

Vulnerabilidad de los vehículos clasificados como “otros” en la accidentalidad de la provincia de Villa Clara, Cuba

García Depestre, R. A.¹, Delgado Martínez, D. E.², Díaz García, E. E.³

Fecha de recepción: 01 de abril de 2009 – Fecha de aceptación: 30 de enero de 2010

RESUMEN

La accidentalidad vehicular es un problema de salud mundial, lo que constituye la primera causa de muerte de niños y adultos jóvenes. Cuba no está exenta de esta situación y la provincia de Villa Clara, ubicada en la región central del país, está entre las primeras en el país en lo que se refiere a la inseguridad vial. Por lo que es necesario analizar los factores que inciden en los accidentes a partir de la información contenida en los reportes de accidentes de tránsito. En este trabajo se caracteriza la accidentalidad a partir de índices, demostrando que la composición vehicular, especialmente los clasificados como “otros” (según el Código de vialidad y tránsito de la República de Cuba), tienen gran influencia, debido al volumen vehicular y la diferencia de velocidad con respecto al resto de vehículos que circulan. Además, se establece un orden de peligrosidad, el cual es empleado para priorizar acciones en las vías en función de la seguridad, así como la relación porcentual accidentalidad/composición. Asimismo se analiza el estado de conservación de la infraestructura vial.

Palabras clave: seguridad vial, accidentalidad, composición vehicular, velocidad

Vulnerability of vehicles classified as “other” in traffic accidents in the province of Villa Clara, Cuba

ABSTRACT

Traffic accidents are a global concern. They are the primary cause of death of children and young adults. Cuba is no exception. Villa Clara province, located in the central territory of Cuba, is identified as the region having the most unsafe roads. Thus, it is necessary to analyze the causes of accidents considering the information presented in accident reports. In this research, accident occurrence is characterized by using indices which reflect the vehicular composition of the traffic volume. These indices prove that the vehicle type classified as “other” (by the Cuban Highway Traffic Control Act) has a great influence in the occurrence of accidents due to speed differences and vehicular volume in relation to the rest of vehicle types. A riskiness scale is also established which is used to prioritize the road safety measures considering the risk, as well as the relationship between accident occurrence versus vehicular composition. Mention is also made of the state of conservation of road infrastructure.

Keywords: safety road, accidents, vehicular composition, speed

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, CUBA (renegd@uclv.edu.cu)

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, CUBA (domingo@uclv.edu.cu)

³ Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Vías de Comunicación, Instituto Superior Politécnico José A. Echevarría (ISPJAE), CUBA (egua@civil.cujae.edu.cu)

INTRODUCCIÓN

Todo país, independientemente de su ubicación geográfica, población, desarrollo económico, nivel científico técnico y régimen social, usa el vehículo automotor en su actividad cotidiana de manera creciente, razón por la que los gobiernos se encargan en mayor o menor medida de garantizar un grupo de acciones que propicien la seguridad vial.

No obstante, a nivel mundial en las carreteras mueren al año 1,2 millones de personas y unos 50 millones sufren lesiones (OMS, 2004). Las cifras varían según la población y la densidad del tránsito, así como el grado de aplicación de las medidas preventivas y correctivas.

Los índices de accidentalidad sirven para comparar su gravedad en lugares diferentes, durante el mismo período de tiempo o en el mismo lugar en distintos momentos. Los índices de seguridad se pueden utilizar como elementos para caracterizar la accidentalidad. Los índices de accidentalidad más desfavorables agrupados por regiones geográficas se localizan en África (19,1-28,3 fallecidos/100 000 habitantes), Asia (16,3-19,0 fallecidos/100 000 habitantes) y América (12,1-16,2 fallecidos/100 000 habitantes). Esta situación se acentúa en los países en vías de desarrollo (OMS, 2004).

Según el informe del 2008 de la Comisión Nacional de Vialidad y Tránsito, en Cuba, los accidentes del tránsito ocupan el quinto lugar entre las causas de muerte y el primer motivo de la pérdida de vidas de forma violenta, con un promedio anual, en el período del 2000 al 2008 de 10 212, con un saldo de 922 fallecidos y 7 899 lesionados, para un índice de 8,23 fallecidos/100 000 habitantes. Estas cifras son comparables con indicadores de Europa (5,9-12,8 fallecidos/100 000 habitantes) (OMS, 2004).

Sin embargo, si se analizan otros índices, como pueden ser habitantes/vehículo, vehículos/kilómetro de carretera y fallecidos/10 000 vehículos, se está en una situación desfavorable. En este sentido, en el año 1998, Cuba ocupaba el segundo lugar en América en cuanto a mayor cantidad de habitantes por vehículos, con 31.0; el primer lugar en cuanto a vehículos por kilómetros de carretera, con 5.9, y fallecidos por 10 000 vehículos, con 36.1 (Radelat, 2003). En la actualidad estos índices no han variado sustancialmente e inciden negativamente en la seguridad vial.

La densidad vial de Cuba es de 0,62 km/km², parámetro considerado adecuado, con un promedio anual de volumen diario de tránsito (PAVDT)

relativamente bajo, lo que confirma el indicador de vehículos por kilómetros de carretera.

En el caso de Cuba, se reconoce el predominio del factor humano como causa principal de ocurrencia de los accidentes (Albentosa, 2006). Los registros de datos han estado habitualmente enfocados hacia la determinación de la responsabilidad, más que hacia el análisis de las causas. Sin embargo, el estado de la infraestructura vial no es el adecuado, pues el financiamiento ha dependido fundamentalmente de las posibilidades reales más que de las necesidades. Por este motivo, existen deterioros en el estado de la calzada, los paseos y los elementos de drenaje longitudinal y transversal; los niveles de señalización son bajos y en mal estado y, además, la composición vehicular es heterogénea, marcada por las tradiciones, hábitos y limitaciones económica, así como un parque vehicular muy variado, en algunos casos con más de 60 años de explotación, lo que redundará en diferencias significativas en las velocidades entre los tipos de vehículos.

En los últimos años se han producido avances significativos en la comprensión del problema de los accidentes de tránsito, que pueden abrir el camino a la identificación de claras responsabilidades. El Ministerio del Transporte de la República de Cuba tiene entre sus prioridades disminuir los accidentes del tránsito y sus consecuencias, por lo que propicia investigaciones encaminadas a analizar la accidentalidad. A partir de la problemática analizada, en la presente investigación se determinan los índices de accidentalidad por tramos de vías y su peligrosidad, además se relaciona la composición vehicular con la velocidad y los accidentes. Finalmente, se recomiendan algunas medidas que deben favorecer la disminución del número de accidentes y su severidad.

METODOLOGÍA

Una vez realizados los análisis tradicionales de seguridad vial y conocida la situación general existente en el país y en la región, fue necesario establecer el procedimiento a seguir. Para ello se realizaron, inicialmente, algunas valoraciones complementarias que permiten formular y justificar dicho procedimiento.

El concepto de accidente, para el caso de Cuba, está definido por la Ley 60, “Código de vialidad y tránsito”, que establece como accidente del tránsito: “*el hecho que ocurre en la vía, donde intervienen por lo menos un vehículo en movimiento y como resultado produce la muerte, lesiones de personas o daños materiales*”.

Uno de los aspectos principales en el análisis es la caracterización de la seguridad vial a partir de índices que expresen el grado de exposición a partir del tránsito, práctica común a nivel internacional, y no del número de habitantes (Carlsson y Hedman, 1990). Estos índices se determinan a partir de la relación entre el número de accidentes, o el de fallecidos o el de lesionados en una unidad geográfica, y el tránsito existente en esa misma unidad. El índice de accidentalidad basado en el tránsito es el reflejo más adecuado y la medida exacta de la magnitud del problema de los accidentes de tránsito.

Según el criterio de Menéndez (2008), varios son los índices empleados para identificar los emplazamientos con mayores riesgos. Esta autora propone un orden de peligrosidad al establecer un ordenamiento decreciente de los índices considerados y lo aplica con buenos resultados en vías urbanas. En el caso de esta investigación, por primera vez en Cuba, se propone utilizar este orden de peligrosidad en las vías rurales.

El orden de peligrosidad se establece a partir de los índices de accidentalidad, mortalidad, morbilidad y frecuencia, usando la expresión 1:

$$\text{Ordenpeligrosidad} = \frac{\sum R_n}{n} \quad (1)$$

Donde:

R_n = Número de orden obtenido por un
emplazamiento para cada índice calculado
 n = Cantidad de índices calculados

La ventaja de recurrir a este índice en el análisis de la accidentalidad es que permite determinar qué debe ser priorizado en cuanto a estudios, recursos, financiamiento, etc. Lo que no resulta evidente en el análisis por tramos de concentración de accidentes (TCA).

Según indicaciones del Centro Nacional de Vialidad (Serrano, 2006), en Cuba se considera que los TCA son lugares de la red vial que presentan una alta frecuencia de accidentes en un período, es decir, son tramos de vías que duplican el índice de accidentalidad promedio del territorio, analizado en un período de tres años. En los estudios por TCA no se define el orden de peligrosidad, no se analiza la totalidad de las vías y no se valora la severidad de los accidentes.

La estrategia metodológica propuesta en esta investigación consta de dos etapas. La primera concibe la recopilación de información de los accidentes en las vías de interés nacional en la provincia de Villa Clara (ubicada en la región central

del país), el cálculo de indicadores, las observaciones en el terreno y la consulta con especialistas. En la segunda etapa se estudia, la composición vehicular, la velocidad y el estado de conservación de la vía, se determina su influencia en el comportamiento de la accidentalidad del territorio y la propuesta de medidas para atenuarla. Estas etapas se detallan a continuación:

ETAPA I:

Recopilación de la información y procesamiento
Determinación de los índices: frecuencia, índice de accidentalidad, mortalidad y morbilidad en cada tramo y año
Determinación del orden de peligrosidad para las vías de estudio
Selección de los TCA
Caracterización de la accidentalidad en la provincia en cuanto a tipos de vehículos que se accidentan, hora y otros elementos

ETAPA II:

Estudio de la composición vehicular y la velocidad
Estudio del estado de conservación de la vía
Análisis de los resultados
Propuesta de medidas

RESULTADOS

En el desarrollo de la investigación se utilizó la información sobre accidentalidad en la provincia de Villa Clara. La información analizada fue obtenida a partir de informes realizados por la Unidad Provincial de Tránsito y el Centro Provincial de Vialidad durante nueve años (Rosada, 2008). Sin embargo, para el análisis del índice de peligrosidad solo se consideraron los datos de los últimos tres años.

ETAPA I

Recopilación y procesamiento de la información
En Cuba, las provincias con mayores frecuencias de accidentes, número de fallecidos y lesionados son La Habana, Ciudad de La Habana, Villa Clara, Ciego de Ávila, Sancti Spiritus y Santiago de Cuba, con un comportamiento por encima de la media nacional. Los índices correspondientes a la provincia de Villa Clara, en el período comprendido entre el año 2000-2008, se muestran en la Figura 1.

En muchas partes del mundo, incluyendo Cuba, los vehículos se clasifican como ligeros, pesados, ómnibus y otros (motos, ciclos, vehículos de tracción animal, etc.). En Cuba circula un alto porcentaje de vehículos clasificados como "otros", entre los que se destacan ciclos y vehículos de tracción animal. La composición vehicular para el territorio analizado se puede apreciar en la tabla 1.

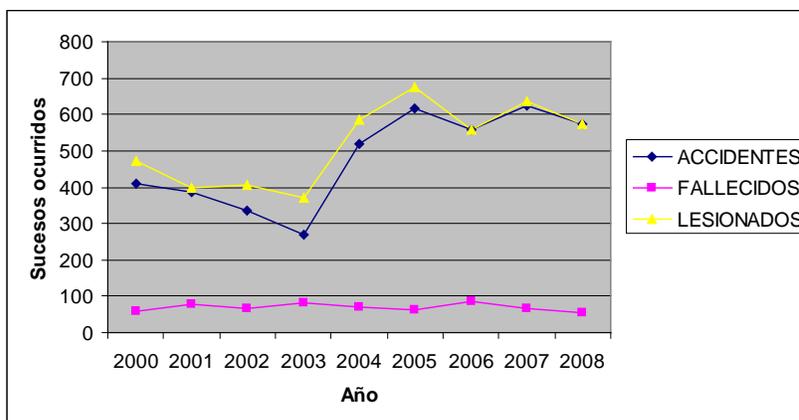


Figura 1. Comportamiento de la accidentalidad en la provincia de Villa Clara.

Tabla 1. Porcentaje de la composición vehicular en Villa Clara.

Tipos de vehículos	Porcentaje
Vehículos ligeros	55 %
Vehículos pesados	18 %
Ómnibus	3 %
Otros	24 %

La principal causa de accidentes no es conducir a una velocidad excesiva, sino hacerlo de forma inadecuada a las condiciones del entorno, ya que el conductor no adapta su forma de conducción a las circunstancias que le rodean. Por tanto, dada la composición del tránsito en el territorio, es conveniente valorar la posibilidad de ocurrencia de accidentes atendiendo a la diferencia de velocidades entre los distintos tipos de vehículos que circulan.

La realización de un análisis de la accidentalidad debe tener en cuenta múltiples indicadores, entre los que se destacan los índices de accidentalidad, la composición vehicular de la accidentalidad, su relación con la composición de la corriente vehicular y la diferencia de velocidades entre los tipos de vehículos. Estos indicadores fueron considerados en la realización de la presente investigación.

El análisis se realiza en las vías rurales y suburbanas de la provincia de Villa Clara y que son de interés nacional. Estas vías se encuentran bajo la administración y patronato del Centro Provincial de Vialidad de Villa Clara y son agrupadas en 86 tramos con una longitud total de 991,53 km.

Se detectó que el modelo de reporte de accidentes del tránsito utilizado actualmente no define el lugar exacto de los accidentes, pues en las vías no existen los hitos kilométricos. De ahí que se utilicen referencias inadecuadas que impiden la localización exacta del siniestro. Por esa razón se definen tramos de mayor longitud que los recomendados (de 200 a

300 metros) para los análisis de los TCA.

Determinación de los índices: frecuencia, índice de accidentalidad, mortalidad y morbilidad en cada tramo y año

Se calcularon los índices de frecuencia, accidentalidad, mortalidad y morbilidad de cada tramo para un período de tres años. Se consideró este período porque es el tiempo estimado donde las condiciones de la vía no varían. Los resultados para los tramos seleccionados se muestran en la Tabla 2.

Durante el año 2007, el número de accidentes y lesionados fue mayor; sin embargo, la mortalidad fue mayor en el año 2006. Los tramos con indicadores más altos fueron los siguientes: Santa Clara-Placetas (2007), por la frecuencia de accidentes; Carretera Central-Complejo agroindustrial “Benito Juárez” (2005), por el índice de accidentalidad; Esperanza-Cienfuegos- Complejo agroindustrial “Efraín Alfonso” (2007), por el índice de mortalidad; Placetas-Autopista nacional (2005), por el índice de morbilidad, Rosada, R. (2008).

Determinación del orden de peligrosidad para las vías de estudio

El orden de peligrosidad por tramos se determinó mediante la expresión 1. En la Tabla 3, se muestran los 10 primeros tramos de carreteras en orden descendente. Los resultados de este análisis se consideran como un elemento importante para priorizar las acciones de prevención.

Tabla 2. Índices de accidentalidad.

AÑOS	Índices ($accidentes \cdot 10^8 / veh\acute{c}ulos _ Km$)		
	Accidentalidad	Mortalidad	Morbilidad
2005	57	13	39
2006	53	21	64
2007	136	13	103

Tabla 3. Orden de peligrosidad.

Denominación del tramo	Orden de peligrosidad	Valor numérico
Sagua-Cifuentes	1	6,50
Santa Clara-Aeropuerto	2	10,00
Remedios-Caibarién	3	11,00
Esperanza-Santa Clara	4	12,75
Santo Domingo-Jicotea	5	12,83
Santa Clara-Universidad	6	13,25
Manicaragua-Jibacoa	7	13,50
Santa Clara-Placetas	8	14,67
Autopista Nacional- Santa Clara	9	16,08
Pedraplén-Límite Sancti Spiritus	10	16,75

Selección de los TCA

Del total de tramos de vías analizados se determinó que los correspondientes a Sagua-Cifuentes y Santa Clara-Aeropuerto son TCA y ocupan los dos primeros lugares en el orden de peligrosidad. El resto de los tramos que se acercan a la categoría de TCA también están entre los primeros por su orden de peligrosidad, lo que evidencia las ventajas de utilizar este índice y, por tanto, la factibilidad de su empleo.

Caracterización de la accidentalidad en la provincia en cuanto a tipos de vehículos que se accidentan, hora y otros elementos

En la Tabla 4 se presenta la accidentalidad por tipos de vehículo, para los tramos analizados. En la misma se aprecia que el porcentaje de accidentes y fallecidos donde participan los vehículos clasificados como “otros” es elevado, se destaca el año 2006 en el que este tipo de vehículo tiene mayor incidencia en los accidentes y fallecidos que el resto de los vehículos. En el período valorado, el comportamiento de los vehículos ligeros y los clasificados como “otros” tienen el mismo peso en la accidentalidad y mortalidad, por lo que es necesario determinar las causas de tan marcada influencia de este tipo de vehículos.

Tabla 4. Cantidad de accidentes por tipo de vehículos implicado.

AÑO	Suceso	Tipos de vehículos y % que representan				Total (%)
		Vehículos ligeros (%)	Vehículos pesados (%)	Ómnibus (%)	Otros (%)	
05	Accidentes	109(37,7)	43(14,9)	39(13,4)	99(34,0)	289(29,1)
	Fallecidos	11(44,0)	4(16,0)	2(8,0)	8(32,0)	25(26,0)
06	Accidentes	84(27,6)	50(16,5)	32(10,5)	138(45,4)	304(30,6)
	Fallecidos	10(23,8)	13(31,0)	3(7,1)	16(38,1)	42(43,8)
07	Accidentes	172(43,0)	86(21,5)	23(5,8)	119(29,7)	400(40,3)
	Fallecidos	11(37,9)	8(27,6)	2(6,9)	8(27,6)	29(30,2)
Σ	Accidentes	365(36,8)	179(18,3)	94(9,3)	356(35,6)	993
	Fallecidos	32(33,3)	25(26,0)	7(7,4)	32(33,3)	96

Fuente: Rosada, (2008)

La mayor incidencia de accidentes ocurre entre las 15:00 horas y las 21:00 horas. Esto está motivado por factores ambientales, composición de la corriente vehicular, velocidad de circulación y agotamiento del conductor, entre otros. Para los estudios realizados en la segunda etapa se tomó el horario comprendido

entre las 15:00 y las 18:00. Se realizó un estudio de velocidad instantánea por tipo de vehículo mediante pistola láser y el aforo vehicular clasificado.

Cuando se analizaron las causas de accidentalidad, se determinó que el factor hombre incide en mayor

medida en la accidentalidad (entre el 76,2% y 68,4% para el período de estudio). Le sigue la vía y posteriormente el vehículo, lo que se puede observar

en la Tabla 5 y se corresponde con lo planteado por Treat (1979).

Tabla 5. Causa porcentual de la accidentalidad.

Causas / Años	Vía (%)	Hombre (%)	Vehículo (%)
2005	16,0	73,4	10,6
2006	23,7	68,4	7,9
2007	14,1	76,2	9,7
Total	17,0	73,5	9,5

ETAPA II

Estudio de la composición vehicular y la velocidad

Para este estudio, los tramos de carreteras seleccionados fueron Sagua-Cifiente, Santa Clara-Aeropuerto, Santa Clara-Universidad y Santa Clara-Manicaragua. Se seleccionaron las tres primeras,

teniendo en cuenta el orden de peligrosidad por debajo de sexto lugar y la última, por la complejidad de su trazado.

Los resultados de la composición vehicular se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de la composición vehicular.

Tramos	Tipos de vehículos (%)			
	Ligeros	Pesados	Ómnibus	Otros
Sagua-Cifiente	42,6	24,0	6,0	27,4
Santa Clara-Aeropuerto	39,9	27,7	8,8	23,6
Santa Clara-Universidad	43,5	24,0	9,3	23,2
Santa Clara-Manicaragua	42,9	24,0	5,3	27,8

Se constató que los vehículos clasificados como “otros” se ubican después de los ligeros por su presencia en la vía, lo que está en correspondencia con la composición vehicular del territorio.

10 km/h, por lo que no resulta tan relevante en un análisis de seguridad vial. Sin embargo, la diferencia de velocidad entre estos tipos de vehículos y los clasificados como “otros” es considerable en todos los casos e influye notablemente en la accidentalidad. (Ver Tabla 7)

La diferencia de velocidad resultante entre los vehículos ligeros, pesados y ómnibus es menor que

Tabla 7. Diferencia de velocidad para las vías en estudio.

Tramos	Diferencia de velocidad (km/h)
Sagua-Cifiente	43,37
Santa Clara-Aeropuerto	21,64
Santa Clara-Universidad	23,09
Santa Clara-Manicaragua	34,19

En los aforos de tránsito y los estudios de velocidad realizados se corroboró que la presencia de los vehículos clasificados como “otros” incide significativamente en las diferencias de la velocidad entre vehículos. Además, se evidenció que el tiempo de explotación de los vehículos también influye en las diferencias de velocidad, aunque no fue estudiado en detalle.

determinó en los tramos objeto de estudio por el método de índice de estado calzada, paseo drenaje y señalización vertical, textura por mancha de arena y lisura mediante la regla de tres metros. Los resultados de este análisis se pueden observar en la Tabla 8.

Estudio del estado de conservación de la vía

Otro elemento analizado fue el estado de conservación de los elementos de la vía, que se

En la evaluación no se incluyó el estado de las señales horizontales porque no se contaba con un método apropiado de evaluación. Aunque en este caso particular, la señalización horizontal es muy pobre o se encuentra en pésimo estado, lo que impide el buen desempeño de su función.

Tabla 8. Estado de conservación de los elementos de la vía.

Tramo	EVALUACIÓN					
	Calzada	Paseos	Drenaje	Señales	Textura	Lisura
Sagua-Cifuentes	95,65 Muy Bueno	47,5 Regular	45,32 Regular	55,61 Malo	0,18 Muy Fina	1,40 Aceptable
Santa Clara-Aeropuerto	99,21 Muy Bueno	57,45 Regular	56,79 Regular	60,34 Regular	0,18 Muy Fina	1,40 Aceptable
Santa Clara-Universidad	95,68 Muy Bueno	46,78 Regular	28,55 Malo	53,94 Malo	0,17 Muy Fina	1,40 Aceptable
Santa Clara-Manicaragua	98,85 Muy Bueno	35,43 Malo	37,65 Malo	87,20 Bueno	0,16 Muy Fina	1,75 Aceptable

Al evaluar el estado de conservación de la vía es evidente que el estado de varios de sus elementos es inadecuado desde el punto de vista de seguridad vial, al poseer evaluaciones inaceptables por la práctica internacional. Prueba de ello, puede ser el caso de deterioros evidentes de los bordes del pavimento y de diferencias de estos con los paseos de más de 10 cm, paseos muy erosionados, texturas inadecuadas, películas de agua en la superficie por deficiente drenaje, etc que provocan maniobras indebidas de los vehículos y estrés en el conductor. No obstante, en el estudio de los reportes de los accidentes del tránsito no fue posible establecer la relación de los accidentes con el estado de la vía.

DISCUSIÓN

Se obtiene la relación porcentual entre accidentes y composición por tipos de vehículos a nivel provincial en el año 2007. Esta relación se comporta de la siguiente manera: vehículos ligeros 0,78, ómnibus 1,93, vehículos pesados 1,19 y otros 1,24. Se deben analizar los valores superiores a la unidad pues en la provincia la accidentalidad es superior en el caso de los ómnibus, los vehículos clasificados como “otros” y los vehículos pesados en ese orden. De ahí que las medidas generales deben estar dirigidas a esos tipos de vehículos.

Para el caso de los tramos de vías donde se realizaron los estudios de velocidad, se efectuó el aforo del tránsito para actualizar la composición vehicular y obtener las relaciones entre los accidentes y la composición vehicular, los fallecidos y la composición vehicular y, finalmente, los lesionados y la composición vehicular. Estas relaciones se muestran en la Tabla 9. En el caso de la relación accidentes/ composición vehicular, los ómnibus y los vehículos clasificados como “otros” son los de mayor incidencia. Mientras que para la relación fallecidos/ composición vehicular, los vehículos clasificados

como “otros” superan al resto. Cuando se analiza la relación lesionados/composición vehicular, los vehículos clasificados como “otros” tienen mayor incidencia.

Por tanto, el tipo de vehículo de mayor incidencia en la accidentalidad en las vías estudiadas es el clasificado como “otros”, por esa razón, las acciones para disminuir la accidentalidad deben estar encaminadas en este sentido, sin descuidar el resto de los factores comentados.

Este índice relativo se emplea por primera vez en el territorio y de su aplicación se han obtenido valiosas conclusiones relacionadas con la accidentalidad. Además, no existe referencia de su uso en otras regiones del país.

Propuesta de medidas

Atendiendo a la vulnerabilidad de los vehículos clasificados como “otros”, es necesario definir un grupo de acciones que permitan reducir el número de accidentes y su severidad, dada la necesidad de convivencia de este tipo de vehículo con el resto de los vehículos en la vía.

Como resultado de los análisis realizados y de la consulta de bibliografía internacional, se proponen un grupo de medidas preventivas, probadas internacionalmente, de costo mínimo, de rápida implementación y eficacia máxima a corto plazo. Estas medidas están relacionadas con la vía, con su geometría, tránsito, dotaciones viales y estado de los elementos que la constituyen.

En el caso de estudio para los tramos estudiados se propone considerar las siguientes medidas; tratamiento específico a usuarios vulnerables, carriles exclusivos para ciclos, pasos peatonales, isletas de refugio, tránsito, regulación de la circulación de

vehículos según la accidentalidad horaria, establecimiento de límites de velocidad según las características de la vía, establecimiento de rutas secundarias entre origen y destino de los viajes principales, incremento de las dotaciones viales, completamiento de la señalización vertical, señalización horizontal, iluminación nocturna en

intersecciones importantes, acciones de conservación en calzada, paseo y obras de drenaje, mantener en buen estado los elementos de la vía, poda de árboles que limiten la visibilidad, eliminación de obstáculos que afecten la visibilidad o funcionamiento de la vía y tratamiento a los accesos viales.

Tabla 9. Relación accidentes, fallecidos y lesionados/composición vehicular.

ACCIDENTES / COMPOSICIÓN				
Tramo	Tipo de vehículos			
	Ligeros	Ómnibus	Pesados	Otros
1.Sagua-Cifunte	0,86	1,55	0,76	1,30
2.Santa Clara-Aeropuerto	0,92	1,10	0,66	1,50
3.Santa Clara-Universidad	0,85	1,00	0,76	1,50
4.Santa Clara-Manicaragua	0,86	1,80	0,76	1,30
FALLECIDOS / COMPOSICIÓN				
1.Sagua-Cifunte	1,07	0,38	0	1,66
2.Santa Clara-Aeropuerto	0	0	0	4,24
3.Santa Clara-Universidad	0	0	0	4,31
4.Santa Clara-Manicaragua	1,17	0	0	1,80
LESIONADOS / COMPOSICIÓN				
1.Sagua-Cifunte	1,02	0,18	2,17	1,43
2.Santa Clara-Aeropuerto	1,00	0,24	2,27	1,41
3.Santa Clara-Universidad	0,77	0,69	0	2,16
4.Santa Clara-Manicaragua	0,78	1,39	0	1,20

Otras medidas complementarias pueden ser tomadas y, sin dudas, contribuyen también al noble objetivo de disminuir la accidentalidad, entre ellas se destacan la divulgación de las estadísticas de accidentalidad y la educación vial. Para comprobar el efecto de las mismas se sugiere su evaluación luego de un año de aplicadas.

CONCLUSIONES

Se caracteriza la accidentalidad en las vías rurales y suburbanas de interés nacional de la provincia de Villa Clara. Por primera vez se establece un orden de peligrosidad a partir de índices de accidentalidad, mortalidad, morbilidad y frecuencia, que se recomienda para priorizar las acciones intervención.

Se determinó que en los reportes de accidentes generalmente se atribuye al hombre toda la responsabilidad de los accidentes y no se analiza sistemáticamente la influencia del vehículo y la vía. Esta relación debe evaluarse en los levantamientos de los accidentes y ser reflejada en los modelos de reporte.

Se determinó que la composición vehicular en Cuba y en la provincia de Villa Clara en particular está marcada por la presencia de los vehículos clasificados como “otros”.

La diferencia de velocidad instantánea determinada en los tramos objeto de estudio entre los vehículos clasificados como “otros” y el resto, tiene gran incidencia en la accidentalidad y es uno de los aspectos a valorar en las medidas propuestas para incrementar la seguridad de este tipo de usuario.

La relación accidente/composición vehicular apunta hacia los vehículos clasificados como “otros”, los de mayor incidencia en la accidentalidad.

Las acciones encaminadas a hacer disminuir la accidentalidad en estos tramos de vías deben incidir en los siguientes factores: tratamiento específico a usuarios vulnerables, tránsito, dotaciones viales y estado de los elementos de la vía. Aunque no se debe olvidar el papel de la educación vial y la divulgación de las estadísticas de accidentalidad vial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albentosa, T. (2006) *Vía a la vida: una oportunidad para reflexionar*. División Nacional de Tránsito, UNICEF, Ciudad Habana, Cuba, 175 p.

Carlsson, G. y Hedmark, K. (1990) *A Systematic Approach to Road Safety in Developing Countries*. The World Bank. Washington, DC. USA.

Colectivo de autores. (2002) Decreto Ley # 231. Modificativo de la Ley No 60, Ciudad Habana, Cuba.

Ley No 60, *Código de vialidad y tránsito*. (1990) Editora Ministerio de Justicia. Ciudad Habana. Cuba.

Menéndez, L. A. (2008) “Metodología para el tratamiento de los emplazamientos con alta concentración de accidentes en vías urbanas”. CUJAE Ciudad Habana. Cuba.

OMS, (2004) “Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito. Resumen”. Editado por Margaret Peden.

Radelat, G. (2003) *Principios de ingeniería del tránsito*. Institute of Transportation Engineers. Washington, DC. USA. 300 p.

