

**"Documento original en mal estado"**

**ANEXO 5**

**TECNICAS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACION DE  
LAS CARACTERISTICAS DINAMICAS DE ESTRUCTURAS Y  
SUELOS. PONENCIA PUBLICADA EN LAS IX JORNADAS DE  
INGENIERIA ESTRUCTURAL Y SISMORESISTENTE EN  
LA ESPE QUITO - ECUADOR  
MAYO 1995.**

## TECNICAS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DINAMICAS DE ESTRUCTURAS Y SUELOS.

**POR:           Ing. JAIME ARGUDO RODRIGUEZ (1)**

### RESUMEN

En esta ponencia se describirán varias técnicas experimentales empleadas para la determinación de las características dinámicas de estructuras y suelos, las mismas que han sido empleadas en varios países del mundo con resultados satisfactorios.

Se expondrán los ensayos de vibración forzada y de vibración libre ejecutados en el edificio de la Municipalidad de Tokyo, Japón (Abril de 1990), de vibración forzada practicados al edificio del reactor nuclear de la central eléctrica Atucha II, Argentina (Noviembre de 1993) Ambos ensayos conducidos por la compañía japonesa KAJIMA.

La técnica de medición de la vibración ambiental para la determinación del período fundamental de estructuras, se sustentará mediante los ensayos llevados a cabo en numerosos edificios en Guayaquil con ocasión del proyecto: "Vulnerabilidad Sísmica de Edificios Importantes de Guayaquil", desarrollado con la coordinación de UNDRD/DHA y del proyecto actualmente en ejecución: "Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural de Hospitales en Guayaquil", desarrollado con la coordinación de la OPS

Se presentará la técnica de la medición de microtrepidaciones para la estimación del rango de períodos dominantes en los suelos, citando como referencia ensayos realizados en Guayaquil, Ecuador y en otros países

---

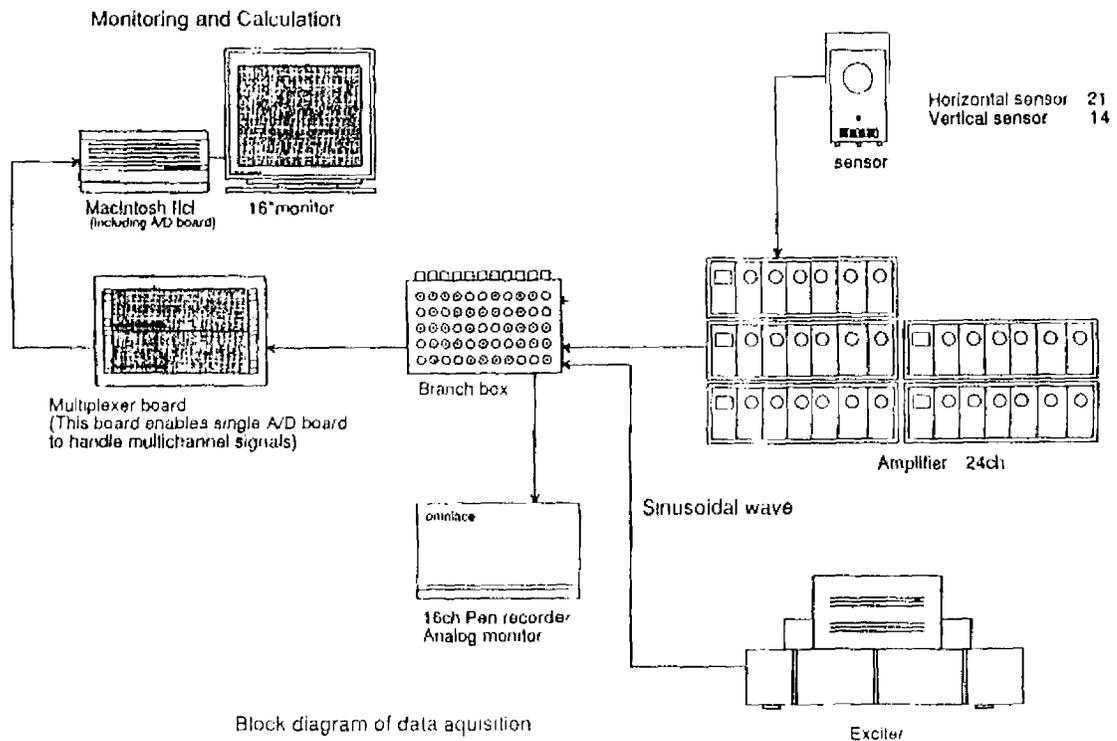
**(1)    Miembro de Kajima Technical Research Institute (Nov. - Dic. 1993).  
          Profesor Principal de Ingeniería Sísmica, Universidad Católica de Guayaquil.**

## 1. ENSAYOS DE VIBRACION FORZADA EN EDIFICIOS:

### 1.1. Descripción del ensayo:

El ensayo de vibración forzada, es el más exhaustivo de los ensayos usados para la determinación experimental de las características dinámicas de las estructuras, modos y períodos de vibración. Consiste en someter a la estructura a un régimen de vibración usando como fuerza de excitación una función armónica sinusoidal de frecuencia variable generada por un excitador dinámico instalado en la estructura (**Referencia 1**).

Un conjunto de sensores localizados en varios niveles registran la respuesta sinusoidal armónica de la estructura y transmiten los registros de desplazamientos a un sistema de adquisición de datos mediante señales analógicas que son luego convertidas en señales digitales por un computador para su posterior procesamiento. El sistema (hardware) se presenta a continuación en la **Figura 1**.



**FIGURA 1:** DIAGRAMA DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA EL ENSAYO DE VIBRACION FORZADA (METODO MIK DE KAJIMA).

### 1.2. Procesamiento de las señales digitales y determinación de la respuesta verdadera de la estructura:

Las señales digitales de respuesta de todos los sensores se procesan empleando la técnica de análisis de correlación cruzada que permite eliminar el ruido y obtener la respuesta verdadera de la estructura.

Cuando una estructura es sometida a una fuerza sinusoidal  $F(t)$ , la función de correlación cruzada  $\phi_{xz}(t)$  entre la señal armónica por el excitador  $X(t)$  y las señales registradas en cada uno de los sensores  $Z(t)$ , se expresa mediante la **Ecuación 1**:

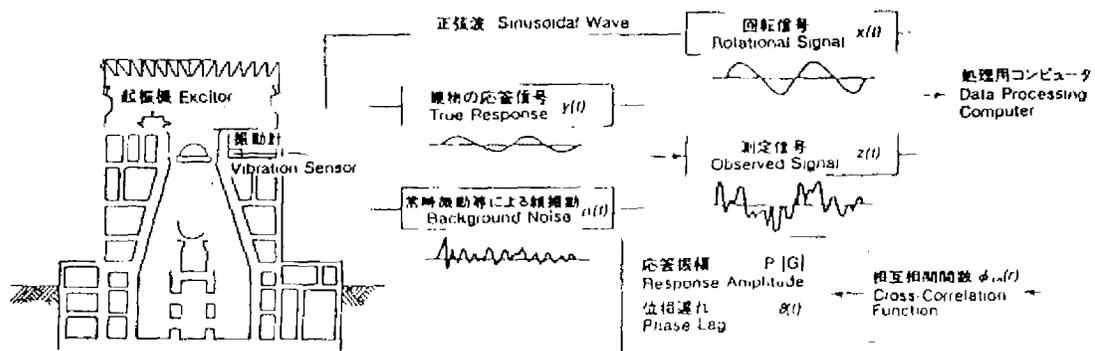
$$\phi_{XZ}(\tau) = 1/T \int_0^T X(t) \cdot Z(t+\tau) dt \quad \text{Ec. 1}$$

- Donde:
- $F(t) = P \cdot \cos \omega t$
  - $X(t) = A \cdot \cos \omega t$
  - $Y(t) = P \cdot |G| \cdot \cos(\omega t - \Theta)$
  - $Z(t) = Y(t) + N(t)$
  - $P$  : La amplitud de la fuerza de excitación
  - $A$  : La amplitud de la señal de excitación (desplazamientos)
  - $\omega$  : La frecuencia circular de vibración de la excitación
  - $|G|$  : Constante de amplificación dinámica entre la señal del excitador y la respuesta real de la estructura.
  - $\Theta$  : El ángulo de fase de la respuesta real
  - $Y(t)$  : La respuesta real de la estructura correspondiente a cada sensor
  - $N(t)$  : La función de ruido ambiental
  - $T$  : La duración del registro
  - $\tau$  : Tiempo de fase en la función de correlación.

