimental vibrations, respectively. The experimental frequencies were estimated from power spectral densities (PSD) and the theoretical frequencies were obtained from PSA spectra (0%) using the Northridge-1994 earthquake. Roof-First Level spectral ratios were also estimated. A follow up the present will use these result to evaluate the dynamic characteristics and the vibration modes. The current experimental and theoretical results are match each other very well.

**Keywords:** ambient vibrations, dynamic characteristics, H/V spectral ratios, multistory buildings.

### INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de las ciudades fronterizas de Tijuana y Mexicali, así como de la porción de costa entre Tijuana y Ensenada, todas ellas en Baja California, México, ha incrementado considerablemente la construcción de edificaciones de gran envergadura tanto del sector privado como del sector gubernamental. Por otro lado, resulta obvio el potencial del peligro sísmico de la región, ya que además de los sistemas de fallas tierra adentro, en la parte continental en el extremo Este se encuentra la frontera entre la Placa del Pacífico y la Placa de Norteamérica, y a su flanco Oeste el sistema de fallas mar adentro en las costas del océano Pacífico. Debido a las claras evidencias de que la gran mayoría de las fallas de la región son sísmicamente activas, y por tanto representan un alto potencial de peligrosidad y de riesgo sísmico, se justifica plenamente realizar estudios que permitan conocer en mejor medida el

<sup>1</sup> Artículo recibido el 25 de marzo de 2009 y aceptado el 3 de junio de 2009.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Recinto Universitario de Mayagüez, Universidad de Puerto Rico. Puerto Rico. E-mail: [chuerta@uprm.edu](mailto:chuerta@uprm.edu), [huerta@cicese.mx](mailto:huerta@cicese.mx)

<sup>3,4</sup> Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Tijuana. E-mail: [hebron62@hotmail.com](mailto:hebron62@hotmail.com)

<sup>5</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. E-mail: [fortunato@uabc.mx](mailto:fortunato@uabc.mx)

<sup>6</sup> Departamento de Sismología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). E-mail: [rosalba\\_sofia@yahoo.com.mx](mailto:rosalba_sofia@yahoo.com.mx)

<sup>7</sup> Facultad de Física, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. E-mail: [yuriambaltazar@yahoo.com.mx](mailto:yuriambaltazar@yahoo.com.mx)

comportamiento esperado de la respuesta sísmica de estructuras ante movimientos fuertes o moderados del terreno, ya que a la fecha, en la región es escaso este tipo de estudios.

En este trabajo se presenta la estimación teórica y experimental de las frecuencias de vibración de un edificio de nueve niveles. Para evaluar la respuesta analítica de la estructura ante el temblor de Northridge de 1994, evento ID-24386, se utilizó el programa SAP2000 y para la estimación experimental se utilizaron mediciones de vibración ambiental y procesado de señales en el dominio de las frecuencias.

Se presentan y comparan además las funciones de transferencia teóricas y experimentales entre la planta baja y la azotea del edificio para las tres direcciones ortogonales de movimiento. En el análisis dinámico de edificios, la frecuencia natural de vibración y el amortiguamiento son parámetros esenciales, porque como es sabido la respuesta de los edificios ante el movimiento del terreno es dominado principalmente por esos parámetros. Para inferir el comportamiento dinámico y el potencial de daño que un edificio pudiera experimentar durante un temblor, se hace necesario medir y coleccionar ese tipo de parámetros del edificio.

El cambio de la frecuencia de vibración antes y después de la ocurrencia de un temblor, así como del amortiguamiento relacionan directamente el grado de degradación de los elementos estructurales y pueden ser utilizados como indicadores directos para evaluar cuantitativamente el daño en el edificio. Para medir esos y otros parámetros, han sido desarrollados varios métodos. Aquí se mencionan: el Método del Decremento Aleatorio, y el de Razones espectrales H/V, que utilizan diferentes tipos de señales como: (i) vibración ambiental, (ii) vibraciones forzadas y (iii) temblores de varias magnitudes. La metodología basada en la medición de vibración ambiental puede ser realizada con menos esfuerzo, menos tiempo y menor costo porque no hay necesidad de preparar una fuente de vibraciones para la prueba, pues no requiere de equipo pesado ni sofisticado, solo requiere de equipos de alta sensibilidad para medir vibraciones (aceleración, velocidad o desplazamiento) que se registran en una estructura. Además son pruebas no destructivas que no agreden a la estructura. Sin embargo ha sido señalado que se debe poner especial atención al análisis de la prueba de vibración ambiental, porque la vibración ambiental puede contener varios modos de vibración. Varios trabajos, entre los que destacan los realizados por Rojas et al (2006), Hallin et al. (2004), Clemente et al. (2004), y Ren et al. (2004) coinciden en que tanto la vibración ambiental como la vibración forzada son adecuadas para determinar los parámetros modales, y muestran una buena consistencia con los obtenidos analíticamente. Dentro del mismo contexto del uso de vibración ambiental y soluciones analíticas así como formas alternas en el procesado y análisis de señales, están los estudios publicados por Irie y Nakamura (2000), Huang (2000), Espinoza (1999), Midorikawa (1990), y Muría-Villa et al. (2000), entre otros. En estos estudios se tratan temas que van desde la estimación de las incertidumbres, el tratamiento de algoritmos numéricos alternos para el procesado de señales, y el uso de temblores directamente registrados en la estructura, así como mediciones de vibración ambiental.

## **EDIFICIO**

### **Descripción arquitectónica**

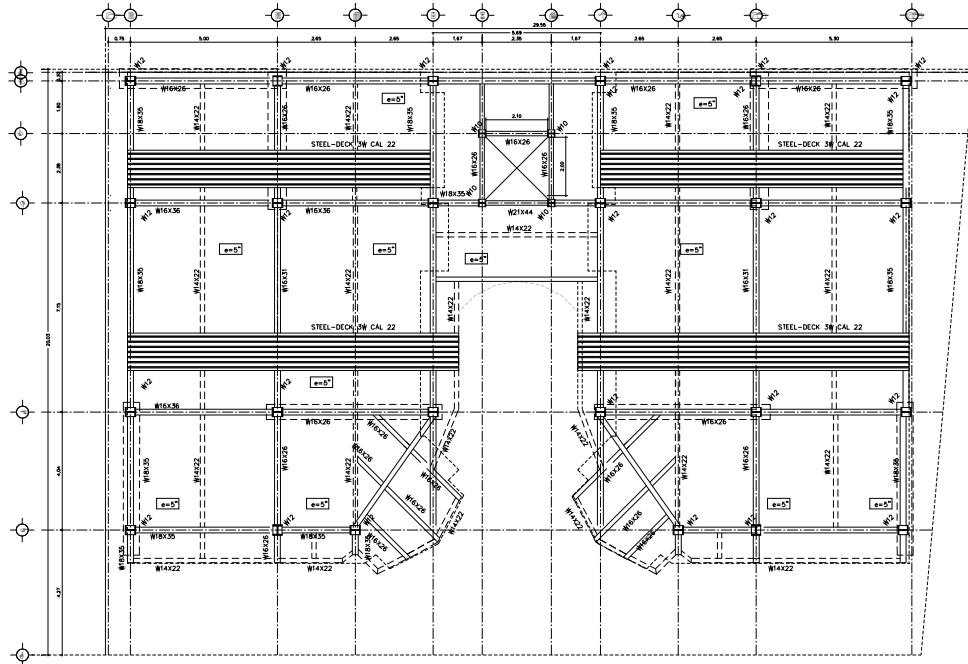
El edificio se puede describir como una estructura de nueve niveles, de los cuales los dos primeros se destinan a estacionamiento y los siete restantes son departamentos para habitación. El primer estacionamiento se encuentra a 4.70 m bajo el nivel de banqueta, el primer nivel de habitación se encuentra a 1.50 m arriba del nivel de banqueta y el último nivel está a 24.60 m.

Los dos primeros niveles se encuentran construidos en toda el área del predio (555.10 m<sup>2</sup>) y para los siete restantes su construcción es un 65% de ésta. Esta configuración hace que adopte la forma de planta de U, donde en las partes verticales de la U se ubican los departamentos y en la parte horizontal las escaleras y el elevador.