Rosada, R. (2008) *Informe de balance de la comisión provincial de vialidad y tránsito. Villa Clara*. Empresa provincial de transporte Villa Clara. Ministerio del Transporte. 14 p.

Serrano, L (2006) *La seguridad como medida fundamental en Cuba para el diseño de nuevas carreteras y mejoramiento de las existentes*. Ciudad Habana, Cuba.

Treat, J. R. (1979) *Tri-level Study of the Causes of Traffic Accidents: Final Report – Executive Summary*. Bloomington. Institute for Research in Public Safety. Washington, DC. USA.

Este documento debe citarse como:

García, R. A., Delgado, D. E., Díaz, E. E. (2010). **Vulnerabilidad de los vehículos clasificados como “otros” en la accidentalidad de la provincia de Villa Clara, Cuba**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-1, pp 1-9, ISSN: 1665-529-X.

Seguimiento de trayectorias para un sistema de bola y viga utilizando control difuso Takagi-Sugeno

Farfán Martínez, R.¹, Ruz Hernández, J. A.², García Hernández, R.², Rullán Lara, J. L.²

Fecha de recepción: 24 de noviembre de 2008 – Fecha de aceptación: 21 de abril de 2010

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de un algoritmo de control para el seguimiento de trayectorias que combina la Teoría de Regulación Lineal y el Modelado Difuso Takagi-Sugeno (T-S) aplicado al sistema de la Bola y la Viga. Se describe el problema y la solución con base en esta técnica para el regulador por retroalimentación de estados. La ley de control global se calcula como una combinación de las leyes de control de cada modelo lineal. El análisis de estabilidad se efectúa eligiendo una función cuadrática candidata de Lyapunov. Este método permite calcular una matriz definida positiva que cumple con ciertas condiciones para garantizar la estabilidad en lazo cerrado. Esta matriz se calcula numéricamente empleando las Desigualdades Lineales Matriciales (DLMs). Los resultados se presentan a nivel simulación.

Palabras clave: control difuso, estabilidad de Lyapunov, regulación, sistemas no lineales.

Trajectory tracking for a ball and beam system using Takagi-Sugeno fuzzy control

ABSTRACT

This work presents the design of an algorithm of control for the trajectory tracking that combines the Theory of Linear Regulation and Takagi-Sugeno Fuzzy Model (T-S) applied to the Ball and Beam system. The problem and solution based in this technique for the feedback regulator are described. The law of global control is calculated as a combination of control laws of each linear model. The stability analysis takes place choosing a quadratic function candidate of Lyapunov. This method allows to calculate a defined matrix positive that fulfills certain conditions to guarantee the stability in loopback. This matrix calculates numerically using the Matrix Linear Inequalities (DLMs). The results are shown just as simulations.

Keywords: Fuzzy control, Lyapunov stability, regulation, nonlinear systems.

¹Profesor Investigador de la Universidad Tecnológica de Campeche (UTCAM), Carretera Federal 180 S/N, San Antonio Cárdenas, C.P. 24381, Cd. del Carmen, Campeche, México (farfan678@hotmail.com)

²Profesor Investigador de la Universidad Autónoma del Carmen, UNACAR

INTRODUCCIÓN

El hecho de que un sistema pueda seguir señales de referencia es uno de los problemas fundamentales en la Teoría de Control, por lo tanto, es un tema que se ha estudiado profundamente y para el que se han diseñado diferentes métodos que dan solución a este problema. Uno de estos métodos es la Teoría de Regulación, con la cual se puede lograr el seguimiento asintótico de trayectorias y al mismo tiempo rechazar perturbaciones. El problema del Regulador Lineal fue planteado por Francis (1977), con la finalidad de lograr el seguimiento de trayectorias y de manera paralela la estabilidad de dichos reguladores. La solución de este problema se plantea como la solución de un sistema de dos ecuaciones lineales matriciales llamadas ecuaciones de Francis. Dichas ecuaciones se construyen con base en el sistema lineal en el espacio de estados, incluyendo las perturbaciones que pudieran afectar el funcionamiento del controlador y considerando un exosistema. Dicho exosistema es un generador externo de referencias y/o perturbaciones. En los años noventa, se extendieron los resultados hacia el Regulador No Lineal. Isidori (1995) estableció un enfoque considerando que el regulador se diseña a partir de resolver un conjunto ecuaciones diferenciales parciales llamadas ecuaciones de Francis-Isidori-Byrnes. El controlador puede ser visto como una interconexión de dos controladores, que estabilizan la planta logrando una respuesta estable del sistema. Posteriormente, se realizaron trabajos enfocados a demostrar la estabilidad de estos sistemas de control haciendo uso de la Teoría de Estabilidad de Lyapunov, (Byrnes et al., 1997) y (Tanaka et al., 2003). Una de las técnicas de aproximación de sistemas no lineales es el Modelado Difuso T-S. Esta técnica permite modelar las dinámicas no lineales por medio de una adecuada combinación de subsistemas lineales, cada uno de estos modelos corresponde a

diferentes puntos de operación (Takagi y Sugeno, 1985).

Un Regulador No Lineal combinado con modelos T-S se desarrolló utilizando técnicas de DLMs para diseñar un controlador que se aplicó a nivel de simulación a un sistema didáctico (Castillo et al., 2003). Un algoritmo de control se realizó y aplicó en tiempo real a un robot sub-actuado, haciendo uso de modelos difusos T-S, (Begovich et al., 2002). En Ramos, et al. (1998), se diseña un Regulador Lineal en combinación con los modelos difusos T-S y lo aplican en tiempo real al sistema del péndulo invertido. De igual forma, existen trabajos combinando la Teoría de Regulación Lineal y el Modelado Difuso T-S aplicados al sistema de la Bola y la Viga. Estos trabajos logran su objetivo, pero sus leyes de control se saturan y tienen poca posibilidad de implementarse en tiempo real (Ma y Sun, 2000) y (García et al., 2005). El presente trabajo, se centra en combinar la Teoría de Regulación Lineal y el Modelado Difuso T-S para diseñar una estrategia de Control Inteligente que permita al sistema de la Bola y la Viga el seguimiento de señales de referencia. De igual forma hace uso de DLMs para calcular una matriz definida positiva que garantice que el sistema en lazo cerrado sea asintóticamente estable.

Descripción del Equipo Didáctico

El problema en el equipo didáctico de la Bola y la Viga consiste en controlar la posición de una bola de acero que rueda entre dos alambres que se encuentran en tensión y sujetos a unos topes ubicados en los extremos de la viga. El ángulo de la viga cambia al aplicarse voltaje de corriente directa al motor sobre el cual está montada. El equipo didáctico utilizado es el modelo CE106 de la marca TecQuiment, el cual se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Equipo Didáctico de la Bola y la Viga.

El intervalo de longitud en que rueda la bola es $[-0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m}]$. La posición x de la bola depende del ángulo de inclinación en que se encuentra la viga, la

cual puede girarse con un ángulo θ que está definido en el intervalo $[-10^\circ, 10^\circ]$. El equipo didáctico dispone de una entrada y dos salidas. La entrada es la señal de

control, y consiste en un voltaje en el intervalo [-10V, 10V] que actúa directamente sobre el motor del equipo, el cual a su vez está acoplado al eje de la viga para llevar la bola a una posición determinada. Una de las salidas corresponde a la posición de la bola y está dada por un voltaje en el rango de [-10V, 10V], el cual es proporcional al intervalo de rodado de la bola.

La otra salida indica el ángulo de la viga con un voltaje en el intervalo [-10V, 10V] que a su vez es proporcional al ángulo.

El modelo del sistema de la Bola y la Viga en el espacio de estados se expresa como sigue (TecQuipment, 1999):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \beta(x_1 x_4^2 + g \operatorname{sen}(x_3)) \\ x_4 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = x_1$$

donde: $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ es el vector de estados del sistema,

u es la entrada de control y se define como el voltaje aplicado al motor de corriente directa sobre el cual está montada la viga.

x es la posición de la bola,

\dot{x} es la velocidad de la bola, θ es el ángulo de inclinación de la viga y

$\dot{\theta}$ es la derivada del ángulo de inclinación de la viga.

La constante β se calcula como sigue:

$$\beta = \frac{5r^2}{2R^2 + 5r^2} \quad (2)$$

y los valores de las constantes del modelo son los siguientes:

$$R = \text{radio de la bola} = 0.95 \text{ cm} \quad (3)$$

$$r = \text{radio de rodamiento} = 0.65 \text{ cm}$$

$$g = \text{aceleración de la gravedad} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

El modelo representado por la ecuación 1 toma la siguiente forma no lineal en el espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (4)$$

METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología empleada para diseñar el algoritmo de control propuesto en este trabajo. De igual forma se describe el análisis de estabilidad en lazo cerrado.

Modelado Difuso T-S

Este enfoque permite aproximar un sistema no lineal mediante un conjunto de modelos lineales locales. Un modelo difuso dinámico T-S se describe por un conjunto de reglas “SI-ENTONCES” como sigue:

i-ésima regla de la planta:

$$\begin{aligned}
 &SI \ z_1(t) \text{ es } M_{i1} \text{ y } \dots \text{ y } z_g(t) \text{ es } M_{ig} \\
 &ENTONCES \ \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5}$$

donde: $i = 1, 2, \dots, r$; r es el número de reglas,
 $z_1(t) \dots z_g(t)$ son las variables medibles del sistema,
 M_{ij} son los conjuntos difusos,
 $j = 1, 2, \dots, g$; $x(t) \in R^n$ es el vector de estado;
 $u(t) \in R^m$ es el vector de entrada y
 $y(t) \in R^p$ es el vector de salida.

El estado y la salida final del sistema difuso se infieren de la siguiente manera (García et al., 2005):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z(t)] \cdot \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z(t)]} \\
 y(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z(t)] \cdot C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z(t)]}
 \end{aligned} \tag{6}$$

donde: $\lambda_i[z(t)] = \prod_{j=1}^g M_{ij}[z_j(t)]$,

M_{ij} es el grado de pertenencia de $z_j(t)$ en M_{ij} .

Regulación Lineal

En la Teoría de Regulación Lineal, el objetivo de control es obtener un sistema estable en lazo cerrado y un error de seguimiento asintótico para cada estado

inicial posible y cada entrada exógena en una familia preescrita de funciones del tiempo (Knobloch et al., 1993).

Considérese un sistema lineal:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Pw(t) \\
 \dot{w}(t) &= S w(t) \\
 e(t) &= Cx(t) + Qw(t)
 \end{aligned} \tag{7}$$

donde: $x(t) \in R^n$ es el vector de estados de la planta,
 $u(t) \in R^m$ es el vector de entradas de control,
 $w(t) \in R^r$ es el vector de perturbaciones externas y/o referencias y
 $e(t) \in R^p$ es el error de seguimiento.

Para resolver este problema, se suponen las siguientes consideraciones:

- (H1) El par (A, B) es estabilizable.
- (H2) El exosistema es neutralmente estable; esto es, los valores propios de S están en el eje imaginario del plano complejo.

Si (H1) y (H2) se satisfacen, existe una solución al problema del regulador lineal con retroalimentación de estados si y sólo si existen dos matrices Π y Γ las cuales resuelven el siguiente sistema de ecuaciones lineales matriciales (Knobloch et al., 1993):

$$\begin{aligned} \Pi S &= A\Pi + B\Gamma + P \\ 0 &= C\Pi + Q \end{aligned} \tag{8}$$

La ley de control está dada por:

$$u(t) = -Kx(t) + Lw(t) \tag{9}$$

con: $L = \Gamma + K\Pi$ y K es cualquier matriz tal que $A - BK$ sea estable en el sentido Hurwitz.

Algoritmo Takagi-Sugeno

En esta etapa, se presenta el control difuso T-S para seguimiento de trayectorias en un sistema no lineal. Para las reglas del controlador se utilizan en los

antecedentes los mismos conjuntos difusos usados en las reglas de la planta. Las reglas para la planta y el controlador son las siguientes:

i-ésima regla de la planta:

$$\begin{aligned} &SI \ z_1(t) \text{ es } M_{i1} \text{ y } \dots \text{ y } z_g(t) \text{ es } M_{ig} \\ &ENTONCES \ \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + P_i w(t) \\ \dot{w} = Sw(t) \\ e(t) = C_i x(t) + Q_i w(t), \quad i = 1, \dots, r \end{cases} \end{aligned} \tag{10}$$

i-ésima regla del controlador:

$$\begin{aligned} &SI \ z_1(t) \text{ es } M_{i1} \text{ y } \dots \text{ y } z_g(t) \text{ es } M_{ig} \\ &ENTONCES \ u_i(t) = -K_i x(t) + L_i w(t) \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \tag{11}$$

El controlador difuso total será una combinación de todos los controladores locales, quedando de la

siguiente forma (García et al., 2005):

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z(t)] \cdot [-K_i x(t) + L_i w(t)]}{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z(t)]} \tag{12}$$

Análisis de Estabilidad

En los sistemas de control, las DLMs nos ayudan a resolver una gran variedad de problemas. Uno de ellos es el de estabilidad eligiendo para su análisis una

función cuadrática de Lyapunov. Para analizar la estabilidad del sistema difuso, se sustituye (12) en (6) y se obtiene la ecuación del sistema en lazo cerrado como sigue:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i[z(t)] h_j[z(t)] \{A_i - B_i K_j\} x(t) \quad (13)$$

donde:

$$h_i[z(t)] = \frac{\lambda_i[z(t)]}{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z(t)]} \quad (14)$$

La ecuación (13) se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \sum_{i=1}^r h_i[z(t)] h_i[z(t)] M_{ii} x(t) \\ & + 2 \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} h_i[z(t)] h_j[z(t)] \left\{ \frac{M_{ij} + M_{ji}}{2} \right\} x(t) \end{aligned} \quad (15)$$

donde:

$$M_{ij} = (A_i - B_i K_j) \quad (16)$$

Dada una función cuadrática candidata de Luapunov $V(x(t))$, ésta debe satisfacer las siguientes condiciones:

- a). $V(0) = 0$
 - b). $V(x(t)) > 0$ para todo $x(t) \neq 0$
 - c). $V(x(t)) \rightarrow \infty$ cuando $\|x(t)\| \rightarrow \infty$
 - d). $\dot{V}(x(t)) < 0$ para todo $x(t) \neq 0$
- (17)

Considerando una función candidata de Lyapunov de la forma:

$$V(x(t)) = x^T(t) P x(t) \quad (18)$$

con $P > 0$, por sí sola garantiza el cumplimiento de los incisos a), b) y c) de (17). Para demostrar el inciso d), se tiene que:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) = & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i[z(t)] h_j[z(t)] x^T(t) \times \left[(A_i - B_i K_j)^T P + P (A_i - B_i K_j) \right] x(t) \\ & + \sum_{i=1}^r h_i^2[z(t)] x^T(t) \left[M_{ii}^T P + P M_{ii} \right] x(t) + \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} 2 h_i[z(t)] h_j[z(t)] x^T(t) \\ & \times \left[\left(\frac{M_{ij} + M_{ji}}{2} \right)^T P + P \left(\frac{M_{ij} + M_{ji}}{2} \right) \right] x(t) \end{aligned} \quad (19)$$

Como se aprecia, para probar la estabilidad del sistema es necesario encontrar una matriz P que cumpla con el siguiente teorema (Tanaka y Wang, 2003):

Teorema 1: El sistema difuso continuo es globalmente asintóticamente estable en lazo cerrado si existe una matriz definida positiva común P que satisface las siguientes desigualdades:

$$M_{ii}^T P + PM_{ii} < 0 \quad i = 1, \dots, r$$

$$\left[\frac{M_{ij} + M_{ji}}{2} \right]^T P + P \left[\frac{M_{ij} + M_{ji}}{2} \right] \leq 0 \quad (20)$$

para $i < j \leq r$.

Puntos de Operación del Equipo

Teniendo como referencia las dimensiones físicas y las características de operación del equipo, el sistema

se linealiza alrededor de los siguientes puntos de operación:

$$\begin{aligned} x_{01} &= [-0.5m \quad 0 \quad -10^\circ \quad 0] & x_{04} &= [0m \quad 0 \quad -10^\circ \quad 0] \\ x_{02} &= [-0.5m \quad 0 \quad 0^\circ \quad 0] & x_{05} &= [0m \quad 0 \quad 0^\circ \quad 0] \\ x_{03} &= [-0.5m \quad 0 \quad 10^\circ \quad 0] & x_{06} &= [0m \quad 0 \quad 10^\circ \quad 0] \\ x_{07} &= [0.5m \quad 0 \quad -10^\circ \quad 0] \\ x_{08} &= [0.5m \quad 0 \quad 0^\circ \quad 0] \\ x_{09} &= [0.5m \quad 0 \quad 10^\circ \quad 0] \end{aligned} \quad (21)$$

Los puntos de operación se eligen considerando las características reales del equipo y su utilidad para definir los conjuntos difusos de la posición de la bola y del ángulo de la viga.

representado por la ecuación 1 para un punto específico de operación se obtiene utilizando la expansión en series de Taylor hasta la primera derivada, por lo que está dada por $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$, donde:

La linealización del modelo no lineal del sistema

$$A = \left. \frac{\partial F(x(t), u(t), t)}{\partial x} \right|_{x^0, u^0} \quad (22)$$

$$B = \left. \frac{\partial F(x(t), u(t), t)}{\partial u} \right|_{x^0, u^0}$$

y $x^0 = [x^0 \quad \dot{x}^0 \quad \theta^0 \quad \dot{\theta}^0]^T$ son los valores para

el punto de operación. Los modelos lineales obtenidos son los siguientes:

$$A_1 = A_3 = A_4 = A_6 = A_7 = A_9 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.2092 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = A_5 = A_8 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.2896 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B_1 = B_2 = \dots = B_9 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = C_2 = \dots = C_9 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Conjuntos Difusos

Los conjuntos difusos se definen con base en las características de operación del sistema. Para el sistema de la Bola y la Viga se proponen los

siguientes conjuntos difusos, con N: Negativo, C: Cero y P: Positivo, los cuales se muestran en las siguientes figuras:

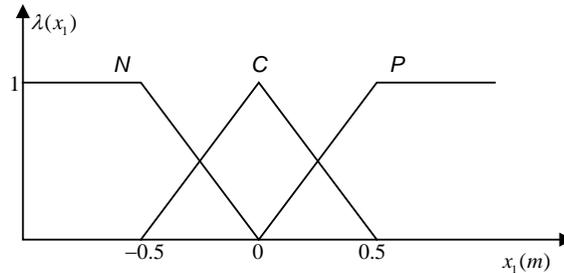


Figura 2. Conjuntos Difusos Para la Posición de la Bola.

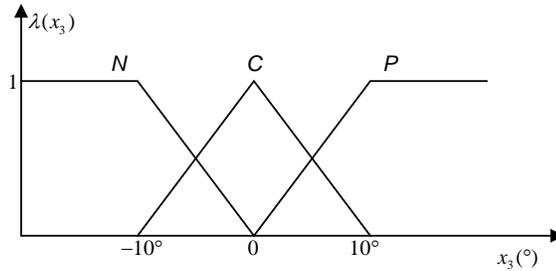


Figura 3. Conjuntos Difusos Para el Ángulo de la Viga.

Modelo del Exosistema

El vector de entradas exógenas \$w(t)\$, contiene tanto las perturbaciones hacia el sistema como las señales de referencia que debe seguir la salida de la planta (Francis, 1977). En este trabajo, no se consideran

perturbaciones en el sistema, por lo tanto, el modelo del exosistema contiene únicamente la señal de referencia. El objetivo de este trabajo consiste en que la salida del sistema \$y(t) = x_1\$ siga una señal de referencia senoidal:

$$y_{ref} = 0.25sen(t) \tag{24}$$

El algoritmo que se propone permite el seguimiento de trayectorias senoidales o cosenoidales de amplitud \$A\$ y frecuencia \$\omega\$ en \$rad/seg\$. La frecuencia de la señal de referencia tiene un impacto directo en la

matriz \$S\$ del exosistema, ya que se busca que dicha matriz tenga valores propios en: \$\pm \omega i\$; para lo cual se propone la siguiente matriz:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

la cual tiene valores propios en el eje imaginario: $[0 \ 0 \ i \ -i]$. De esta manera, el exosistema queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{w}_1(t) \\ \dot{w}_2(t) \\ \dot{w}_3(t) \\ \dot{w}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ w_3(t) \\ w_4(t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

cuyas condiciones iniciales son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} w_1(0) \\ w_2(0) \\ w_3(0) \\ w_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

y la señal de referencia propiamente dicha es:

$$w_1(t) = 0.25 \text{sen}(t) = y_{ref} \quad (28)$$

En este trabajo se considera que no existen perturbaciones externas, entonces $P=0$ en la

ecuación 7; y las matrices Q_i quedan de la siguiente manera:

$$Q_i = [-1 \ 0 \ 0 \ 0], \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (29)$$

Ley de Control

El objetivo de este trabajo es encontrar una ley de

control para cada modelo lineal, que puede representarse como (Knobloch et al., 1993):

$$u_i(t) = -K_i x(t) + L_i w(t); \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (30)$$

donde las matrices de ganancias K_i estabilizan cada sistema lineal, y se calculan ubicando los polos de lazo cerrado en $[-0.424 \pm 1.263i \ -0.626 \pm 0.4141i]$, (Huang, 2004).

Las matrices Γ_i y Π_i se calculan con la ecuación 8 y son las que resuelven las ecuaciones de Francis. Las matrices de ganancias K_i y L_i con $i = 1, 2, \dots, 9$, son las siguientes:

$$\begin{aligned} K_1 = K_3 = K_4 = K_6 = K_7 = K_9 &= [0.192 \ 0.5183 \ 3.4 \ 2.1] \\ K_2 = K_5 = K_8 &= [0.189 \ 0.5104 \ 3.4 \ 2.1] \\ L_1 = L_3 = L_4 = L_6 = L_7 = L_9 &= [-0.2688 \ 0.1152 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (31)$$

$$L_2 = L_5 = L_8 = [-0.2647 \quad 0.1134 \quad 0 \quad 0]$$

De acuerdo con lo anterior, las reglas del controlador son:

SI x_1 es M_{i1} y $x_3(t)$ es M_{i3}
 ENTONCES $u_i(t) = -K_i x(t) + L_i w(t) \quad i = 1, 2, \dots, 9$. (32)

Estabilidad en lazo cerrado

La matriz P se calcula utilizando la herramienta LMI de Matlab, la cual resulta ser:

$$P = \begin{bmatrix} 22.1538 & 23.1097 & 69.3743 & 21.6512 \\ 23.1097 & 49.1974 & 163.3118 & 57.8344 \\ 69.3743 & 163.3118 & 657.7038 & 254.7091 \\ 21.6512 & 57.8344 & 254.7091 & 125.4148 \end{bmatrix} \quad (33)$$

con $[4.6599 \quad 12.6668 \quad 29.9563 \quad 807.1869]$ como valores propios, con lo cual se cumple el Teorema 1 y se garantiza la estabilidad del sistema en lazo cerrado. No se utilizan todas las reglas del modelo difuso para este análisis, debido a que existen linealizaciones que son iguales. Resultados y Discusión

Es importante mencionar que no se considera la fricción de la bola al rodar entre los alambres, debido a que no afecta de una manera significativa la dinámica del sistema. También se hace uso de algunas herramientas de Matlab para implementar el algoritmo de control, realizar las simulaciones y calcular algunos valores necesarios para demostrar la eficacia de la técnica de control empleada en este trabajo.

Simulaciones

El algoritmo de control se evalúa en dos escenarios

distintos a nivel simulación. En el primero, se considera que todos los estados del sistema están disponibles y libres de errores en la medición al modelo. En el segundo, se agrega ruido aleatorio a la posición de la bola y al ángulo de la viga para simular los errores de medición en los sensores, con el objetivo de evaluar la eficiencia del algoritmo de control. En ambos casos, las condiciones iniciales son $x = [0.5m \quad 0.1m/s \quad 6^\circ \quad 0]$ y el tiempo de muestreo de 0.01 s. En el primer escenario de simulación, al inicio, se presenta una pequeña saturación durante unos segundos debido a que la Bola parte de un extremo de la viga. El ángulo de la viga empieza a disminuir obedeciendo a la ley de control, cabe mencionar que el voltaje aplicado al motor es directamente proporcional al ángulo de la viga. El seguimiento se alcanza al transcurrir 9 s. y se mantiene durante toda la simulación, como se puede apreciar en las Figuras 4, 5 y 6.

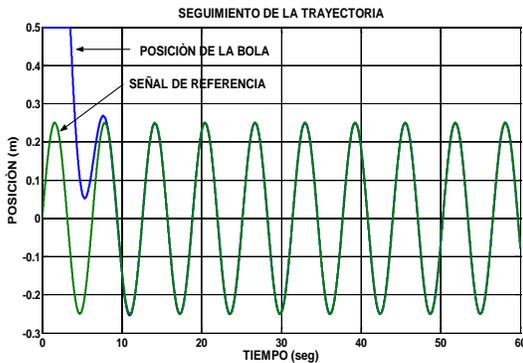


Figura 4. Seguimiento de la Trayectoria.

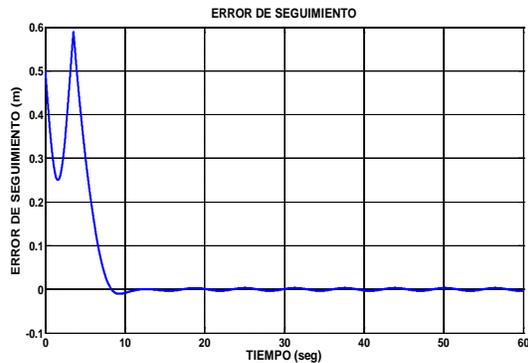


Figura 5. Error de Seguimiento.

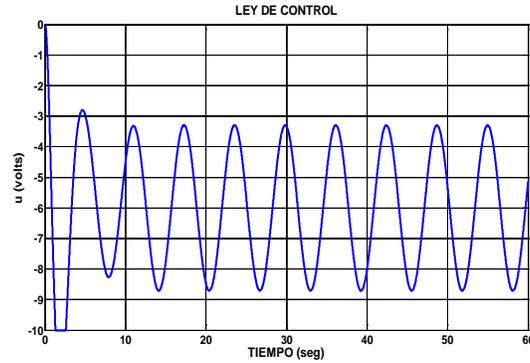


Figura 6. Ley de control.

En el segundo escenario de simulación, los resultados son parecidos a los del escenario 1. Se pueden apreciar los efectos del ruido agregado a los estados, sobre todo en la ley de control, la cual va presentando variaciones a lo largo de la simulación. La posición de

la bola también presenta variaciones; sin embargo, al cabo de 9 s. se logra el seguimiento. El error de seguimiento tiende a cero con los efectos visibles del ruido. Las Figuras 7, 8 y 9 ilustran los resultados.

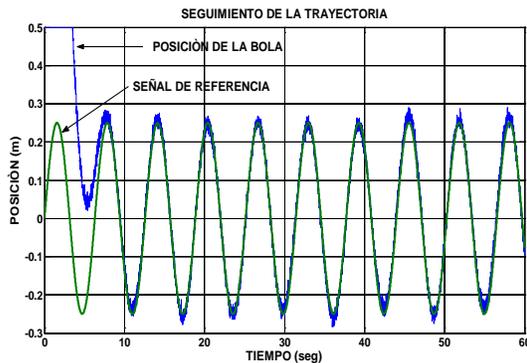


Figura 7. Seguimiento de la Trayectoria.

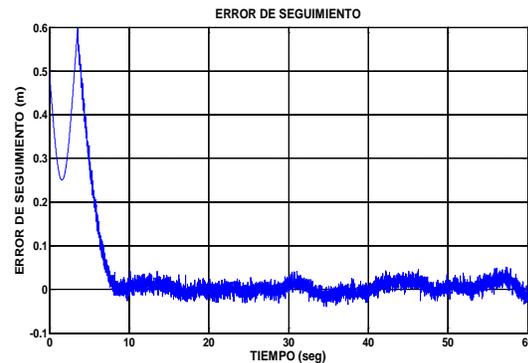


Figura 8. Error de Seguimiento.

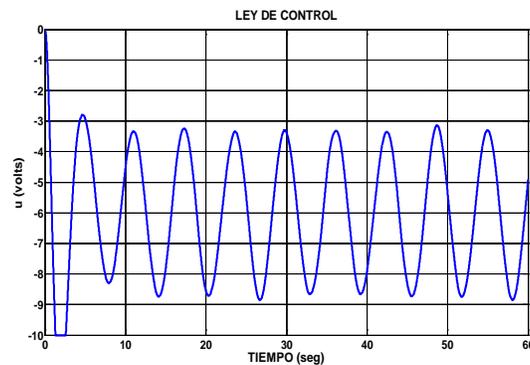


Figura 9. Ley de control.

CONCLUSIONES

Se diseñó un algoritmo de control que combina la Teoría de Regulación Lineal y el Modelado Difuso T-S para seguimiento de trayectorias y se aplicó en simulación al equipo didáctico de la Bola y la Viga. Se obtuvieron leyes de control suaves y dentro de los

rangos del actuador. Al agregar ruido para simular los errores de medición de los sensores se observó que el controlador fue robusto ya que forzó al sistema para que realizara el seguimiento de la trayectoria. Como trabajo futuro se propone aplicar el algoritmo de control diseñado en tiempo real.