Al resolver por métodos numéricos la **Ecuación 1**, se llega a la **Ecuación 2**, cuyo segundo término  $\phi_{XN}(\tau)$  es la función de correlación cruzada entre  $X(t)$  y  $N(t)$ , el mismo que llega a ser muy pequeño y despreciable cuando el tiempo de medición es suficientemente largo, cuando la amplitud de la fuerza de excitación  $P$  es lo suficientemente grande como para filtrar el ruido ambiental o bien, si la frecuencia circular de la excitación  $\omega$  es muy cercana a alguna frecuencia propia de la estructura como para producir una respuesta resonante.

$$\phi_{XZ}(\tau) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot P \cdot |G| \cdot \cos(\omega \tau - \Theta) + \phi_{XN}(\tau) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot P \cdot |G| \cdot \cos(\omega \tau - \Theta) \quad \text{Ec. 2}$$

Finalmente, a partir de la **Ecuación 2** se puede llegar a determinar los valores de amplitud de respuesta  $P \cdot |G|$  y ángulo de fase  $\Theta$  para todos y cada uno de los sensores. La **Figura 2**, que a continuación se presenta, ilustra el procedimiento antes descrito



**FIGURA 2: ENSAYO MISO (TECNICA DE MUTO, ISHII & KAJIMA CORPORATION)**

### 1.3 El excitador dinámico:

Consiste en una máquina accionada por un generador que hace rotar con velocidad angular o frecuencia circular  $w$  uniforme dos masas iguales en sentido opuesto produciendo como resultado una fuerza de excitación sinusoidal  $F(t)$  que solicita a la estructura lateralmente, tal como se muestra en las Figura 3

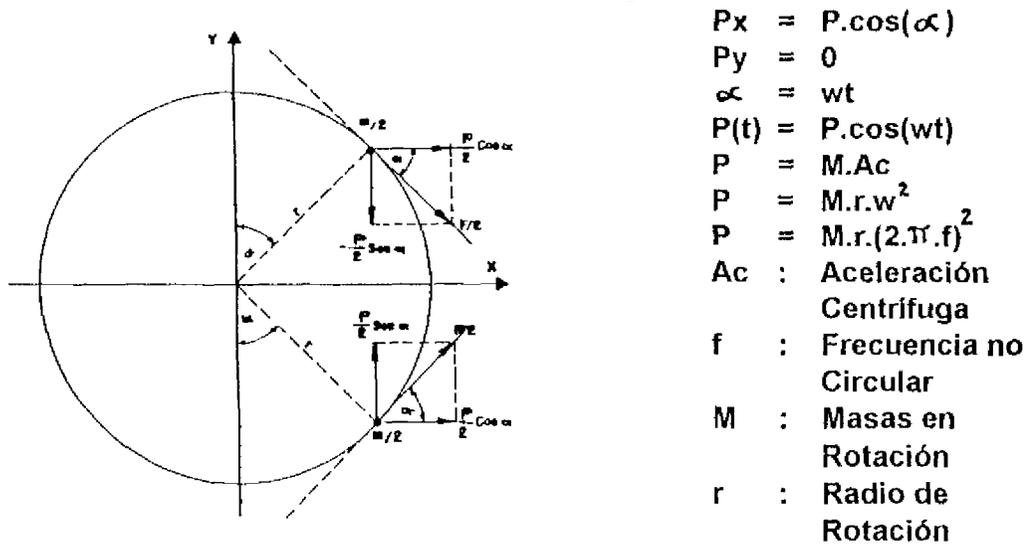


FIGURA 3: FUERZA  $F(t)$  GENERADA POR MASAS EN ROTACION

A continuación se presentan dos fotos de excitadores que han sido utilizados en ensayos de vibración forzada realizados en el Edificio de la Municipalidad de Tokyo, Japón 1990, en el Edificio del Reactor Nuclear Atucha II de la Argentina, 1993 (Foto 1); y en dos viviendas de Guayaquil - Ecuador, 1991 (Foto 2), (Referencia 2).

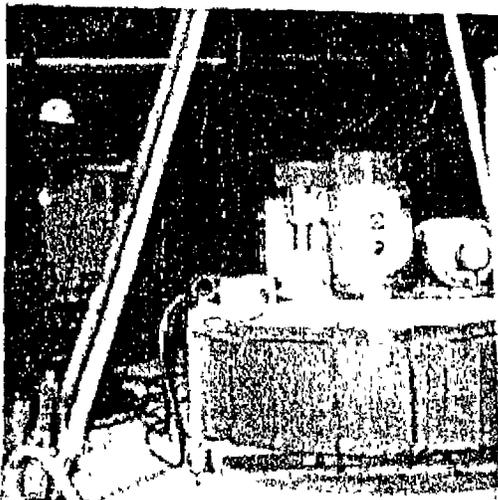


FOTO 1

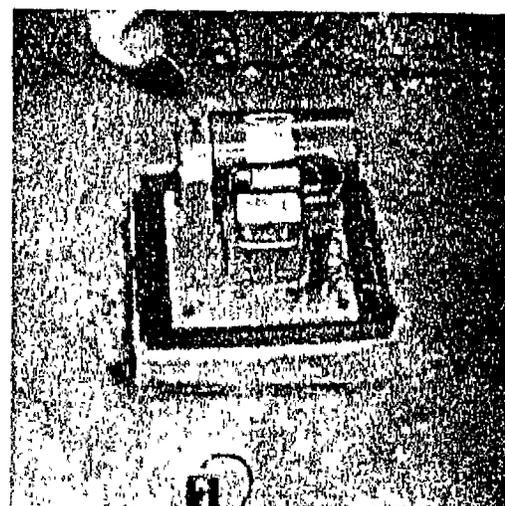


FOTO 2

El excitador de la **Foto 1**, genera una fuerza máxima de excitación  $P = 3000$  kgs lo que permite mediciones satisfactorias para un rango de frecuencias  $f > 1$  Hz en estructuras muy pesadas o  $f > 0.5$  Hz para estructuras más livianas. El excitador de la **Foto 2**, genera una fuerza máxima de excitación  $P = 200$  kgs. Por su baja potencia solo puede ser utilizado en estructuras pequeñas y livianas de hasta dos pisos.

#### 1.4. Resultados obtenidos en dos ensayos de vibración forzada.

##### 1.4.1 Edificio del reactor nuclear Atucha II de la Argentina (Noviembre 1993):

En Noviembre de 1993, el Instituto Técnico Kajima realizó el estudio de las características dinámicas del edificio del reactor nuclear Atucha II en la Argentina (**Foto 3**), conjuntamente con la Universidad de Córdoba y la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEA) de la Argentina

Durante cuatro semanas se llevaron a cabo 12 ensayos localizando al excitador en tres posiciones diferentes, midiendo en más de 80 puntos (dentro y fuera del edificio del reactor), se instalaron cerca de 14 kms de cables conectores y un centro de control de datos para la adquisición de cerca de 200 registros entre señales horizontales y verticales. La localización de los sensores instalados en el interior del edificio se presenta en la **Figura 4**.

Lo exhaustivo del ensayo, guarda relación con la complejidad de la estructura conformada por un edificio de hormigón armado que en su parte central aloja la cápsula del reactor nuclear y que está encerrado por dos esferas, la primera de acero para el control físico de radiaciones y la segunda (visible desde el exterior del edificio) de hormigón armado para control biológico. El edificio está conectado con las esferas en la cimentación desplantada a 18.6 metros de profundidad sobre un suelo firme de arcilla sobreconsolidada del tipo cangagua



FOTO 3: EDIFICIO DEL REACTOR NUCLEAR ATUCHA II, ARGENTINA

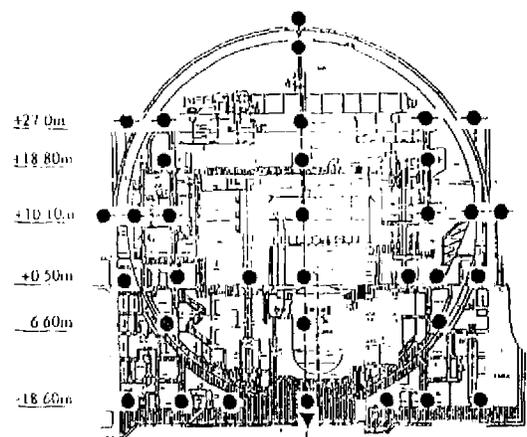
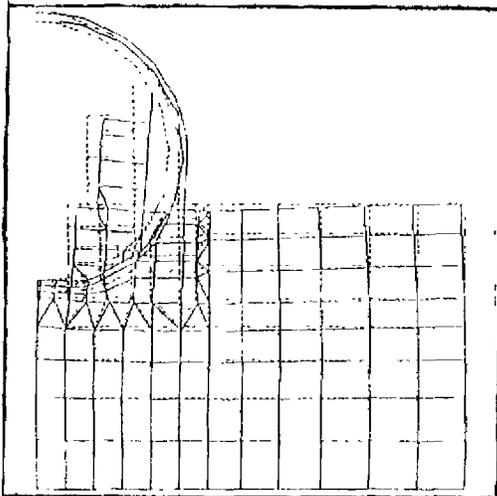


FIGURA 4: LOCALIZACION DE SENSORES (ATUCHA II)