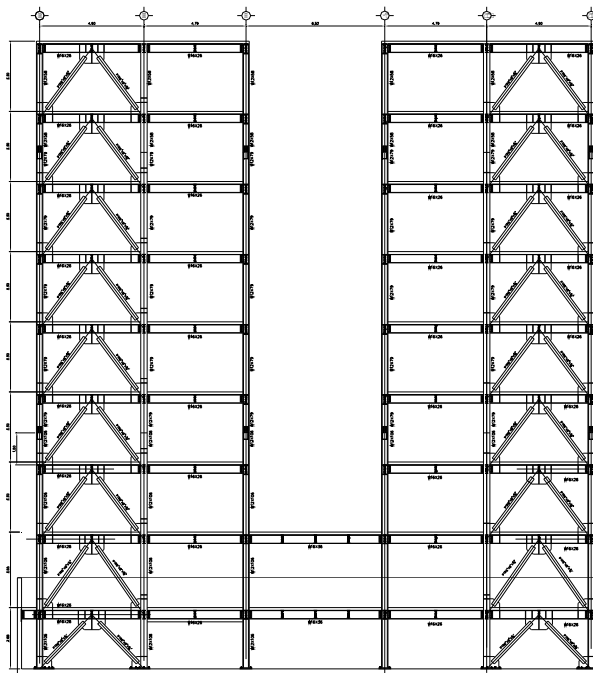
La construcción se inicia bajo nivel de banqueta; en este caso los muros de contención se han desligado de la estructura, por lo tanto ésta se encuentra resuelta a base de perfiles de acero de ala ancha en columnas y trabes. Asimismo tiene contraventeos (arriostramientos) ubicados en lugares estratégicos para su adecuado funcionamiento, todo esto en acero A50. La losa se hizo con “steel deck” (losacero). Todas las divisiones exteriores e interiores se construyeron con materiales que no contribuyen al desempeño sísmico de la estructura.

Cabe mencionar que los dos ejes que conforman la parte horizontal de la U donde se encuentran las escaleras y el elevador, el eje exterior o colindancia no se ha ligado a la parte vertical de la U (véase Figura 1, eje B) de tal forma que la zona de escaleras y elevador se encuentra libre a toda su altura. Solamente el siguiente eje se encuentra ligado al resto de la estructura (véase el eje D, en la Figura 2).

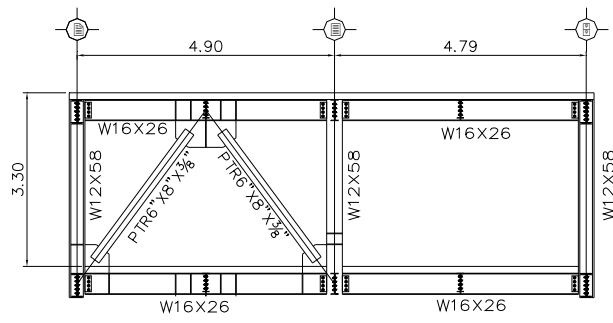
A manera de ilustración, esto se puede observar gráficamente en el eje E de la Figura 3, donde se aprecia la libertad de los dos cuerpos en que se encuentran divididos.



(a) Planta.

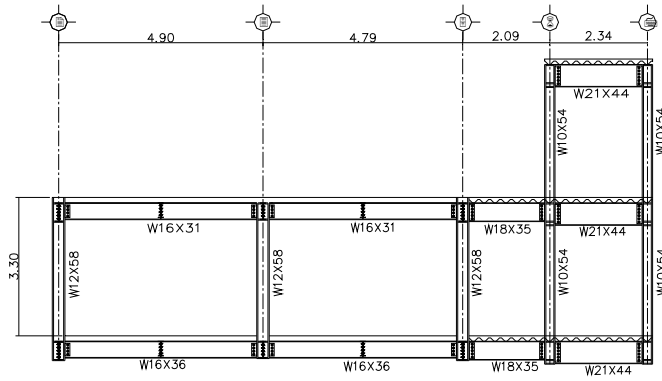


(b) perfil.

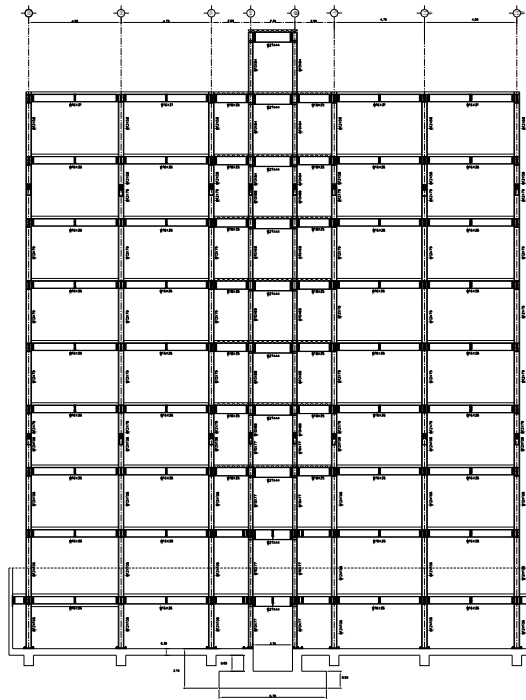


(c) sección.

Figura 1: Vista del Eje B. (a) planta, (b) perfil, (c) sección.



(a) sección.



(b) perfil.

Figura 2: Vista del Eje D. (a) sección, (b) perfil.



La conformación de la estructura desde el punto de vista sísmico tiene características especiales. De acuerdo con el reglamento de Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, que en su artículo LXXXV.7 señala textualmente “para que una estructura pueda considerarse regular debe satisfacer los siguientes requisitos: (i) En planta no tiene entrantes ni salientes cuya dimensión exceda de 20% de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección que se considera de la entrante o saliente, (ii) Ningún piso tiene un área delimitada por los paños exteriores de sus elementos resistentes verticales, mayor que la del piso inmediato, ni menor que el 70% de ésta”. Con relación a la estructura en estudio se pueden hacer los siguientes comentarios. Con relación al inciso (i): La geometría en planta en forma de U de los niveles 3 al 9 en las dos direcciones rebasa el 20% en entrante o saliente. Con relación al inciso (ii): Debido a que la configuración de los pisos 3 al 9 tiene la forma geométrica de U y el área de éstos es del orden del 65% de los inferiores, esta configuración la hace irregular. Según su destino, el inmueble material del presente trabajo cae dentro de la clasificación “B”.

### **Descripción de la estructura**

La estructura del edificio se clasifica como una construcción reticular, debido a que sus elementos estructurales (losas, trabes, columnas, etc.) están diseñados y ubicados para soportar todas las cargas vivas y muertas a las que está sujeta. La distancia entre espaciamiento de columnas varía desde los 1.67 m hasta los 7.15 m de distancia, los que se consideran como claros de longitud media. Las vigas principales son de perfil de acero estructural con geometría W18x35 y W16x26, del tipo ASTM A572-50, con un esfuerzo a la fluencia de 3515 kg/cm<sup>2</sup>. Las vigas secundarias en su gran mayoría están hechas a base de perfil de acero estructural W14x22. Los perfiles de las columnas varían según el nivel de piso en el que estén: las columnas de los dos niveles de sótano y del nivel de planta de vestíbulo están hechas de perfil W12x106 y en los pisos 2, 3, 4 y 5 las columnas son W12x79. En el piso 6 presentan una conexión a la mitad de su desarrollo, en la que se reduce el perfil de W12x79 a W12x58. Las losas de entrepiso son losas de “steel deck”, de lámina estructural galvanizada (calibre 22), con altura de nervaduras de 7.6 cm (3 pulgadas) y armado de malla electrosoldada 6x6/8-8. Están apoyadas sobre las trabes principales y secundarias a las cuales transmiten las cargas. El espesor total de la losa es de 15.24 cm (6 pulgadas) incluyendo el concreto. Éste tiene una resistencia a la compresión  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  con agregado máximo de 2 cm ( $\frac{3}{4}$  de pulgada). El armado de refuerzo en el concreto es de acero tipo AG-80. Los conectores de cortante son de tipo “stud” de 2 cm ( $\frac{3}{4}$  de pulgada) de diámetro por 11.43 cm ( $4 \frac{1}{2}$  pulgadas) de alto, a cada 30.48 cm (12 pulgadas).