REFERENCIAS

- Begovich, O., E. N. Sánchez y M. Maldonado (2002). *Takagi-Sugeno Escheme for Real-Time Trajectory Tracking of an Underactuated Robot*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 10, 14-20.
- Byrnes, C. I., F. D. Prisco y A. Isidoro (1997). *Structurally Stable Output Regulation of Nonlinear Systems*. Automática, 33, 369-385.
- Castillo, B., J. A. Meda y A. Titli (2003). *A Fuzzy Regulator for Takagi-Sugeno Fuzzy Models*. Proc. IEEE International Symposium on Intelligent Control, 310-315, Houston, Texas.
- Francis, B. A. (1977). *The Linear Multivariable Regulator Problem*. SIAM J. Control Optimiz., 15, 486-505.
- García, R., E. N. Sánchez, J. A. Ruz, J. G. Pacheco y E. Shelomov (2005). *Seguimiento de Trayectorias Basado en Regulación Lineal y Control Difuso Takagi-Sugeno Aplicado al Problema de la Bola y la Viga*. Memorias del SAAEI, 365-370, Santander, España.
- Huang, J. (1995). *Nonlinear Output Regulation (Theory and Applications)*, SIAM, U.S.A.
- Isidori, A. (1995). *Nonlinear Control Systems*, Springer Verlag, New York.
- Knobloch, H. W., A. Isidori y D. Flockerzi (1993). *Topics in Control Theory*, Birkhäuser Verlag, Germany.
- Ma, X. J. y Z. Q. Sun (2000). *Output Tracking and Regulation of Nonlinear System Based on Takagi-Sugeno Fuzzy Model*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 30, 47-59.
- Ramos, L. E., B. Castillo y S. Negrete (1998). *Nonlinear Regulation of a Seesaw-Inverted Pendulum*. Proc. IEEE International Conference on Control Applications, 1399-1403, Trieste, Italy.
- Takagi, T. y M. Sugeno (1985). *Fuzzy Identification of Systems and its applications to Modelling and Control*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 15, 116-132.
- Tanaka, K. y H. O. Wang (2003). *Fuzzy Control Systems Design and Análisis, A Linear Matrix Inequality Approach*, Willey, New York.
- Tanaka, K., T. Hori y H. O. Wang (2003). *A Multiple Lyapunov Function Approach to Stabilization of Fuzzy Control Systems*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 11, 582-589.
- TecQuipment (1999). *Ball and Beam Handbook, TQ Intelligent Solutions for Education and Training*, TecQuipment Ltd., England.

Este documento debe citarse como:

Farfán, R., Ruz, J. A., García, J. L., Rullán, J. L. (2010). **Seguimiento de trayectorias para un sistema de bola y viga utilizando control difuso Takagi-Sugeno**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-1, pp 11-22, ISSN: 1665-529-X.

Comparación del comportamiento térmico de tres cubiertas: láminas de reciclado tetra pak®, láminas de fibrocemento y teja de barro

Quiroa Herrera, J. A.¹, Vecchia, F.², Castañeda Nolasco, G.³

Fecha de recepción: 28 de agosto de 2009 – Fecha de aceptación: 10 de mayo de 2010

RESUMEN

Se expone los resultados del comportamiento térmico de las láminas producidas por el proceso de reciclaje pos-uso de las cajas acartonadas fabricadas por Tetra Pak®. Las láminas fueron instaladas de la siguiente forma: una célula experimental con láminas recicladas y dos más con cubiertas convencionales: teja cerámica y lámina de fibrocemento. Las tres celdas tienen losa de vigueta y bovedilla, también cuentan con las mismas características constructivas variando únicamente la cubierta. El análisis del comportamiento térmico fue hecho basándose en la climatología dinámica, por medio de la determinación de un período representativo de calor, y definiendo el día representativo de este período. Las variables analizadas fueron: temperatura superficial de la lámina o teja, temperatura superficial de la losa, temperatura del aire interior de la célula y la temperatura del aire exterior. Los resultados mostraron que para las tres láminas los valores fueron similares, sin embargo la lámina producida por el reciclaje de cajas Tetra Pak® presentó los menores valores de temperatura lo que representa un mejor comportamiento térmico en comparación a las cubiertas convencionales.

Palabras-Clave láminas recicladas, climatología dinámica, comportamiento térmico.

Thermal behavior comparison of three different roof tiles: tetra pak® recycled tiles, fiber-cement tiles, and ceramic tiles

ABSTRACT

This article presents the results of studies on the thermal behavior of roofing tiles made out of Tetra Pak recycling material. The roofing tiles were installed in the following manner: an experimental prototype cell made out of recycling material, and two more with conventional tiles: ceramic and fiber-cement tiles. The three prototype cells were made with light concrete slabs of the same characteristics (prestressed concrete beams and concrete vaults), being the difference the roofing system. The thermal behavior evaluation was made based in the dynamic climatology, using a representative period of hot conditions and defining a representative day for the period. The analyzed variables were: solar radiation, superficial temperature of the tiles, superficial temperature of the ceiling, internal air temperatures of the cells and external air temperature. The results shows that the values were similar for the three tiles, but the roof tiles produced by the recycling of Tetra Pak ® had the lowest temperature values, showing a better thermal behavior than the conventional tiles.

Keywords: recycled tiles, dynamic climatology, thermal behavior

¹Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, (jaqh2000@eesc.usp.br)

²Professor Doutor, livre docente do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Brasil, (fvecchia@sc.usp.br)

³Profesor Doctor de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas, Chiapas, México, (gnolasco2@gmail.com)

INTRODUCCIÓN

Los impactos generados por el sector de la construcción genera la necesidad del desarrollo de materiales que disminuyan dicho impacto como es el caso específico de las láminas fabricadas de el reciclaje de las cajas Tetra PAK® ya que en su proceso de fabricación son utilizados residuos sólidos. Por lo que son importantes los estudios sobre nuevos materiales mostrando las ventajas y desventajas en relación a los materiales convencionales. Este estudio se enfoca específicamente al estudio del comportamiento térmico de las láminas recicladas en relación a las láminas de fibrocemento y a las tejas cerámicas. Las láminas fueron instaladas en tres celdas de prueba y fue estudiado el comportamiento térmico en una situación de calor.

Las celdas experimentales se localizan en las instalaciones de la Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos, Brasil. Fueron comparadas y evaluadas las temperaturas superficiales de las láminas y de las losas de las tres celdas experimentales. Como parte de la evaluación se comparó la temperatura del aire interna y la temperatura del aire externa para determinar la diferencia entre estas. También se analizó el comportamiento de los sistemas de cubierta con relación a la radiación solar global.

En el experimento se analizó la reacción al calor de los diferentes sistemas de cubierta propuestos, este análisis se basa en la climatología dinámica, seleccionando el día representativo experimental del episodio representativo.

METODOLOGÍA

Celdas Experimentales

La metodología utilizada es basada en la norma ABNT CB-02 sobre la evaluación del comportamiento térmico de edificaciones. De acuerdo a esta norma existen dos formas de realizar este tipo de evaluaciones y estas pueden ser experimentalmente o por medio de simulaciones. En el caso específico de esta investigación el estudio del comportamiento térmico fue realizado experimentalmente, para la evaluación se utilizó la metodología propuesta por Vecchia (1997) haciendo el análisis desde una abordaje de la climatología dinámica.

Las celdas experimentales poseen características similares, variándose apenas el sistema de cubierta (láminas y tejas). La descripción general de la implantación y de la construcción de las mismas se describe a continuación:

- **Sistemas de Cubiertas:** las láminas y tejas fueron instaladas de acuerdo con las indicaciones y valores de inclinación recomendados por los fabricantes que es de 30 %. Se instalaron dos diferentes tipos de láminas y uno de tejas en las tres celdas de prueba. Las láminas son: lámina de reciclaje de cajas Tetra Pak® (Ibaplac) que tiene 1.20 m. de ancho por 2.80 m. de largo con 15 mm de espesura y un peso de 15 kg. La lámina de fibrocemento tiene 1.10 m. de ancho por 2.8 m. de largo con un peso de 15 kg y una espesura de 5 mm. Las tejas cerámicas tipo romanas tienen un rendimiento por metro cuadrado de 17 piezas con un peso de de 44 kg/m². Las tres celdas tienen losa de vigueta y bovedilla.
- **Sistema Estructural:** Se utilizaron vigas, de madera, con las dimensiones de 0,06 x 0,12 m, exentas de cualquier agente que pueda comprometer su estabilidad o apariencia, así como agentes biológicos.
- **Muros:** Las celdas de prueba fueron construidas con ladrillos cerámicos macizos con medidas de 0,010x0,020x0,005 m, asentados con argamasa de cemento y arena, proporción 1:2 preparado en el lugar de obras. Los ladrillos fueron asentados con juntas de 0,015 m de espesor.
- **Puertas y Ventanas:** Son de madera incluyendo los batientes de las puertas y de las ventanas con acabado rústico pintadas en color amarillo. Las celdas cuentan con una puerta de dimensiones de 0,60 m por 2,10 m. La ventana tiene 1,00 m por 0.70 m (Figura 1).
- **Dimensiones:** Las celdas experimentales miden 2.70 m x 2.20 m en planta y cuentan con 2.90 m en la parte más alta (Figura 1).
- **Implantación:** Las celdas experimentales fueron implantadas de tal forma que no provoquen sombras entre ellas y así no afectar los resultados de los estudios realizados (Figura 2).

Equipo y Sensores Utilizados

- **Temperatura de aire externa:** se utilizó un sensor de temperatura y humedad modelo HMP45AC de Vaisala con abrigo de protección para la radiación solar.
- **Radiación Solar Global:** se utilizó un

piranómetro modelo LI200X, de la empresa Licor.

- Temperaturas superficiales internas: fueron

instalados termopares tipo T (cobre-constantin) en las superficies internas de las láminas y de las losas de las celdas experimentales (Figura 3).

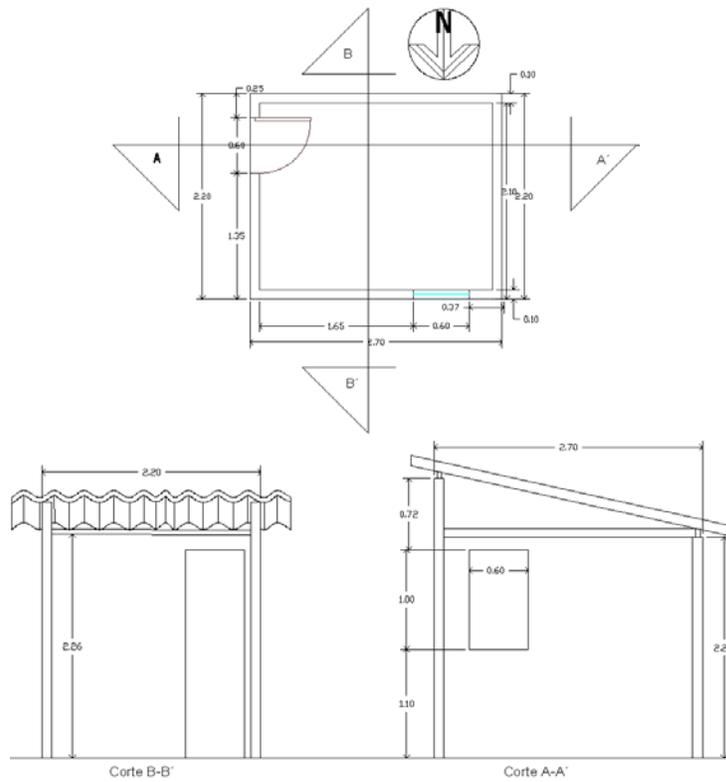


Figura 1. Planta arquitectónica y cortes de las celdas experimentales.



Figura 2. Implantación de las celdas experimentales.



Figura 3. Localización de los Termopares en las superficies internas de las láminas, tejas y de las losas.

- **Temperaturas de aire internas:** fueron instalados termopares tipo “T” (cobre-constantino) en el interior de las celdas de prueba para medir la temperatura de aire interna. Los termopares fueron colocados en el centro de las celdas de prueba a 1.20 m de altura. Las

puntas fueron protegidas con un abrigo de PVC cubierto con aislante térmico que tiene la función de proteger contra la radiación la punta del termopar para evitar algún error de medición de las temperaturas de aire internas (Figura 4).

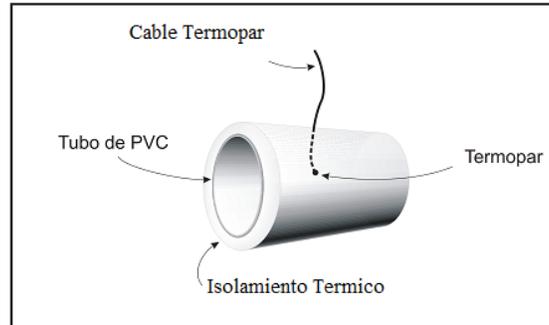


Figura 4. Abrigo utilizado para proteger las puntas de los termopares contra la radiación.

- **Sistema de adquisición de datos:** el sensor de temperatura y humedad externa (HMP45AC), radiación solar global (LI200X) y los termopares instalados fueron conectados a un multiplexor AM416 el cual está conectado al sistema automático de adquisición y almacenamiento de datos (*datalogger*) modelo CR10X, ambos equipos fabricados por la empresa Campbell Scientific Inc. El *datalogger* fue programado para coleccionar datos a cada 20 segundos haciendo una media a cada 30 minutos.

Análisis Climático

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen (KOTTEN, M. et al., 2006), São Carlos - São Paulo se localiza en una zona tropical con temperaturas amenas, muy húmedas y con un verano caliente. Segundo Monteiro (1969) Sao Carlos se encuentra en una zona de actuación de masas de aire ecuatoriales polares y tropicales.

- **Caracterización y análisis del episodio representativo**
Fue seleccionado el período de transición de la estación otoño-invierno de 2008 por presentar días sin nebulosidad y por el paso de varias frentes frías facilitando la selección del episodio representativo.

Se analizaron los datos de las estaciones climatológicas del período experimental, elaborando gráficos, considerando los diferentes dominios de las masas de aire que actuaron en la región y con apoyo de imágenes de satélite se adoptó el episodio representativo con elevados valores de temperatura de aire externa, ocurrido entre los días 27 de abril a 7

de mayo de 2008.

- **Definición del día representativo experimental**
Una vez determinado el período representativo se define el día representativo experimental con el fin de facilitar el análisis comparativo de los resultados, este día es el que presentó el mayor valor de temperatura del episodio representativo. Los valores de temperatura del día seleccionado superan los registros de las “Normales Climatológicas 1960-1991” para el mes de abril, con temperatura media máxima de 25.7 °C y temperatura media mínima de 15.5 °C, facilitando así, la evaluación de la reacción al calor de los sistemas estudiados en este día representativo experimental.

El día representativo experimental definido (VECCHIA, 1997) se caracterizó por ser un día de excepcional calor, superando las medias máximas de 25.7 °C del mes de abril registradas en las “Normales Climatológicas de 1961-1990”. De esta forma, fue seleccionado el día 27 de abril de 2008, que alcanzó una temperatura de aire máxima de 29 °C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del episodio climático de once días (27 Abril-7 Mayo) se tomó el día 27 de abril como día representativo experimental (VECCHIA, 1997), el cual se presentó sobre el dominio de una masa tropical en donde se registraron temperaturas elevadas.

- **Temperatura de aire exterior:** la temperatura de aire externa máxima registrada en el día 27 de abril fue de 29 °C alcanzada a las 15:30 horas y la temperatura mínima fue de 14.7 °C a las 6:00 horas. La temperatura máxima superó por 3.3 °C

la temperatura media máxima registrada en las “Normales Climatológicas (1961-1990)”. (Figura 5).

- Radiación Solar Global: el valor máximo alcanzado en el día 27/04/2008, fue de 800 W/m², registrado a las 12:00 horas del día. (Figura 6).
- Temperaturas superficiales internas de las láminas y tejas: de los tres casos de estudio, el que registró el mayor valor de temperatura fue la lámina de fibrocemento con un valor de

52.17 °C, seguida por la teja cerámica con valor de 45.16 °C. La lámina que registró el menor valor de temperatura superficial fue la Ibañac con un valor de 41.44 °C. La diferencia entre la mayor y la menor temperatura registrada es de 10.73°C. Todas las temperaturas alcanzaron el valor máximo a las 12:00 horas, siendo a la misma hora en que la curva de radiación solar global registró el punto más alto (Figura 7).

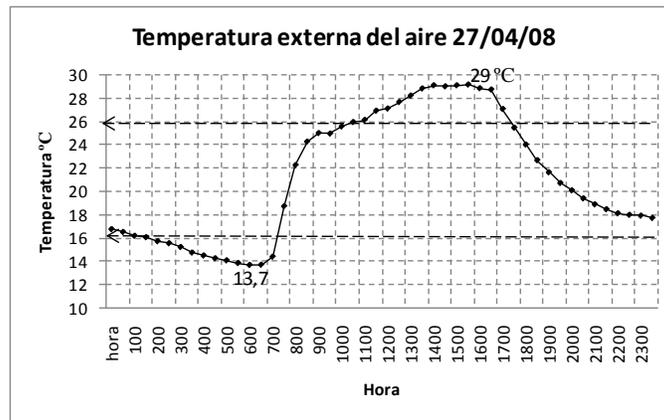


Figura 5. Gráfico de la curva de temperatura de aire externa en el día representativo experimental 27/04/2008. En líneas discontinuas están marcadas las temperaturas medias máximas y medias mínimas registradas en las Normales Climatológicas (1961-1990).

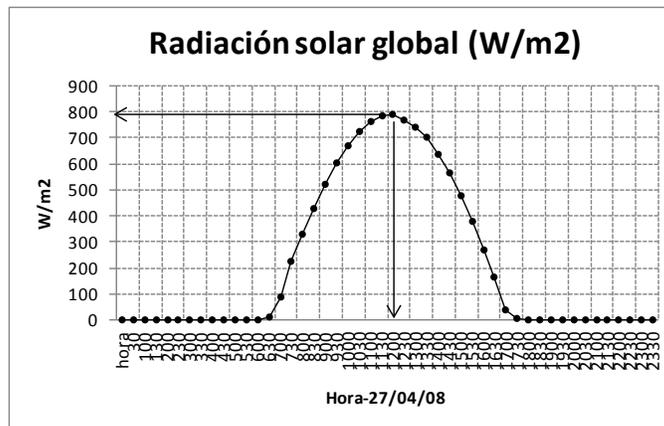


Figura 6. Gráfico de la curva de la radiación solar global en el día representativo experimental (27/04/2008).

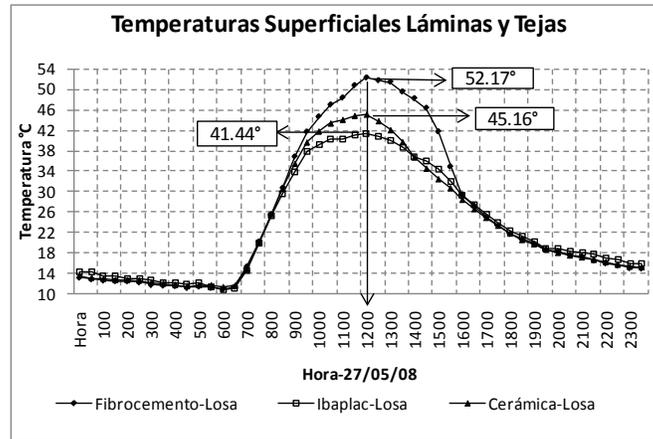


Figura 7. Gráfico de las curvas de las temperaturas superficiales de las láminas y tejas, registradas en el día representativo experimental (27/04/2008).

- Temperaturas de aire del ático: el mayor valor de temperatura en el ático se registró en la célula con teja de fibrocemento, la cual fue de 35.62 °C, seguida por la célula con lámina Ibaplac con valor de 29.39 °C. La que registró el menor valor de temperatura en el ático fue la célula con teja cerámica con un valor de 29.14 °C. La diferencia

entre los dos valores registrados en las celdas con teja cerámica y con lámina Ibaplac es de menos de 0.25 °C. Los valores máximos también fueron registrados en el mismo horario, siendo este a las 13:30 horas. La mayor diferencia de valores registrada fue de 6.48 °C (Figura 8).

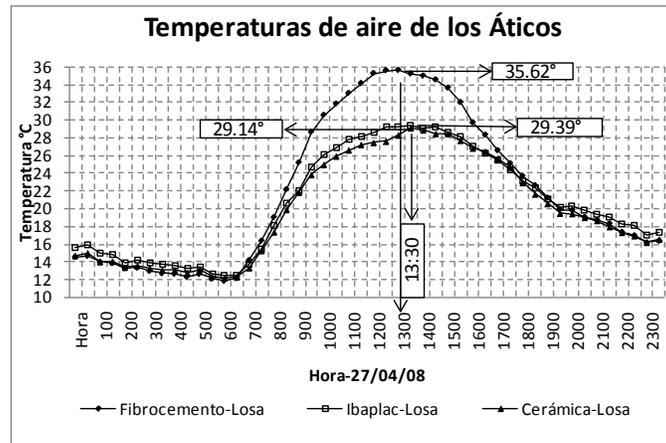


Figura 8. Gráfico de las curvas de las temperaturas de aire de los áticos, registradas en el día representativo experimental (27/04/2008).

- Temperaturas superficiales superiores de las losas: la mayor temperatura presentada fue de 31.89 °C a las 15:00 horas y se registró en la célula con lámina de fibrocemento. La célula con tejas cerámicas presentó el valor máximo de 26.32 °C a las 15:30 horas, y el menor valor de todos fue registrado en la célula con lámina Ibaplac, siendo de 24.55 °C registrado a las 16:30 horas y fue la que presentó el mayor retraso térmico en relación a la temperatura externa cuyo valor máximo fue alcanzado a las 15:30 horas.(Figura 9).

- Temperaturas superficiales inferiores de las losas: la temperatura máxima se registró en la célula con láminas de fibrocemento (28.18 °C a las 16:00 horas), la célula con tejas cerámicas registró 25.24 °C a las 17:00 horas. La célula con menor valor fue la de las láminas Ibaplac, de 24.28 °C registrado a las 17:00, siendo también la que presentó el mayor atraso térmico en en relación a la hora en que fue registrado el valor máximo de la temperatura de aire externa de 29° el cual fue a las 15:30 horas.(Figura 10).

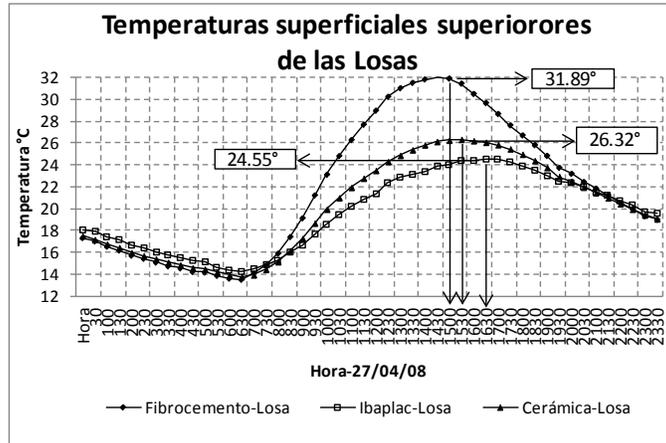


Figura 9. Gráfico de las curvas de las temperaturas superficiales superiores de las losas, registradas en el día representativo experimental (27/04/2008).

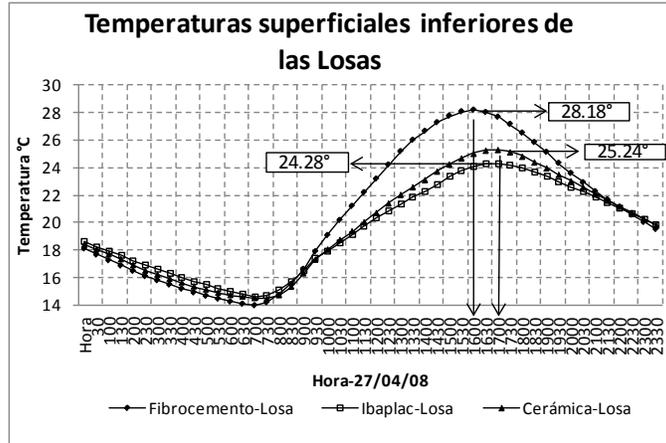


Figura 10. Gráfico de las curvas de las temperaturas superficiales inferiores de las losas, registradas en el día representativo experimental (27/04/2008).

- Temperaturas del aire internas: en la Figura 11 se observan los registros comparativos de las temperaturas internas del aire registradas en las celdas experimentales y la temperatura externa del aire. El gráfico muestra que las envolventes están disminuyendo el valor de las temperaturas internas con relación a la temperatura externa.

El valor máximo de temperatura externa del aire fue de 29 °C, a las 15:30 horas. Fue un día de excepcional calor, pues superó las medias máximas registradas en las Normales Climatológicas (1961-1990). Las temperaturas internas del aire alcanzaron los valores máximos a las 17:00 horas siendo que la célula con láminas de fibrocemento fue la que

registró el mayor valor (25.85 °C), seguido por la célula con teja cerámica con valor de 25.02 °C, finalmente, la que presentó el menor valor fue la célula con láminas Ibaplac con 24.96 °C. La diferencia entre la mayor temperatura y la menor temperatura registrada no rebasó 1 °C.

Como parte del análisis se tomó la temperatura de 32°C como valor máximo (Aulciems & Szokolay, 1999) susceptible para confort térmico. De acuerdo con los resultados obtenidos, los valores de las temperaturas superficiales inferiores de las losas y las temperaturas internas del aire no superaron la temperatura adoptada de 32°C.

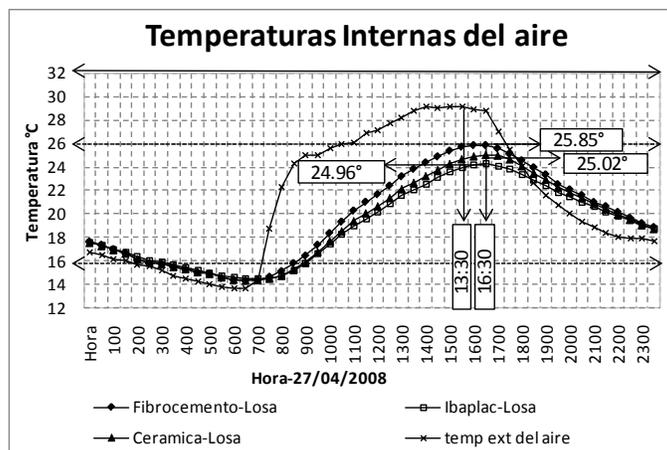


Figura 11. Gráfico de las curvas de las Temperaturas de aire internas y externas, registradas en el día típico experimental 27/04/2008.

En todas las temperaturas medias superficiales y de aire las que presentaron los mayores valores fueron los de la celda con lámina de fibrocemento. En el caso de las celdas con tejas cerámicas y láminas Ibaplac, hubo poca diferencia entre los valores de temperatura superficiales de la losa y de la temperatura de aire interior. Aun presentando poca diferencia de los valores, las láminas Ibaplac fueron las que registraron los menores valores de temperatura.

De los tres casos analizados se percibió que en donde se presentaron las mayores diferencias de temperatura fue en la superficie de las láminas y tejas, estos valores fueron disminuyendo de la superficie de las tejas y láminas para la superficie de las losas y los valores continuaron disminuyendo hasta llegar a las temperaturas internas del aire. De esta forma en los tres casos, la envolvente está funcionando como una barrera de radiación suficientemente efectiva para mantener la temperatura interior debajo de los 32 °C adoptados como valor máximo de temperatura confort.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos analizados, las temperaturas internas del aire de las celdas experimentales presentaron valores menores que la temperatura externa del aire, esto significa que en los tres casos la envolvente tuvo un comportamiento térmico correcto en una situación de calor.

En la comparación de las temperaturas interiores del aire con el valor máximo adoptado de 32 °C, nuevamente en los tres casos el comportamiento térmico de las celdas experimentales fue bueno

puesto que las temperaturas del aire interna fueron menores que el valor de temperatura que se tomó hipotéticamente como límite para el confort térmico.

En los tres casos, los valores más elevados de las temperaturas superficiales de las láminas y las tejas se presentaron en el mismo horario que se registró el valor más elevado de la radiación solar global, esto puede ser explicado debido a las características leves de las láminas y tejas estudiadas aunado al ángulo de inclinación en donde se procuró la mayor incidencia de la radiación solar en las techumbres.

Los tres sistemas de cubierta pueden ser mejorados, por ejemplo, incrementando una capa de aluminio (foil) en la superficie superior de la losa, o utilizando algún otro tipo de aislante térmico que actúe como una barrera contra la radiación, esto resultaría en una mejora en el comportamiento térmico de los sistemas de cubierta.

La célula con láminas Ibaplac fue la que presentó los menores valores de temperaturas superficiales y de aire, solamente en las temperaturas de aire del ático tuvo un valor ligeramente mayor que las tejas cerámicas. De esta forma, las láminas Ibaplac fueron las que presentaron el mejor comportamiento térmico del análisis comparativo realizado. Aunado a esto cuenta con la ventaja de ser un material que es obtenido del proceso de reciclaje de las cajas acartonadas Tetra Pak®, además pueden ser recicladas nuevamente después de ser utilizadas, son de fácil instalación, características que las tornan una excelente opción como un elemento constructivo alternativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT CB-02 Comitê Brasileiro de Construção Civil 2007.
Brasil (1992). Departamento Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. *Normais Climatológicas (1961-1990)*.

Doherty, A y Szokolay, S. V. (1999). *Thermal comfort. PLEA Notes, Brisbane (Australia)*, PLEA: Passive and Low Energy Architecture, Department of Architecture, University of Queensland.

Monteiro, C. A. DE F. (1969) *A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada sul-oriental do Brasil (contribuição metodológica à análise rítmica dos tipos de tempo no Brasil)*. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo. Série Teses e Monografias.

Kotten, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, And F. Rubel, (2006). *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. Meteorol. Z., 15, 259-263.

VECCHIA, F. (1997). *Clima e Ambiente construído. A Abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano*. São Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH USP), Universidade de São Paulo. Tese de doutorado.

AGRADECIMENTOS

A la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por la beca concedida para la realización de este proyecto.

A la Empresa Ibablac (Brasil), por los materiales otorgados tejas de material reciclado Tetra Pak®).

Este documento debe citarse como:

Quiroa, J. A., Vecchia, F., Castañeda, G. (2010). **Comparación del comportamiento térmico de tres cubiertas: láminas de reciclado tetra pak®, láminas de fibrocemento y teja de barro**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-1, pp 23-31, ISSN: 1665-529-X.

Estimación de costos de obras de recuperación de playas en la costa de Yucatán

Ancona-Ayora, R.¹, Pech-Pérez¹, J., Zetina-Moguel¹, C.