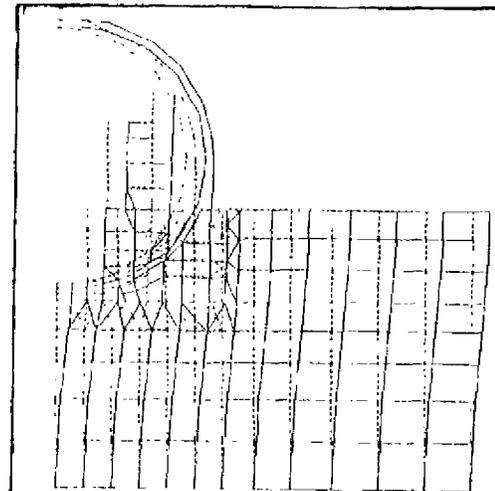
Los resultados definitivos del ensayos se presentarán en la Conferencia Mundial sobre Mecánica Estructural en Tecnología de Reactores Nucleares a realizarse en Brasil, en Julio de 1995. Algunos resultados preliminares obtenidos durante los ensayos se ilustran a continuación

a) La **Figura 5**, muestra el modo de vibración en la frecuencia  $f = 4.1$  Hz correspondiente al sistema suelo - estructura en interacción. Este modo es particularmente importante porque define un movimiento de balanceo (rocking motion), capaz de producir pares de fuerzas normales al suelo que a su vez introducen esfuerzos cortantes en la cimentación de la estructura. Analíticamente esta frecuencia fue estimada en 2.9 Hz.

b) La **Figura 6**, muestra el modo de vibración en la frecuencia  $f = 1.62$  Hz ( $T = 0.6$  seg) calculada mediante un modelo de elementos finitos y corresponde al primer modo o frecuencia fundamental del suelo. Nótese que en este caso la estructura se desplaza lateralmente como cuerpo rígido. Esta forma modal fue identificada en los ensayos experimentales en una frecuencia de 2 Hz (**Referencia 3**)



**FIGURA 5:** Modo de vibración del movimiento de balanceo  $f = 4.1$  Hz. (experimental)  
 $f = 2.9$  Hz (analítico)



**FIGURA 6:** Modo fundamental del suelo  $f = 2$  Hz (exp)  
 $f = 1.6$  Hz. (analítico).

c) Los sensores colocados en los niveles superiores de la estructura, captan predominantemente las vibraciones de las esferas de acero y hormigón donde han sido instalados y permiten una clara identificación de las formas modales que corresponden a la estructura, esto se corrobora al graficar las formas modales con las amplitudes normalizadas de  $P \cdot |G| \cos(O)$ .

En la **Figura 7** se observan las curvas de resonancia de un sensor localizado sobre la cima de la esfera de acero para cuatro ensayos diferentes. En la **Figura 8**, se aprecian las curvas de resonancia de varios sensores localizados en +27.0 m durante un mismo ensayo. La frecuencia fundamental de vibración de la esfera metálica fue estimada en 7.1 Hz y la de la esfera de hormigón en 5.4 Hz

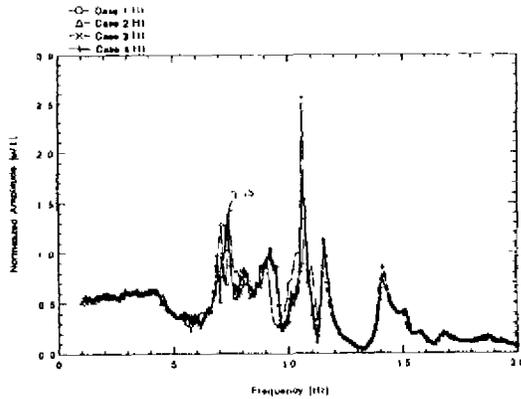


FIGURA 7: Curvas de Resonancia nivel de cima +36.0 m.

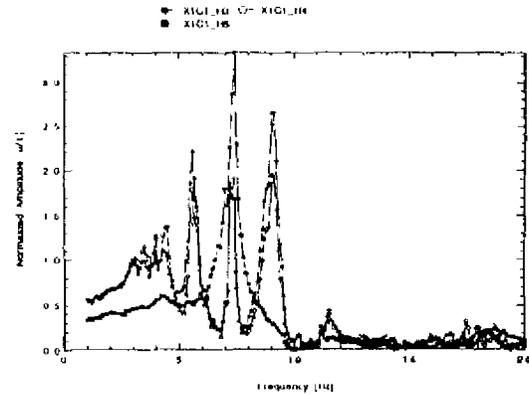


FIGURA 8: Curvas de Resonancia, a +27 m Edificio del reactor Atucha II, Argentina

#### 1.4.2 Edificio de la Municipalidad de Tokyo:

En Abril de 1990, el Instituto Técnico Kajima realizó el estudio de las características dinámicas del edificio de la Municipalidad de Tokyo que tiene 34 pisos (**Foto 4**) Se llevó a cabo un ensayo de vibración forzada instalando el excitador en el piso 33 y empleando 20 sensores horizontales y 2 verticales de tipo pendular (**Foto 5**). En la **Figura 9**, se muestra la localización de los sensores.

Dado que el edificio es bastante esbelto, su periodo fundamental, no pudo ser evaluado mediante los ensayos de vibración forzada y se debió recurrir para su determinación a un ensayo de vibración ambiental Se lo estimó en  $T = 2.94$  seg para el sentido más flexible.



FOTO 4: EDIFICIO DE LA MUNICIPALIDAD DE TOKYO, JAPON

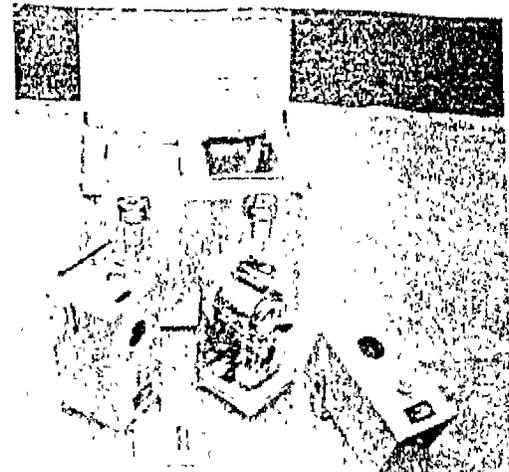
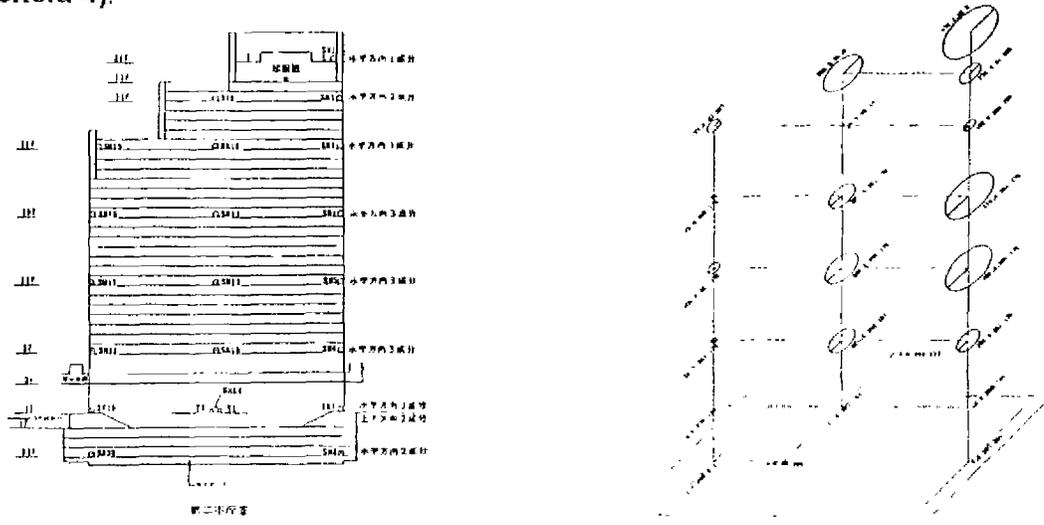


FOTO 5: SENSOR VERTICAL DE TIPO PENDULAR.

Para otros modos distintos al primero, se obtuvieron las curvas de resonancia  $f$  vs  $P \cdot |G|$ , a partir del ensayo de vibración forzada y sus respectivas formas modales fueron calculadas graficando las amplitudes normalizadas  $P \cdot |G| \cdot \cos\theta$ , tal como se ilustra en la **Figura 10**, para el caso del segundo modo en la dirección transversal ( $f = 1.02$  Hz.). (Referencia 4).



**FIGURA 9:** Localización de sensores y excitador Edificio de la Municipalidad de Tokyo. **FIGURA 10:** II Modo de vibración  $f = 1.02$  Hz

## 2. ENSAYO DE VIBRACION LIBRE EN EDIFICIOS:

### 2.1. DESCRIPCION DEL ENSAYO:

Mediante este ensayo se estima el porcentaje de amortiguamiento crítico  $\frac{1}{2}$ , a partir del decremento logarítmico medido en la curva de vibración libre. Para producir un régimen de vibración libre es necesario generar primero un régimen sinusoidal armónico de vibración forzada en la frecuencia correspondiente al primer modo de vibración y liberar súbitamente la fuerza de excitación  $F(t)$ .

$F(t)$ , no necesita ser una fuerza muy grande puesto que el edificio se encuentra en condición de resonancia, y esto implica que la amplitud de la respuesta medida es mucho mayor que la de la excitación (10, 20, 50 veces, dependiendo del grado de amortiguamiento del primer modo)

Dicha fuerza en estructuras rígidas debe ser producida por una máquina (excitador dinámico), pero en estructuras flexibles puede ser producida por personas balanceándose en el último piso, tal como se hizo en el Edificio de la Municipalidad de Tokyo (**Foto 6**). También puede generarse la fuerza, golpeando armónicamente a la estructura, tal como se hizo en el piso doce del edificio Rocasa en Guayaquil (**Foto 7**).