### **Descripción de la cimentación**

La cimentación del inmueble está resuelta mediante la construcción de una losa de cimentación de concreto armado, con  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , con un agregado máximo de 2 cm ( $\frac{3}{4}$  de pulgada). La cimentación está compuesta, principalmente, de una losa firme de concreto de 35 cm de espesor armado con doble parrilla de varilla del nro. 4 a cada 20 cm en ambos sentidos, recubrimiento mínimo de 5 cm y de tres tipos de trabes (T1, T2 y T3) dispuestas en una retícula en toda la superficie de la losa. Las propiedades que diferencian a estas trabes son principalmente su armado.

### **Descripción del muro perimetral**

El muro de concreto reforzado del edificio es un muro perimetral de 20 cm de espesor y 4.70 m de altura. Es de tipo voladizo y su base se encuentra integrada a la losa de cimentación del inmueble. En el linderos Este el muro posee 6 columnas de concreto complementadas al mismo.

## **UBICACIÓN DEL EDIFICIO Y CONTEXTO SÍSMICO-GEOLÓGICO**

### **Descripción sísmico - geológica de la región**

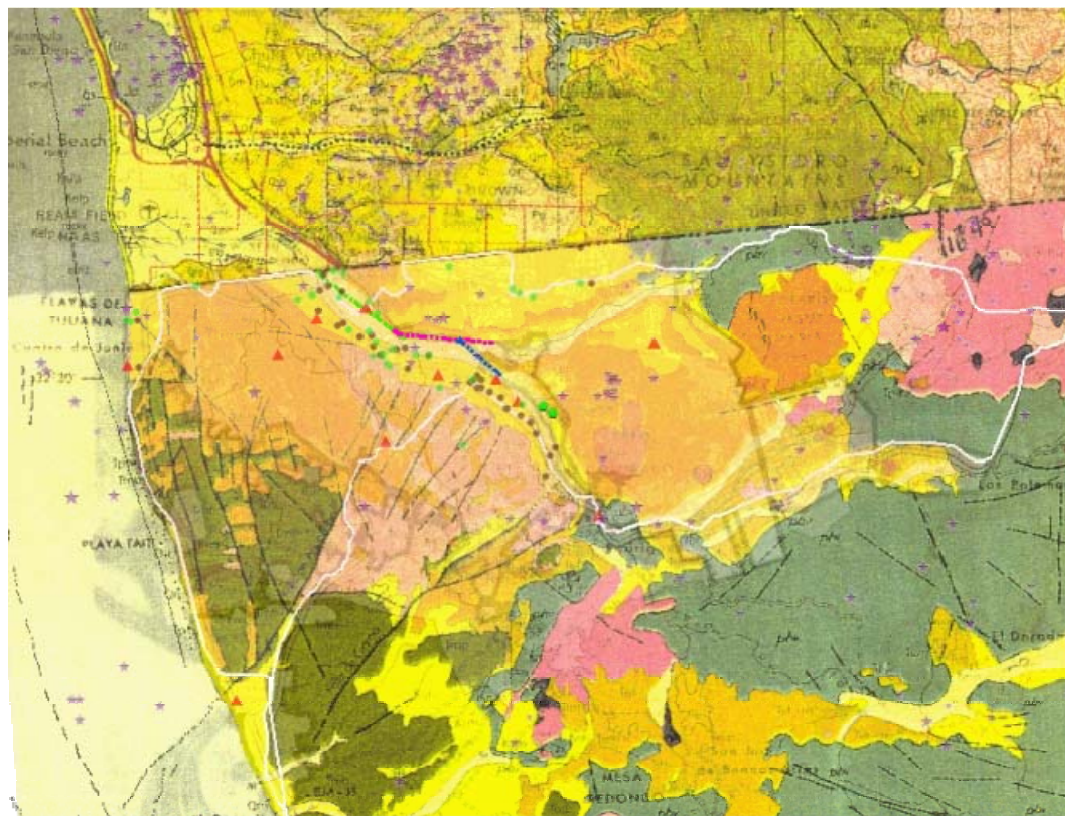
Tijuana es uno de los principales centros urbanos del norte de Baja California, y el más densamente poblado. Geográficamente se localiza dentro de la zona sísmicamente activa producto de la interacción entre la Placa de Norteamérica y la Placa del Pacífico. El área se caracteriza por una alta incidencia de sismicidad, así como por numerosos sistemas de fallas regionales y locales. En la región, temblores históricos de magnitud mayor o igual a 6 no son la excepción, así como evidencias de sismicidad registrada instrumentalmente en un amplio rango de magnitudes, que se manifiesta cotidianamente.

La ciudad de Tijuana se localiza en una zona tectónicamente activa caracterizada por fallas activas, deslizamiento rotacional de suelos y actividad sísmica reciente.

Las fallas *Rose Canyon* y *La Nacion* al norte, las fallas *Agua Caliente*, *García* y *Vallecitos-San Miguel* al sur-sureste, las fallas *Los Buenos*, *Miramar*, *Spanish Bright*, *Silver Strand* y *Coronado Bank* al oeste, forman el marco tectónico-estructural de la región de Tijuana. La sismicidad histórica de la región de Tijuana es baja comparada con el sur-sureste de California y el resto del norte de Baja California, lo anterior no excluye la posibilidad de la ocurrencia de un evento significativo capaz de producir daños. De los estudios recientes de dominio público realizados en Tijuana que contienen una descripción aún más detallada de lo aquí mencionado se puede consultar Montalvo (1996), Ibarra (2004), Huerta (2005), Alain et al. (2000), así como el de Reichle (1991) que fue el primer trabajo sobre el escenario de terremoto esperado para la ciudad de Tijuana. Tijuana, B. C., está dentro de una zona sísmica catalogada como “C”, que es una categoría de frecuencia sísmica intermedia según estudios realizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para fines de diseño sismorresistente.

### Localización del edificio

En Tijuana, un gran número de edificios están construidos en depósitos de suelos de diferente edad y composición. El edificio cuestión del presente estudio, se localiza en el flanco oeste de la Zona Río (parte topográfica más baja de Tijuana) constituida de sedimentos jóvenes de ambientes de depositación de baja y alta energía. Específicamente el suelo y subsuelo que predomina está constituido de material limo-arcilloso y en ciertas regiones se encuentra aluvión, areniscas y conglomerados. De acuerdo al Uniform Building Code (UBC) el suelo en que esta desplantado el edificio es clase B. El resto de la ciudad con elevaciones en el rango de media a alta, está caracterizada por sedimentos suaves pobremente consolidados expuestos a intensa erosión, en parte debido a lo pronunciado de las pendientes, Berumen y Bermúdez (2002). La Figura 4 muestra la ubicación del edificio dentro del contexto antes descrito y la Figura 5 un acercamiento para mayor detalle.



**Figura 4: Distribución del tipo de suelos y ubicación de fallas locales en la mancha urbana de Tijuana, B.C., México y San Diego, California, E.U.A. (modificado de Gastil et al., 1975).**





**Figura 5: Vista aérea de la ubicación del edificio, señalado en círculo sombreado con líneas.**

## **INSTRUMENTACIÓN, MEDICIONES DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y PROCESADO DE DATOS**

### **Instrumentación**

Para la recolección de las señales se utilizó una grabadora Kinometrics modelo SSR-1 de seis canales, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 1. Para establecer los parámetros de grabación se utilizó una computadora portátil que se conecta a la grabadora y con el protocolo de comunicación se definieron los parámetros para iniciar la toma de datos. Cuando la señal se registra por los sensores, entra a la grabadora, donde dependiendo de la forma en que se desee registrar la señal, se selecciona el número de canales de registro, la velocidad de muestreo, la ganancia, y el tipo de filtro que se desee utilizar.