Fecha de recepción: 19 de junio de 2009 – Fecha de aceptación: 19 de mayo de 2010

RESUMEN

El incremento de actividades humanas y los eventos climáticos extremos han acelerado la erosión costera en Yucatán alentando la construcción de obras de protección costera. En este artículo se describe una herramienta computacional para estimar costos aproximados de construcción usando el método paramétrico de estimación de costos. Los cálculos se basan en información física preliminar y las proyecciones de uso de la playa. El desarrollo de la herramienta computacional requirió de una revisión exhaustiva de: la normatividad nacional y local, los métodos regionales de construcción, los costos históricos tomados de obras de protección costera realizados en años recientes y adicionalmente se usaron entrevistas a expertos. Las ecuaciones se dedujeron de las características morfológicas de cada tipo de trabajo de protección costera y fueron esenciales para la estimación de costos. La precisión de las estimaciones de costos está en el orden del 70%. Las variables de campo son críticas para la precisión de las estimaciones.

Palabras Clave: costos paramétricos, ingeniería de playas, Yucatán.

Cost estimating of coastal protection works on Yucatan coast

ABSTRACT

Increment of human activities and extreme climatic events have accelerated Yucatan coastal erosion, encouraging coastal protection construction works. This paper describes a computational tool to estimate approximate construction cost using Parametric Cost Estimate Method. Calculations are based on physic preliminary information and the projected beach use. Tool development required exhaustive revision of: national and local normative, regional construction methods, historical costs acquired from coastal protection works in recent years and, additionally, interviewing experts. Equations were deducted from morphological characteristic of each kind of protection work and were essential to cost estimating. Precision of cost estimates are in the order to 70%. Terrain construction variables are critical for precision of estimates.

Keywords: parametric cost, coast engineering, Yucatan.

¹Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Av. de Industrias No contaminantes s/n y Periférico Norte. Mérida, Yucatán. México (anconaa83@hotmail.com)

INTRODUCCION

En Yucatán las actividades económicas de la zona costera incluyen la pesca, la agricultura y ganadería de sobrevivencia, el turismo recreativo, la acuicultura y el tráfico marino (Capurro *et al.*, 2002). Debido al proceso de urbanización de las costas de Yucatán iniciada en el año de 1900, se han modificado las condiciones sociales y ambientales de las regiones costeras. Esto ha originado que se construyan obras para apoyar el desarrollo de las actividades económicas y recreativas, actualmente en la costa Yucateca existen diversos tipos de obras marítimas y portuarias como: espigones, puertos de abrigo, dragados, diques y escolleras. La construcción de estas estructuras y los eventos naturales que sufren las costas, como las tormentas tropicales y los huracanes, han producido desequilibrios entre los que destacan la aceleración del fenómeno de erosión costera en ciertas zonas de la costa.

En 1964 se construyó en esta región la primera serie de espigones, y desde entonces se han ido desarrollando este tipo de obras (SCT, 1986). En los últimos 15 años el proceso de erosión en las playas del noreste del estado de Yucatán, ha propiciado un gran número de estudios y acciones orientadas a reducir la pérdida de la línea costera. La estabilización de la línea costera requiere de un cuidadoso diseño de los proyectos que controlan la erosión de las playas. Para realizar esta planeación correctamente es conveniente contar con un plan integral de recuperación y la información adecuada para la toma de decisiones (Capurro, 2003).

Un procedimiento propuesto para el diseño de estructuras de protección de costas es el siguiente (SMC, 2000; U.S. Army Corps of Engineers, 1984):

1. Definición de los objetivos.
2. Formulación de los requerimientos funcionales.
3. Determinación de las condiciones de contorno hidráulicas.
4. Determinación de las condiciones de contorno geotécnicas.
5. Selección de las alternativas tipológicas posibles.
6. Definición geométrica de cada alternativa.
7. Comprobación del comportamiento funcional de cada alternativa.
8. Cálculo de la estabilidad de cada alternativa.
9. Cálculo económico de cada alternativa.
10. Selección de la solución más adecuada.

Como puede verse, una parte de la información requerida durante la planeación de una obra es el cálculo del costo de construcción, ya que con esta

información se analiza la factibilidad del proyecto. Sin embargo, en esta etapa de los proyectos no se cuenta con la información detallada (planos, especificaciones, cuantificaciones, etc.), de tal manera que los estimados de costos no se pueden alcanzar por el método tradicional del análisis de los precios unitarios. Los costos poseen gran incertidumbre debido a los múltiples factores que intervienen; para poder calcular un estimado de costo es necesario considerar algunos factores como: el clima, la disponibilidad de recursos, la distancia de acarreo, el diseño, el mercado laboral y otros elementos de alta variabilidad. Se puede obtener un estimativo aproximado sin poseer un proyecto detallado, y este estimativo se basa en la cantidad de superficie por construir o bien en el número de unidades utilizables. El nivel de precisión esperado de tales presupuestos es de hasta +/- 40% para construcción pesada (carreteras o canales de riego) y en edificación puede arrojar variaciones de +/- 20% (Varela, 1994).

Un método apropiado de aproximación para este tipo de obras se conoce con el nombre de Costos Paramétricos. Este método se basa en el conocimiento del comportamiento de los costos de obras similares, realizadas en el pasado, en función de unas pocas características físicas muy representativas de tales obras (Patrascu, 1988). Actualmente, en Yucatán, no se cuenta con una herramienta computacional apropiada para estimar costos de las obras de recuperación de playas y todo parece indicar que los proyectos de este tipo aumentarán en los siguientes años.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una herramienta computacional para la estimación de costos de obras para la recuperación física de playas en la costa de Yucatán que apoye durante la etapa de planeación y evaluación de un proyecto de protección costera.

METODO

Se obtuvo información relacionada con los procedimientos constructivos de las obras de protección costera que se han realizado en fechas recientes en la región y las normas de diseño y construcción. Se seleccionaron las dependencias gubernamentales relacionadas con este tipo de obras: la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Secretaría de Obras Públicas (S.O.P.) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). También se seleccionaron a las cuatro empresas constructoras que habían realizado la mayor cantidad de obras de protección costera en la región y que se encontraban activas. Por otra parte se obtuvo información de publicaciones internacionales

sobre la restauración de playas por medio de geotextiles en las costas yucatecas (Álvarez *et al.*, 2005).

De la SEMARNAT, se obtuvo una descripción actual de la legislación de las obras de protección costera. Del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se recopilaron todas las normas que rigen la construcción de obras de recuperación de playas en el país, esto haciendo referencia a las obras de puerto, y sus diferentes tipos de construcción, control de materiales y normativa de procedimientos de construcción generales. Después del análisis de las mismas se concluyó que las normas que están directamente involucradas con este proyecto son las siguientes: el capítulo de obras de protección, N-CTR-PUE-1-02-001-06 a la N-CTR-PUE-1-02-005-06, en donde se definen los distintos tipos de obras de protección que se realizan en México; y el capítulo de terracerías de puerto, N-CTR-PUE-1-01-001-04 a la N-CTR-PUE-1-01-014-04 en donde se describen y regulan los procedimientos constructivos más comunes al realizar las obras de protección.

También se obtuvo información de la Secretaría de Obras Públicas (S.O.P.) del Gobierno del Estado de Yucatán. De esta secretaría se obtuvo una descripción completa y detallada del programa de recuperación de playas supervisado por ella misma durante el año del 2001. De este programa resaltan los rellenos de playa que se realizaron con geotubos.

Con respecto a las empresas constructoras, se obtuvieron los presupuestos de cinco obras de protección de playas, tres de las cuales son espigones de acuerdo a las normas de la SCT, es decir, de cubos de concreto, de piedra natural y de bolsacreto. Otra empresa proporcionó información sobre los procedimientos constructivos de las obras, y dos presupuestos, uno sobre un espigón a base de bolsacreto y otro de un dique. Una tercera empresa, proporcionó información sobre el procedimiento constructivo de los rompeolas semisumergidos a base de geotextiles. La cuarta empresa proporcionó presupuestos de obras de recuperación de playa a base de geotextiles, así como, los procedimientos constructivos de este tipo de obras. También se realizaron visitas obras de protección de playas en proceso de construcción en el estado de Campeche.

Con el conocimientos de las normas, de los procesos constructivos y de los presupuestos de las obras, se procedió a la identificación de las tareas básicas de cada tipo de obras, de tal manera que a partir de ellas se pudiera definir un catálogo de conceptos de obra para elaborar el estimado de costos de la obra y, por

otro lado, para identificar las variables físicas que constituyen la base para estimar las cantidades a realizar de cada concepto. Se definieron siete catálogos de conceptos, uno para cada tipo de obra.

Estimación de costos paramétricos

El estimado de costos paramétrico consiste en identificar un conjunto de características distintivas de la obra que puedan correlacionarse directamente con el costo de la obra. A tales características representativas se les llama parámetros (Patrascu, 1988). En este caso, las características distintivas de las obras se conocerán con el nombre de variables físicas las cuales servirán de base para determinar las cantidades de los conceptos que componen la obra, y estas últimas al ser multiplicadas por su costo por unidad, obtenido del estudio de obras construidas con anterioridad, permitirán estimar el costo de construcción de la obra. Para la obtención de estos costos por unidad es muy importante seguir un criterio muy bien definido de lo que se incluye en cada costo por unidad y se debe contar con un conjunto bastante amplio de información para poder obtener valores confiables.

Desarrollo de la herramienta computacional

Para el desarrollo de la herramienta computacional se eligió el software Lotus, en la versión Smart Suit que es sencillo de utilizar para personas que no son profesionales de la programación y que permite obtener resultados en un ambiente gráfico y amigable para el usuario final.

La Figura 1 presenta el funcionamiento general de la herramienta, que inicia con un módulo para seleccionar la estructura costera apropiada para resolver el problema de erosión de acuerdo a las condiciones del sitio y necesidades, posteriormente se solicitan los datos para identificar el presupuesto que se va a elaborar. A continuación solicita las variables físicas relacionadas con el tipo de obra seleccionado, tanto particulares como generales y con estos valores calcula el costo de la obra basándose en costos históricos. Finalmente actualiza los costos a la fecha de realización del estimado e imprime los resultados obtenidos.

RESULTADOS

La información proporcionada por los constructores permitió identificar los factores que influyen en la selección de una estructura para evitar la erosión costera y elaborar un diagrama procedimiento para hacer la selección. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 2. Considerando en primer lugar el objetivo que debe cumplir la obra de protección o recuperación y la función que tiene actualmente la

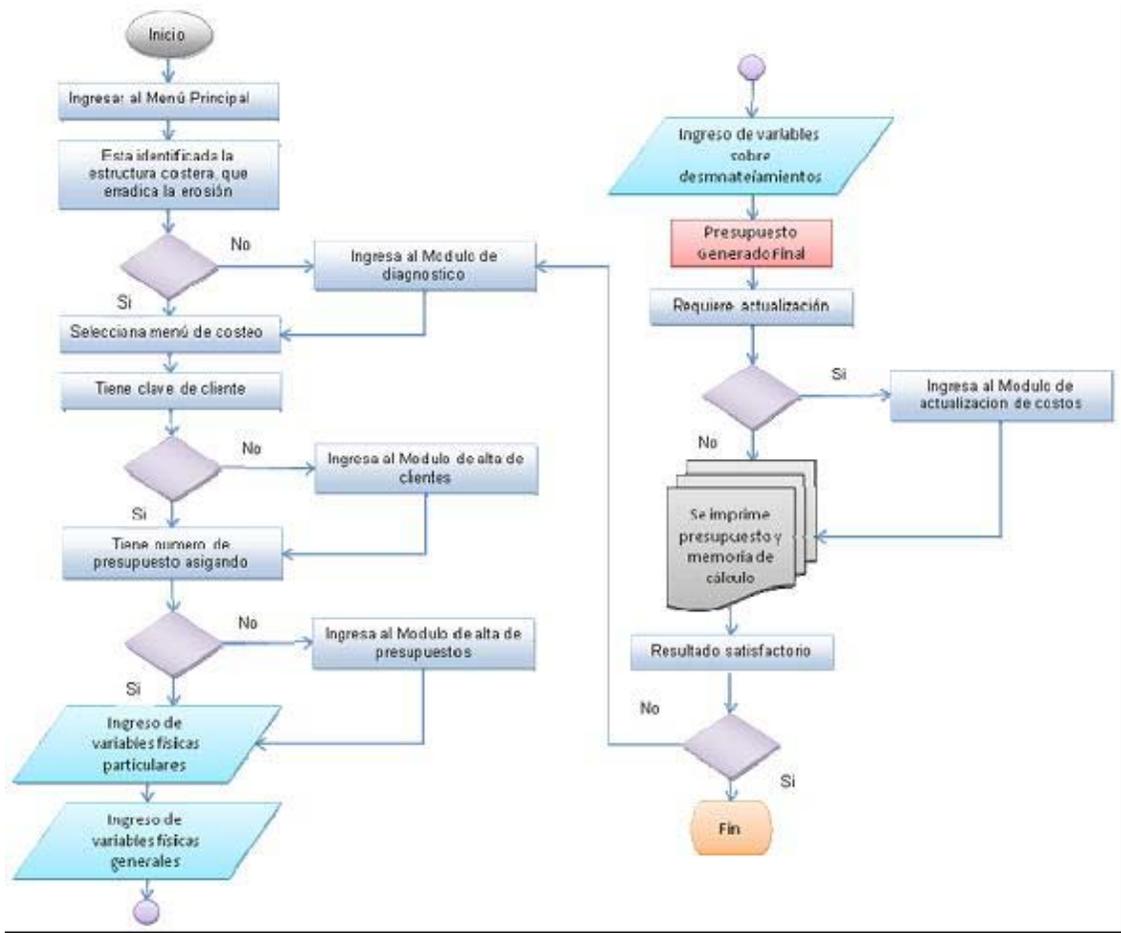


Figura 1. Diagrama general de la herramienta computacional.

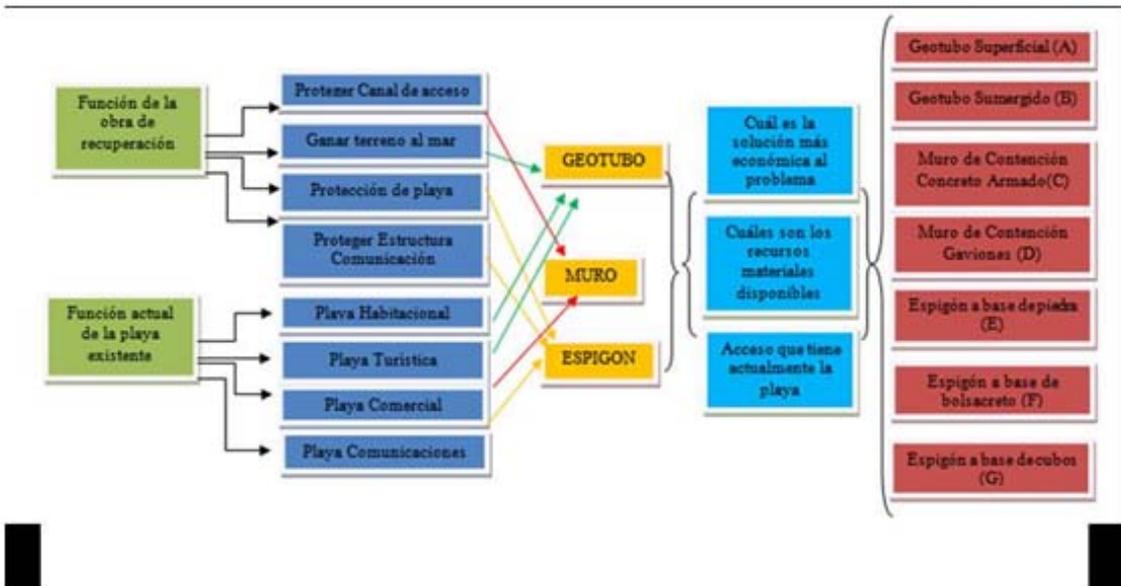


Figura 2.- Diagrama de procedimiento para la selección de estructuras que considera los factores que influyen en la selección de una estructura para evitar la erosión costera.

playa se selecciona el tipo de obra más apropiado, esto es, rompeolas, muro de contención o espigón. Posteriormente se seleccionara un tipo específico de obra considerando la opción más económica de acuerdo a los recursos materiales disponibles y al acceso que se tiene a la playa (tipo de camino). El tipo específico de obra puede ser uno de los siguientes: geotubo superficial, geotubo semisumergido, muro de contención perimetral a base de concreto armado, muro de contención perimetral a base de gaviones, espigón a base de piedra, espigón a base de bolsacreto o espigón a base de cubos de concreto.

El sistema desarrollado puede estimar el costo de cualquiera de estos siete tipos de obras después de proporcionar los valores de las variables físicas que se asocian con cada tipo de obra. Los presupuestos que se obtienen actualmente con el sistema, reflejan la información disponible a la fecha que aunque no es

muy amplia permite resultados aceptables, y se pretende obtener más información de obras futuras con la finalidad de hacer más confiables estos resultados. También es importante señalar que los resultados que proporcionará el sistema, serán más precisos que los que de otros sistemas existentes, puesto que se han desarrollado ecuaciones específicas para este tipo de obras y los costos fueron extraídos de obras realizados en la costa yucateca.

Variables físicas generales

Las variables físicas generales, son aquellas variables utilizadas en todos los tipos de obra que contempla la herramienta, esto es, aquellas que se usan para definir la superficie de playa a recuperar o proteger. Se identifican con los cortes transversales y con la vista en planta de la playa que se recuperará (ver la Figura 3). Estas variables son: el ancho de playa (AP), la profundidad de playa (P) y la longitud de playa a recuperar (LP).

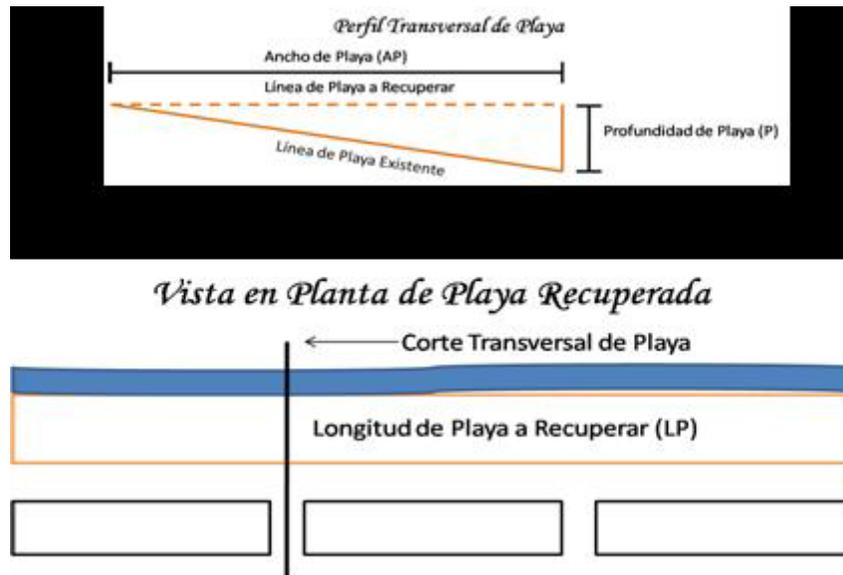


Figura 3. Variables generales solicitadas al usuario.

Variables físicas de acuerdo al tipo de obra

En la Figura 4 se muestran las variables necesarias para la estimación de costos de las obras de protección basadas en geotubos y que se mencionan a continuación. Para el geotubo principal: alto (b), ancho ($a1$), longitud del manto antisocavación (LM) y área a rellenar (A). Para el geotubo secundario: alto (b'), ancho (a') y área a rellenar (a).

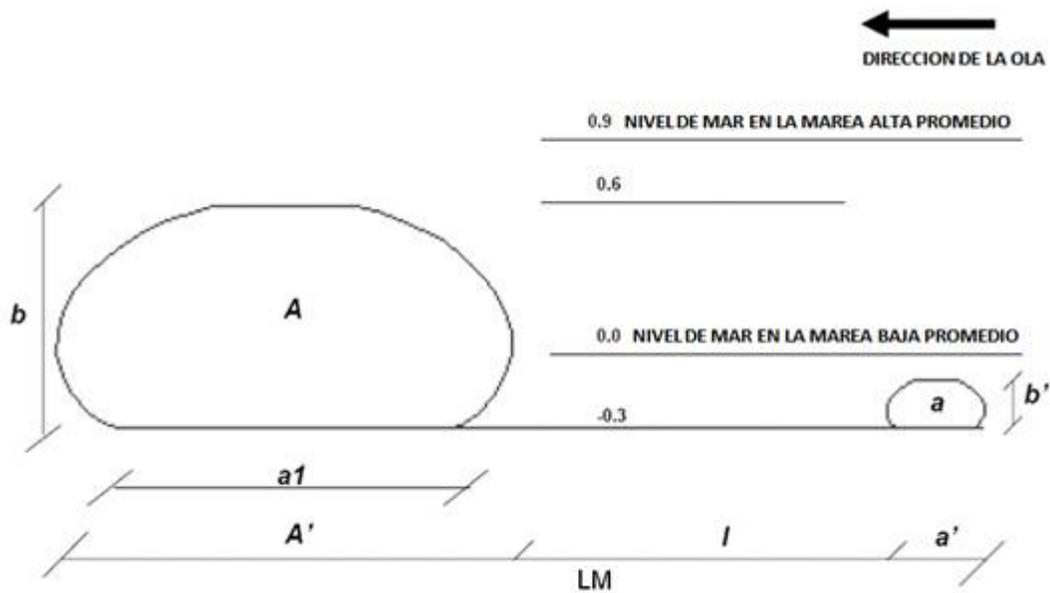
Para el caso de los muros de contención, debido a que la sección principal de la estructura no varía sino que únicamente varía el empotramiento a roca firme, la

única información necesaria para estimar los costos será la profundidad del lecho marino en seis puntos seleccionados (P_1, \dots, P_6). Todos los demás datos son fijos para este tipo de obras. Ver la Figura 5.

En cuanto a los espigones, las variables se usan para el cálculo de los volúmenes de materiales con base en las secciones transversales y los perfiles longitudinales, como se muestra en la Figura 6. Las variables requeridas se relacionan con: el perfil longitudinal del espigón, las secciones transversales del espigón, los materiales a utilizarse y los

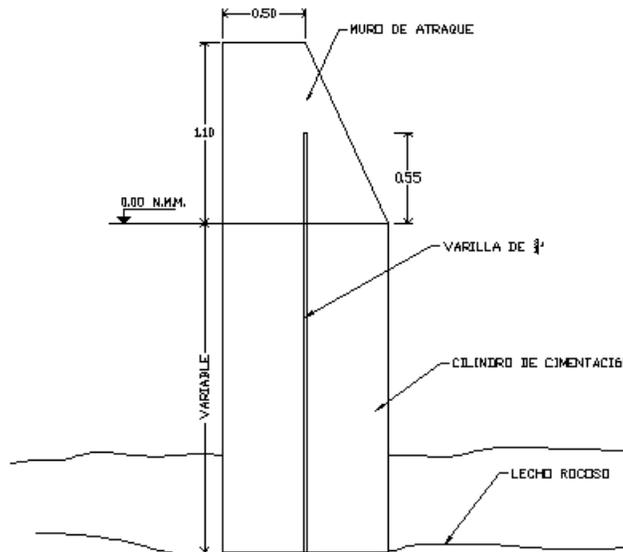
porcentajes de coraza, núcleo, y base del espigón. También se requiere conocer el peso específico de la roca en los bancos de extracción, el espesor de la capa de roca en el banco y la distancia a la que se encuentra el banco de extracción del espigón.

En los espigones para realizar la estimación de costos se idealiza la estructura por capas de acuerdo al diseño. Para calcular los volúmenes de los trabajos se divide la longitud total en cinco tramos, y se consideran las áreas de cuatro secciones transversales típicas además de los extremos.



SECCION DEL CORTE DEL TUBO GEOTEXTIL

Figura 4. Variables físicas de los geotubos.



DETALLE DE CIMENTACION Y MURO DE ATRAQUE

Figura 5. Sección tipo de los muros de contención.

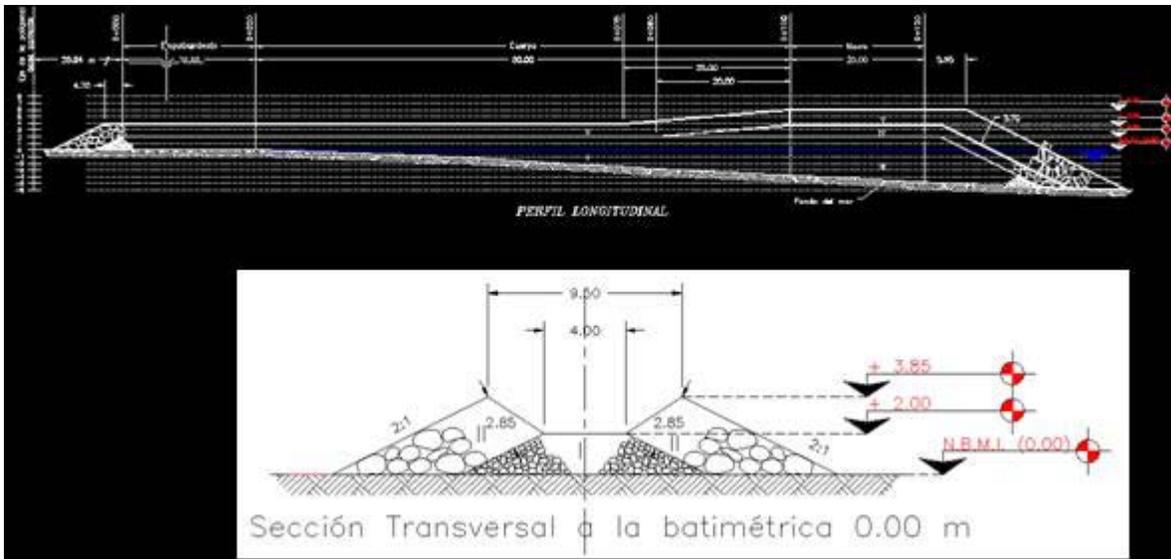


Figura 6. Esquema general del diseño en espigones.

Otras variables para realizar la estimación de costos

Localización de la obra: Esto es importante porque define un porcentaje representativo de los gastos, ya que existen lugares en los cuales no se tiene acceso por carretera por lo que se realiza por medio de barcaza; esto aumenta considerablemente los acarrees de equipo, material y mano de obra.

Tipo de material: Esto es obviamente el principal factor de costo, como en cualquier tipo de obra, ya

que define el tipo de acarreo, el uso de banco de materiales, la distancia al banco de materiales, la forma de pago, etc.

Estructuras existentes: cuando en el sitio existen estructuras de protección costera puede ser necesario desmantelarlas o bien modificarlas antes de iniciar la construcción de la nueva estructura, el programa ofrece varias opciones para manejar las estructuras existentes.

Ecuaciones para calcular los volúmenes de las obras

Geotubos sumergidos

1. Extracción de arena (m^3): $Ea = \left(\frac{P}{2}\right)Ap.Lp$
2. Nivelación del terreno (m^2): $Nt = Ap.Lp$
3. Carga de Material extraído (m^3): $Cm = \left(\frac{P}{2}\right)Ap.Lp$
4. Colocación de Geotubo (m): $Cg = Lp$
5. Dragado bajo el Geotubo (m^3): $Dg = \left(\frac{b+b'}{2}\right)Lm.Lp$
6. Carga de arena dragada (m^3): $Ca = \left(\frac{b+b'}{2}\right)Lm.Lp$

Muros de contención a base de concreto

7. Extracción de arena (m^3): $Ea = \left(\frac{P}{2}\right)Ap.Lp$

8. Retiro de material fangoso (m³): $Rm = \frac{\sum_{i=1, \dots, 6} Pi}{6} \cdot Lp \cdot (1.00)$
9. Colocación de concreto (m³): $Cc = \left(\left(1.10 \cdot \left(\frac{1+0.5}{2.0} \right) \right) + \left(\frac{\sum_{i=1, \dots, 6} Pi}{6} \cdot \left(\pi \cdot \frac{1^2}{4} \right) \right) \right) \cdot Lp$
10. Acero de ¾" (Ton): $Ac = \left(\frac{\sum_{i=1, \dots, 6} Pi}{6} + 0.55 \right) \cdot Lp \cdot (0.00225)$

Espigón a base de piedra natural

11. Desmonte de banco (Ha): $Dm = \frac{(Rn + Rs + Rc)}{Per \cdot Ecr \cdot 10000}$
12. Despalme de banco (m3): $Dp = Dm \cdot Ecv \cdot 10000$
13. Piedra para núcleo (Ton): $Rn = (0.10Vt_3 + 0.80Vt_4 + 0.70Vt_5)(1.00 - Pr) \cdot Per$
14. Piedra para capa secundaria (Ton): $Rs = (0.50Vt_1 + 0.50Vt_2 + 0.60Vt_3)(1.00 - Pr) \cdot Per$
15. Piedra para coraza (Ton):
 $Rc = (0.50Vt_1 + 0.50Vt_2 + 0.30Vt_3 + 0.20Vt_4 + 0.30Vt_5)(1.00 - Pr) \cdot Per$
16. Volumen del tramo 1 (M³): $Vt_1 = \left(\frac{Ab_1 + Ac_1}{2} \right) \cdot \left(\frac{h_1}{2} \right) \cdot (l_1)$
17. Volumen del tramo 2 (M³): $Vt_2 = \frac{\left(\frac{Ab_1 + Ac_1}{2} \right) \cdot (h_1) + \left(\frac{Ab_2 + Ac_2}{2} \right) \cdot (h_2)}{2} \cdot (l_2)$
18. Volumen del tramo 3 (M³): $Vt_3 = \frac{\left(\frac{Ab_2 + Ac_2}{2} \right) \cdot (h_2) + \left(\frac{Ab_3 + Ac_3}{2} \right) \cdot (h_3)}{2} \cdot (l_3)$
19. Volumen del tramo 4 (M³): $Vt_4 = \frac{\left(\frac{Ab_3 + Ac_3}{2} \right) \cdot (h_3) + \left(\frac{Ab_4 + Ac_4}{2} \right) \cdot (h_4)}{2} \cdot (l_4)$
20. Volumen del tramo 5 (M³): $Vt_5 = \left(\frac{Ab_4 + Ac_4}{2} \right) \cdot \left(\frac{h_4}{2} \right) \cdot (l_5)$

$Vt_j =$ Volumen del tramo j ($j=1, \dots, 5$).