FOTO 6: ENSAYO DE VIBRACION LIBRE MUNICIPALIDAD DE TOKYO



FOTO 7: ENSAYO DE VIBRACION LIBRE EDIFICIO ROCASA, GUAYAQUIL

En la **Figura 11** mostrada a continuación, se ilustra como calcular el porcentaje de amortiguamiento crítico  $\delta$ , a partir de una curva de vibración libre

Donde  $F(t) = P \cdot \cos(w \cdot t)$ ,  $w$  = frecuencia circular del primer modo de la estructura.  
 $T_1$  = período fundamental de la estructura.

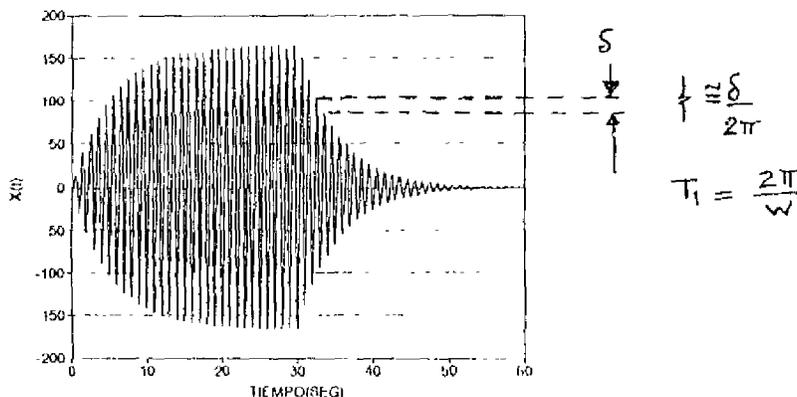
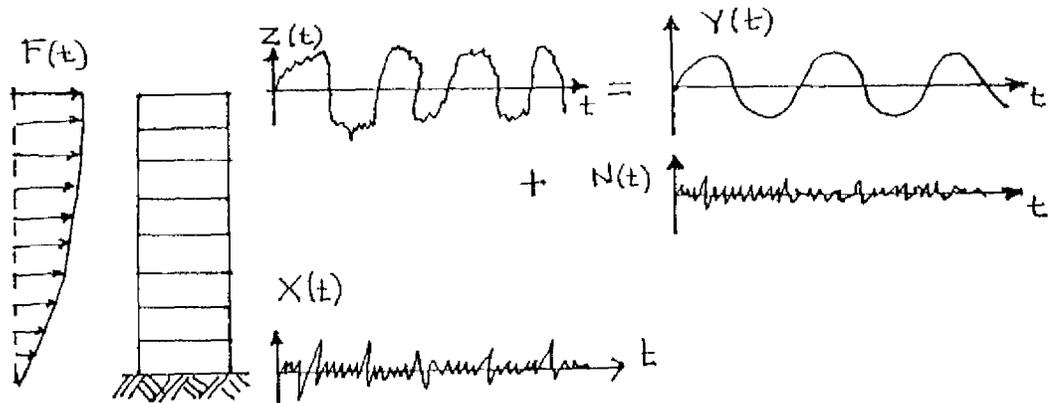


FIGURA 11: CURVA DE VIBRACION LIBRE GENERADA POR REGIMEN FORZADO EN CONDICION DE RESONANCIA EN EL PRIMER MODO DE VIBRACION

### 3. ENSAYOS DE VIBRACION AMBIENTAL EN EDIFICIOS:

#### 3.1. VARIABLES DEL ENSAYO:

Este ensayo permite determinar el período fundamental de las estructuras sometidas a fuerzas ambientales de excitación. En la **Figura 12**, un edificio se encuentra representado por un sistema de varios grados de libertad sobre el cual se desarrollan las siguientes funciones:



**FIGURA 12: ENSAYO DE VIBRACION AMBIENTAL, FUNCIONES QUE ACTUAN SOBRE UNA ESTRUCTURA**

- F(t)** : es la función de la principal fuerza de excitación, (el viento) Actúa mediante fuerzas tensoriales tridimensionales que excitan a una estructura generalmente en su primer modo, dado que las frecuencias de las corrientes de viento son bajas (menores que 2 Hz)
- X(t)** : es la función de las microtrepidaciones del suelo. Contiene frecuencias que corresponden tanto a las características dinámicas del sitio como a las de las fuentes ambientales de vibración, siendo el tránsito la fuente más importante con frecuencias en el rango de 2 a 5 Hz
- Z(t)** : es la función de respuesta medida en el último piso de la estructura. En ella se combinan: la respuesta verdadera de la estructura en su primer modo  $Y(t)$ , las respuestas de otras formas modales y las vibraciones de las fuentes de excitación  $N(t)$ . Sin embargo, la participación del primer modo es predominante dado que:
- La estructura es excitada por el viento con frecuencias que corresponden al primer modo.
  - El modo fundamental posee la mayor participación modal dentro de la respuesta global de la estructura. Lo que se explica en detalle en el **Anexo 1**
- Y(t)** : es la función de la respuesta verdadera de la estructura, que corresponde al primer modo de vibración.
- N(t)** : es la función de ruido (background noise), que corresponde a la contribución de las vibraciones de las fuentes ambientales de excitación, el suelo y la estructura en frecuencias distintas a la del primer modo. Esta función es muy pequeña con relación a  $Y(t)$  cuando se satisfacen las siguiente condiciones.

- a) El tiempo de medición debe ser lo suficientemente largo para registrar una señal estacionaria que permita identificar en el espectro de Fourier a la frecuencia del primer modo entre otras que corresponden a las fuentes, al suelo o a otras formas modales
- b) La fuerza de excitación del viento  $F(t)$  grande, como para producir una respuesta  $Z(t)$  similar a  $Y(t)$ . Esto es lo que ocurre cuando el viento actúa sobre estructuras esbeltas de 5 o más pisos
- c) La función  $N(t)$  atenuada considerablemente cuando las condiciones de medición son favorables. En edificios de 4 pisos o menos, se pueden realizar las mediciones durante la noche, reduciendo así grandemente la amplitud de la función  $X(t)$

### **3.2. Instrumentación, procesamiento de las mediciones y determinación del período fundamental de la estructura.**

#### **3.2.1. Uso de la Función de Transferencia:**

Algunos sostienen que es necesario ejecutar los ensayos de vibración ambiental midiendo simultáneamente la respuesta del suelo  $X(t)$  y la de la estructura en su último piso  $Z(t)$ , para calcular la función de transferencia al dividir el espectro de Fourier de  $Z(t)$  entre el espectro de Fourier de  $X(t)$ , para estimar la frecuencia correspondiente al primer modo de la estructura.

La función de transferencia logra matemáticamente, que las frecuencias de la estructura predominen y se desvanezcan las frecuencias del suelo y de la fuente ambiental de excitación.

Sin embargo, si se mide siguiendo los conceptos anotados en 3.1., se puede probar que el espectro de Fourier de  $Z(t)$  muestra por sí solo lo predominante de la respuesta del primer modo en la dirección observada.

Como ejemplo, se presenta la medición de la vibración ambiental en el piso 17 del edificio del Banco del Pacífico (**Foto 8**). Cerca del edificio, en el suelo, se obtuvo un registro  $X(t)$  cuyo espectro de Fourier se muestra en la **Figura 13**.

Se midió la respuesta de la estructura en la dirección N-S, y se obtuvo el espectro de Fourier de la señal  $Z(t)$  que se aprecia en la **Figura 14**. Finalmente, la función de transferencia calculada al dividir los espectros anteriores confirma que la frecuencia fundamental es  $f = 0.69$  Hz (**Figura 15**)

Queda a criterio del lector establecer la utilidad que tiene en estas condiciones, el uso de la función de transferencia



FOTO 8: EDIFICIO MATRIZ DEL BANCO DEL PACIFICO, ICAZA Y PICHINCHA.

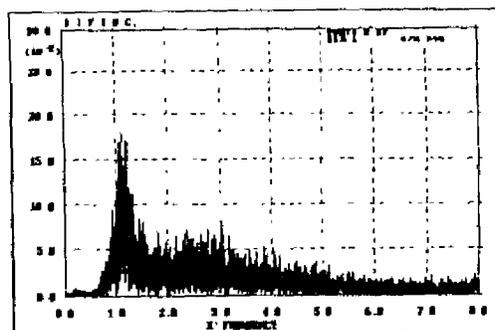


FIGURA13: ESPECTRO DE FOURIER DEL SUELO, MALECON Y 9 DE OCTUBRE.