**Tabla 1: Especificaciones de la grabadora Kinometrics modelo SSR-1.**

Tipo de almacenamiento	Memoria de estado sólido
Convertidor analógico digital	16 bits
Rango máximo de voltaje	$\pm 2.5$ v
Tipos de filtros	Butterworth de 6 polos, y Bessel
Filtros	5, 15 ó 50 Hz
Ganancias	1, 10, 100 ó 1000
Frecuencia de muestreo	50, 100 o 200 muestras/s

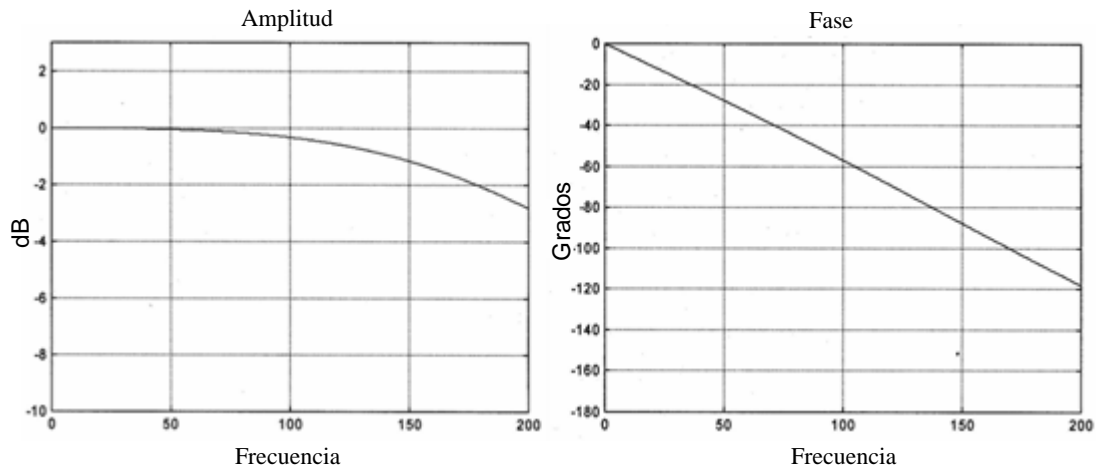
Como sensores, se utilizaron tres acelerómetros EpiSensor modelo FBA ES-T que usan elementos piezoeléctricos para detectar las tres componentes ortogonales de las vibraciones. Sus especificaciones se dan en la Tabla 2.



**Tabla 2: Especificaciones de la grabadora Kinometrics modelo SSR-1.**

Ancho de banda	DC-200 Hz
Sensibilidad (X, Y, Z)	20 V/g
Rango a escala total	$\pm 0.25$ g
Voltaje al rango de escala total	20 V

La Figura 6 muestra las curvas de respuesta nominales (función de transferencia) de estos sensores.



**Figura 6: Respuesta del sensor Epi-Sensor en amplitud y fase (tomada del manual de usuario de Kinometrics, Inc., 2005).**

En las ecuaciones 1a y 1b se dan las expresiones para la conversión de unidades digitales (cuentas) a unidades físicas del movimiento.

$$\frac{\text{Volts/Cuentas}}{\text{Volts}/\left(\frac{m}{s^2}\right)} = \frac{\text{Volts}\left(\frac{m}{s^2}\right)}{\text{VoltsCuentas}} = \frac{m/s^2}{\text{Cuentas}} \quad (1a)$$

Al multiplicar la expresión anterior por las cuentas de la grabadora, se obtienen las unidades físicas del terreno, en este caso en unidades de aceleración.

$$\frac{m/s^2}{\text{Cuentas}} \times \text{cuentas} = \frac{m}{s^2} \quad (1b)$$

**Ejemplo:** unidades físicas a recuperar en g (aceleración).

Parámetros de la grabadora: Ganancia =1, Convertidor analógico –digital (CAD) de 16 bits, Salida del CAD = +2.5 V

$$\frac{5}{2^{16}} = 7.6294 \times 10^{-5} \frac{V}{\text{Cuentas}}$$

Parámetro del sensor: Constante del motor,  $G = 20 \text{ V/g}$

$$\frac{7.6254 \times 10^{-5}}{20} = 3.8147 \times 10^{-6} \frac{\text{g}(\text{m/s}^2)}{\text{cuentas}}$$

En la Figura 7 se presenta un diagrama esquemático del sistema de captura de datos compuesto por sensor (acelerómetro) y grabadora, así como el proceso de conversión de unidades.

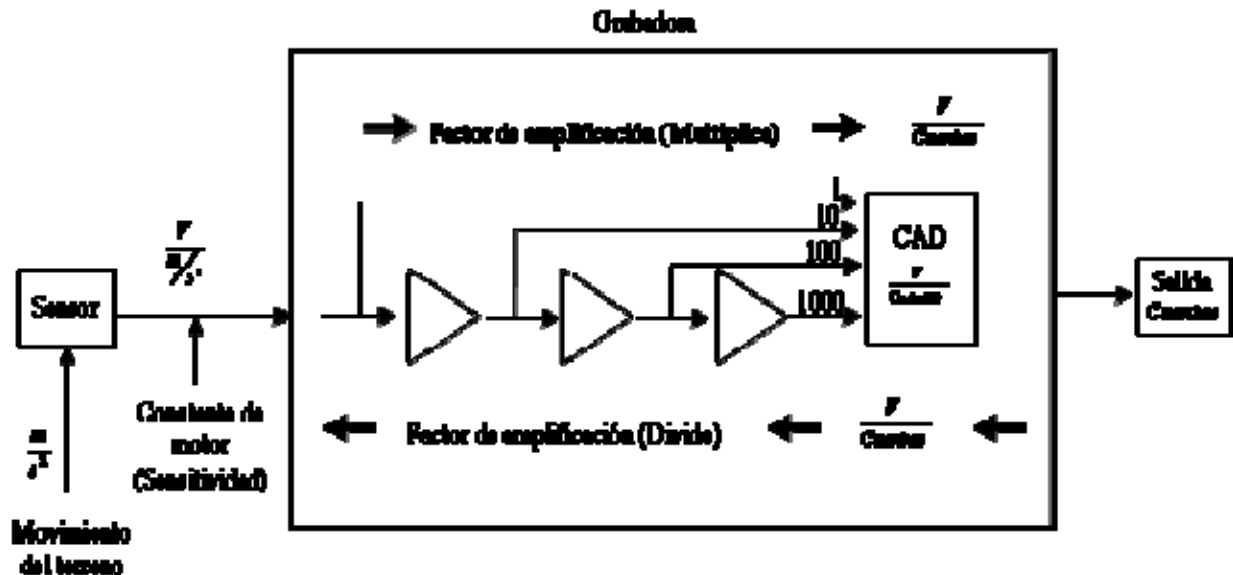
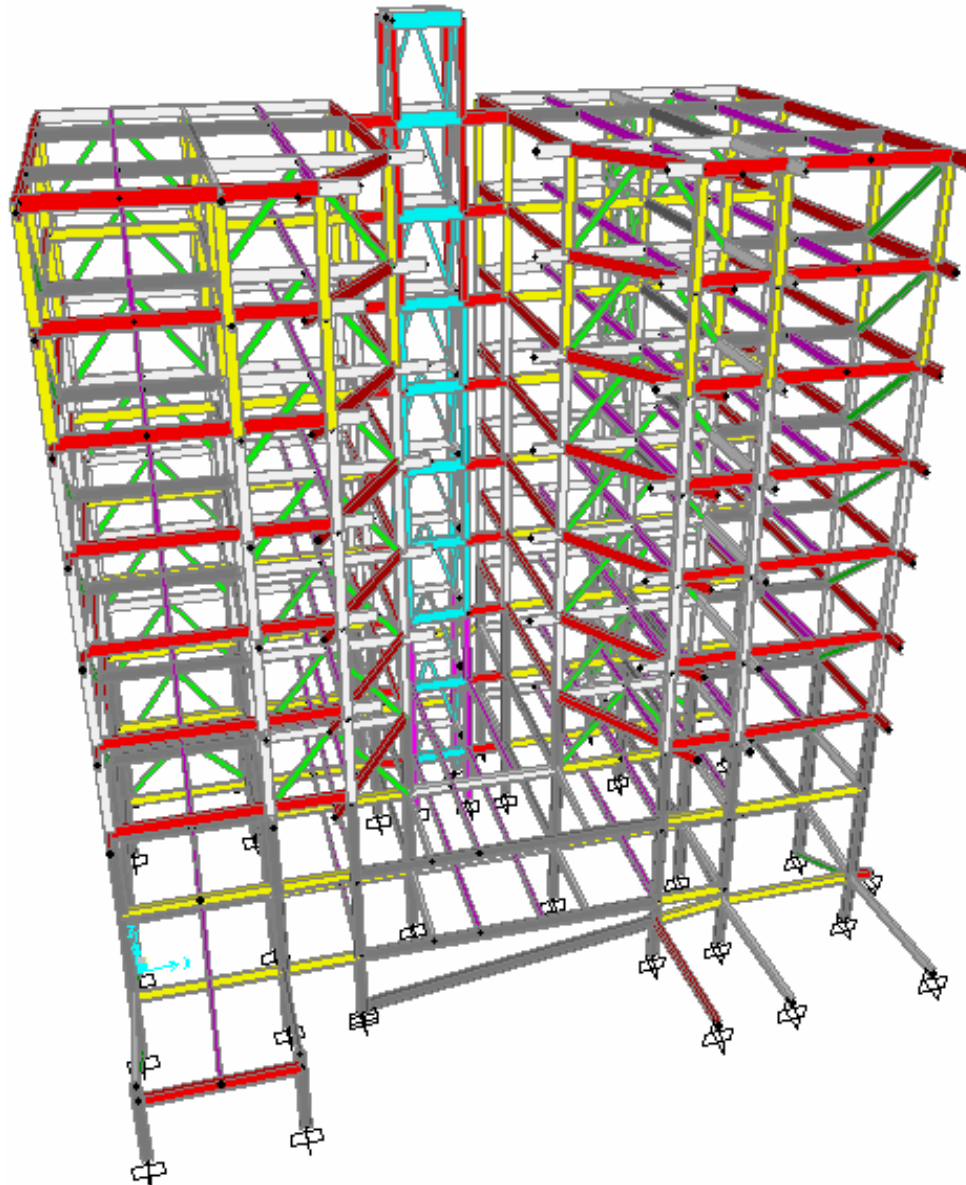