$Ab_k =$ Ancho de la base del espigón en la sección k ($k=1, \dots, 4$).

$Ac_k =$ Ancho de la corona del espigón en la sección k ($k=1, \dots, 4$).

$h_k =$ altura del espigón en la sección k ($k=1, \dots, 4$).

$l_j =$ longitud del tramo j ($j=1, \dots, 5$).

$Pr =$ porosidad de la roca del espigón.

$Per =$ Peso específico de la roca.

$Ecr =$ Espesor de la capa de roca.

$Ecv =$ Espesor de la capa vegetal.

La herramienta computacional

La herramienta desarrollada se denominó Estimación de Costos para Recuperación de Playas (ECORP). Su uso se basa en menús que permiten el acceso a las diferentes funciones. Inicia presentando los tres tipos

principales estructuras que se construyen en la región, así como la opción que ayuda a seleccionar una estructura en base a las condiciones del sitio. En la Figura 7 se presenta el menú principal.



Figura 7. Menú principal de ECORP.

Habiendo definido el tipo específico de estructura que se va utilizar, ya sea con ayuda de la herramienta o de manera externa, el usuario es dirigido hacia una ventana que le permite ingresar las variables correspondientes a esa estructura. La Figura 8 muestra el ejemplo para el caso de rompeolas semi-sumergidos a base de geotextiles. Además de permitir el ingreso de los valores para las variables específicas de la estructura la ventana proporciona acceso a la definición de las variables físicas de la playa, esto es, la longitud, el ancho y la profundidad.

En caso de existir estructuras de protección en el sitio es posible especificar a la herramienta el tipo y las dimensiones de la misma, para incluir en el presupuesto de la obra los costos correspondientes a la demolición o adecuación de dicha estructura. Con toda la información anterior el sistema procede a calcular los volúmenes de todos los conceptos que intervienen en la construcción de la obra, utilizando

para ello las fórmulas que se presentaron previamente y con estos volúmenes y con los precios unitarios extraídos de los presupuestos de obra proporcionados por las empresas constructoras se estima el costo de construcción de la obra. Este costo se presenta en el reporte que se muestra en la Figura 9.

Los costos que se presentan corresponden a los costos vigentes en que fue construida una obra similar por alguna empresa constructora. Como lo más común es que se requieran los costos actualizados, la herramienta puede actualizar los costos usando los factores de actualización que publica periódicamente la SCT. Proporcionando el factor correspondiente la herramienta volverá a presentar el estimado con los costos actualizados. Este factor también se puede definir en base a la inflación acumulada desde la fecha de elaboración del presupuesto original hasta la fecha actual.

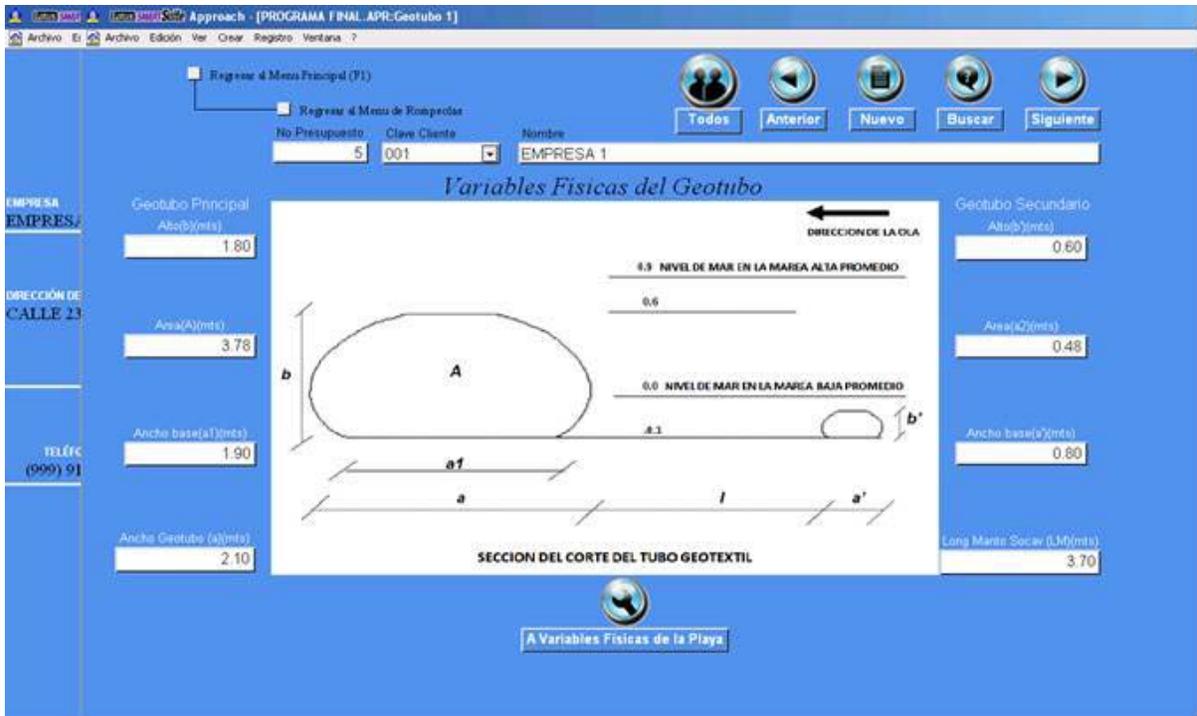


Figura 8. Ventana para captura de datos de la estructura.

DISCUSIÓN

Durante la investigación se pudo constatar que en el caso del desarrollo de la aplicación, los problemas principales son la decodificación del conocimiento del experto, es decir, la elaboración de los diagrama de conceptos, así como transcribir la información recabada durante las entrevistas (Popescu *et al.*, 2003). La programación fue relativamente sencilla debido a que la programación de variables es lineal como se describió anteriormente.

Este tipo de proyectos es muy útil, ya que después de estudiar las técnicas actuales, es posible extraer la experiencia de manera que se conservan estos conocimientos aún en ausencia del experto, así que es una manera de socializar el conocimiento generado en campo, en ingeniería esta es una de las áreas que es necesario desarrollar prestándole mayor atención (Marzouk y Moselhi, 2003; Yu *et al.*, 2006). La erosión de playas es cada vez más común en Yucatán debido a los eventos climatológicos y existe una gran cantidad de usuarios potenciales para la aplicación elaborada.

Durante el desarrollo de la investigación se observó que es necesario esclarecer los métodos de transferencia de información por medio de las entrevistas, es decir, por medio de ejemplos comunes y afines al área, ya que esta fue una de las partes de

más dificultad en la elaboración de este proyecto. De igual manera es conveniente la elaboración de manuales estándares para la elaboración de los diagramas, ya que en la bibliografía actual se describen de manera confusa, y no existen tendencias para el manejo de distintos tipos de información, es decir, no marca las diferencias de metodología dependiendo del tipo de información que maneja un proyecto cualquiera.

CONCLUSIONES

El Método de Costos Paramétricos mostró ser adecuado para elaborar presupuestos preliminares de obras de protección costera. El nivel de aproximación de la herramienta elaborada en este trabajo es del 70%, debido principalmente a las variables del terreno, que normalmente, cambian durante la construcción de las obras. La información que proporciona esta herramienta computacional es un buen apoyo a la toma de decisiones en la construcción de obras de protección de playas.

Durante el trabajo quedó evidencia la necesidad de abundar en estudios, métodos y técnicas relacionadas a la ingeniería costera que respondan a las características particulares de la Península de Yucatán, de igual manera es importante aprovechar las experiencias de las empresas locales en el desarrollo de las obras de ingeniería costera.

Concepto	Descripción	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
EXTRACCION DE ARENA EN PLAYON					
SPLAD007	NIVELACION DEL TERRENO O AREA DONDE SE	M2.	\$3.59	11,793.36	\$42,338.17
	TOTAL EXTRACCION DE ARENA EN PLAYON				\$42,338.17
DESMANTELAMIENTO Y TRAB. PREVIOS					
SDEMOL00	DEMOLICION DE ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO	M3	\$126.91	4.50	\$570.99
SREP0004	TRITURACION DE MATERIAL (DEMOLICION) HASTA	M3	\$26.39	4.50	\$118.73
SREP0005	EXCAVACION EN ARENA PARA FORMAR CAJON PARA	M3.	\$27.79	4.50	\$125.03
	TOTAL DESMANTELAMIENTO Y TRAB. PREVIOS				\$814.76
COLOCACION DE GEOTUBO EN PLAYAS.					
SGEOTU06	SUMINISTRO E INSTALACION DE GEOTUBO CON	ML	\$956.73	2,569.36	\$2,458,183.79
	TOTAL COLOCACION DE GEOTUBO EN PLAYAS.				\$2,458,183.79
DRAGADOS Y CARGAS					
SDRA0001	DRAGADO DE ARENA EN EL PLAYON A BASE DE MEDIO	M3	\$20.38	2.00	\$40.72
SDRA0002	CARGA DE MATERIAL PRODUCTO DE DRAGADO	M3	\$11.80	2.26	\$26.69
	TOTAL DRAGADOS Y CARGAS				\$14.03
DESMANTELAMIENTO DE ESPIGONES.					
SDEMOL01	DEMOLICION DE ESPIGONES A BASE DE ROCA EN	M3	\$103.30	3.06	\$316.10
SDESM001	DESMANTELAMIENTO Y EXTRACCION DE ESPIGONES	M2	\$267.30	11.02	\$2,944.98
SPLAYA10	ACOPIO, TENDIDO, ACOMODO Y NIVELACION DEL	M2.	\$10.73	489,360.00	\$5,250,832.80
	TOTAL DESMANTELAMIENTO DE ESPIGONES				\$5,254,093.88
	SUBTOTAL				\$7,755,444.63
	IVA				\$1,163,316.69
	TOTAL PRESUPUESTO				\$8,918,761.32

Figura 9. Pantalla de salida con los costos de la obra.

REFERENCIAS

- Alvarez E., Rubio R., H. Ricalde (2005). *Beach restoration with geotextil tubes as submerged breakwaters in Yucatan, México. Proceedings of the International Symposium: Tsunami Reconstruction with Geosynthetics – Protection, Mitigation, and Rehabilitation of Coastal and Waterway Erosion Control. Bangkok-Thailand, December 2005.* 1(1): 1-13.
- Capurro L., Euán J., J Herrera (2002). *Manejo sustentable del ecosistema costero de Yucatán. Avance y Perspectiva*, 21: 195-204.
- Capurro L. (2003). *Un Gran Ecosistema Costero: la Península de Yucatán. Avance y Perspectiva*, 22: 69-75.
- SCT (1986). *Estudio de evolución de línea de playa entre progreso y Chelem, Yucatán.* (M.S.).
- Marzouk M., O. Moselhi. (2003). *Object-Oriented simulation model for earthmoving operations.* Journal of Construction Engineering And Management ASCE, 129(2): 173-181

Patrascu A. (1988). *Construction Cost Engineering Handbook*. MARCEL DEKKER INC. ISBN 0-8247-7627-8. USA.

Popescu C., Phaobunjong K. and Ovararin N. 2003. *Estimating Building Costs*. Crc Press. ISBN: 0824740866. 768 pp.

SMC (Sistema de Modelado Costero) (2000). *Documento de Referencia Vol. III. Obras*. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Universidad de Cantabria. Ministerio de Medio Ambiente. España.

Varela L. (1994). *Costos por metros cuadrados de construcción*, 5ª Ed. Varela Ingeniería de Costos S.A. de C.V.

U.S. Army Corps of Engineers (1984). *Shore Protection Manual*, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS. USA.

Yu W., Lai C., W. Lee (2006). A WICE approach to real-time construction cost estimation. *Automation in construction, An international Research Journal*. 15(1): 12-19.

Este documento debe citarse como:

Ancona-Ayora, R., Pech-Pérez, J., Zetina-Moguel, C. (2010). **Estimación de costos de obras de recuperación de playas en la costa de Yucatán**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-1, pp 33-43, ISSN: 1665-529-X.

Gas sensor array for VOC's monitoring in soils contamination

Rincón, M.¹, Getino, J. M.², Robla, J. I.¹, García Hierro, J.¹, Mochón, J.¹ and Bustinza, I.¹

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2010 – Fecha de aprobación: 19 de mayo de 2010

ABSTRACT

Aiming to develop low cost devices for in situ volatile organic compounds (VOC) in soils contamination, a gas sensor array has been used to analyze (VOC) in laboratory experiments. Different thin film semiconductor metal oxide gas sensors were arranged in a gas sensor array that was exposed to hundreds of VOC mixtures gas samples fabricated in a full automatized gas line system. Several architectures of backpropagation neural networks were applied to sensor array responses after some preprocessing algorithm and signal normalization for quantification purposes. Partially connected hidden layer networks produced lower network errors than fully connected networks. Typical relative prediction errors about 20% to 40% were obtained. These results has permitted us to go further in the research and in situ soil measurements are being carried out currently using this gas sensor array system.

Keywords: gas sensor, volatile compounds, soils contamination, neural networks

RESUMEN

Este trabajo está dedicado a describir la labor que desarrollamos en nuestros laboratorios, con los dispositivos del bajo costo para detectar los compuestos orgánicos volátiles (VOC) en la contaminación de los suelos. Un sensor del gas se ha utilizado para analizar (VOC) en experimentos del laboratorio. Diversos sensores del gas del óxido de metal del semiconductor de la película fina fueron preparados para trabajar con el sensor del gas que tomó centenares de muestras del gas de las mezclas del VOC fabricadas en un sistema de línea de gas completamente automatizado. Varias arquitecturas de las redes neuronales fueron aplicadas a las respuestas del sensor después de una cierta normalización del algoritmo y de señal del proceso previo para los propósitos de la cuantificación. Las redes ocultas, parcialmente conectadas en una capa, produjeron errores muy bajos a la red de capa superior a la que estaban completamente conectadas. Los errores relativos típicos de la predicción cerca de el 20% a el 40% fueron obtenidos. Estos resultados han permitido que avancemos en la investigación y las medidas in situ del suelo se están realizando actualmente usando este sistema ya probado en laboratorio, del sensor del gas.

Palabras clave: sensor de gas, compuestos volátiles, contaminación de suelos, redes neuronales

¹Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CSIC. Av. Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid, Spain. Tel.: +34 91 553 8900 – Fax.: +34 91 534 7425 (mrincon@cenim.csic.es)

²INYPESA. General Días Porlier ,49 28001 Madrid, Spain (jmgg@inypsa.es)

INTRODUCTION

Volatile organic compounds (VOC), are main contributors to soil and subsoil contamination. They can induce health problems and environmental risks depending on their mobility, stability and toxicity. VOC in soils contamination is generally characterized by the presence of complex mixtures of these compounds. In order to estimate specific risks it is necessary to determine the flow characteristics (Eikmann et al., 1995) and transfer models based on experimental data can be used. Hydrocarbons suffer a slow migration toward deeper soil layers until arriving to the phreatic layer where volatile compounds are formed. These compounds ascend to the surface by means of the pressure gradient and there they are introduced in the atmosphere.

Contaminated soil analysis is complicated because of the soil heterogeneity and the difficulties for obtaining representative samples. Most current analytical methods for soils diagnosis are based on chromatography variants: TLC, GC, HPLC and especially high resolution gas chromatography/mass spectrometry (HRGC/MS) (Getino, 1998). These techniques allow compounds identification by means of retention time and by spectral differences. Some mobile methods like GC/MS are also used, but they are high cost and time consumable techniques.

In this work, a new device for VOC in soils analysis is presented. The system is based on a metal oxide semiconductor gas sensor array (Getino, 1998). Different non-selective metal oxide gas sensors arranged in a sensor array and neural networks (NN) algorithms can be used to detect organic compounds in soils. Metal oxide gas sensors change the electrical conductivity when VOC are adsorbed on metal oxide surface, so it is possible to detect the compounds by measuring the electrical resistance of the sensors. This technology presents the advantages of its low cost, small size and microelectronic compatibility, but single sensors are usually low performance devices because of their poor sensibility. However, the use of sensor arrays has been adopted as a feasible method to improve gas sensors performance. The sensors in the sensor array can be all of them working by the same operation principle or not. Moreover, sensor signals can be steady state, differential or modulated signals. But most sensor arrays follow the same schema: once exposed to gas samples, sensor signals are processed to give response vectors and some pattern recognition algorithms are applied to these vectors in order to obtain an estimation of the compound presence and/or concentration.

The gas sensor array integrated in the soil measurement device used is formed by 16 different sputtered thin

films of semiconductor metal oxides. Results of two different experiments are presented here, first a laboratory characterization and secondly, in situ analysis

EXPERIMENTAL

2.1 FABRICATION DETAILS

The sensor array was fabricated by growing 16 different metal oxides on a circular alumina (Laser Tech. 99.6% Al₂O₃) substrate of 25.4 mm diameter and 0.38 mm thickness. Each sensing element is 1 mm wide and 8 mm long.

Oxide films were grown by radiofrequency (RF) magnetron sputtering using the Alcatel SMC 450 system. Temperature inside the chamber was set to 250 °C at a total pressure of 0.5 Pa and a RF power of 100 W was selected. Two metal oxide cathodes were used as target materials (99.9% SnO₂ and 99.998% TiO₂ Cerac disks) under a 10% oxygen – 90% argon mixture. Some tin oxide sensors were doped with different amounts of sputtered Pt, changing the deposition time during the sputtering process. Platinum clusters of 200 µm of diameter were introduced over a tin oxide layer, and a second tin oxide layer was grown over the Pt layer, in order to obtain a sandwich structure. Electrical contacts were also deposited by sputtering from a 99.999% Pt cathode in argon atmosphere at 250° and 0.5 Pa. Anode-cathode distance were varied from 50 to 55 mm. (Endres et al., 1995).

Once fabricated, the sensor array was annealed in synthetic air at 520 °C during 4 hours to obtain polycrystalline thin films formed by nanocrystallites and to stabilize the electrical properties of the sensors. Gas sensor array elements are shown in Table I.

GAS SAMPLING

VOC can be classified by families in a first approach: aliphatic hydrocarbons, monoaromatic hydrocarbons, chlorinated aliphatic hydrocarbons, oxygenated aliphatic hydrocarbons, hydroxylated hydrocarbons, chlorinated monoaromatic hydrocarbons, volatile acids and nitrosamines.

For the experimental testing in laboratory a suitable selection of VOC molecules is needed. According to the importance of their use or disposal, the frequency in contamination cases, the knowledge on their physico-chemical properties and their availability, the following compounds were chosen: octane as aliphatic, chloroform as chlorinated, benzene and toluene as aromatic, propanal and methyl ethyl ketone (MEK) as oxygenated hydrocarbons. All these compounds were supplied in binary mixtures gas bottles (1000 ppm of each compound in nitrogen).

Table I. Gas sensor array details.

#	Layer 1	Layer 2	Layer 3
1	SnO ₂ (100 nm)		
2	SnO ₂ (150 nm)		
3	SnO ₂ (200 nm)		
4	SnO ₂ (250 nm)		
5	SnO ₂ (100 nm)	Pt (2 s)	SnO ₂ (100 nm)
6	SnO ₂ (100 nm)	Pt (4 s)	SnO ₂ (100 nm)
7	SnO ₂ (100 nm)	Pt (6 s)	SnO ₂ (100 nm)
8	SnO ₂ (100 nm)	Pt (8 s)	SnO ₂ (100 nm)
9	SnO ₂ (150 nm)	Pt (2 s)	SnO ₂ (150 nm)
10	SnO ₂ (150 nm)	Pt (4 s)	SnO ₂ (150 nm)
11	SnO ₂ (150 nm)	Pt (6 s)	SnO ₂ (150 nm)
12	SnO ₂ (150 nm)	Pt (8 s)	SnO ₂ (150 nm)
13	SnO ₂ (100 nm)	TiO ₂ (120 nm)	
14	SnO ₂ (150 nm)	TiO ₂ (180 nm)	
15	SnO ₂ (200 nm)	TiO ₂ (240 nm)	
16	SnO ₂ (250 nm)	TiO ₂ (300 nm)	

Gas sampling was carried out in a full-automated gas line system (see Figure1). Gas mixing was dynamically performed using mass flow controllers, air-operated valves and electrovalves all controlled by computer. Gas mixture samples are fabricated adding the volumetric contributions of the individual gases to the total gas flow. Using the volumetric concentrations of the binary mixtures gas bottles $C_{b,i}$, the concentration

$C_{m,i}$ of each individual component i in the total gas mixture flow, V_{tot} , is calculated by (Endres et al., 1995):

$$C_{m,i} = C_{b,i} \frac{V_{b,i}}{V_{tot}} \quad (1)$$

where $V_{b,i}$ is the flow of the component i .

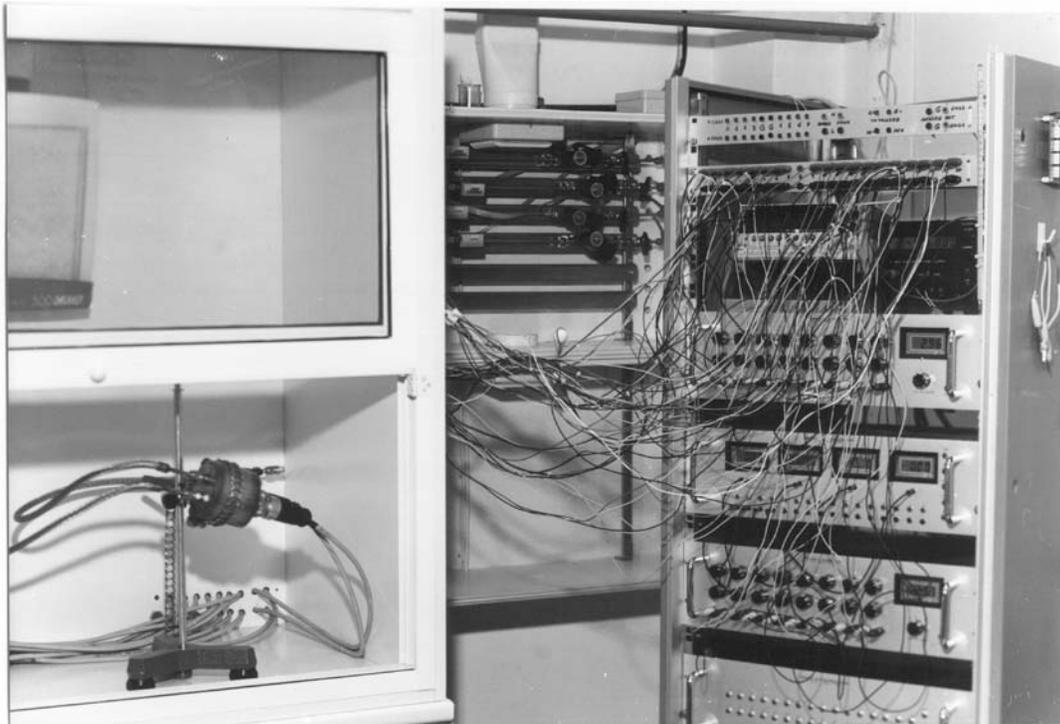


Figure 1. Gas line system and measurement equipment.

Carrier gas is fabricated from pure oxygen and nitrogen gas bottles in order to obtain synthetic air (79:21) in the final mixture. To prepare samples with different test gas concentrations the individual gas flows must satisfy equation (1). This can be achieved using mass flow controllers that can keep constant the desired gas flow.

EXPERIMENTAL SET-UP

A cylindrical measurement device for VOC in soils contamination has been designed. It incorporates the gas sensor array in the bottom of a small stainless steel test chamber (Capital Eq., 2004). Gas inlet and outlet are located in the top of the system. Below the gas sensor array and within a thermal and electrical isolating ceramic body, both an electrical heater and one thermocouple are placed. The heater can be powered up to 12 Vdc to obtain 500 °C whereas

thermocouple is used for temperature control. Gas sensor electrodes are connected mechanically with electrical wires grouped in one cable ending in a standard interface for computer connection.

The measurement device was placed in the test gas line system and fabricated gas samples were dynamically introduced in the test chamber. The electrical resistances of the sensors were measured by means of a Keithley 2700 digital multimeter including a 7706 multiplexer card connected to a personal computer through a GPIB CEC card. A Testpoint (Moore *et al.*, 1993) based runtime application has been designed for automatic control of measuring process and data acquisition. The user interface of this program is shown in Fig.2.

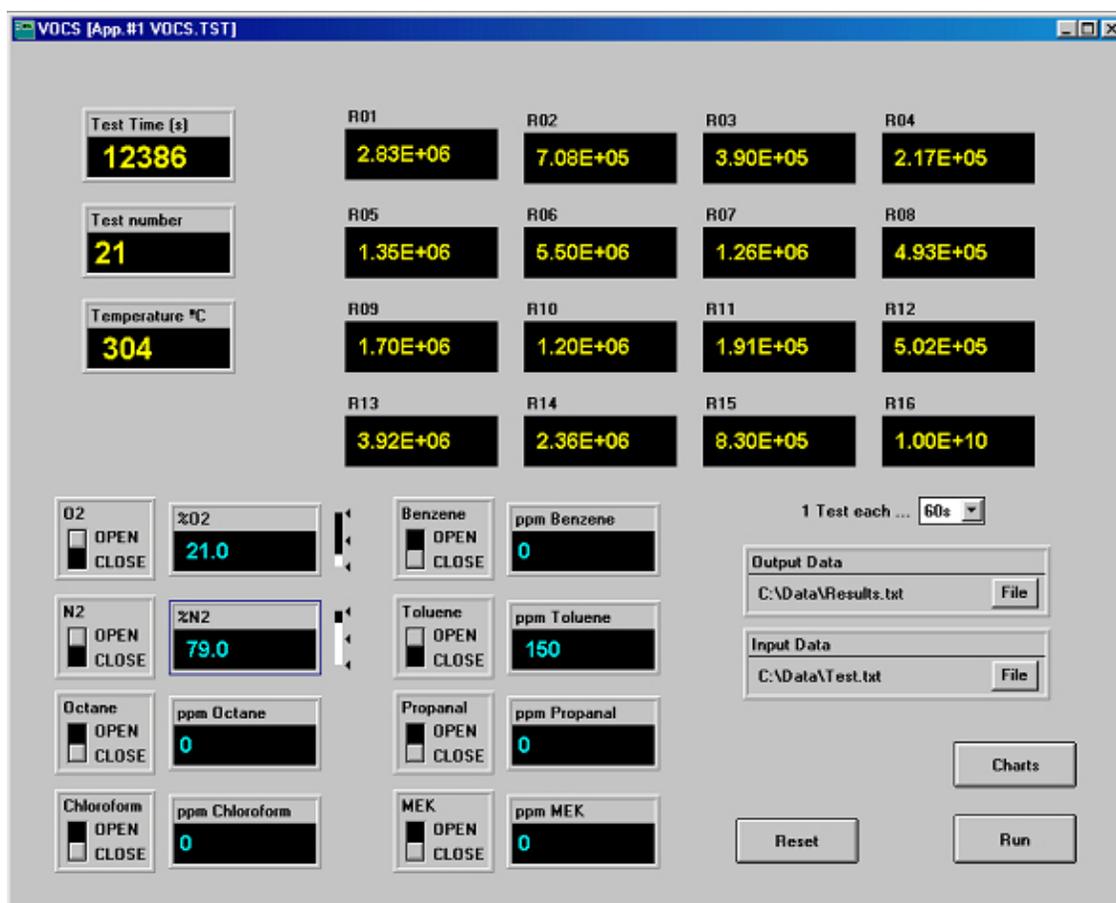


Figure 2. Measurement program user interface.

RESULTS AND DISCUSSION

ELECTRICAL CHARACTERIZATION

Gas sensor array was electrically characterized at 300 °C with a total flowrate of 200 ml/min exposed to mixtures of single VOC in synthetic air (benzene in air, toluene in air, chloroform in air, octane in air, propanal in air and MEK in air). VOC concentration was varied

from 50 to 250 ppm at 50 ppm steps. Experiments were repeated ten times per VOC tested. Sensor resistances were continuously measured at one-minute intervals during 10 minutes of synthetic air exposure and during 10 minutes of VOC exposure.

All tested VOC showed a reducing behavior during the

interaction with the metal oxide surface, producing a resistance decrease in all sensors. Tin and Titanium oxides are both n-type semiconductors and when these are exposed to reducing gases in oxygen containing atmospheres, reducing gases react with the oxygen species adsorbed on the oxide surface. The products of this reaction are desorbed from surface, injecting electrons to the conduction band and increasing then the sensor electrical conductance.

Assuming the value of sensor conductance in air at constant temperature (G_a) as baseline and because the sensor response is positive defined, we can define the

dimensionless response of n-type sensors to VOC by the relative conductance G/G_a , i.e., the value of the sensor conductance in VOC divided by the value of the sensor conductance in air.

The average responses obtained to 150 ppm of each VOC are shown in Fig. 3. In the figure it can be shown how responses to oxygenated compounds (MEK and propanal) are much higher than responses to the resting compounds. Among these, the gas sensor array responded better to octane than to chloroform or aromatic compounds (benzene and toluene). Similar patterns were obtained for other VOC concentrations.