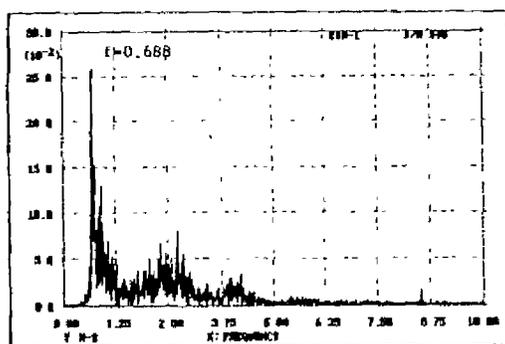


FIGURA 14: ESPECTRO DE FOURIER PISO 17, DIRECCION N-S BANCO DEL PACIFICO

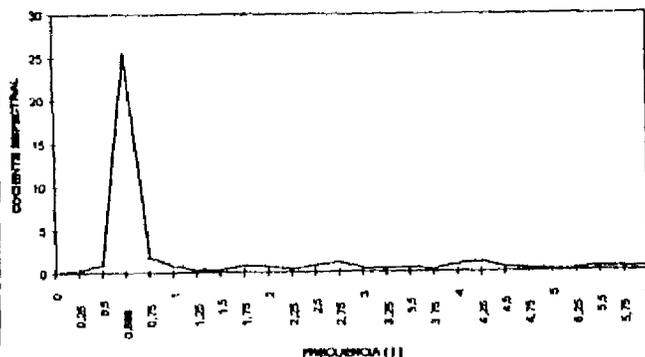


FIGURA15: FUNCION DE TRANSFERENCIA ENTRE ESPECTROS DE FIGS 14 Y 13

Ocasionalmente resulta conveniente calcular la función de transferencia, cuando las condiciones de medición son adversas o si no se conoce previamente las frecuencias de vibración del suelo del sitio y de las fuentes de excitación.

Generalmente es posible identificar el período fundamental de la estructura directamente a partir del registro  $Z(t)$  obtenido en el último piso de la estructura. Mas bien son otros los condicionantes de una correcta evaluación de la frecuencia del primer modo: El tiempo de observación largo, la ejecución de la medición en condiciones ambientales favorables y la evaluación de la respuesta torsional de la estructura en su primer modo, son los elementos más importantes de una correcta medición e interpretación.

### 3.2.2. Descripción de los ensayos de vibración ambiental realizados en Guayaquil:

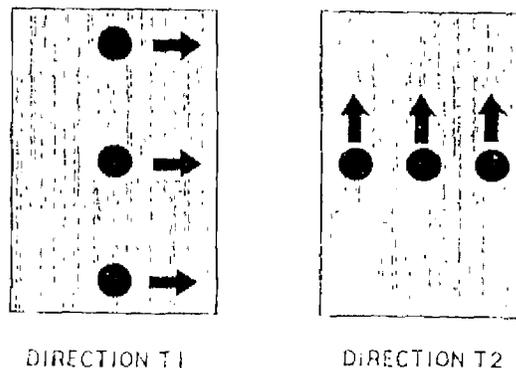
Durante el proyecto "Vulnerabilidad Sísmica de Edificios Importantes de Guayaquil", coordinado por el Departamento de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas DHA/UNDRO y la Junta Provincial de Defensa Civil del Guayas (**Referencia 5**), se midió el período fundamental de 40 edificios de 4 o más pisos.

Tres sensores se instalaron en el piso superior de los edificios con la disposición mostrada en la **FIGURA 16**. El sensor que proporciona la información sobre el período fundamental se instaló en la proximidad del centro de masas de la estructura. Se realizaron dos lecturas, cada una de cinco minutos de duración (tiempo suficiente para lograr una respuesta estacionaria de una estructura esbelta), para identificar el período fundamental en la dirección longitudinal y el período fundamental en la dirección transversal. **T2** y **T1**, respectivamente.

En ciertos casos se tiene una importante respuesta rotacional, especialmente en aquellos edificios con algún grado de excentricidad, luego, es necesario identificar plenamente al período fundamental rotacional para no errar en la interpretación. Esto se consigue colocando dos sensores lo más alejados posible del centro de masas.

Los dos sensores antes mencionados, permiten calcular matemáticamente la respuesta rotacional en el centro de masas y también el amortiguamiento del primer modo de vibración, tal como se muestra en el **Anexo 2**, (**Referencia 6**)

#### DIRECTION OF SENSORS ON TOP OF BUILDINGS



**FIGURA 16.** DISPOSICION DE SENSORES EN EL ULTIMO PISO DE LOS EDIFICIOS. TOMADO DE LA REFERENCIA 7.

A continuación se presentan en las **Figuras 16, 17, 18, 19** y **Fotos 9, 10 y 11, 12** algunos ejemplos del uso de los espectros de Fourier o bien de los espectros de Densidad de Potencia de los registros obtenidos en el último piso, en la determinación de las frecuencias  $f_1 = 1/T_1$  o  $f_2 = 1/T_2$  de algunos edificios en Guayaquil

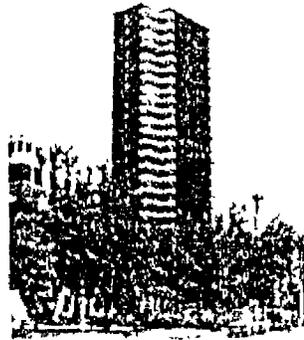


FOTO 9: EDIFICIO "EL FORTIN"  
MALECON Y P. AGUIRRE, 26 PISOS.

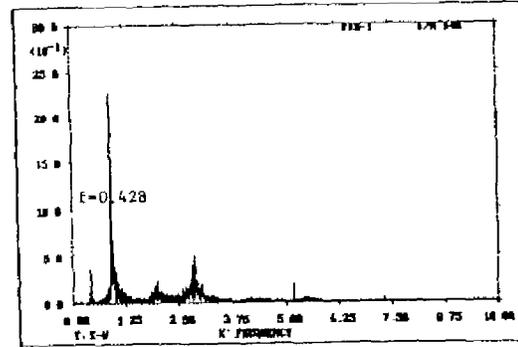


FIGURA 16: ESPECTRO DE FOURIER DIRECCION  
E-W,  $f_2 = 0.428 \text{ Hz}$ ,  $T_2 = 2.34 \text{ SEG.}$

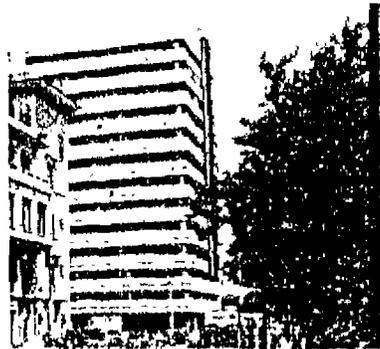


FOTO 10: EDIFICIO "ROCASA"  
MALECON Y ROCA, 13 PISOS

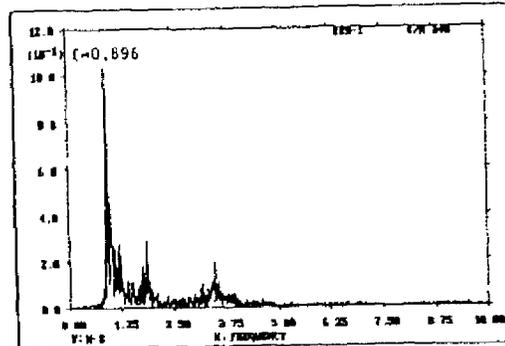


FIGURA 17: ESPECTRO DE FOURIER DIRECCION  
N-S,  $f_1 = 0.896 \text{ Hz}$ ,  $T_1 = 1.12 \text{ SEG}$



FOTO 11: CLINICA PANAMERICANA  
PANAMA Y ROCA

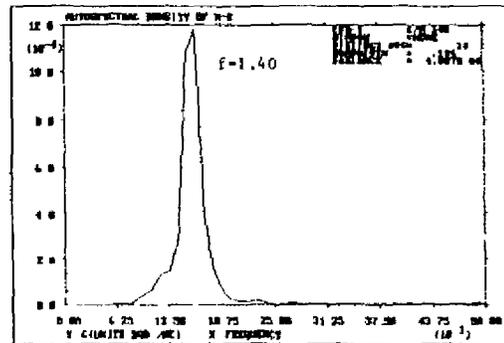
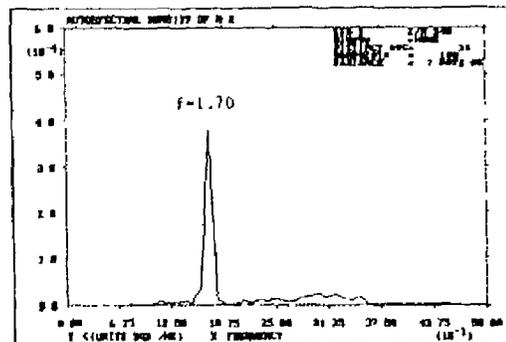
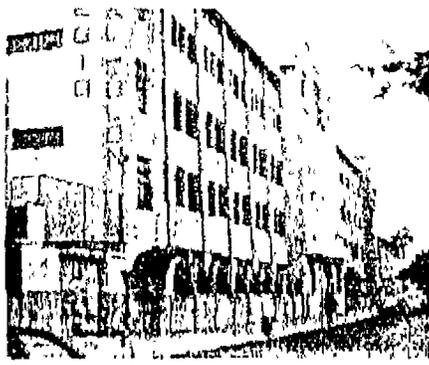


FIGURA 18: ESPECTRO DE POTENCIA N-S,  
 $f_1 = 1.4 \text{ Hz}$ ,  $T_1 = 0.71 \text{ SEG}$



**4. Medición de microtrepidaciones para la estimación de las características dinámicas de los suelos y su aplicación a la microzonificación sísmica de Guayaquil.**

**4.1. Frecuencias de la fuente de excitación versus frecuencias propias del suelo:**

Al emplear la técnica de microtrepidaciones, uno de los aspectos más cruciales consiste en establecer la naturaleza de las frecuencias de vibración medidas. Se debe discriminar las frecuencias que corresponden a la fuente de excitación ambiental de aquellas que corresponden a las frecuencias propias del suelo.