Figura 7: Representación esquemática del sistema de captura de datos, sensor y grabadora y el proceso de conversión de unidades.

## MEDICIÓN DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

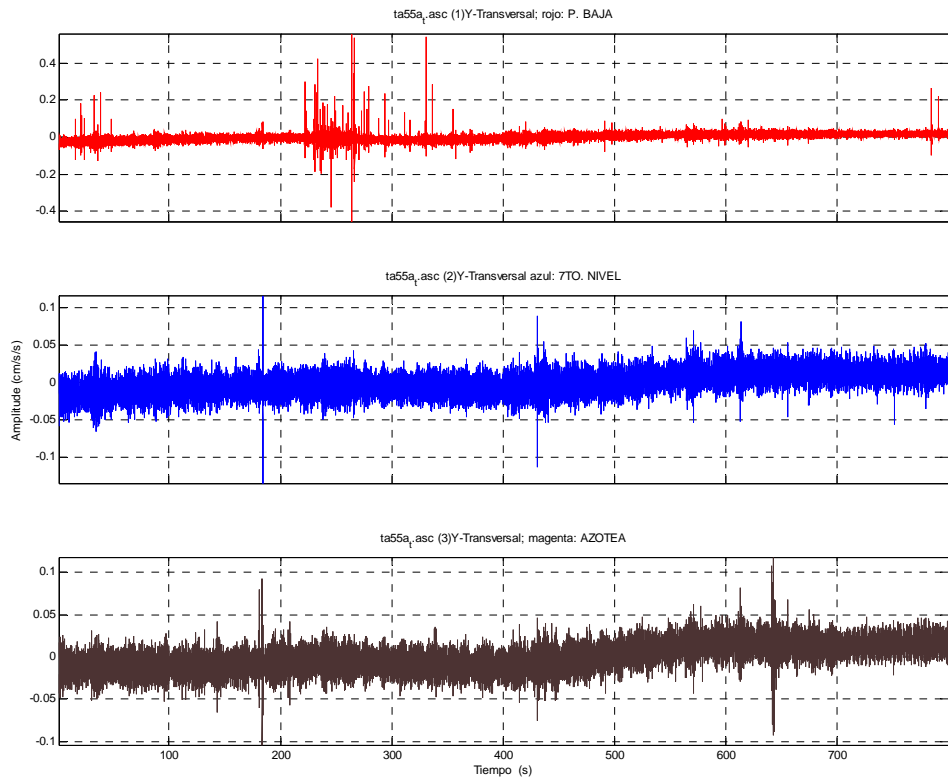
Se efectuaron mediciones de vibración ambiental en tres diferentes arreglos de sensores. Para cada configuración de los arreglos se registro simultáneamente cada una de las tres direcciones ortogonales del movimiento. Para el arreglo 1, los acelerómetros se ubicaron en la cara frontal de la parte interior de la torre norte en los niveles 3, 7, y azotea del edificio. Para el arreglo 2, los acelerómetros se ubicaron: uno en el nivel tres, y dos en la azotea en esquinas encontradas. Para el arreglo 3, se ubicaron dos sensores: uno en el nivel tres y el otro en la azotea, ambos junto al cubo de elevadores y escaleras, en este caso cada sensor registró simultáneamente las tres componentes ortogonales del movimiento. La Figura 8 muestra gráficamente la ubicación individual de los sensores para cada arreglo.

La longitud de las series de tiempo colectadas fue de entre 10 y 20 minutos, excepto para el registro de la componente vertical, que fue de 5 minutos solo en la configuración de sensores número 1. La frecuencia de muestreo en todos los casos fue de 50 Hz. Las señales de vibración ambiental registradas se procesaron en el dominio de las frecuencias para obtener su representación en términos de su potencia de densidad espectral (PSD, por sus siglas en inglés).

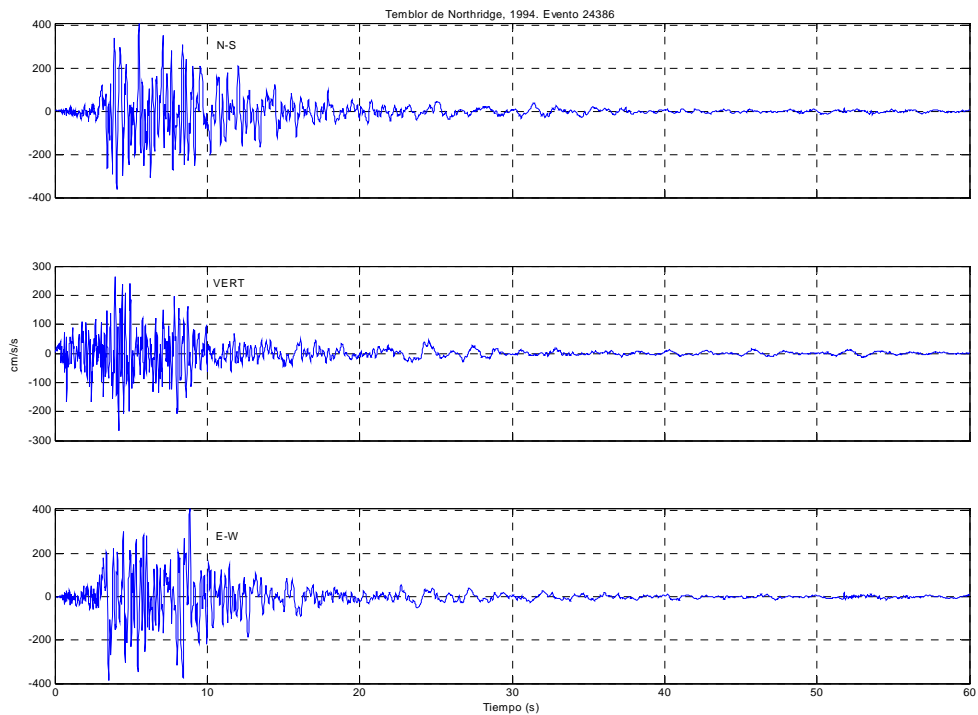


**Figura 8: Ubicación de los sensores para los tres arreglos. Cilindros en naranja: arreglo 1, Cubos en verde: arreglo 2, Estrellas en azul: arreglo 3.**

Una muestra de la serie de tiempo de vibración ambiental y el registro del temblor de Northridge de 1994, se presenta en las Figuras 9 y 10, respectivamente.