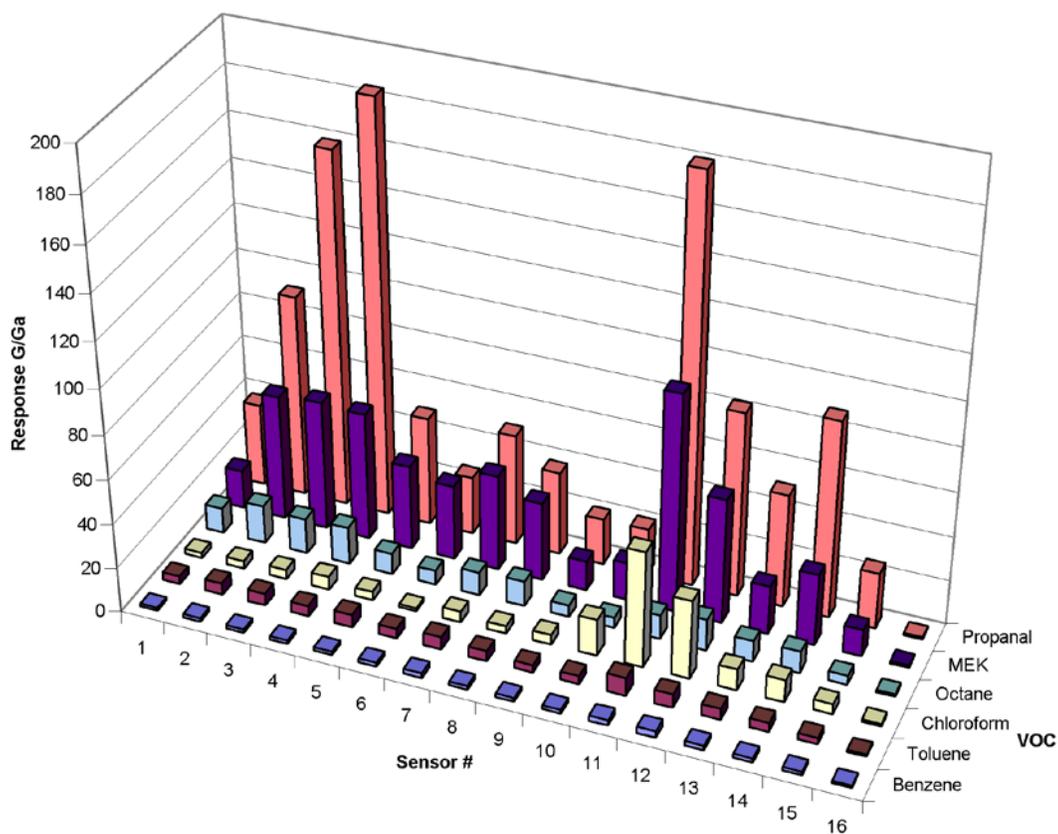


Figure 3. Response of gas sensor array to 150 ppm of VOC in synthetic air measured at 300 °C.

Undoped tin oxide films (sensors 1 to 4) were more sensible to oxygenated VOC than Pt-doped sensors (sensors 8 to 12) or the two layer $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2$ films (sensors 13 to 16), with the exception of sensors 11 and 12. Sensor 16 manifested some problems with the electrical contacts and some times its response could not be obtained from the resistance measurements. The sensor array behavior when exposed to chloroform is very similar than when exposed to oxygenated

compounds, especially for sensors 11 and 12. For octane and aromatic compounds, most sensors responses are very close, as it was expected for this type of gas sensors.

Once characterized for single test VOC detection, the sensor array was exposed to different mixtures of several VOC in synthetic air. It is possible to fabricate 57 different mixtures with six different compounds at a

fixed concentration. This is the result of two concentrations (compound presence and absence) and six compounds combinatory ($2^6=64$). The single binary mixtures (6) carried out previously and the absence of all VOC in the mixture (just air) have to be removed from this quantity, giving the above-mentioned 57 possible mixtures. Rising the number of concentrations in one unit, the possible number of experiments goes to 672. Considering that it should be very important to repeat the experiments we found a high cost and time consuming situation. So, instead of characterizing all possible mixtures in a wide concentration range, just a hundred of different VOC mixtures were selected and each experiment was repeated once. Concentrations for each compound were varied between 50 and 150 ppm when such compound was present in the mixture. Experiments were carried out at 300 °C, monitoring the gas sensor resistance in air and in VOC cycles of 10 minutes. Again, responses to mixtures containing oxygenated compounds were much higher than responses to non-containing oxygenated VOC mixtures, and the gas sensor response pattern was very similar to the obtained during single VOC in air characterization.

LABORATORY ANALYSIS

All experiments were analyzed by means of neural networks. Backpropagation was chosen as learning rule for all NN, using both momentum and an adaptative learning rule to speed this process. Different network architectures were tested: both fully and partially neuron connection (Moore et al., 1993), between hidden layer and output layer neurons were used in two-layer network architectures using logarithm sigmoid function as transfer function. NN were trained removing each one of the samples before normalizing. After training, the removed sample was used to validate the network (Holmberg et al., 1995).

The normalized fractional conductance change was chosen as preprocessing algorithm for network input:

$$\frac{(G - G_a)/G_a}{\sqrt{\sum (G - G_a)^2 / G_a^2}} \quad (2)$$

where G is the conductance of the sensors when exposed to gas sample and G_a is the conductance of the sensors in air at the same fixed temperature. This function has been successfully used in backpropagation NN for classifying purposes (Gardner et al., 1992).

Network inputs were normalized in a way that all values were comprised in the range (-1, +1) according to:

$$x_{ij}^{norm} = \frac{2(x_{ij} - \min(x_{ij}))}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} - 1 \quad (3)$$

where x_{ij} is the network input for sensor i and gas sample j .

The network output function is defined as a normalized concentration, so all output values are comprised in the range (0,+1):

$$\frac{c}{c_{max}} \quad (4)$$

where c_{max} is the maximum concentration for each compound present in the gas sample.

NN were simulated using Matlab's Neural Network Toolbox (Demut, 1994). First network architecture tested was 15:h:6, eliminating responses from malfunctioning sensor 16, so network input was reduced to 15 sensors and network output aims to determine the 6 VOC tested. The number of neurons in the hidden layer was varied from 0 to 36 training the networks up to a maximum number of 10000 iterations. In Fig. 4 the influence of neurons number in the hidden layer after 2000 iterations is shown. The lowest sum squared network error was found for 12 neurons in the hidden layer. For this 15:12:6 network we can see in the figure how increasing the iterations no further error decrease can be found.

Partially connected 15:6xh:6 networks in which the hidden layer was split in six different groups of h neurons were also tested. Output for each compound is calculated exclusively using its corresponding group in the hidden layer and there is no connection with resting groups.

Fig. 5 shows errors for 15:6xh:6 networks after 2000 iterations varying neurons number in each group in the split-hidden layer. Errors decrease with neurons number up to a value of $h = 3$. Similar network errors are found using more than three neurons in hidden layer groups. Figures 6, 7 and 8 represent predicted VOC concentrations by 15:6x5:6 network versus real concentrations of all these compounds. At high concentrations predicted values are far from the ideal straight line of slope unity. Using this network the following mean values of relative prediction errors for each compound in the (50-250) ppm concentration range were obtained: 26% for benzene, 36% for toluene, 22% for chloroform, 39% for octane, 27% for MEK and 18% for propanal.

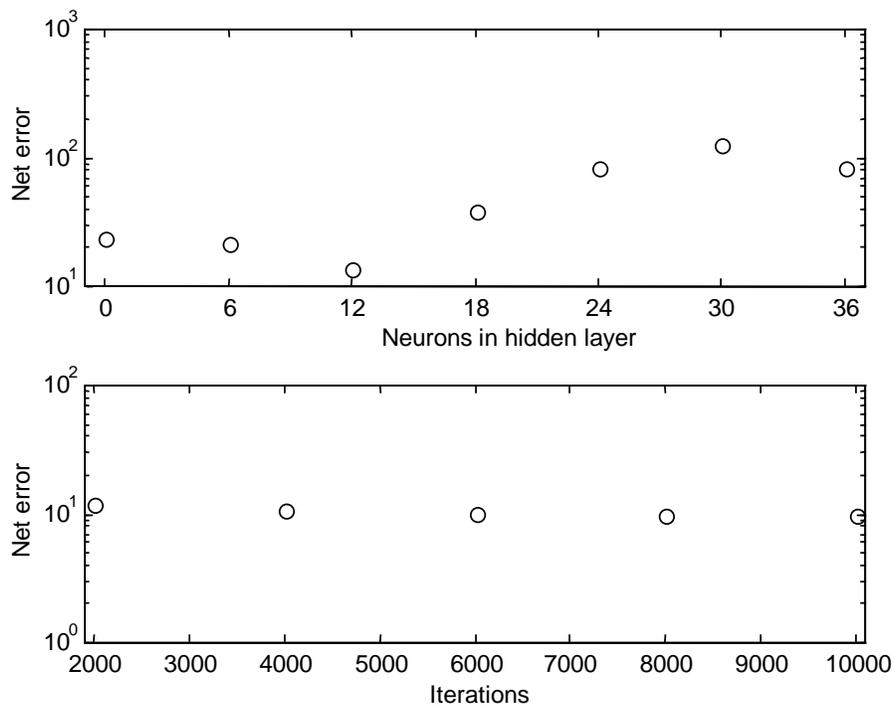


Figure 4. Influence of neurons number in the hidden layer on 15:*h*:6 network error and influence of iterations number on 15:12:6 network error.

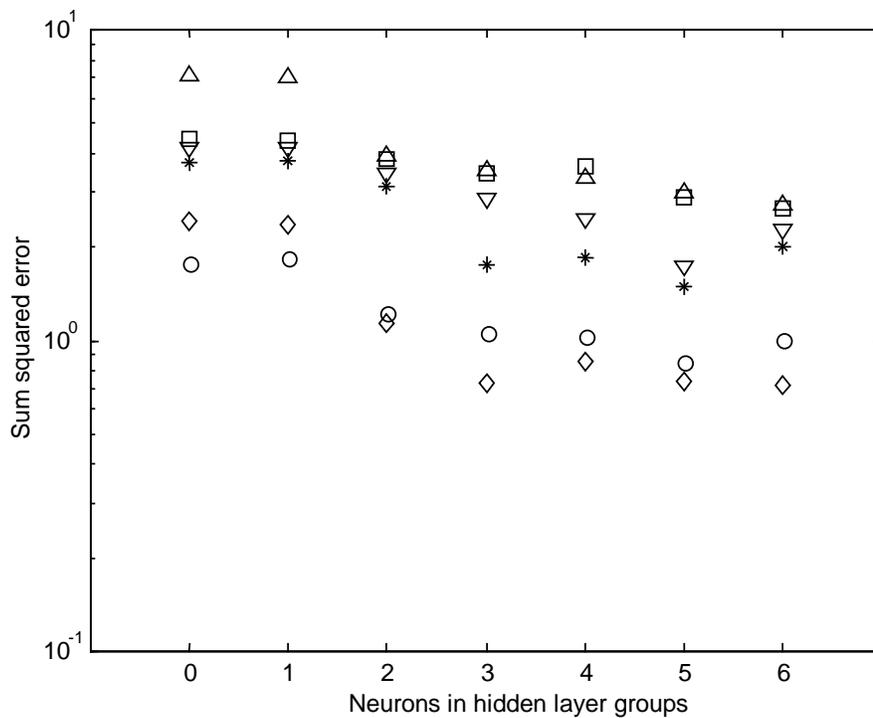


Figure 5. Influence of neurons number in hidden layer groups on 15:6*h*:6 network error for benzene (o), toluene (△), chloroform (*), octane (□), MEK(▽) and propanal (◇) after 2000 iterations.

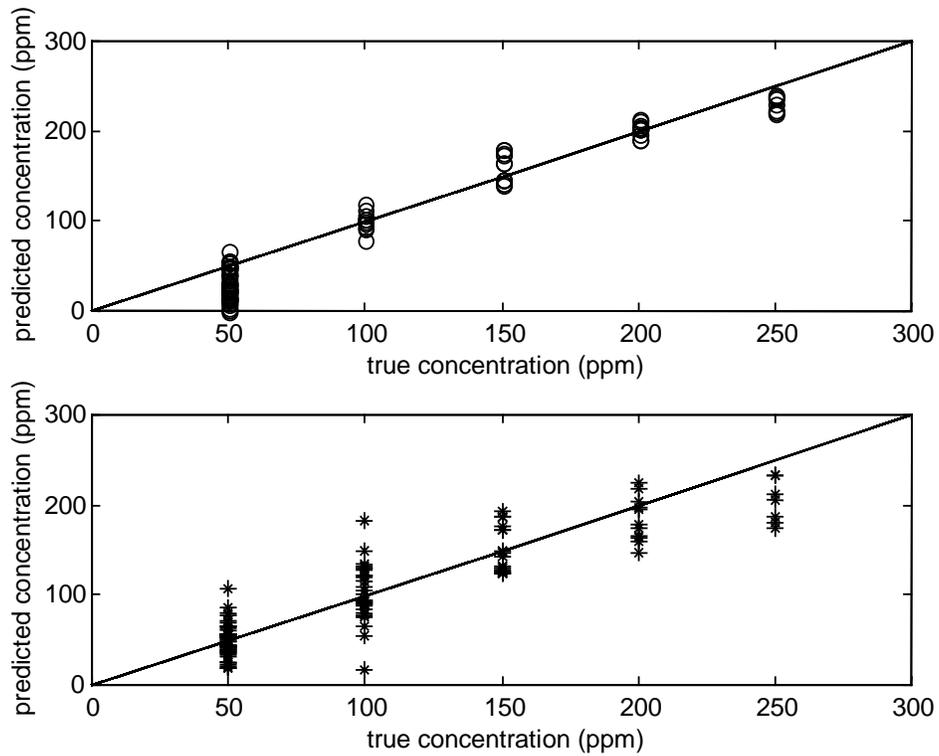


Figure 6. Predicted benzene (o) and chloroform (*) concentrations by 15:6x5:6 network versus true concentrations.

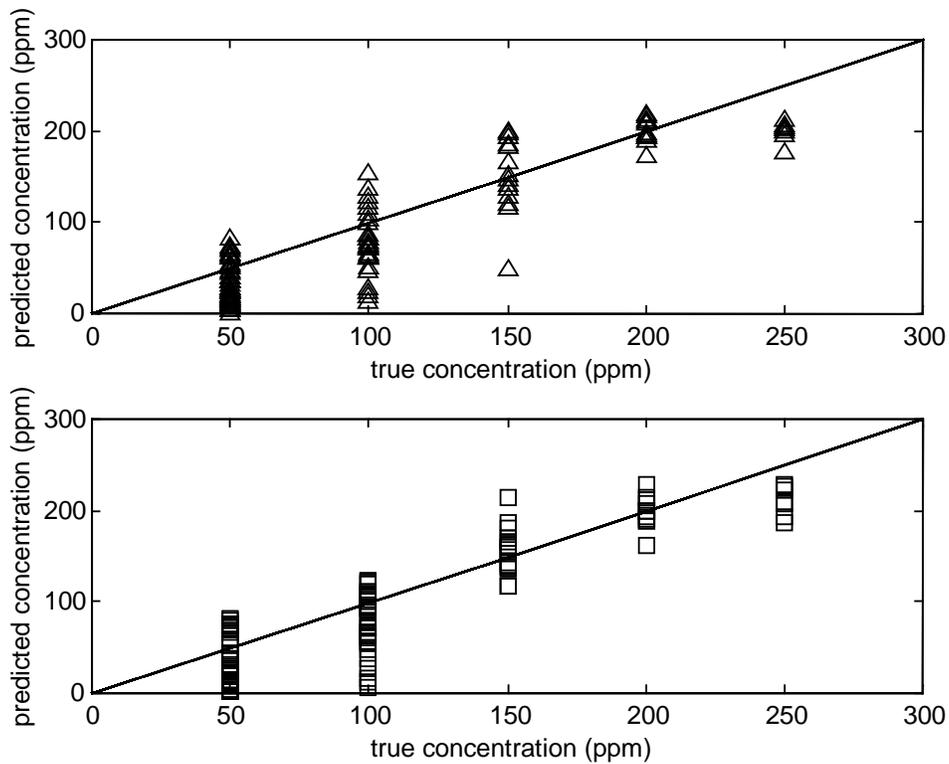


Figure 7. toluene (Δ) and octane (\square) concentrations by 15:6x5:6 network versus true concentrations.

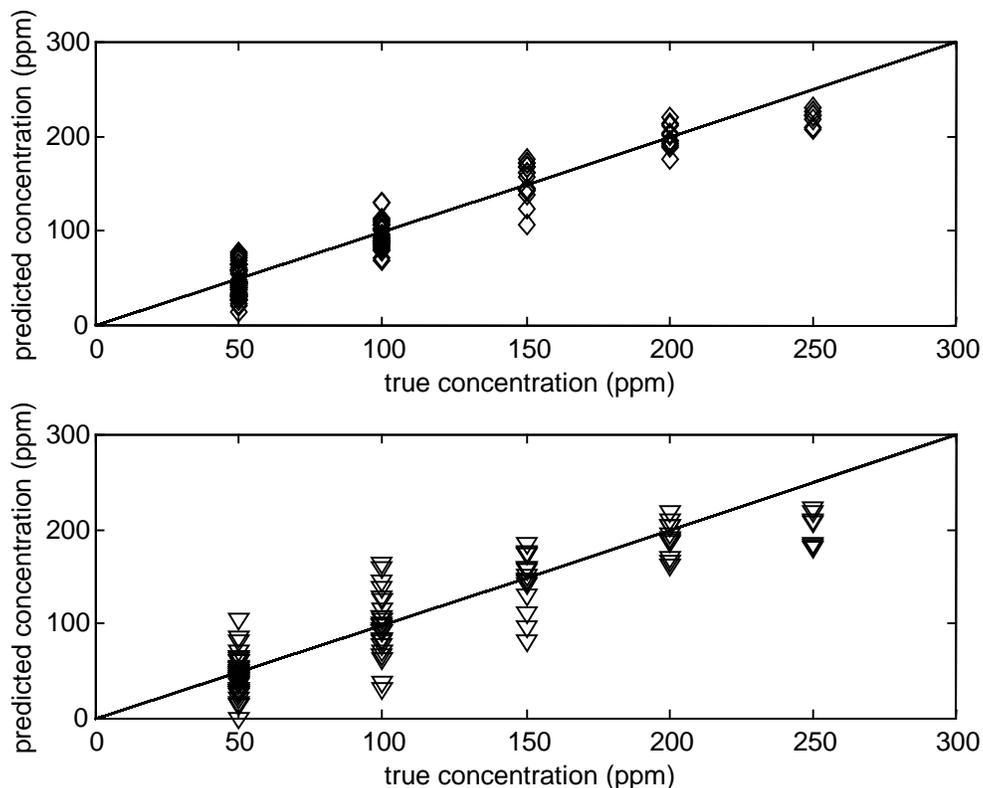


Figure 8. Predicted propanal (\diamond) and MEK(∇) concentrations by 15:6x5:6 network versus true concentrations.

CONCLUSIONS

Gas semiconductor sensor arrays can be used to develop new measuring techniques for VOC in soils contamination monitoring. Sputtered thin films metal oxide gas sensors respond highly to oxygenated compounds (MEK and propanal) and aliphatic compounds like octane. Lower responses were found to chloroform and aromatic compounds (benzene and toluene) but generally speaking, responses from the fabricated sensor array were important and suitable for analysis tasks.

Artificial neural networks, in special two-layer networks, result valid methods to process the sensor array output. The preprocessing algorithm of normalized fractional conductance change is required to obtain good results. Conductance change techniques were first proposed to compensate the temperature dependence of chemical sensors (Heiland, et al., 1982), while normalization over the sensor array results very useful for discrimination processes (Gardner et al.,

1991). Main problem of sensor arrays in which all the sensors operate by the same sensing principle is the sensors redundancy and the consequent diminution of the discrimination capability. Different metal oxides (tin oxide and titanium oxide) were used aiming to reduce collinearity problems in the response matrix.

Although predicted concentration errors are high enough to consider the system as an analytical instrument, we have proved the validity of this device to detect the presence of VOC concentrations at ppm levels in air. This is the basis for future measuring systems capable to give a precise on-site estimation of soil contamination in real time.

Currently, in situ measurements are being carried out using the fabricated sensor array. For future works, the sensor array can be miniaturized using sputtered thin films over thermally isolated silicon micromachined structures in order to obtain an integrated array device with low power requirements and small size.

REFERENCES

- [4] Capital Equipment Corporation, *TestPoint V.5, for Windows*, 2004.
- [8] Demuth, H., Beale, M. *Neural Network Toolbox User 's Guide*, The MathWorks, Inc., Jan. 1994

- [1] Eikmann, Th, Hartmann, W. R., Herklotz, K., Fischer, A. B. “*Ocurrence and evaluation of volatile susbtances at toxic waste sites in relation to environmental medicine*”, in *Contaminated Soil '95*, vol. I, W.J. van der Brink, R. Bosman and F.Arendt (eds.), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1995, p. 545-550
- [3] Endres, H. E., Jander, H. D., Göttler, W. “*A test system for gas sensors*”, *Sensors and Actuators B*, 23 (1995) 163-172
- [7] Gardner, J. W., Hines, E.L., Tang, H. C. “*Detection of vapours and odours from a multisensor array using pattern-recognition techniques. Part 2. Artificial neural networks*”, *Sensors and Actuators B*, 9 (1992) 9-15
- [10] Gardner, J. W. “*Detection of vapours and odours from a multisensor array using pattern-recognition techniques. Part 1. Principal component and cluster analysis*”, *Sensors and Actuators B*, 4 (1991) 109-115
- [2] Getino, J. “*Modelado e Identificación de Sistemas Multisensores basado en Oxidos Metálicos Semiconductores para Detección y Análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles*”, Thesis, Madrid, 1998.
- [9] Heiland, G. “*Homogeneous semiconductor gas sensors*”, *Sensors and Actuators*, 2 (1982) 343-362
- [6] Holmberg, M., Winquist, F., Lundström, I., Gardner, J. W., Hines, E. L., “*Identification of paper quality using a hybrid electronic nose*”, *Sensors and Actuators B*, 26-27 (1995) 246-249
- [5] Moore, S.W., Gardner, J.W., Hines, E.L., Göpel, W., Weimar, U. “*A modified multilayer perceptron model for gas mixture analysis*”, *Sensors and Actuators B*, 15-16 (1993) 344-348

Este documento debe citarse como:

Rincón, M., Getino, J. M., Robla, J. I., García Hierro, J., Mochón and J. Bustinza, I. (2010). **Gas sensor array for VOC's monitoring in soils contamination**. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 14-1, pp 45-54, ISSN: 1665-529-X.

Ajuste de datos a modelos físicos usando Mathematica

Peñuñuri, F.¹, Zambrano, M.¹, Acosta, C.¹, Zaragoza, N.¹

Fecha de recepción: 21 de mayo de 2009 – Fecha de aceptación: 24 de marzo de 2010

RESUMEN

En el análisis de datos experimentales realizar ajustes a modelos físicos es de gran importancia. Con frecuencia los datos se ajusta a una expresión lineal donde los parámetros de ajuste se determinan por el método de mínimos cuadrados, este método también puede ser usado para realizar los ajustes no lineales, pero cuando se desconoce la solución del modelo, el ajuste es prácticamente imposible y no se cuenta con una manera clara de proceder.

En este trabajo se desarrolla un programa de ajuste no lineal de datos, a modelos más que a expresiones analíticas, para ello se utiliza el software Mathematica. Se analizan tres casos, una partícula sujeta a una fuerza constante, un modelo de difusión y ajustes al campo de temperaturas en el calentamiento modulado de una lámina de grafito. Por si mismo, el hecho de lograr los ajustes sin necesidad, a priori, de la solución del modelo merece mención, aunado a ello, la metodología que se usa es fácilmente aplicable a otros modelos sin requerir gran poder de cómputo ni gran cantidad de tiempo, por lo que el presente trabajo resulta de mucha utilidad para toda persona interesada en ajustes no lineales a modelos.

Palabras clave: ajustes no lineales, Mathematica.

Data fit to physical models using Mathematica

ABSTRACT

When the analysis of experimental data is required, the fit to physical model is of major importance. Frequently, the linear fit is used but this is only feasible if the phenomena under study accept a linear solution, the fit is done through the least square approach. The least square method can also be used in order to make a non-linear fit, but when the solution of the model is unknown, the non-linear fit is difficult to do if not impossible.

In this article we present a program that processes non-linear data fits. In itself, the fact of making the fit without a previous knowledge of the analytical expression deserve consideration, more over that the methodology used is easy and cheap to apply, for this reason this article will be of great help in making non-linear fits to data sets. In order to make this work, we use the Mathematica software.

We analyzed the following cases: a particle under the action of a constant force, the diffusion equation and the modulated thermal excitation of a graphite plate.

Keywords: non-linear fits, Mathematica.

¹Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte S/N Apdo. Postal 150 Cordemex. Tels. (999) 941-01-68, 941-01-94, 941-01-95 Fax: (999) 941-01-89 Mérida, Yucatán, México

INTRODUCCIÓN

La creación de modelos para la descripción de un fenómeno físico permite una mejor comprensión del problema de estudio, se tendrá una fácil manipulación de los parámetros involucrados y será posible realizar predicciones del fenómeno en cuestión.

Tales modelos por lo general se presentan en forma de ecuaciones diferenciales, integrales o integrodiferenciales. Con frecuencia, es necesario realizar ajustes de un modelo a datos experimentales, esta tarea no es difícil siempre que se conozca la forma analítica de la solución del modelo, en particular Mathematica posee muchas funciones destinada a esta labor, no es así cuando la solución es desconocida, puede verse (Wolfram, 2003) o su página web mencionada en la bibliografía.

Aún cuando existe una gran cantidad de bibliografía que aborda este problema, conocido como estimación paramétrica no lineal, problemas inversos o problemas mal condicionados, (Burden y Faires, 1985), realizar los ajustes cuando la solución del modelo es desconocida es complicado, pues está la tarea extra de encontrar la solución, que por lo general, se tendrá en forma numérica.

En este trabajo se desarrolla un método sistemático para la obtención de los ajustes, realizando en forma integral las soluciones del modelo y la elección de la mejor solución. El software utilizado es Mathematica, la economía del proceso es considerable a demás de lo amigable del software que permite una programación funcional sin mayores problemas.

El trabajo se organiza de la siguiente forma: En primer lugar se muestra la manera en que se realizan los ajustes cuando se conoce la función a ajustar. En la segunda sección se presenta la manera en que se procederá para el caso en que se desconozca la solución del modelo. En la tercera sección se realizan ajustes a tres modelos: a un tiro parabólico, a un proceso de difusión y el ajuste a un campo de temperaturas de una muestra de grafito, iluminada por una fuente con frecuencia f . Finalmente, presentamos las conclusiones y se proporciona los programas de ajuste en los apéndices.

AJUSTES: FORMA ANALÍTICA CONOCIDA

En este trabajo se establece la diferencia entre el concepto de modelo y su solución, aunque en la literatura muchas veces se toman como sinónimos.

Se comenzará describiendo, de manera general, la forma de proceder en el ajuste de datos cuando se conoce la función a la que se desean ajustar.

En aras de la concreción, sea

$$F(x; a_1, a_2, \dots, a_n) = 0, \quad (1)$$

la función a ajustar, ésta depende de la variable independiente x y de los parámetros a_i . Se construye un vector error E cuya componente i -ésima estará definida como:

$$E_i = F(x_i; a_1, a_2, \dots, a_n) - D_i \quad (2)$$

donde D_i es el valor experimental correspondiente a la variable independiente x_i . La solución buscada resultará de encontrar el mejor conjunto de parámetros que minimice la norma del vector error.

Para realizar la minimización de la norma euclidiana, método conocido como de mínimos cuadrados, existe un gran número de software comercial. La elección de esta norma obedece a su fácil tratamiento analítico, no así por ejemplo la norma de suma ya que habrá que minimizar la suma de los valores absolutos de las componentes del vector error lo cual no es, en general, fácil de hacer. En este trabajo también se minimiza la norma euclidiana del vector E .

METODOLOGÍA

2.1. AJUSTES A MODELOS

Al realizar análisis metodológico a modelos, es necesario determinar sus soluciones con el fin de proceder a los ajustes de la manera descrita en la sección anterior. Para resolver este problema, se usa el gran potencial que tiene Mathematica para realizar programación funcional. Se construye una función solución del modelo para proceder a la variación paramétrica de datos como ya se mencionó. La figura (1) muestra el procedimiento en forma esquemática.

Los puntos generales en la realización de los ajustes son:

- Decir a Mathematica cuál será la solución del modelo.
- Decir a Mathematica cuáles son las derivadas, respecto a los parámetros de ajuste de la función construida en el punto anterior.
- Ejecutar los ajustes usando por ejemplo el comando NonLinearRegress.

Es importante señalar la versatilidad de la metodología anterior aplicada en Mathematica pues no sólo sirve para modelos descritos en forma de ecuaciones diferenciales sino también integrales e

integrodiferenciales. Los comandos básicos que se utilizan para llevar a cabo esta tarea son

NonLinearRegress y NonlinearFit, (Wolfram, 2003). En los apéndices se pueden ver los detalles técnicos.

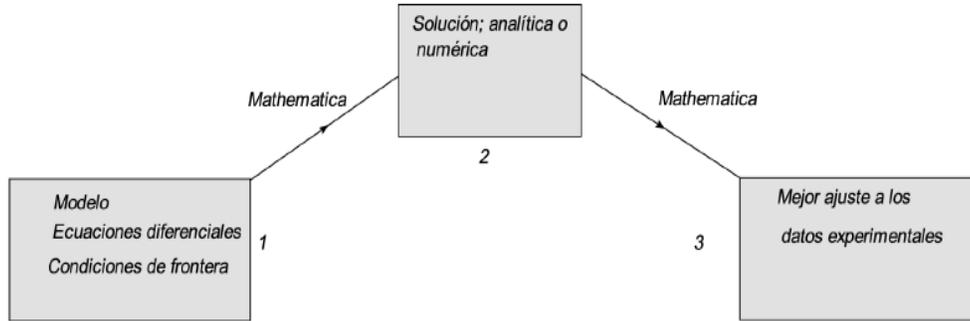


Figura 1: Diagrama del procedimiento para los ajustes.

Cabe aclarar que la manipulación numérica de las condiciones de frontera (CF), es un trabajo formidable pues no se aceptan discontinuidades que analíticamente podrían ser tratadas. Así pues, si se está trabajando con CF, éstas deben ajustarse de tal forma que sean consistentes, aquí radica un problema crucial ya que se debe asegurar que al modificar ligeramente las condiciones de frontera, para permitir el tratamiento numérico, el problema sigue siendo muy parecido al original cosa bastante plausible pero que no siempre se cumple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta en esta sección el ajuste a tres modelos: una partícula sujeta a una fuerza constante, un proceso de difusión y a justes a un campo de temperaturas de una muestra de grafito, iluminada por una fuente con frecuencia f . Los dos primeros con el fin de ilustrar la metodología empleada pues sus soluciones son conocidas y es posible verificar la validez de los ajustes.