Es fundamental investigar primero a las fuentes ambientales: su origen, amplitudes más probables, órbita o dirección en la que predominantemente actúan, estacionaridad y rango de frecuencias. En la **Figura 20**, se comparan variables de diversas fuentes ambientales versus varios tipos de suelos (**Referencia 9**).

**4.1.1. Microtrepidaciones en suelos flexibles del Tipo III de Guayaquil.**

Cuando se miden las microtrepidaciones en suelos flexibles, las condiciones de medición son muy favorables. Las frecuencias de la fuente, fácilmente se pueden distinguir de las del sitio debido a que se producen en rangos de frecuencias distintas.

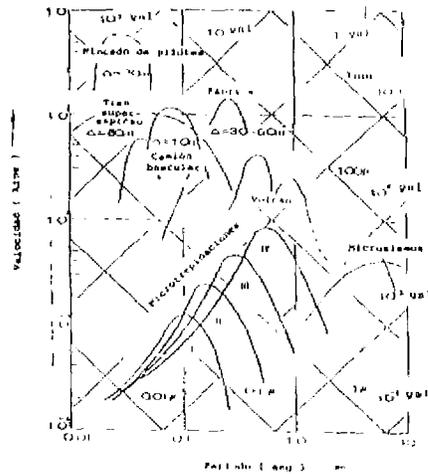
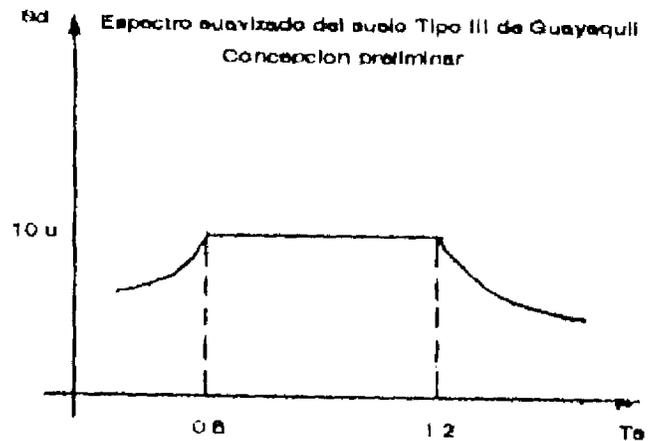


Fig. 1. Desplazamiento, Velocidad, Aceleración y Amplitud para diversos tipos de vibraciones en el suelo.



**FIGURA 20: VIBRACIONES DE LA FUENTE AMBIENTAL VERSUS VIBRACIONES DEL SUELO.**

**FIGURA 21: PERIODOS DE VIBRACION DEL SUELO DE TIPO III DE GUAYAQUIL**

Desde Junio de 1991, sobre el depósito de suelo suave de Guayaquil donde se asienta la ciudad en su mayor extensión, se han realizado más de 60 mediciones con equipos de diferente tecnología habiéndose establecido lo siguiente:

- a) Las vibraciones ambientales de mayor amplitud en el area urbana corresponden al tránsito, (frecuencias entre 2 y 5 Hz). Su órbita principal coincide con la dirección N-S, sus frecuencias son estacionarias en cualquier órbita, sitio y hora de observación. Las amplitudes, aunque varían a lo largo del día dependiendo del tránsito, son independientes del contenido frecuencial de la señal.
- b) En virtud de lo anterior, la concepción preliminar que sobre el rango de períodos dominantes fue obtenida en 1991, a partir de diez ensayos de microtrepidaciones **Referencia 2 , (Figura 21)**, ha sido hasta la presente fecha siempre verificada mediante nuevas mediciones realizadas a diferentes horas, en distintos sitios, con distintos equipos y con técnicas matemáticas de procesamiento diferentes.

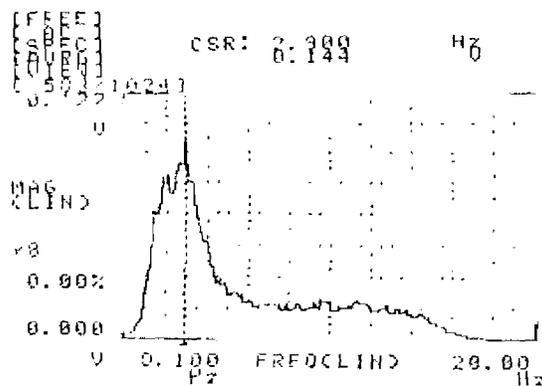
**4.1.2. Microtrepidaciones en suelos rígidos del Tipo I, e intermedios del Tipo II.**

Medir microtrepidaciones en suelos rígidos puede resultar una tarea muy complicada, puesto que las frecuencias de las fuentes ambientales fácilmente se confunden con las del sitio. En estos suelos, la estacionaridad es difícil de encontrar porque el suelo amplifica los diversos géneros de vibraciones ambientales transitorias.

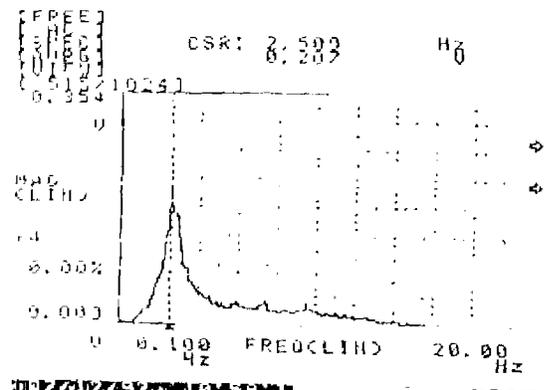
Mientras en suelos del Tipo III, 15 minutos de registro a cualquier hora resulta suficiente para obtener una señal estacionaria, en suelos Tipo I, es necesario minimizar el ruido ambiental tomando lecturas durante la noche y de mucho más larga duración.

Los suelos Tipo II presentan características intermedias, lo que implica que en algunos casos las lecturas muestran aceptable estacionaridad en lecturas de corta duración, pero en otros es recomendable medir conforme se recomienda para suelos del Tipo I.

En el Cuzco, Perú, el CISMID midió un registro de corta duración cuyas transformadas de Fourier se muestran en las Figuras 22 y 23. La componente horizontal, tiene a las frecuencias de la fuente y el sitio casi confundidas en un solo rango que se extiende desde 1.8 a 4 Hz. Al confrontar la transformada de Fourier horizontal con la vertical, se concluyó que la frecuencia del suelo es de 2.9 Hz.



**FIGURA 22: COMPONENTE HORIZONTAL TRANSFORMADA DE FOURIER**



**FIGURA 23: COMPONENTE VERTICAL CUZCO, PERU, 1992**

#### 4.2. Procesamiento de las mediciones de microtrepidaciones para el suelo Tipo III de Guayaquil:

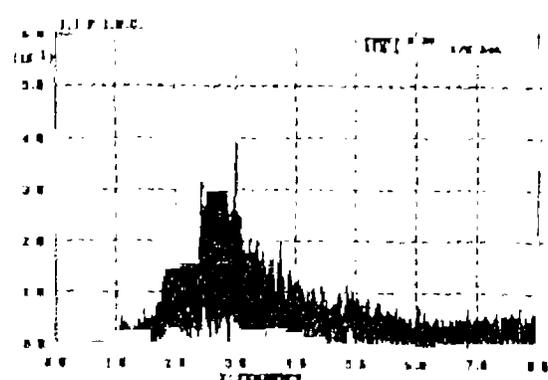
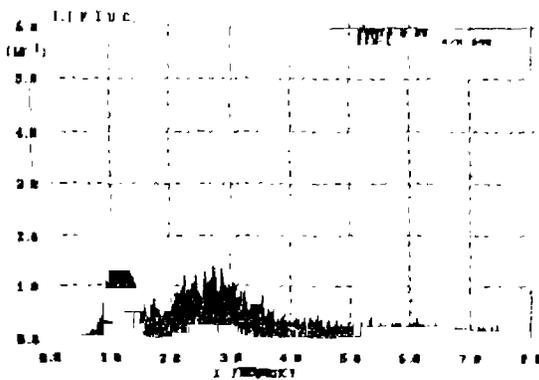
Las técnicas más aceptadas para procesar los registros de microtrepidaciones son dos:

- Medir simultáneamente la señal en campo libre y en la roca basal, obtener la función de transferencia entre los espectros de Fourier o de Potencia Espectral de ambas señales, de donde se obtendría la(s) frecuencia(s) del sitio. Esta técnica resulta idónea si se dispone de medios para colocar un sensor a gran profundidad (en el caso de Guayaquil, hasta aproximadamente 100 m).
- Desarrollar un estudio sobre la naturaleza de las vibraciones ambientales, medir en campo libre las componentes horizontal y vertical de un sitio, calcular los espectros de Fourier o de Potencia Espectral de ambas señales, y finalmente estimar el rango de frecuencias dominantes del suelo.