**Figura 9: Series de tiempo de vibración ambiental registradas a tres niveles del movimiento en dirección transversal.**



**Figura 10: Registros de aceleración del temblor de Northridge de 1994, ID-24386.**

## PROCESADO DE DATOS

En primer instancia, los registros de vibración ambiental fueron graficados en el dominio del tiempo para su inspección visual, que concierne principalmente en identificar sobre la existencia de señales que no sean características del ruido de fondo (vibración ambiental) como aquellas producidas por maquinarias (elevador, cochera, u otros), ya que requieren de ser removidas manualmente. Más no así las señales transientes “spikes” usualmente presentes en mediciones de vibración ambiental y que en el procedimiento de procesado aquí adoptado no requieren de la intervención del analista para su exclusión. El análisis en el dominio de las frecuencias consistió en obtener la estimación de los espectros de potencia de densidad espectral (PSD) de la series de tiempo.

En preparación para el procesado de las señales de vibración ambiental, los registros de campo fueron transformados de unidades digitales (cuentas) a unidades físicas de aceleración del movimiento de las vibraciones detectadas. El factor nominal de conversión del sistema completo (acelerómetro y grabadora) fue de  $3.8147 \times 10^{-6} \text{ g(m/s}^2\text{)/cuentas}$ , y la componente de d.c. fue removida de las series de tiempo. Por las características del acelerómetro y los parámetros de grabación, no fue necesario aplicar corrección alguna por efecto de instrumento ya que la curva de respuesta del acelerómetro es completamente plana en el rango de frecuencias de 0.4 a 50 Hz. Los PSD's más estables y confiables fueron estimados con traslapes (superposiciones) grandes en el proceso de promediado. En general, traslapes de un 75% y promediado de segmentos de entre 256 y 512 puntos fueron utilizados hasta completar la longitud total de las series de tiempo que oscilaron entre 30000 y 60000 puntos.

Este proceso sigue las reglas del Análisis de Fourier tal y como se describe en varios libros de procesado de señales como por ejemplo Kanasewish (1981), Oppenheim and Shafer (1975), and Bendat and Piersol (1971). Se estimaron los PSD usando y promediando sub-segmentos de series de tiempo de 256 o 512 puntos en longitud con un traslape del 75 %. El valor medio de cada sub-segmento fue removido y una ventana tipo Hanning de igual número de puntos fue aplicada a cada sub-segmento. La estimación final del PSD promediado fue entonces normalizada multiplicándola por el incremento en frecuencia ( $\Delta f$ ) y el factor de escalamiento de la amplitud (que es igual a dos debido a la simetría de la transformada discreta de Fourier) y dividiendo por el número de puntos de los datos ( $N$ ). A continuación se da una descripción y las expresiones analíticas para el caso discreto de la estimación del espectro de potencia (PSD).

La estimación del espectro de potencia se realiza en una computadora mediante la transformada discreta de Fourier (TDF) de cada realización (muestra) aquí denotada por  $x^{(k)}[n]$ , donde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ . Cada realización es  $T = N t_s$  segundos en duración, donde  $N$  denota el número total de muestras y  $t_s$  el intervalo de muestreo. El  $l^{\text{ésimo}}$  valor de la muestra de la transformada continua de Fourier (TCF)  $X_T(l\Delta f)$  está relacionada con la TDF por:

$$X_T(l\Delta f) = \frac{X[l]}{\Delta f}, \dots \dots \dots l = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, \quad (2)$$

donde  $\Delta f = 1/T$ . Entonces la expresión para el  $k^{\text{ésimo}}$  espectro muestreado puede re-escribirse como

$$S^{(k)}(l\Delta f) = \frac{1}{T} |X_T^{(k)}(l\Delta f)|^2 \quad (3)$$

$$S^{(k)}(l\Delta f) = \frac{1}{T} \frac{|X^{(k)}[l]|^2}{(\Delta f)^2} \quad (4)$$

$$S^{(k)}(l\Delta f) = \frac{1}{\Delta f} |X_T^{(k)}[l]|^2 \quad (5)$$

$S^{(k)}(l\Delta f)$  es entonces la representación del PSD de la muestra. Introducimos ahora el espectro de potencia discreto  $S^{(k)}[l]$ ,

$$S^{(k)}[l] = S^{(k)}(l\Delta f)\Delta f \quad (6)$$

Combinando las ecuaciones 5 y 6, llegamos a la expresión para el caso discreto del espectro de potencia de la muestra,

$$S^{(k)}[l] = |X^{(k)}[l]|^2, \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, \quad (7)$$

donde  $X^{(k)}[l]$  es la TDF de la  $k$ ésima realización que consiste de  $N$  muestras, por ejemplo

$$X^{(k)}[l] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^{(k)}[n] e^{-i2\pi nl/N} \quad (8)$$

La estimación del espectro de potencia discreto  $S^{(k)}[l]$  está dada por el promedio del conjunto de todos los espectros de potencia discretos. Esto es,

$$\hat{S}^{(k)}[l] = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |X^{(k)}[l]|^2, \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, \quad (9)$$

$\hat{S}[l]$  denota la potencia asociada a aquellas frecuencias de ancho de banda  $\Delta f$ , centradas en  $f = l\Delta f$ .

## RESPUESTA ANALÍTICA

Para el análisis teórico del comportamiento estructural del edificio, se llevó a cabo la recopilación de los datos del proyecto ejecutivo. Con ellos se construyó un modelo tridimensional en el programa de análisis estructural estático y dinámico denominado SAP2000 versión 10, que considera las propiedades mecánicas y geométricas así como las dimensiones de los elementos estructurales que conforman la edificación.

Una vez construido el modelo virtual, se realizó una investigación de registros de sismos para encontrar una estación que estuviera instalada en un suelo similar en el cual está desplantado el edificio. Esto, para obtener una respuesta sísmica apegada a lo que sucedería en el sitio. Se estableció utilizar el sismo de Northridge de 1994, en la estación Northridge-24386.

Con el modelo virtual construido y con los acelerogramas del sismo de Northridge en formato digital, se le provocó al modelo una excitación sísmica virtual en sus tres componentes (N-S, E-O y Vertical) simultáneamente. Con esto se determinaron los desplazamientos y aceleraciones máximas provocadas en los nudos del edificio, y en específico los espectros de respuesta de la estructura. En estos espectros se graficaron en las ordenadas las aceleraciones espectrales, y en las abscisas las frecuencias dominantes que se presentan en la estructura ante la excitación sísmica. Esto se hizo con el fin de comparar entre los resultados estimados del comportamiento estructural teórico con los resultados experimentales obtenidos de las mediciones de vibración ambiental.