PARTÍCULA SUJETA A UNA FUERZA CONSTANTE

De la segunda ley de Newton, si una partícula de masa m está sujeta a una fuerza constante entonces:

$$\ddot{\mathbf{r}}(t) = (0, -g) \tag{3}$$

éste será el modelo al cual se ajustarán los datos. Las con condiciones iniciales son:

$$\mathbf{r}(0) = (x_0, y_0) \tag{4}$$

$$\dot{\mathbf{r}}(0) = (v_{0x}, v_{0y}) \tag{5}$$

El problema acepta solución analítica,

$$\mathbf{r}(t) = \left(x_0 + v_{0x} t, y_0 + v_{0y} t - \frac{1}{2} g t^2 \right), \tag{6}$$

Con el propósito de simular datos experimentales se introduce un ruido aleatorio a la solución, para ello se le suma arbitrariamente, un numero aleatorio entre -1 y 1. En el caso del tercer ejemplo esto no es necesario pues los datos si son experimentales.

En la figura (2) se muestra el mejor ajuste y los datos simulados para un conjunto de parámetros y condiciones iniciales de $x_0 = 0, g = 9.8, v_{0x} = 21.2132, v_{0y} = 21.2132$.

Se define en Mathematica la función:

```

f[vox_?NumberQ, voy_?NumberQ, g_?NumberQ] :=
NDSolve[{{x''[t] == 0, y''[t] == -g}, y[0] == 0, x[0] == 0,
y'[0] == voy, x'[0] == vox}, {x, y}, {t, 0, 4.5}];
  
```

es a esta función a la que se ajustarán los datos. El programa de ajuste se muestra en el apéndice (A), obteniendo los siguientes valores de los parámetros: $v_{0x} = 21.168, v_{0y} = 21.1677, g = 9.79742$.

Nótese que los ajustes se hacen respecto a las expresiones (3, 4, 5) no respecto a la expresión (6) puesto que en principio ésta es desconocida.

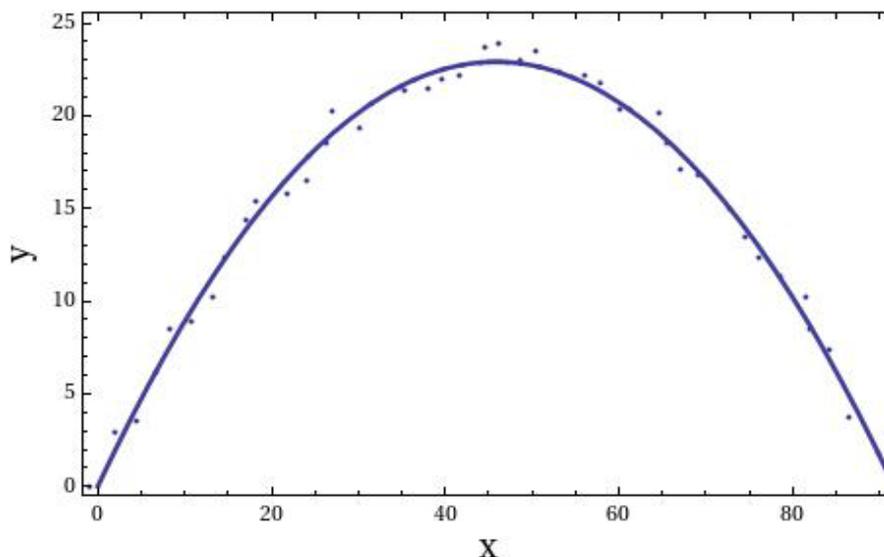


Figura 2: Ajuste a datos simulados.

AJUSTE A UN PROCESO DE DIFUSIÓN

Supóngase que se tiene un sistema que obedece la ecuación de difusión:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \tag{7}$$

con condiciones de frontera

$$u(x,0) = x^2 \tag{8}$$

$$u(0,t) = 0 \tag{9}$$

$$u(1,t) = 0, \tag{10}$$

donde u representa la concentración de la sustancia que se difunde y D es el coeficiente de difusión.

La ecuación (7) puede resolverse por el método de separación de variables para tener:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n (n\pi x) e^{-D(n\pi)^2 t} \tag{11}$$

con

$$C_n = 2 \int_0^1 (n\pi x) x^2 dx. \tag{12}$$

Al igual que en el ejemplo anterior, se dará un ruido a la solución para simular datos experimentales. La suma converge rápidamente de tal forma que no hay diferencia significativa al tomar la suma hasta $n = 3$ o $n = 10$, de hecho, para t y D de 0.5, la diferencia

se manifiesta más allá de la cifra decimal número 15, por mucho, más allá de la precisión experimental. Otro hecho notable es respecto a las condiciones de frontera (8) y (10), se ve que son inconsistentes aunque esta discontinuidad no afecta la solución formal de la ecuación, si afectará el tratamiento numérico de la misma.

El valor obtenido por el ajuste para el coeficiente D es de 0.501. Se muestran los detalles en el apéndice (B). Nótese el cambio en las condiciones de frontera con el fin de asegurar su continuidad, no obstante fuera del punto de discontinuidad, las CF son “prácticamente” las mismas. De nuevo, los ajustes son respecto a las expresiones (7, 8, 9, 10) y no respecto a la expresión (11).

En la figura (3), para un valor de D y t de 0.5, mostramos los datos y el ajuste correspondiente.

CALENTAMIENTO MODULADO DE UNA LÁMINA DE GRAFITO

En este ejemplo el ajuste no se realiza sobre un modelo que involucre alguna ecuación diferencial, sino un modelo que involucra variables complejas y que está dado por una integral.

Para este caso la solución analítica del modelo es desconocida y el ajuste de datos experimentales se realiza como se explica en la sección 2.

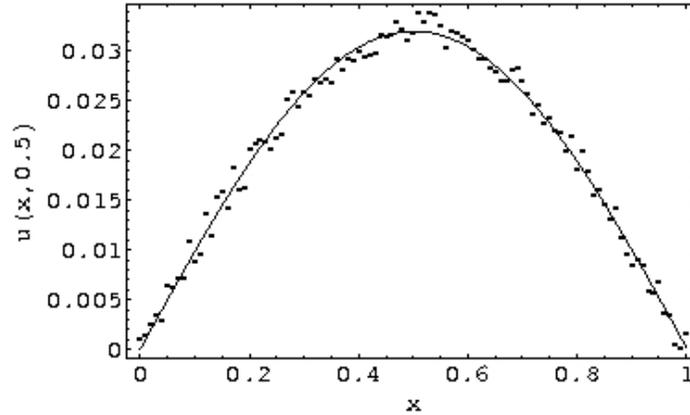


Figura 3: Ajuste y datos simulados.

En las ciencias fototérmicas frecuentemente se requiere ajustar datos al módulo o al argumento de una función compleja, por ejemplo, el campo de temperatura para una lámina de espesor L en presencia de una fuente de calor modulada a frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ y medida en la cara iluminada es (Salazar y Sánchez-Lavega 1998):

$$\Theta_{1D}(f) = \frac{F_0}{2k\sigma_1} \frac{1 + e^{-2\sigma L}}{1 - e^{-2\sigma L}} \quad (13)$$

donde

$$\sigma = (1+i) \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}, \quad (14)$$

F_0 es la cantidad de energía absorbida por el material por unidad de área por unidad de tiempo, α y k son, respectivamente, la difusividad y conductividad térmica de la lámina. Este campo puede ser considerado cuando la muestra es plana, y las dimensiones y perfil de la fuente son tales que es posible suponer que el calor fluye en la dirección axial únicamente. En caso contrario y suponiendo que la fuente es un laser en su modo TEM_{00} , es necesario considerar la propagación del calor en la dirección radial teniendo en cuenta las dimensiones y el perfil gaussiano del laser. Si esto es así, el campo de temperatura en el centro del perfil gaussiano estará dado por (Fabbri y Cernuschi, 1997)

$$\Theta_{3D}(f) = \frac{F_0 R^2}{k} \int_0^\infty \frac{e^{-(\lambda R/2)^2}}{s(\lambda)} \frac{1 + e^{-2s(\lambda)L}}{1 - e^{-2s(\lambda)L}} \lambda d\lambda, \quad (15)$$

donde

$$s(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 + \sigma^2}, \quad (16)$$

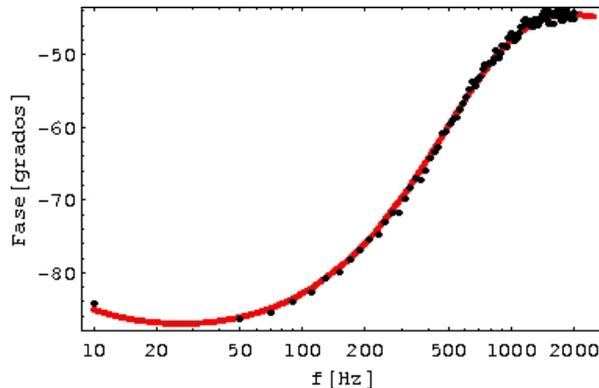


Figura 4: Fase de la señal IR de una lámina de grafito de $188 \mu\text{m}$ como función de la frecuencia. La línea sólida representa el mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación 15.

R es el radio efectivo del láser y λ es la variable del espacio de Hankel. Es precisamente a la fase de esta función, Ec. 15, a la que se desea ajustar los datos experimentales. La figura (4) muestra la fase de la señal IR tomada de una lámina de grafito de $188\mu m$ de espesor como función de la frecuencia de modulación. La línea representa el mejor ajuste a los datos experimentales.

Este ajuste se realizó en las versiones 5 y 6 de Mathematica, pero la versión 5 resultó mucho más eficiente (el ajuste se realizó en 3 minutos), mientras que en la versión 6 tomó cerca de una hora. Los cálculos se realizaron en una PC de escritorio con un procesador Intel Pentium Dual-Core de 2 gigas de Ram.

En el apéndice (C) presentamos el programa que

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Página web de WOLFRAM RESEARCH.

<http://documents.wolfram.com/applications/eda/FittingDataToLinearModelsByLeast-SquaresTechniques.html>

Burden, R. L. y Faires, J. D. (1985). *Análisis Numérico*. Grupo Editorial Iberoamericana. España;

Woodbury, K. A. (2003). *Inverse Engineering Handbook*. CRC Press.

S. Wolfram, *The Mathematica Book*, 5a. Edición, Wolfram Media 2003.

A. Salazar, A. Sánchez-Lavega, J. M. Terrón. *Effective thermal diffusivity of layered materials measured by modulated photothermal techniques*, J. Appl. Phys., 84 (6), 3031, (1998).

L. Fabbri, F. Cernuschi. *Finite laser beam size effects in thermal wave interferometry*, J. Appl. Phys., 82(11), 5305, (1997).

realiza el ajuste.

CONCLUSIONES

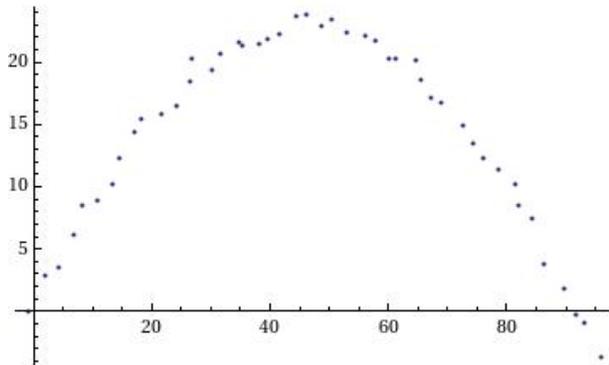
Se presentó una metodología para la realización de ajustes a modelos usando Mathematica. La eficiencia y simplicidad de los ajustes mostrados es considerable. No se requiere el conocimiento previo de la solución del modelo, por lo que el trabajo presentado es de gran utilidad práctica.

Se efectuaron ajustes a tres fenómenos físicos, dos de ellos muy sencillos presentados con fines explicativos, simulando datos experimentales y un tercero con datos obtenidos de las mediciones en la forma del campo de temperaturas en una placa de grafito, para la cual no se tenía la forma analítica a la cual ajustar.

APÉNDICE

A. Lanzamiento parabólico. La versión de Mathematica usada es la 6.

```
(*Esta parte simula datos experimentales*)
xt = 30. Cos[45 °] t;
yt = 30. Sin[45 °] t -  $\frac{g t^2}{2}$  /. g → 9.8;
r[xt_, yt_] = {xt, yt};
datax = Table[{t, xt + RandomReal[{-1, 1}]}, {t, 0, 4.5, 0.1}];
datay = data = Table[{t, yt + RandomReal[{-1, 1}]}, {t, 0, 4.5, 0.1}];
randdat = Thread[{datax[[All, 2]], datay[[All, 2]]];
lp = ListPlot[randdat, AxesOrigin → {0, 0}]
```



```
(*Solución de la ED (modelo)*)
f[vox_?NumberQ, voy_?NumberQ, g_?NumberQ] :=
  NDSolve[{{x''[t] == 0, y''[t] == -g}, y[0] == 0, x[0] == 0, y'[0] == voy, x'[0] == vox},
    {x, y}, {t, 0, 4.5}];
S[vox_?NumberQ, voy_?NumberQ, g_?NumberQ, t_] := {x[t], y[t]} /. f[vox, voy, g][[1]];
Sx[vox_?NumberQ, t_] := S[vox, 0, 0, t][[1]];
Sy[voy_?NumberQ, g_?NumberQ, t_] := S[0, voy, g, t][[2]];

(*Paquete para el cálculo numérico*)
<< NumericalCalculus`

(*Cálculo de las derivadas de la solución*)
Sxvox[vox_?NumberQ, t_] := ND[Sx[aux, t], {aux, 1}, vox, Terms → 10];
Syvoy[voy_?NumberQ, g_?NumberQ, t_] := ND[Sy[aux, g, t], {aux, 1}, voy, Terms → 10];
Syg[voy_?NumberQ, g_?NumberQ, t_] := ND[Sy[voy, aux, t], {aux, 1}, g, Terms → 10];
```

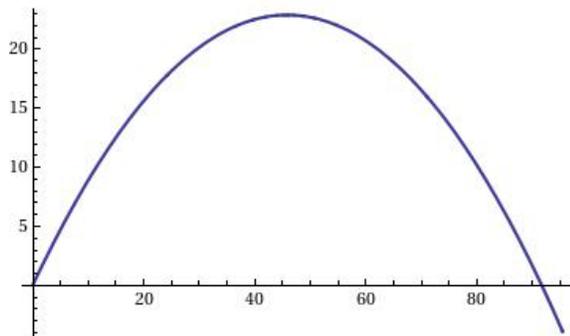
```
(*Asignación de derivadas utilizadas por NonlinearRegress*)
Derivative[1, 0][Sx] = Sxvox;
Derivative[1, 0, 0][Sy] = Syvoy;
Derivative[0, 1, 0][Sy] = Syg;
```

```
(*Paquete para ajustes no lineales*)
<< NonlinearRegression`
```

```
(*Ajuste-x*)
ajx = NonlinearRegress[datax, Sx[vox, t], {{vox, 15.1}}, t] // First
BestFitParameters -> {vox -> 21.2147}
```

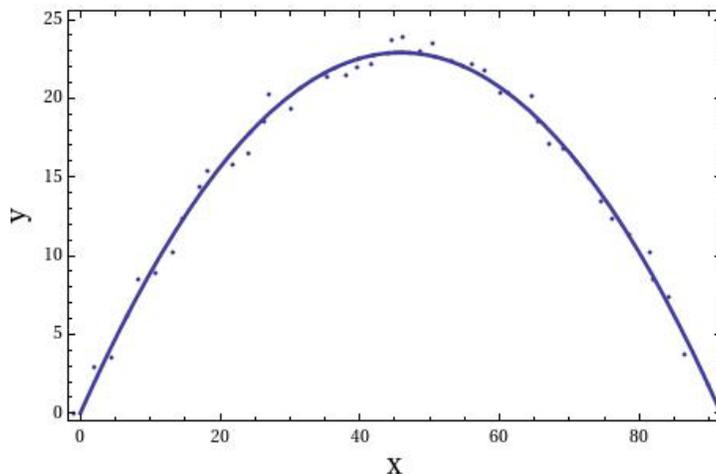
```
(*Ajuste-y*)
ajy = NonlinearRegress[datay, Sy[voy, g, t], {{voy, 15.1}, {g, 7}}, t] // First
BestFitParameters -> {voy -> 21.1809, g -> 9.79845}
```

```
grap = ParametricPlot[S[ajx[[2]][1, 2], ajy[[2]][1, 2], ajy[[2]][2, 2], k], {k, 0, 4.5},
  AspectRatio ->  $\frac{1}{\text{GoldenRatio}}$ , PlotStyle -> {Thickness[0.006]}, AxesOrigin -> {0, 0}]
```



(**Gráfica de los datos y el ajuste*)

```
amgr = Show[lp, grap, Frame -> True, AspectRatio ->  $\frac{1}{\text{GoldenRatio}}$ , PlotRange -> {{0, 90}, {0, 25}},
  FrameLabel -> {"X", "Y"}]
```



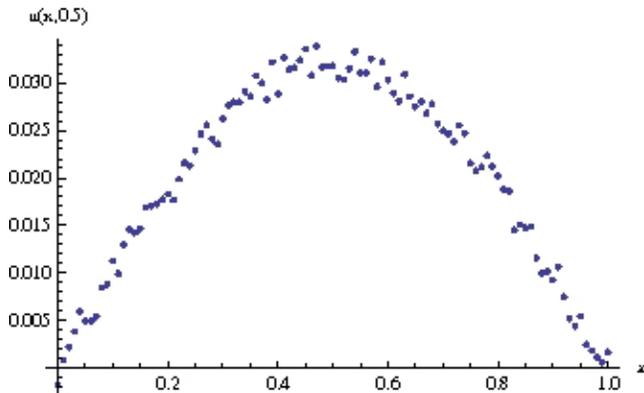
B. Proceso de difusión. La versión de Mathematica usada es la 5.

```
(*Generación de los datos*)
sol[n_] = (2) Integrate[(x^2) Sin[nPi x], {x, 0, 1}];
fdc[x_] = Sum[sol[j] Exp[-(D) (jPi)^2 t] Sin[jPi x], {j, 1, 10}] /. {t -> 1/2, D -> 1/2};
```

```
dat2 = Table[{k, fdc[k] + Random[Real, {-0.002, 0.002}]}, {k, 0, 1, .01}];
```

```
(*Paquete para ajustes no lineales*)
<< Statistics'NonlinearFit'
```

```
(*Gráfica de los datos*)
g2 = ListPlot[dat2, PlotJoined -> False, AxesLabel -> {x, "u(x,0.5)"}]
```



```
(*Solución*)
fajus[d_?NumberQ] := NDSolve[{D[u[x, t], t] == (d) D[u[x, t], {x, 2}],
  u[x, 0] == x^2, u[0, t] == 0, u[1, t] == Exp[-10000 t]}, u, {x, 0, 1}, {t, 0, 1}]
f[d_?NumberQ][x_, t_] := u[x, t] /. fajus[d][[1]]
```

```
(*Paquete necesario para cálculo numérico*)
<< NumericalMath'NLimit'
```

```
fd[d_?NumberQ][x_, t_] := ND[f[aux][x, t], {aux, 1}, d, Terms -> 10]
```

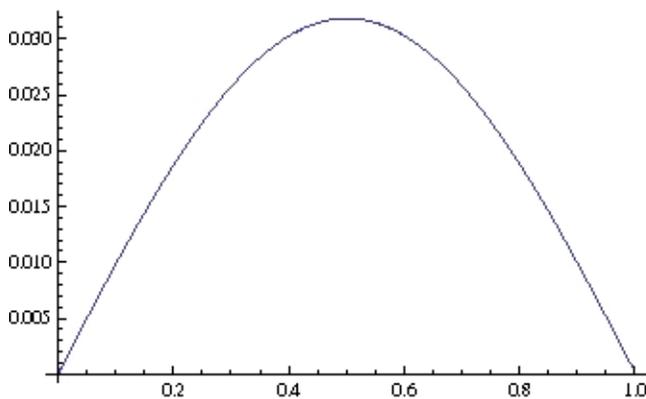
```
(*Asignación de derivadas que usará NonlinearRegress*)
f /: ∂d( f[d][x_, t_] ) := fd[d][x, t]
```

```
result = NonlinearRegress[dat2, f[d][x, .5], x, {d, .3}]
```

{BestFitParameters -> [d -> 0.502451], ParameterCITable ->	Estimate	Asymptotic SE	CI
d	0.502451	0.000869272	[0.500726, 0.504175]
	Model	DF	SumOfSq
		1	0.0509395
EstimatedVariance -> 1.12851 × 10 ⁻⁶ , ANOVATable ->	Error	100	0.000112851
	Uncorrected Total	101	0.0510523
	Corrected Total	100	0.0101387
			Curvature
AsymptoticCorrelationMatrix -> (1.), FitCurvatureTable ->	Max Intrinsic	0	}
	Max Parameter-Effects	0	
	95. % Confidence Region	0.504039	

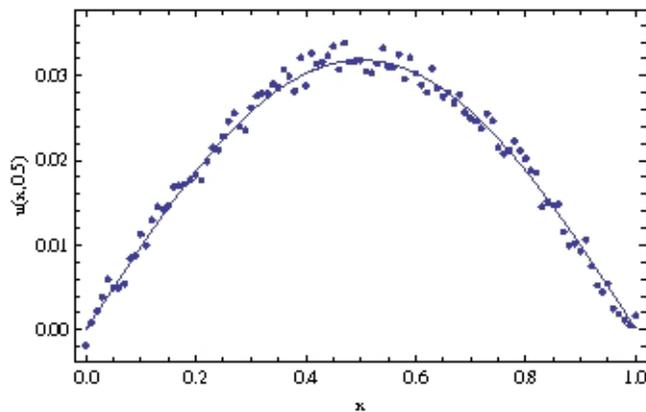
```
(*Gráfica de la solución obtenida*)
```

```
gpel = Plot[f[0.502451][x, .5], {x, 0, 1}]
```



```
(*Gráficas de la solución y los datos*)
```

```
gdataj = Show[g2, gpel, Frame -> True, Background -> RGBColor[1, 1, 1],
FrameLabel -> {" x ", "u(x,0.5)", None, None}, RotateLabel -> True,
AspectRatio -> 1/GoldenRatio, AxesOrigin -> {0, 0}, PlotRange -> {-0.003, .037}]
```



C. Calentamiento modulado de una lámina de grafito. La versión de Mathematica usada es la 5.0:

(*Función solución, se desea ajustar a su argumento*)

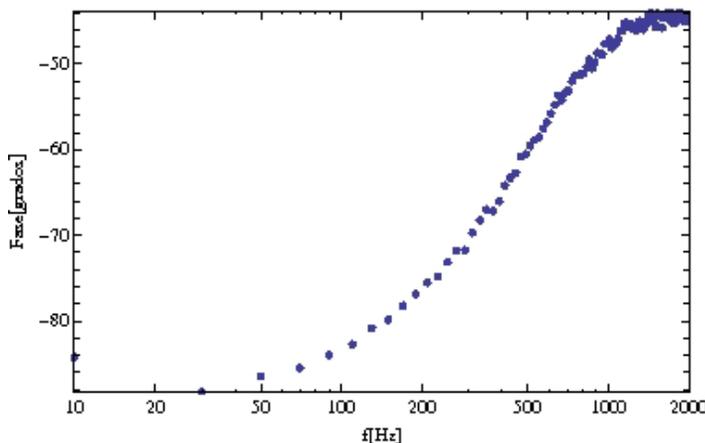
```
TS[r_?NumberQ, α_?NumberQ, R_?NumberQ, L_?NumberQ, f_?NumberQ, a_?NumberQ] :=
NIntegrate[
  Exp[-λ^2 R^2 / 4]
  / Sqrt[λ^2 + 2 π I f / α]
  (1 + Exp[-2 Sqrt[λ^2 + 2 π I f / α] L]
  / (1 - Exp[-2 Sqrt[λ^2 + 2 π I f / α] L]
  BesselJ[0, λ r] BesselJ[1, λ a], {λ, 0, ∞})]
```

(*Datos experimentales*)

```
DataL188 = {{10, -84.24'}, {30, -88.27'}, {50, -86.44'}, {70, -85.5'}, {90, -83.99'},
{110, -82.73'}, {130, -80.83'}, {150, -79.852'}, {170, -78.20'}, {190, -76.84'},
{210, -75.5072'}, {230, -74.8027'}, {250, -73.108'}, {270, -71.801'}, {290, -71.71'},
{310, -69.71'}, {330, -68.25'}, {350, -66.98'}, {370, -67.14'}, {390, -66.01'},
{410, -64.16'}, {430, -63.29'}, {450, -62.71'}, {470, -60.77'}, {490, -60.51'},
{510, -59.55'}, {530, -58.88'}, {550, -58.56'}, {570, -57.5'}, {590, -56.8'}, {610, -55.76'},
{630, -54.74'}, {650, -53.66'}, {670, -54.23'}, {690, -53.38'}, {710, -53.1'},
{730, -52.04'}, {750, -51.39'}, {770, -51.31'}, {790, -51.19'}, {810, -51.03'},
{830, -50.36'}, {850, -49.49'}, {870, -50.52'}, {890, -49.73'}, {910, -48.64'},
{930, -48.76'}, {950, -48.91'}, {970, -47.66'}, {990, -47.63'}, {1010, -47.1'},
{1030, -48.12'}, {1050, -47.42'}, {1070, -47.57'}, {1090, -47.06'}, {1110, -46.18'},
{1130, -46.13'}, {1150, -45.24'}, {1170, -45.16'}, {1190, -45.7'}, {1210, -45.26'},
{1230, -45.88'}, {1250, -45.56'}, {1270, -46.12'}, {1290, -45.84'}, {1310, -45.01'},
{1330, -45.7'}, {1350, -45.96'}, {1370, -45.57'}, {1390, -44.91'}, {1410, -44.43'},
{1430, -45.11'}, {1450, -44.04'}, {1470, -44.86'}, {1490, -45.26'}, {1510, -45.72'},
{1530, -44.11'}, {1550, -44.43'}, {1570, -44.19'}, {1590, -45.77'}, {1610, -44.65'},
{1630, -44.19'}, {1650, -44.55'}, {1670, -44.67'}, {1690, -43.84'}, {1710, -44.53'},
{1730, -44.55'}, {1750, -45.27'}, {1770, -45.29'}, {1790, -44.61'}, {1810, -44.83'},
{1830, -44.12'}, {1850, -43.88'}, {1870, -44.64'}, {1890, -44.57'}, {1910, -44.7'},
{1930, -45.04'}, {1950, -44.7'}, {1970, -44.97'}, {1990, -45.05'}, {2010, -44.32'}};
```

(*Paquete para graficar usando escala
logarítmica y gráfica de los datos experimentales*)

```
<< Graphics`Graphics`
G1 = LogLinearListPlot[DataL188, {PlotRange -> All, PlotStyle -> {PointSize[0.0125]},
Frame -> True, FrameLabel -> {"f[Hz]", "Fase[grados]"}, AspectRatio -> 1 / GoldenRatio}];
```



(*Cálculo numérico*)

```
<< NumericalMath`NLimit`
```

(*Para evitar warnings de deletreo*)

```
Off[General::spell1]
```

```
(*Función a ajustar(menos una constante, F0)*)
TP[r_?NumberQ, α_?NumberQ, R_?NumberQ, L_?NumberQ, f_?NumberQ, a_?NumberQ] :=
  180/Pi Arg[TS[r, α, R, L, f, a]]

(*Derivadas de la función anterior,
en realidad solo se requiere de la derivada respecto a α y a R*)
TPr[r_?NumberQ, α_?NumberQ, R_?NumberQ, L_?NumberQ, f_?NumberQ, a_?NumberQ] :=
  ND[TP[aux, α, R, L, f, a], {aux, 1}, r, Terms→10]

TPα[r_?NumberQ, α_?NumberQ, R_?NumberQ, L_?NumberQ, f_?NumberQ, a_?NumberQ] :=
  ND[TP[r, aux, R, L, f, a], {aux, 1}, α, Terms→10]

TPR[r_?NumberQ, α_?NumberQ, R_?NumberQ, L_?NumberQ, f_?NumberQ, a_?NumberQ] :=
  ND[TP[r, α, aux, L, f, a], {aux, 1}, R, Terms→10]

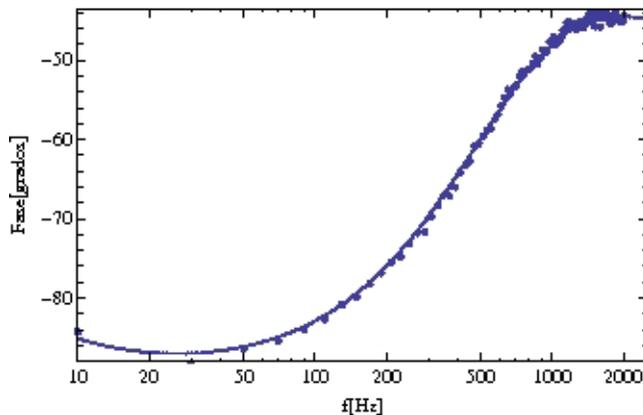
(*Asignación de las derivadas, aqui se instruye a Mathematica
sobre derivadas que requerirá para hacer los ajustes*)
Derivative[0, 1, 0, 0, 0, 0][TP] = TPα;
Derivative[0, 0, 1, 0, 0, 0][TP] = TPR;

(*Paquete para realizar ajustes*)
<< Statistics'NonlinearFit'

bfp = NonlinearRegress[DataL188,
  TP[0, α, R, 0.0188, f, .05]+F0, f, {{α, .2}, {R, .2}, {F0, 1}}] // First
BestFitParameters → {α → 0.551304, R → 0.612911, F0 → -1.05859}

(*Gráfica del ajuste y los datos experimentales*)
GFitt1 = LogLinearPlot[ $\left[ \frac{180}{\pi} \text{Arg}[TS[0, .55, .612, .0188, f, .05]] - 1.05, \right.$ 
  {f, 10, 2500}, PlotStyle → {Thickness[.01], Hue[1]}, Frame → True,
  FrameLabel → {"f[Hz]", "Fase[grados]"}, AspectRatio →  $\frac{1}{\text{GoldenRatio}}$ ];

GrafitoL188 = Show[GFitt1, G1]
```



Este documento debe citarse como:

Peñuñuri, F., Zambrano, M., Acosta, C., Zaragoza, N. (2010). Ajuste de datos a modelos físicos usando **Mathematica**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-1, pp 55-66, ISSN: 1665-529-X.