Para el procesamiento de los registros del suelo suave de Guayaquil, se siguió la segunda técnica propuesta por Nakamura y empleada en ciudad de México (**Referencia 10**). Esta técnica se basa en que las vibraciones de las fuentes ambientales se propagan a través de ondas de superficie, siendo la componente vertical la que capta estas vibraciones en mucho mayor amplitud. La componente horizontal mas bien, contiene una mezcla de las vibraciones de la fuente y el sitio.

Por lo tanto, luego de calcular los espectros de Fourier o de Densidad de Potencia, el cociente de las amplitudes espectrales o función de transferencia de la componente horizontal entre la vertical, llevaría a identificar a las frecuencias del sitio.

En las Figuras 22 y 23, se muestran los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical de una medición realizada en el suelo Tipo III de Guayaquil.



**FIGURA 22: COMPONENTE HORIZONTAL PUNTO 25, SUELO TIPO III.** **FIGURA 23: COMPONENTE VERTICAL PUNTO 25, GUAYAQUIL.**

El cálculo de la función de transferencia puede en este caso obviarse, puesto que es fácil estimar visualmente lo que dicha función matemáticamente expresaría "Las frecuencias que dominan la componente vertical (2 a 4 Hz) y no dominan la componente horizontal corresponden a la fuente de excitación, mientras que las frecuencias que dominan la componente horizontal (1 a 1.25 Hz) corresponden al rango de frecuencias del sitio.

#### 4.3. Uso de Espectros de Fourier o de Espectros de Densidad de Potencia:

Cuando se mide una señal estacionaria del suelo, el espectro de Fourier de dicha señal es el mismo que se obtendría al calcular el Espectro de Densidad de Potencia. Esto se muestra en las Figuras 24 y 25.

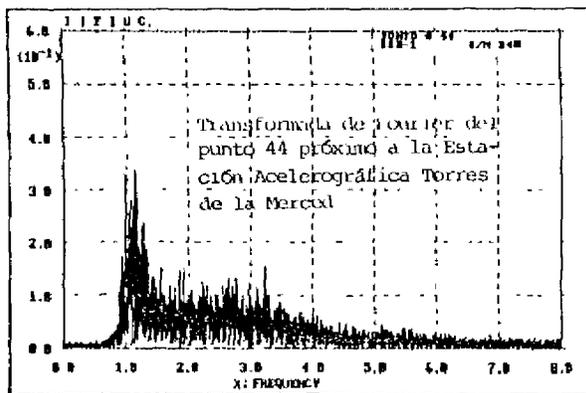


FIGURA 24: ESPECTRO DE FOURIER DEL PUNTO 44

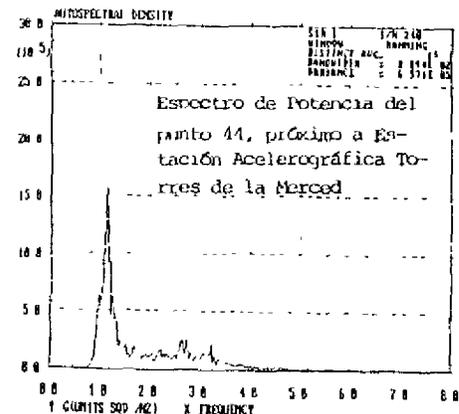


FIGURA 25: DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA, PUNTO 44

El Espectro de Densidad de Potencia, se obtiene al calcular la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de un ensamblaje estadístico de mediciones. Mas, como el proceso aleatorio que medimos es de tipo estacionario sus principales variables aleatorias son las amplitudes y las fases (que no nos interesan) Mientras que, las frecuencias no requieren tratarse como una variable de un proceso estocástico y por lo tanto pueden estimarse determinísticamente directamente a partir del Espectro de Fourier de una sola señal característica (Referencia 11).

#### 4.4. APLICACION DE LAS MICROTREPIDACIONES EN LA MICROZONIFICACION SISMICA DE GUAYAQUIL.

Los resultados de la medición de microtrepidaciones en Guayaquil, se compararon con los registros acelerográficos de microsismos y permitieron calibrar los modelos que fueron utilizados en la Referencia 12, para estudiar la respuesta del suelo durante movimientos fuertes del terreno, lo que concluiría en la definición de espectros para el diseño de estructuras localizadas sobre el suelo Tipo III de la ciudad. Figuras 26 y 27.

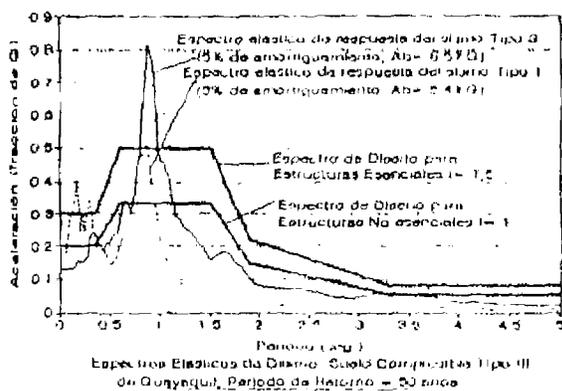


FIGURA 26

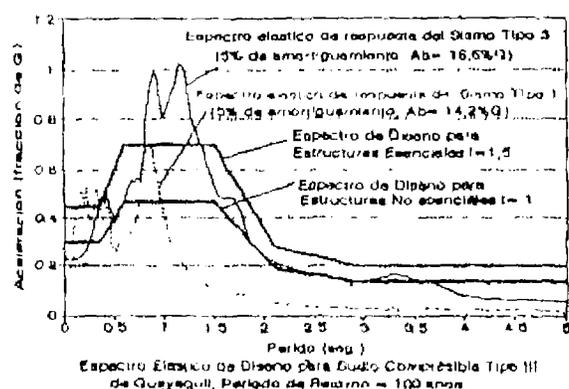


FIGURA 27

## REFERENCIAS:

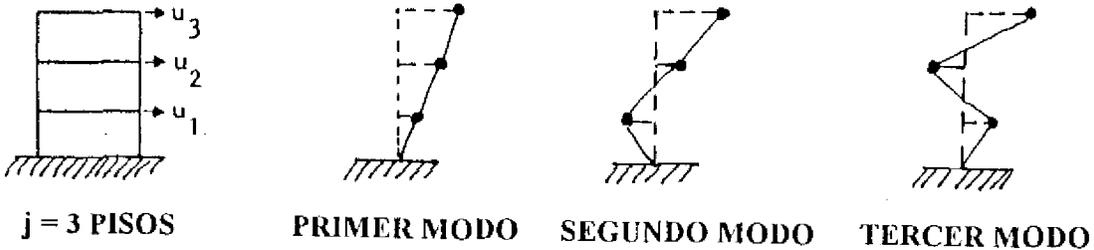
1. Manual del Mini M I K , método de **Muto, Ishii & Kajima Technical Research Institute** para ensayos de vibración forzada en edificios **Octubre de 1993**.
2. Determinación experimental de los periodos de vibración de edificios y suelos de Guayaquil (reporte preliminar). **Argudo Jaime**, Memorias de las VI Jornadas de Ingeniería Estructural, ESPONA, Quito - Ecuador, **Noviembre de 1991**.
3. Analisis preliminar del ensayo de vibración forzada del edificio de la central Atucha II **Kajima Corporation**, **Noviembre de 1993**.
4. Reporte preliminar del ensayo de vibración del Edificio de la Municipalidad de Tokyo, **Kajima Corporation**, **Mayo de 1990**.
5. Vulnerabilidad Sísmica de Edificios Importantes de Guayaquil, **Mera, Argudo, Freire y Villacrés**, Publicación Inédita de UNDRO/DHA desde 1994.
6. Ambient Vibration Tests of Buildings in Santiago and Viña del Mar. **Midorikawa Saburoh**, a report on the Chilean - Japan joint study project on seismic design of structures sponsored by the Japan International Cooperation Agency (JICA). **1990**.
7. Experimental dynamic measurement of periods of vibration of various reinforced concrete buildings and soils of Guayaquil - Ecuador, **Mera Walter & Argudo Jaime**, Universidad de la Calabria - Italia, **1993**.
8. Dynamics of Structures, A Primer **Anil K. Chopra**, **1980**.
9. Medición de Microtrepidaciones y su análisis **Tokeshi Juan Carlos**, CISMID, **1992**.
10. Natural Periods of Sites in the Valley of Mexico from Microtremor Measurements and Strong Motion Data **Javier Lermo, M. Rodríguez & Shri K. Singh** Earthquake Spectra Volume 4, **November 1989**.
11. Dynamics of Structures, **Clough Ray & Penzien Joseph**, **1982**.
12. Microzonificación Sísmica de Guayaquil, **Argudo Jaime**, Memorias de las VIII Jornadas de Ingeniería Estructural, Universidad Central de Quito, **1994**.

## ANEXO 1

### PARTICIPACION DEL PRIMER MODO EN LA RESPUESTA MEDIDA EN EL ULTIMO PISO DE UNA ESTRUCTURA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD O "j" PISOS:

El principio del método de superposición modal se basa en que la respuesta de cada modo de vibración puede ser calculada independientemente de las otras, luego las respuestas modales independientes se combinan para definir la respuesta total de la estructura.

Apliquemos el método de superposición modal a una estructura de tres pisos, a la que corresponden tres modos naturales de vibración en la coordenada traslacional "Y(t)".