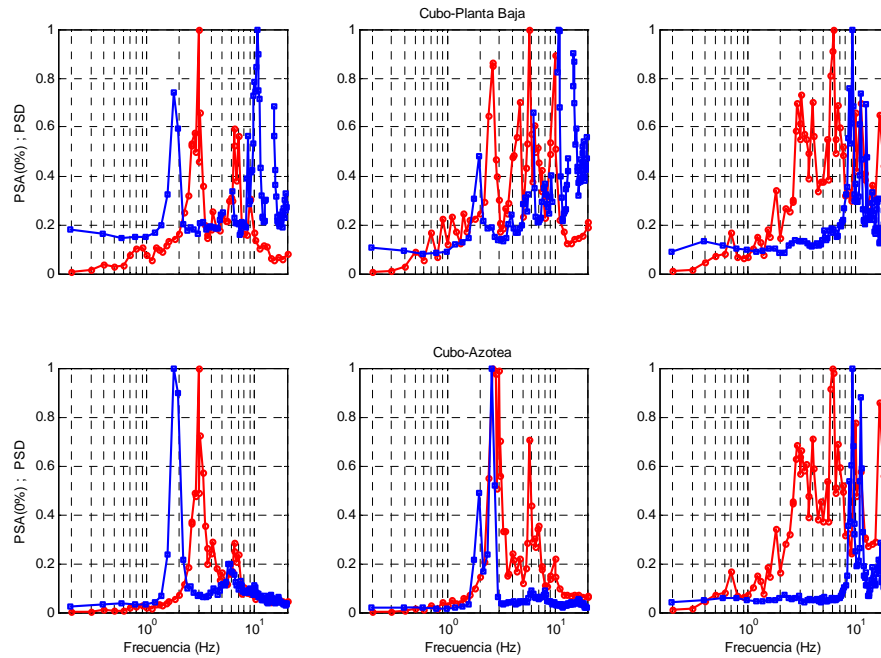
## ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para la comparación de las frecuencias de vibración obtenidas experimentalmente a partir de las mediciones de vibración ambiental y las obtenidas teóricamente de la respuesta de la estructura ante la incidencia del temblor de Northridge 1994, se calcularon los espectros de potencia experimentales y los espectro de pseudo aceleración espectral (PSA) con amortiguamiento del cero por ciento, ambos normalizados entre cero y uno. La comparación coincide entre la ubicación del sensor en el experimento y el nodo correspondiente del modelo de la respuesta teórica.

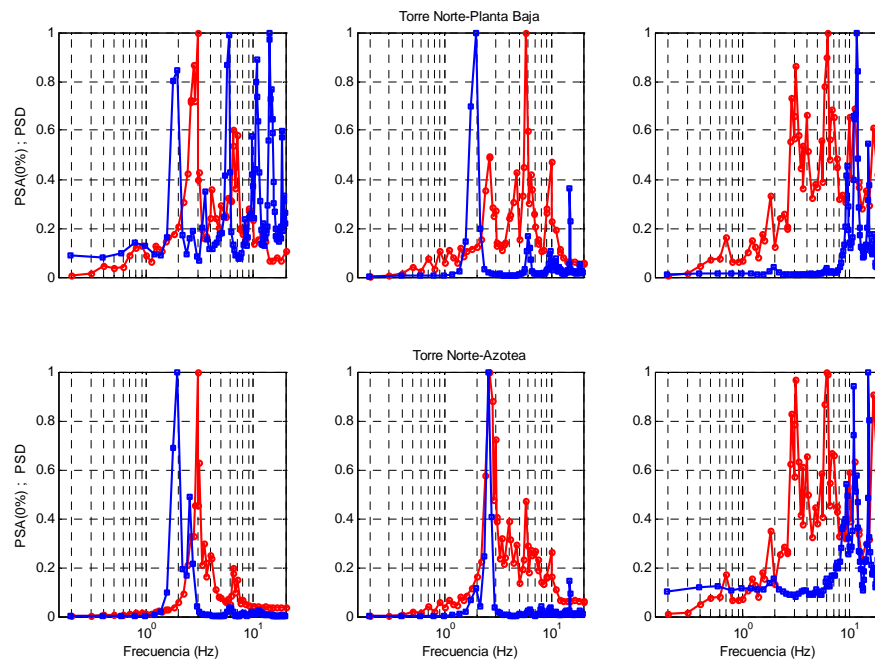
Se presenta en la Figura 11, para su visualización gráfica, la comparación de las frecuencias de vibración correspondientes a las posiciones de los sensores del arreglo 3 (en sus tres direcciones del movimiento) con sus respectivos nodos 507 y 100 de la respuesta del modelo teórico, para la azotea y la planta baja, respectivamente. Por su parte, en la Figura 12 se presenta la comparación correspondiente a la posición de sensores del arreglo 2 (en sus tres direcciones del movimiento) con sus respectivos nodos 497 y 108 de la respuesta del modelo teórico, esto es para la azotea y la planta baja, respectivamente.

Del análisis y comparación de los resultados mostrados en esas figuras, se observa que las frecuencias fundamentales de la vibración medida experimentalmente y la obtenida teóricamente (para los movimientos en dirección longitudinal y transversal) exhiben una correspondencia aceptable, excepto para la componente vertical. Nótese que la obtenida experimentalmente proviene de movimientos muy débiles y la obtenida teóricamente fue estimada con movimientos fuertes. Considerando la posibilidad de que la obtenida teóricamente excita a la estructura en un rango de deformaciones de moderadas a grandes, que se aproximan a estar fuera del comportamiento lineal, podría entonces esto explicar, en parte, las diferencias observadas. También se debe considerar dentro de ese mismo contexto, la incertidumbre asociada a

las estimaciones. Estos aspectos son tema de la continuación del presente trabajo. En la Tabla 3 se presenta el resumen de la comparación entre las frecuencias de vibración teórica y experimental para el conjunto de datos. Finalmente se presentan en la Figura 13 (a, b) las funciones de transferencia entre la azotea y la planta baja.

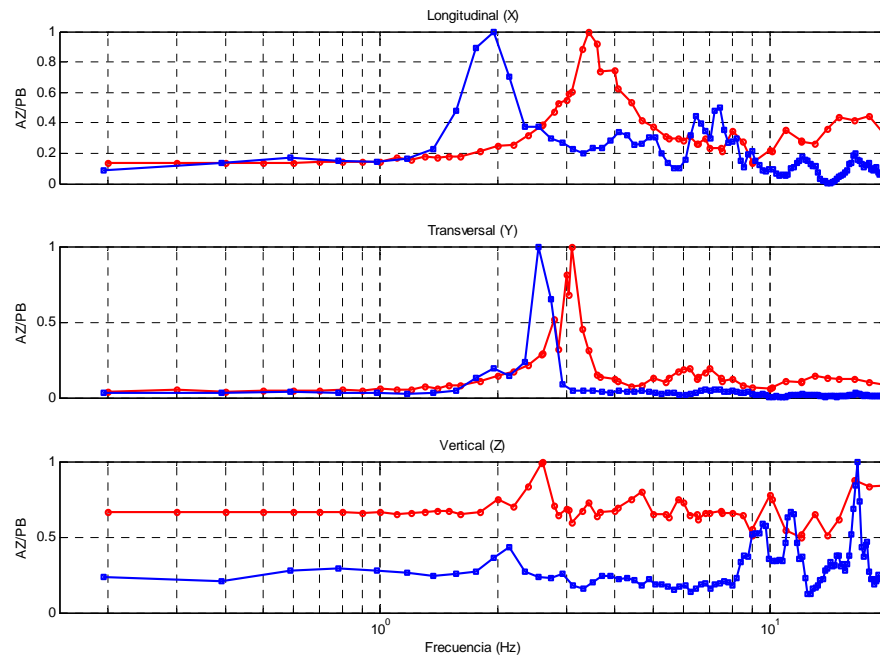


**Figura 11: Espectros de potencia experimentales y PSA (0%) teóricos correspondientes al cubo de elevador-escaleras. Renglón 1: planta baja, y renglón 2: azotea. De izquierda a derecha: movimientos en la dirección longitudinal, transversal y vertical en las columnas 1, 2, y 3, respectivamente. Azul: experimental. Rojo: teórico.**