Materiales cementantes y concretos en las antiguas culturas americanas

Ramírez de Alba, H.¹, Vera Noguez, R.², Mejía López, M.³

Fecha de recepción: 24 de abril de 2010 – Fecha de aceptación: 20 de mayo de 2010

RESUMEN

Se dan a conocer algunos resultados de trabajos de investigación relacionados con los materiales cementantes desarrollados por culturas antiguas de América. Esto se hace con el objetivo de divulgar el desarrollo tan importante en el arte de construir que lograron esas culturas y también como un homenaje a la memoria del Profesor Raymundo Rivera Villarreal, pionero en México de los estudios sobre este tema. Con esta base, se rescatan y se comparan algunos resultados de investigaciones recientes, desarrolladas en la institución de adscripción de los autores, sobre el desarrollo y uso de materiales cementantes en la cultura Maya, en particular se dan a conocer argumentos sobre la posible construcción de un puente colgante de 180 m de longitud en la antigua ciudad de Yaxchilán. Como corolario, se destaca la importancia de esta línea de investigación.

Palabras clave: mayas, cemento, mortero, concreto, puzolanas, estructuras, puente.

Cementitious materials and concrete of ancient cultures in America

ABSTRACT

Some results of research projects on the development of cementitious materials in ancient cultures of America are presented. This is done to spread the important developments achieved by these cultures in the art of construction as well as a tribute in the memory of Professor Raymundo Rivera Villarreal, pioneer in Mexico on this field. With this base, results from recent research projects, done in the institution of the authors, on the development and use of cementitious material in the Maya culture are presented and compared. In particular, arguments on the possible construction of a pendant bridge of 180 m at the ancient city of Yaxchilan are presented. As a corollary, the importance of this line of research is remarked.

Keywords: mayas, cement, mortar, concrete, pozzolans, structures, bridge.

¹ Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México. CP. 50110 (hra@uaemex.mx)

² Maestro en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México. CP. 50110 (rvn@uaemex.mx)

³ Doctor en Arquitectura, Facultad de Arquitectura y Diseño, UAEM, Cerro de Coatepec S/N Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México. CP. 50110 (markusml@terra.es)

INTRODUCCIÓN

Resulta admirable para propios y extraños la gran riqueza constructiva que dejaron las culturas antiguas americanas antes de la llegada de los europeos, esto a pesar de que son relativamente pocos los restos que quedan como patrimonio de la humanidad. Muchos son los libros y artículos que se han escrito sobre los aspectos históricos, arqueológicos y antropológicos, pero no así sobre aspectos tecnológico-constructivos y menos aún de lo referente al desarrollo, fabricación y uso de los materiales cementantes. Por otro lado es cada vez más frecuente la participación de áreas técnicas en campos que se pensaban exclusivos de disciplinas sociales y humanísticas, como es el estudio de las culturas antiguas. Por ejemplo, el estudio de las técnicas constructivas y los materiales utilizados en el pasado ha permitido extender y completar el conocimiento del pasado de la humanidad. Los resultados han servido, por ejemplo, para establecer métodos adecuados de restauración de monumentos antiguos. Entre las culturas posiblemente más estudiadas en el sentido técnico mencionado, se pueden contar principalmente la egipcia, las de Mesopotamia, y por supuesto la griega y la romana, mientras que son pocos los estudios de este tipo sobre las culturas americanas del pasado.

Este trabajo tiene como objetivo divulgar algunos resultados de trabajos relacionados con el tema del desarrollo de materiales cementantes y concretos en diversos sitios arqueológicos para destacar los adelantos tan importantes que lograron las culturas antiguas en el arte de construir. Como parte sobresaliente se hace mención a trabajos hechos por el Dr. Raymundo Rivera Villarreal, como pionero de este tema y como un sencillo pero sentido homenaje a la memoria del investigador, Profesor Emérito de la Facultad de Ingeniería de la UANL, miembro *Fellow* y honorario del Instituto Americano del Concreto (ACI) y entre muchos otros reconocimientos ganador del Premio Fundación ICA a la Docencia en Ingeniería Civil 1998.

Con los datos presentados se hace ver la importancia de esta línea de investigación y se presentan propuestas generales para su continuación.

El extraordinario concreto prehispánico en México

Con el título de este encabezado el Dr. Raymundo Rivera Villarreal escribió una serie de artículos en la Revista Ciencia UANL que describen y resumen muchos años de investigación, en seguida se tratará de hacer una descripción de sus principales propuestas y hallazgos.

Parte I. Lechadas, pastas y morteros (Rivera, 2000a)

En Comalcalco, Tabasco, los constructores al carecer de bancos de piedra cercanos desarrollaron la construcción de pirámides, muros y otros componentes con ladrillos (comúnmente llamados tabiques) unidos con morteros de cal adicionados con materiales puzolánicos. En todas las construcciones de pirámides y en particular los muros, los ladrillos se encuentran unidos con mortero de cal; en las paredes verticales los ladrillos fueron cubiertos con estuco de pasta de cal mezclada con pequeños fragmentos de concha. El autor encontró que no obstante que las pastas y los morteros tenían aproximadamente la misma composición en cuanto las cantidades de calcio y magnesio, existía un factor distinto que le impartía alta resistencia y dureza. Señala que Littman (1958) estableció la adición de algún material que alteraba el crecimiento de los cristales durante el curado del mortero, material que disminuía en forma importante la porosidad y aumentaba, por tanto, la densidad. En sus estudios iniciados en 1992 Rivera concluyó que los cristales no identificados eran precisamente partículas de nefelina y diópside, que son silicatos complejos alcalinos característicos de una reacción puzolánica. En su investigación asegura que en el proceso de nixtamalización del maíz, para hacer la masa para las tortillas, se produce el nejayote que contiene la cal convertida en hidróxido de calcio, que al entrar en contacto con los suelos volcánicos los endurecía progresivamente. Este fenómeno, asegura el autor, fue observado por los antiguos pobladores de América y lo utilizaron para producir morteros más resistentes a la compresión como los encontrados en Comalcalco y El Tajín. Reporta los resultados de pruebas físicas de muestras de mortero del área conocida como Tajín Chico, encontrando un promedio de resistencia a compresión de 4.4 MPa (44 kg/cm²); módulo elástico de 1740 MPa (17360 kg/cm²) y módulo de Poisson de 0.045. De esta parte el autor concluye que el descubrimiento y el desarrollo de la cal en Mesoamérica como material de construcción, estabilizó e impulsó enormemente la cultura en sus diversas formas. Además de establecer una infraestructura firme, con el uso de la cal coloreada (pintura al fresco) se ha podido conocer su historia y costumbres. Asegura que el descubrimiento del mortero puzolánico produjo un material similar al que actualmente se obtiene con cementos hidráulicos.

Parte II. Desarrollo de los techos planos de concreto (Rivera, 2000b)

En esta parte el autor establece que los ingenieros constructores de la ciudad de El Tajín, analizaron las técnicas para construir techos desde diversos puntos de vista, para que fueran funcionales, de fácil construcción y, sobre todo, esperando que fueran durables al severo medio ambiente de la región,

caracterizado por clima cálido húmedo, con abundantes lluvias y al inicio del otoño grandes tormentas y los frecuentes huracanes. De ahí el nombre de El Tajín, que significa huracán, trueno, rayo o relámpago. Asegura que cuando dispusieron de piedra pómez, localizada en el lugar conocido actualmente como José Espinal, a solamente 6 km de El Tajín, lograron construir techos planos de concreto ligero. Su trabajo describe en particular los estudios hechos a la losa plana del techo del edificio Y. Mediante estudios geológicos y estratigráficos se estableció que el material utilizado para la fabricación del mortero y el concreto está constituido por fragmentos de rocas piroclásticas, micritas calcarenitas, rocas volcánicas y tobas vítreas embebidas en una pasta compuesta por un material arcilloso y micrita. Mediante microscopía, se descubrió la presencia de una estructura vidriosa y las inclusiones fluidas atrapadas en las vesículas confirmaron el origen volcánico del agregado grueso, donde un rápido enfriamiento del material extraído condujo a la formación de vidrio. El color muy claro y la baja densidad aparente del concreto les indicó una composición esquelética del agregado grueso. Como la mayoría de las estructuras internas observadas son comunes, tanto para el agregado como para el mortero, se pudo inferir que el agregado y los componentes puzolánicos del mortero tienen origen similar. Posiblemente los componentes del mortero fueron triturados, es decir, procesados antes de ser colocados con el agregado. Al comparar con estudios similares de materiales tipo concreto utilizados en la construcción de caminos en Grecia se observó similitud en la microestructura del material utilizado en esta losa, lo que hace pensar en tecnologías similares pero independientes.

Parte III. El cálculo mineralógico aplicado a monumentos antiguos (Rivera, 2001)

En esta parte el autor establece que el análisis mineralógico se ha aplicado a suelos arcillosos, después se transfirió a los concretos, morteros y rocas. Propone que la utilización de la informática ha permitido efectuar los cálculos iterativos y el método ha sido adaptado a los materiales antiguos: piedras, morteros y recubrimientos, para reconstruir la historia de esos materiales (formulación y evolución a través del tiempo). El cálculo puede servir en particular para establecer la dicotomía entre lo calcáreo o calizo del agregado y la carbonatación de la cal del mortero. Los resultados a la fecha muestran la variedad de las formulaciones y permiten detectar a través del tiempo un efecto puzolánico en los morteros antiguos, permitiendo incluso discriminar los casos en donde este efecto es intencional de aquellos donde es fortuito. Se establece que el razonamiento se asemeja

bastante a aquel que permite reconstruir la composición del cemento desconocido de un concreto moderno a partir de un ataque con solución de ácido nítrico. Efectivamente, para el concreto, el ácido nítrico diluido en relación 1/50, diluye a la calcita, a la dolomita y a los compuestos insolubles que se hayan desarrollado en una reacción puzolánica, esto sucederá a condición de haber sometido previamente la muestra a un calentamiento moderado (500 °C) para mineralizar los posibles productos orgánicos. Al seguir explicando el método, se establece que aunque la sílice no es la única causante del desarrollo de la actividad puzolánica, en el estado actual de conocimientos la relación más utilizada es la llamada Puzolanidad que se define como la suma de sílice (SiO), alúmina (Al₂O₃) y óxido férrico (Fe₂O₃) dividida entre la suma de cal (CaO) y magnesio (MgO). Se concluye que el análisis mineralógico de los morteros es una técnica relativamente ardua pero muy rica en información, al aplicarla a las muestras de materiales de El Tajín pudo concluir que la actividad puzolánica fue intencional.

Sin pretender ni mucho menos haber abarcado la totalidad del trabajo del Profesor Raymundo Rivera, sino solamente la presentación algunos ejemplos, a continuación se resumen, a la luz de los trabajos antes descritos, algunos resultados de investigaciones desarrolladas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) sobre materiales cementantes en la cultura Maya, los resultados completos se podrán consultar en las referencias. Se estudiaron aspectos de ingeniería y arquitectura, aquí solamente se tratan los primeros. Se aprovecha también para incluir en este trabajo una nueva discusión de los resultados que así lo ameritan.

Materiales cementantes en la cultura Maya

Propiedades químicas

Con el permiso y la supervisión del Instituto Nacional de Antropología e Historia, INHA, fueron obtenidas muestras de cuatro zonas arqueológicas mayas: Comalcalco, Toniná, Palenque y Yaxchilán. El primer propósito fue conocer si existían diferencias en la composición química del cemento utilizado en las cuatro regiones. Con la participación de investigadores del Instituto de Investigaciones Nucleares, ININ, se hizo la caracterización microestructural, el análisis químico elemental, así como análisis de difracción y espectrografía. Se encontró el promedio de contenido de sílice de 4.56% con rango de 3.83%; contenido de aluminio promedio de 3.04% y rango de 2.64%; contenido de calcio promedio de 31.34% con rango de 18.95%; contenido de hierro promedio de 2.82% con rango de 1.22%

(Díaz et al, 2001) La variabilidad observada en los componentes que más influyen en las propiedades cementantes, indica que la fabricación del cemento antiguo no se puede considerar estandarizada, sin embargo se identifican patrones comunes lo que sugiere la existencia de reglas empíricas usadas de forma común para la fabricación del cemento, probablemente basadas en la determinación empírica de la densidad, dureza y color de la materia prima. Se observan contenidos significativos de sílice y aluminio por lo que resulta probable el uso de inclusiones particulares para cada zona como cenizas y arcilla calcinada, estas inclusiones tenían por objeto generar una actividad puzolánica. La intención de lograr que la dureza se incremente con el paso del tiempo es clara. Lo anterior se refuerza al analizar los contenidos de óxidos que permiten ahora calcular la relación de puzolanidad, como se definió anteriormente, y que resultó de 0.107 en promedio con rango de 0.021. Tomando en cuenta lo reportado por Rivera Villarreal, la actividad puzolánica fue intencional. Del análisis de difracción por rayos X no se encontró presencia significativa de silicatos di-cálcicos y tri-cálcicos que son componentes básicos de los cementos modernos, por lo que se concluye que la temperatura de los hornos utilizados por los mayas para producir sus materiales cementantes fue al menos de 900 °C que es la necesaria para la separación del dióxido de carbono pero no mayor que 1100 °C que es la necesaria para la formación de los silicatos.

Propiedades mecánicas

Debido a las restricciones oficiales solamente fue posible obtener muestras del tamaño requerido para hacer pruebas físicas de mortero y concreto de Yaxchilán y Palenque. Del primer sitio, algunas muestras de mortero y concreto se obtuvieron de un muro colapsado del Templo No 6 (ver Figura1), así como de lo que se supone fue el estribo de apoyo del lado norte de un puente. Algunas muestras adicionales de mortero y de concreto se obtuvieron de losas de piso en Palenque. Fue posible labrar ocho especímenes cúbicos de concreto con lado aproximado de 61 mm, primero se midió la velocidad de pulso en dos direcciones perpendiculares y después se ensayaron a compresión axial hasta la falla, con fines comparativos se probó un cubo con las mismas dimensiones hecho con agregados de Yaxchilán y cemento Portland moderno (Ramírez et al, 2000). Se observó que la velocidad de pulso fue significativamente diferente en las dos direcciones de medición (promedio en la dirección X de 4.16 cm/s por 10^5 , y en la dirección Y de 3.3 cm/s por 10^5) lo cual se atribuye a la formación de microgrietas en la dirección vertical original en que estaba colocado el material, debido al efecto del agua y la temperatura en por lo menos 15 siglos. La resistencia a compresión promedio resultó de 9.2 MPa (93 kg/cm²) que resulta 53% del correspondiente al espécimen hecho con cemento Portland, el módulo de elasticidad fue medido solamente en un espécimen resultando de 3690 MPa (37000 kg/cm²) que representa el 18% del espécimen hecho con cemento moderno.



Figura1. Fragmento de concreto de Yaxchilán.

Cinco especímenes adicionales de mortero y concreto con dimensiones variables se utilizaron para medir la resistencia a tensión por flexión de acuerdo a la

prueba estándar, para esto los especímenes de material antiguo se embebieron dentro de elementos prismáticos de concreto, en la entrecara se aplicó

pegamento epóxico, en todos los casos la sección de falla incluyó al material antiguo. La resistencia a tensión promedio para mortero fue de 0.66 MPa (6.6 kg/cm²) y para concreto de 1.82 MPa (18 kg/cm²), estos valores resultan significativos al tomar en cuenta que de forma aproximada la resistencia a tensión es el 10% de la correspondiente a compresión (Díaz, 2000)

Las principales observaciones de esta parte son: a) los materiales de construcción artificiales que desarrollaron los mayas han demostrado tener durabilidad excepcional al haber sobrevivido por más de 1500 años bajo condiciones atmosféricas severas, y aún así muestran resistencias significativas al comparar con materiales modernos, b) los valores de resistencia son mayores que los reportados por Rivera (2000) al estudiar concretos ligeros en el Tajín, c) las propiedades mecánicas encontradas, aún sin considerar los efectos del deterioro, son compatibles con los usos estructurales originales, ya que considerando las dimensiones y la masa de las estructuras observadas durante los viajes de estudio, se estima un esfuerzo máximo debido a las cargas actuantes de 2.5 MPa (25 kg/cm²); se puede agregar como que las construcciones mayas contaban con margen de seguridad adecuado a sus usos, y d) se propuso un procedimiento para reproducir el cemento usado por los mayas a base de cal industrial y polvo de arcilla calcinada, las pruebas en especímenes de concreto similares a las antes reportadas permitieron establecer un promedio de 21 MPa (210 kg/cm²) que resulta compatible con los materiales antiguos.

El caso del Puente de Yaxchilán

En un artículo publicado en 1995, O’Kon, asegura haber demostrado que los mayas lograron construir en Yaxchilán, en el siglo VII, un puente colgante de 180 metros de longitud para cruzar el río Usumacinta, apoyado en dos estribos extremos y dos pilas intermedias hechas de mampostería con núcleo de concreto. Siendo así, se puede considerar el puente más largo del mundo en su tiempo, marca que perduró por más de 700 años. Este investigador se basó en estudios fotográficos aéreos que muestran la perfecta alineación de los componentes, así como el estudio de los materiales de los restos que quedan, principalmente un promontorio de mampostería que sobresale de la superficie del río solamente en la época de estiaje y que el mencionado autor identificó como los restos de una de las pilas de soporte del puente.

Sin embargo no existe consenso sobre la existencia del puente pues algunos arqueólogos explican los restos existentes de otras maneras, por ejemplo como retenes de aduana en el tráfico fluvial de mercancías o un faro pues en esa zona el río hace una amplia curva. Al ver que se tienen argumentos a favor y en contra, se decidió, bajo la hipótesis de que el puente realmente existió, investigar el tamaño de los componentes mediante el uso de fórmulas convencionales de resistencia de materiales y el conjunto se estudió por medio de un modelo analítico que permitió conocer el comportamiento estructural para cargas permanentes del peso propio, las cargas variables por el paso de las personas y sus mercancías, así como el efecto de cargas accidentales de viento, sismo y avenidas extraordinarias. Las propiedades de la mampostería y del concreto se basaron en los resultados de las pruebas antes reportadas, en lo correspondiente a otros materiales, se recurrió a lo reportado en otros estudios para materiales actuales similares. De esta manera se logró estimar las dimensiones generales de los principales componentes, como se resume a continuación (Ramírez et al, 2000), (Pérez y Manjarrez, 2001).

Calzada

Se construyó en módulos de 2 a 3.5 metros de largo por seis de ancho que corresponde al ancho del puente según sugieren estudios previos. Las traviesas principales de madera de chicozapote de aproximadamente 150 mm de diámetro dispuestos a cada metro o metro y medio en los que se recibía la plataforma de varas de poco diámetro de ésta y otras especies amarradas longitudinalmente con fibras de henequén (sisal). Tomando en cuenta el arreglo mencionado se tiene un peso unitario de 1.8 kN/m (183 kg/m) que representa una estructura relativamente ligera.

Cables secundarios

Tomando en cuenta el arreglo en módulos, se supone que se debieron colocar 16 parejas de cables en el tramo central y 20 en cada uno de los claros extremos. La observación de la fabricación artesanal de mecates de henequén indica que lo común es que cada unidad sea de 5 mm de diámetro aproximadamente con resistencia individual estimada de 1.4 kN (147 kg), la fuerza máxima factorizada (1.2 para carga muerta y 1.6 para carga viva) resultó de 61.5 kN (6270 kg), por lo que el cálculo indica que se debieron usar aproximadamente 44 mecates de 5 mm para formar cada cable con diámetro de 50 mm.

Cable principal

No se pudo contar con datos que permitan calcular la flecha de los cables por lo que se realizaron cálculos

para diferentes valores entre 7 y 11 metros, resultando con el mismo criterio anterior para el caso más desfavorable un cable formado por 155 mecates individuales para un diámetro exterior aproximado de 150 mm.

Pilas

Tomando en cuenta las dimensiones de los restos existentes, se puede suponer que en la base las pilas tenían sección aproximadamente rectangular de 18 m en el sentido de la corriente y 13 m en sentido transversal, altura de 25 m desde el lecho del río a la calzada. La sección se reduce de forma piramidal hacia arriba, de tal manera que a la altura de la calzada se tenían 10 por 5 metros. Como coronamiento, siguiendo las sugerencias de O'Kon, había un arco para apoyar los cables y servir de paso.

El esfuerzo máximo en la base de la pila tomando en cuenta la condición más desfavorable de carga (peso propio, carga viva y sismo) es de 1.01 MPa (10.3 kg/cm²) que resulta inferior a la resistencia obtenida de 9.2 MPa (93.7 kg/cm²), o sea que las pilas contaban con resistencia sobrada.

Estribos

Los restos del estribo norte están bien conservados no así el del lado sur. El que se pudo observar consiste de una plataforma de planta cuadrada como de 20 m por lado y aproximadamente 6 m de altura con escalinatas y alfardas del lado de acceso y un zampeado hacia la rivera. En este caso si hay evidencia clara de que fueron hechos con concreto vaciado en el lugar. Estos elementos son muy masivos por lo que su resistencia, como en el caso anterior, es sobrada.

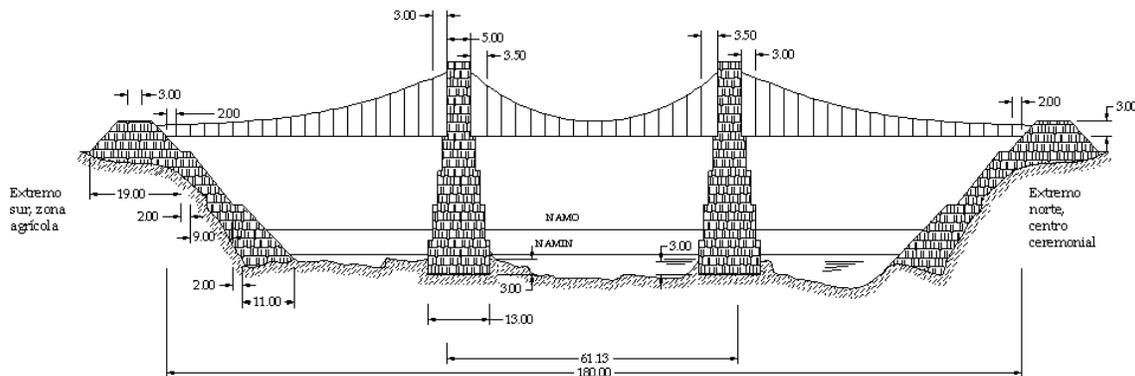


Figura 2. Dimensiones del puente de Yaxchilán.

Los resultados del análisis de cargas con el modelo analítico utilizado indican para el conjunto niveles de esfuerzos y deformaciones tolerables por lo que se concluyó que el puente de Yaxchilán debió contar con dimensiones que corresponden de forma gruesa a las aquí reportadas y que esquemáticamente se representan en la Figura 2. Se establece que definitivamente si pudo ser construido con los materiales y técnicas disponibles en el periodo clásico de la cultura Maya. Se opina que es posible su reconstrucción a un costo aproximado de 30 millones de pesos, cantidad que sería relativamente fácil de recuperar por el atractivo turístico que representaría para la región como valor agregado a las zonas arqueológicas de Yaxchilán y Bonampak que tienen altos índices de visitantes nacionales y extranjeros (Ramírez et al, 2002b)

Observaciones finales

Por ser este artículo principalmente de divulgación, se creyó conveniente enfatizar sobre algunos de los aspectos más importantes que se trataron:

Pocos son los estudios técnicos que se han hecho sobre los materiales de construcción autóctonos, muchos de ellos se deben a investigadores extranjeros.

El Dr. Raymundo Rivera Villarreal, realizó trabajos importantes en esta línea de investigación que se consideran pioneros, además de difundir sus resultados en medios y foros nacionales e internacionales. En este escrito se presentaron algunos de sus hallazgos como un homenaje a su memoria y una invitación a los investigadores a considerar su participación en esta línea.

Se discutieron resultados de investigaciones recientes en materiales y estructuras desarrollados en la cultura Maya, principalmente la probable existencia de un puente colgante de gran longitud en Yaxchilán, así como la propuesta para su posible reconstrucción. Se considera importante la continuación de esta línea de investigación, no sólo para rescatar los conocimientos y logros de las culturas antiguas de las que somos herederos, sino también con fines prácticos

para encontrar formas adecuadas de rescate y preservación de los monumentos y, por ejemplo, proponer con enfoques probabilistas y de riesgo programas de mantenimiento y, en general, aportar criterios técnicos para trabajos conjuntos multidisciplinarios.

Corolario

Se mencionan como ejemplo algunos sitios potenciales donde parece oportuno y valioso aportar conocimientos mediante estudios especializados de los materiales y técnicas de construcción, pero se acepta que es muy posible que se puedan proponer otros enfoques y métodos que sean diferentes a los aquí expuestos.

1. Malinalco en el Estado de México. Con la presencia de varios pisos y pavimentos de mortero de gran dureza que han resistido el paso de los años y también en los últimos tiempos de un número importante de turistas pues la mayoría de estos elementos están abiertos al paso de las personas.
2. Pirámide del Fuego Nuevo, en lo alto del Cerro de la Estrella, Iztapalapa, D.F. También en este caso se tienen pisos de concreto supuestamente vaciado en el lugar que muestra agregados de tezontle y polvo de este mismo material probablemente para lograr mayor dureza.
3. Conjunto del Templo Mayor en la Ciudad de México. Entre diferentes etapas constructivas se observan grandes losas de un material parecido al concreto moderno, con agregado grueso de piedra pumítica y agregado fino de piedra triturada de tezontle adicionado con ceniza volcánica supuestamente con propiedades puzolánicas. Las losas tienen un espesor bastante uniforme de aproximadamente 180 mm, no se tiene en el lugar alguna explicación sobre estas losas para informar al visitante, aspecto que parece importante subsanar.
4. Tlalmanalco en el Estado de México. En la parte posterior de la capilla abierta, que es monumento

colonial de primera magnitud, se observan túmulos de piedra volcánica unida con mortero de gran dureza hecho con mezcla de agregados pumíticos y de tezontle, así como material arcilloso pulverizado. Se puede suponer que son restos de construcciones prehispánicas, además, que las construcciones coloniales, incluyendo el templo, el convento y la capilla abierta se cimentaron parcialmente sobre los restos de las construcciones antiguas.

5. Cempoala en el Estado de Veracruz. En este sitio arqueológico destaca el uso de morteros muy resistentes para unir las piedras redondeadas, que son grandes boleos muy abundantes en la zona. Con estas piedras están hechas las murallas y las pirámides. Parece obvio pensar que la elección de los boleos como principal material de construcción obligó a los constructores a desarrollar un mortero de características apropiadas para lograr la estabilidad de sus construcciones. En este caso el agregado principal parece ser arena de río, posiblemente con adición de ceniza volcánica. También se observa el uso de morteros, de diferente composición y dureza, en pisos y estucos para recubrir sus pirámides y decorarlas. Resulta curioso recordar que Bernal Díaz en su crónica de la conquista menciona que varios españoles al ver las pirámides, *cués* según las nombraban ellos, que resplandecían de blancura creyeron que estaban hechas de plata pura.
6. En varios sitios mayas como Palenque, Toniná, Yaxchilán, Comalcalco, Uxmal, Kabah y seguramente muchos otros, es evidente el uso de estucos, morteros y concretos que usaron como elementos básicos de su arquitectura monumental, pero también en construcciones de ingeniería civil como grandes depósitos de agua llamados chultunes; caminos de gran longitud denominados sacbé (singular) o sacbeod (plural), muelles para puertos, así como, pilas y estribos para puentes colgantes (Ramírez et al, 2002a).

REFERENCIAS

Díaz-Coutiño, H, Ramírez de Alba, H. y Pérez, R. (2001) *Aspectos Químicos y estructurales de la matriz cementante utilizada en la cultura maya*. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Vol. II, No.3, pp139-146 julio-septiembre.

Díaz Coutiño, Heriberto (2000) Estudio del Concreto Maya. Tesis de Doctorado en Ingeniería-Estructuras. Facultad de Ingeniería, UAEM

Littmann, E.R. (1958) *Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos: Comalcalco, Part II*. Ancient Antiquity, Vol. 23, No. 3, pp 292, 296.

O’Kon, J.A. (1995) *Bridge to the past*. Civil Engineering, pp 62-65

Pérez Morales, J. y Manjarrez Garduño, L.E. (2001) *Estudio de una estructura histórica, el puente colgante en la antigua ciudad Maya de Yaxchilán*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, UAEM

Ramírez de Alba, H., Pérez Campos, R. y Díaz-Coutiño, H. (2000) *El cemento y el concreto de los mayas*. Ciencia Ergo Sum, Vol. 6 No. 3, pp 275-284, Noviembre 1999-febrero 2000.

Ramírez de Alba, H., Pérez, J. y Manjarrez, L. (2002a) *Aspectos sobre la ingeniería de construcción de los Mayas*. Información tecnológica. Revista Internacional. CIT. Vol.13. No 3, pp 131-136

Ramírez de alba, H., Pérez Morales J. y Manjarrez Garduño L. (2002b) El Puente de Yaxchilán prodigio de los Mayas. ¿Cómo Ves? Revista de Divulgación de la Ciencia, Universidad Nacional Autónoma de México. Año 4. No 34

Rivera Villarreal, Raymundo (2000a) *El extraordinario concreto prehispánico en México. Parte I. Lechadas pastas y morteros*. CIENCIA UANL/ vol.III, No 2, pp 133-138, abril-junio.

Rivera Villarreal, Raymundo (2000b) *El extraordinario concreto prehispánico en México. Parte II. Desarrollo de los techos planos de concreto*. CIENCIA UANL/ vol.III, No 3, pp247-253, julio-septiembre.

Rivera Villarreal, Raymundo (2001) *El extraordinario concreto prehispánico en México. Parte III. El cálculo mineralógico aplicado a monumentos antiguos*. CIENCIA UANL/ vol. IV, No 1, pp 12-19, enero- marzo.

Este documento debe citarse como:

Ramírez de Alba, H., Vera, R., Mejía, M. (2010). **Materiales cementantes y concretos en las antiguas culturas americanas**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-1, pp 67-74, ISSN: 1665-529-X.