La ecuación de movimiento de cualquier modo de vibración puede expresarse mediante la Ecuación 3:

$$\ddot{Y}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{Y}_n + \omega_n^2 Y_n = -\frac{L_n}{M_n} \ddot{u}_s(t) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:  $\phi_n$  = Los modos de vibración, siendo en este caso  $n = 1, 2$  o  $3$   
 $\omega_n$  = La frecuencia circular de vibración del modo "n".  
 $\xi_n$  = El porcentaje de amortiguamiento crítico del modo "n".  
 $m_j$  = La masa concentrada en el piso "j".

$$L_n = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}$$

$$M_n = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}^2 = \text{La masa modal.}$$

La Ecuación 3, corresponde a la ecuación de movimiento de un sistema de un grado de libertad, excitado una fracción  $L_n/M_n$ , de la aceleración del suelo  $\ddot{U}_g(t)$ . Por lo tanto, su solución, conduce a la Ecuación 4:

$$Y_n(t) = -\frac{L_n}{M_n} \frac{1}{\omega_{nd}} \int_0^t \ddot{u}_s(\tau) \exp[-\xi_n\omega_n(t-\tau)] \sin[\omega_{nd}(t-\tau)] d\tau \quad \text{Ec. 4}$$

La contribución o participación del modo "n", al desplazamiento  $U_j(t)$  de un piso "j" esta dada por

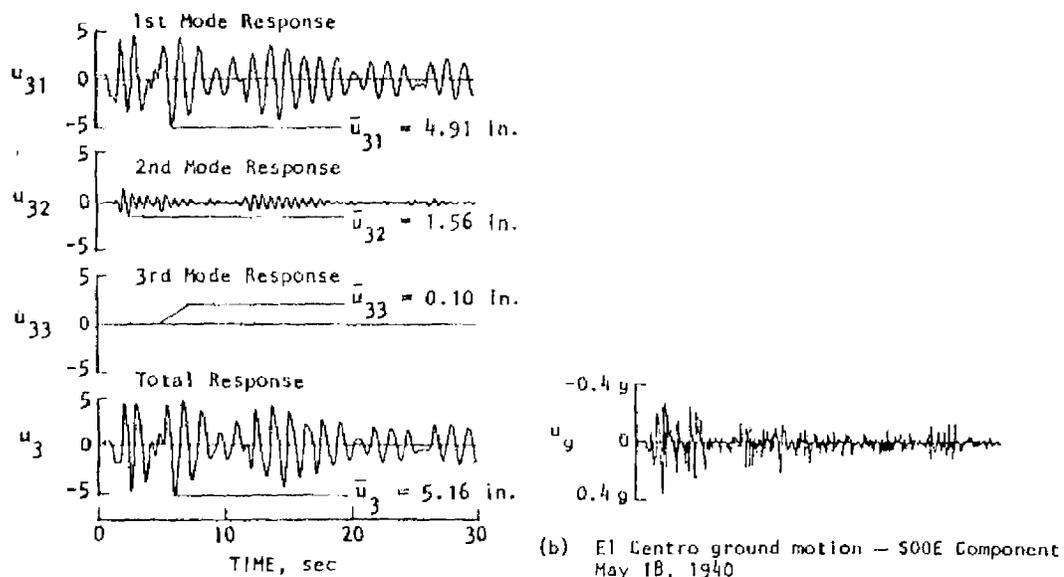
$$u_{jn}(t) = Y_n(t) \phi_{jn}, \quad j = 1, 2, \dots, N.$$

Lo que sustituido en la Ec. 4 conduce a la ecuación 5 que a continuación se escribe

$$u_{jn}(t) = -\frac{L_n \phi_{jn}}{M_n \omega_{n0}} \int_0^t u_g(\tau) \exp[-\xi_n \omega_n(t-\tau)] \sin[\omega_{n0}(t-\tau)] d\tau \quad \text{Ec. 5}$$

Finalmente, si se desea conocer el histograma de desplazamientos en el último piso de la estructura antes mencionada, se tiene que:  $U3(t) = U31(t) + U32(t) + U33(t)$ . Lo que implica, que la respuesta total en el tercer piso, resulta de la contribución o participación de las tres formas modales, donde la participación de  $U31(t)$ , es la más importante y concentra alrededor del 70% de la respuesta total en condiciones homogéneas de excitación  $\ddot{U}_g(t)$  e igual grado de amortiguamiento para cada modo

Para explicar lo anterior recurrimos a la **Referencia 8**. Una estructura como la anterior ha sido sometida a un histograma de aceleraciones del suelo  $U_g(t)$  que corresponde al sismo de El Centro, componente S00E del 18 de Mayo de 1940. Nótese que la respuesta analítica del tercer piso correspondiente a la contribución del primer modo es casi la misma que la respuesta total

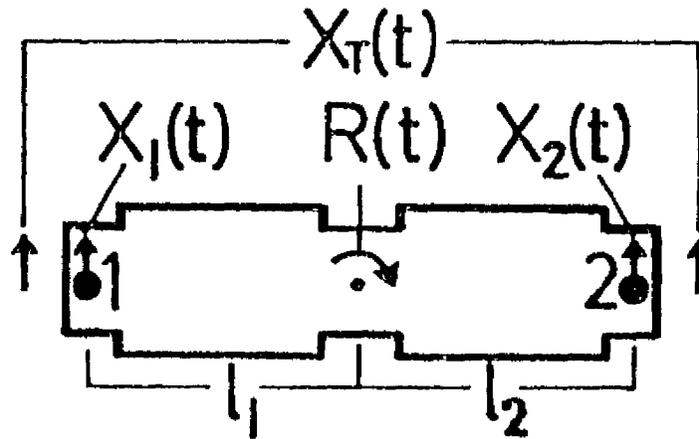


Experimentalmente se ha observado que, cuando la fuerza de excitación es de origen ambiental, en estructuras flexibles de cinco o más pisos, la participación del primer modo puede ser aún más predominante dentro de la respuesta total (90% por ejemplo).

## ANEXO 2

### SEPARACION DE MODOS FUNDAMENTALES DE VIBRACION:

En la Referencia 6, Midorikawa afirma lo siguiente “En la parte más alta del edificio, los modos fundamentales de vibración de los edificios: traslacionales y rotacional, son generalmente predominantes en el movimiento excitado por vibraciones ambientales” Para separar las componentes traslacionales de la rotacional, se requiere la observación simultánea en dos puntos, tal como se muestra en la siguiente grafica



La vibración ambiental observada en los puntos 1 y 2 esta dada por las ecuaciones

$$X_1(t) = X_T(t) + R(t).L_1$$

$$X_2(t) = X_T(t) + R(t).(-L_2)$$

Donde  $X_T(t)$  = Es el tiempo historia de la vibración traslacional en el centro de masa

$R(t)$  = Es el tiempo historia del ángulo de rotación

El movimiento diferencial entre los puntos 1 y 2,  $X_R(t)$ , corresponde a la vibración del modo rotacional como se escribe a continuación

$$X_R(t) = X_1(t) - X_2(t) = R(t).(L_1 + L_2)$$

Donde,  $X_T(t)$  puede también obtenerse matemáticamente. No obstante, un tercer sensor puede instalarse en un sitio que se estime muy próximo al centro de masas para así obtener una lectura experimental de la vibración traslacional en el centro de masas

EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL  
DE HOSPITALES EN GUAYAQUIL  
(REPORTE PRELIMINAR)

Ing. JAIME ARGUDO RODRIGUEZ (1)  
Ing. ROMMEL YELA ACOSTA (2)  
MARIBEL ALDAZ, JAIME BRAVO, (3)  
FERNANDO NUÑEZ, ERNESTO TORRES (3)

RESUMEN

El Instituto de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Guayaquil (IIFIUC) con la coordinación de la Oficina Regional de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), desarrolla desde Enero de 1995 el proyecto: "Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural de Hospitales en Guayaquil".

Este proyecto forma parte de un programa regional que se ejecuta conjuntamente en Venezuela, Colombia, Ecuador y Chile sobre análisis de vulnerabilidad y preparación para emergencias y desastres en hospitales.

El principal objetivo del proyecto es prevenir las pérdidas de vidas y los daños materiales que podrían ocurrir en la infraestructura hospitalaria de Guayaquil por causa de los desastres naturales, fundamentalmente de origen sísmico.

Para el efecto se evaluará la vulnerabilidad estructural de dieciséis hospitales públicos y de beneficencia, para luego proponer medidas estructurales y no estructurales que permitan reducir la vulnerabilidad de sus instalaciones y se ofrecerá capacitación al personal de los hospitales para la gestión de planes de emergencia que consideren la variable vulnerabilidad.

Esta ponencia narra los avances obtenidos hasta Abril de 1995 y detalla la metodología a seguir para la estimación de la vulnerabilidad estructural y la formulación de medidas estructurales y no estructurales.

- 
- (1) Profesor de Ingeniería Sísmica, Universidad Católica  
Director del Proyecto OPS: Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural de Hospitales en Guayaquil.
  - (2) Coordinador e Investigador del IIFIUC  
Investigador del Proyecto OPS: Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural de Hospitales en Guayaquil.
  - (3) Asistentes del Proyecto OPS: Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural de Hospitales en Guayaquil.