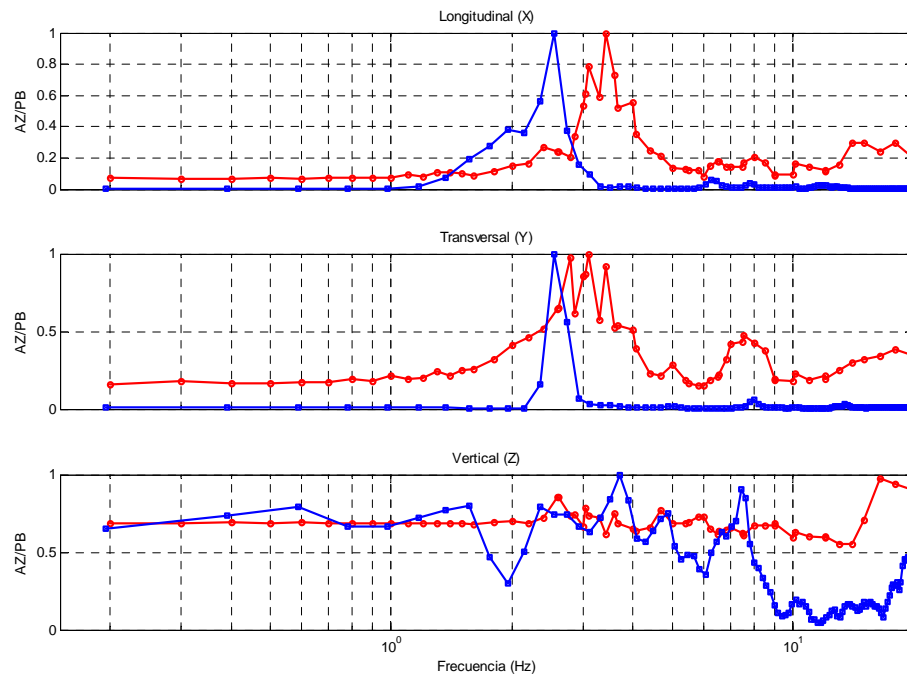


**Figura 12: Espectros de potencia experimentales y PSA (0%) teóricos correspondientes a la torre norte. Renglón 1: planta baja, y renglón 2: azotea. De izquierda a derecha: los movimientos en la dirección longitudinal, transversal y vertical en las columnas 1, 2, y 3, respectivamente. Azul: experimental. Rojo: teórico.**





**Figura 13(a):** Funciones de transferencia azotea-planta baja. Renglones 1, 2, 3 corresponden al cubo. Los movimientos en X, Y, y Z, en los renglones 1, 2 y 3, respectivamente. Azul: experimental. Rojo: teórico.



**Figura 13(b):** Funciones de transferencia azotea-planta baja. Los renglones 4, 5, 6 corresponden a la torre norte. Los movimientos en X, Y, y Z, en los renglones 5 y 6, respectivamente. Azul: experimental. Rojo: teórico.

**Tabla 3: Comparación de frecuencia de vibración del modo fundamental.**

		Longitudinal (X)		Transversal (Y)		Vertical (Z)	
		Experimental (s)	Teórico (s)	Experimental (s)	Teórico (s)	Experimental (s)	Teórico (s)
Arreglo 1 (Torre Norte)	Azotea	#1.75, 3.32	3.00	#1.80, 6.00	2.60	N.A.	*3.10, 6.20
	P. Baja	1.95	3.00	1.95	2.60	N.A.	*3.10, 6.20
Arreglo 2 (Torre Norte)	Azotea	1.95	3.00	2.53	2.60	10.94	*3.10, 6.00
	P. Baja	1.95	3.00	1.95	2.60	11.52	*3.10, 6.20
Arreglo 3 (Cubo)	Azotea	1.75	3.00	2.53	2.60	9.18	*2.86, 6.00
	P. Baja	1.75	3.00	1.95	2.60	9.18	*3.10, 6.20

#Exhibe dos frecuencias, una de ellas significativa. \*Exhiben dos frecuencias significativas. N.A.: No resuelto.

## AGRADECIMIENTOS

A las autoridades de la Dirección General y del Departamento de Ciencias de la Tierra del I. T. T. Este trabajo fue posible a la buena disposición del propietario del edificio y al Arq. Guillermo Rojas que permitieron el acceso a las instalaciones y a la información técnica del mismo. Al personal académico y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UABC, Campus Ensenada: Ing. Jesús Juárez García, estudiantes: América Reynaga, Andrés González, y Esmeralda Ramírez, así mismo a la estudiante Mariana Figueroa, del I. T. M participante del XVII Programa del Verano de la Investigación Científica que organiza la AMC. Estas actividades forman parte de los convenios de colaboración académica realizados por ambas instituciones con CICESE. Se agradece las observaciones y comentarios acertados de los revisores anónimos de este trabajo que ayudo a mejorar esta publicación.

## REFERENCIAS

- Alain, W., Le Page, M., Chávez, V.G., Vela, G.R., Castañeda, S.R. y González, V.C. (2000). “Aportes para un escenario sísmico en Tijuana, ¿y si un terremoto de magnitud 6.5 se produjera en la falla La Nación?”, El Colegio de la Frontera Norte y el Institut de Recherche pour le Développement, 74 pp.
- Bendat, J.S. and Piersol, A.G. (1971). *Random Data: Analysis and Measurements Procedures*, John Wiley & Sons, Inc. New York. 407 pp.
- Berumen, R.M.A. y Bermúdez, H.E. (2002). “Estratigrafía y propiedades de los suelos de Tijuana”, Tesis Profesional, Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico de Tijuana, México, 211 pp.
- Clemente, P., Celebi, M., Bongiovanni, G. and Rinaldis, D. (2004). “Seismic analysis of the idiano cable-stayed bridge”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canadá, paper No. 3296.
- Espinoza, B.F. (1999). “Determinación de características dinámicas de estructuras”, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Gastil, R.G., Philips, R.P. and Allison, E.C. (1975), “Reconnaissance geology of the state of Baja California, México”, *Geol. Soc. America Mem. 170*, 170 pp.
- Hallin, M.W., Bal, A., Esplín, R. and Hsieh, K. (2004). “Modal analysis and modeling of highway bridges”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, paper No. 2996.
- Huang, C.S. (2000). “Modal identification of structures using ARMV model for ambient vibration measurement”, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, paper No. 1702.
- Huerta, L.C.I. (2005). “Site Characterization and Experimental local site effects in the metropolitan area of Mexico-USA region of Tijuana B.C., Mexico and San Diego, CA, USA”, UC-Mexus-CONACyT Report, 55 pp.
- Ibarra, T.G.K. (2004). “Microzonación de períodos dominantes en los principales centros urbanos de Baja California”, Tesis de Maestría, Departamento de Sismología, CICESE, 105 pp.

- Irie, Y. and Nakamura, K. (2000). "Dynamic characteristics of a r/c building of five stories based on microtremor measurements and earthquake observations", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, paper No. 0500.
- Kanasewich, E.R. (1981). *Time Series Analysis in Geophysics*, Third Edition, University of Alberta Press, Edmonton, Alberta, Canadá, 480 pp.
- Midorikawa, S. (1990). "Ambient vibration tests of buildings in Santiago and Viña del Mar", Report of the Chilean-Japan Joint Study Project on Seismic Design of Structures, Departamento de Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería., Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Montalvo, A.J.C. (1996). "Deslizamientos de laderas inducidos por terremotos en la ciudad de Tijuana, B. C.", Tesis de Maestría, Departamento de Sismología, CICESE, 128 pp.
- Muriá-Vila, D., Fuentes, O.L. and Gonzáles, A.R. (2000). "Uncertainties in the estimation of natural frequencies of buildings in México City", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, paper No. 2092.
- Oppenheim, A.V. and Schaffer, R. W. (1975). *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 556 pp.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (1992). "Reglamento de Edificación de Baja California", Tomo XCIX, No. 21, 30 de junio, Mexicali, Baja California, México, 342 pp.
- Reichle, M. (1991). "Earthquake scenario for the San Diego-Tijuana area", Environmental Perils San Diego region, Proceedings of the Geological Society of America Annual Meeting, October 21, 1991, The San Diego Association of Geologists, pp. 127-136.
- Ren, W.X., Zatar, W. and Harik, I.E. (2004). "Ambient vibration-based seismic evaluation of continuous girder bridge", *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 631-640.
- Rojas, R.R., Jara G.J.M. y Hernández, B.H. (2006), "Estudio analítico y experimental de un puente peatonal en la ciudad de Morelia", *Revista Ciencia Nicolaita*, Vol. 43, Universidad Autónoma de Morelia, México, pp. 143-140.
- SAP2000 Ver.10 (2000), Computers and Structures, Inc.