



**ESTUDIOS AMBIENTALES
Y RIESGOS NATURALES**
Aportaciones al sureste de México II

Carlos García (coordinador)

Colección
Jaguar



UNICACH

Estudios ambientales y riesgos naturales

Aportaciones al sureste de México II

Carlos García Lara
(coordinador)



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
2010



El jaguar es uno de las especies más representativas de la fauna chiapaneca y el símbolo por antonomasia de la biodiversidad en nuestro estado. Bajo su nombre están contenidos todos los títulos pertenecientes al ámbito de las ciencias naturales producidos en la universidad.

Primera edición: 2011

D. R. ©2009. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
1ª Avenida Sur Poniente número 1460
C. P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
www.unicach.edu.mx
editorial@unicach.edu.mx

ISBN

Diseño de la colección: Manuel Cunjamá

Diseño de portada: Ana Laura Gordillo Ponce

Impreso en México

Estudios ambientales y riesgos naturales

Aportaciones al sureste de México II

Carlos García Lara
(coordinador)

**Colección
Jaguar**



UNICACH

CUERPO ACADÉMICO
ESTUDIOS AMBIENTALES Y RIESGOS NATURALES

Representante
Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Líder la LGAC: Riesgos Naturales y Ambientales
Carlos Narcía López

Integrantes
Raúl González Herrera
Hugo Alejandro Nájera Aguilar
Carlos Manuel García Lara

Colaboradores
Rodolfo José Palacios Silva
Pedro Vera Toledo

Índice

Lista de figuras	12
Lista de tablas y cuadros	16
Lista de fotos.....	17
Prólogo.....	19
Presentación	21
I. Efecto topográfico en el comportamiento de flujos de viento y sus implicaciones en el diseño de estructuras flexibles	25
<i>Raúl González Herrera</i>	
Resumen	25
Modificación del flujo de viento por la topografía	25
Efectos generales de la topografía	26
Multiplicadores topográficos	29
Colinas de poca pendiente.....	30
Colinas, acantilados y escarpados	31
Efecto de la topografía en los ciclones tropicales, huracanes y tormentas eléctricas	33
Cambios de rugosidad del terreno.....	34
Otras fuentes para obtener datos del fenómeno	36
Normas de diseño por viento en Chiapas	37
Ejemplo de diseño comparativo de distintas normas	38
Comentarios finales	51
Agradecimientos.....	52
Bibliografía	53
II. Sismicidad registrada en la estación acelerométrica de la UNICACH	55
<i>Carlos Narcía-López</i>	
Introducción	55
Marco tectónico	55
Características del equipo de monitoreo	59

Datos.....	62
Análisis	64
Conclusiones	67
Agradecimientos.....	68
Bibliografía	69

III. Evaluación del riesgo a la erosión de suelo en la microcuenca del río Francés..... 71

*Rodolfo Palacios-Silva,
Sergio López-Mendoza y
Alondra Gil-Ríos*

Introducción	71
Erosión del suelo.....	72
Modelación del riesgo a la erosión de suelo por actividad pluvial.....	73
Objetivos del capítulo.....	74
Zona de estudio	75
Localización.....	75
Descripción del paisaje	75
Metodología	80
Ecuación universal para estimar la pérdida de suelo (USLE).....	80
Adaptación de la USLE al Sistema de Información Geográfica.....	81
Erosividad de la lluvia (Factor R).....	82
Erodabilidad del suelo (Factor K)	82
Topografía (Factor LS).....	84
Cobertura vegetal (Factor C).....	87
Prácticas de manejo (Factor P).....	87
Adaptación del binomio USLE-GIS a un modelo de riesgo.....	87
Resultados y discusión	89
Consideraciones finales.....	96
Bibliografía	97

IV. Disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, estudio de un caso en Chiapas..... 101

Pedro Vera Toledo

Resumen.....	101
--------------	-----

Introducción	101
Legislación aplicable.....	103
Ubicación y descripción de las condiciones generales del sitio de estudio	105
Dimensiones del sitio.....	106
Descripción de la operación.....	107
Horario	107
Personal, responsabilidades y funciones asignadas	109
Asignación del sitio de descarga	112
Disposición de residuos	112
Maquinaria y equipo	114
Instalaciones	115
Volumen de residuos	116
Evaluación del sitio con respecto a la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARANAT-2003.....	117
Diseño y conformación del sitio.....	119
Control del biogás	119
Composición de la basura.....	120
Contenido de humedad	121
Nutrientes.....	121
Mezcla	121
Cobertura	121
Compactación.....	122
Etapa 1.....	122
Etapa 2	122
Etapa 3	123
Etapa 4.....	123
Etapa 5	123
Rendimiento	124
Descripción del pozo de venteo.....	125
Planteamiento del sistema:	126
Conformación del sitio	130
Conclusiones y recomendaciones.....	131
Bibliografía	133

V. Alternativas de tratamiento fisicoquímico en lixiviados recalcitrantes y su manejo en el territorio nacional	137
<i>Hugo Alejandro Nájera Aguilar</i>	
I. Generalidades de los lixiviados.....	137
Origen y definición de los lixiviados.....	137
Tipos de lixiviados.....	139
Repercusiones al ambiente	142
II. Alternativas de tratamiento.....	142
Tratamientos fisicoquímicos	144
Coagulación-floculación.....	144
Adsorción con carbón activado	145
Precipitación química	146
Filtración con membrana.....	147
III. Tratamiento de lixiviados en el territorio nacional	149
Tratamiento de lixiviados en el ámbito nacional	149
Tratamiento de lixiviados en el estado de Chiapas.....	151
Comentarios finales.....	154
Bibliografía	157
VI. Sensores químicos y de parámetros físicos basados en fibra óptica... 163	
<i>Rubén Alejandro Vázquez Sánchez</i>	
Introducción	163
Antecedentes	164
Sensores químicos.....	165
Definición	167
Clasificación	168
Propiedades	172
Aplicaciones.....	174
Sensores químicos de fibra óptica	175
Ventajas y limitaciones de los sensores químicos de fibra óptica.....	176
Clasificación de los sensores químicos de fibra óptica	178
Aplicaciones de los sensores químicos de fibra óptica	182
Sensores físicos de fibra óptica	183
Sensores físicos basados en rejillas de Bragg de fibra óptica	184
Aplicaciones de los sensores físicos de fibra óptica	188

Conclusiones	188
Bibliografía	189

VII. Sistemas interferométricos para la detección de variables físicas191

Carlos Manuel García Lara

Introducción	191
Descripción general	192
Interferencia entre dos ondas planas	193
Interferometría.....	195
Aplicaciones.....	198
Velocimetría por laser Doppler	200
Interferómetro de Michelson de doble frecuencia	202
Interferometría para espectroscopía.....	207
Bibliografía	209

Semblanza de revisores invitados..... 213

Alejandro Ruiz Sibaja	213
Jorge Alfredo Aguilar Carboney.....	215
Yareni Perroni Ventura.....	216
Cristina Blanco González.....	216
Ma. Neftali Rojas Valencia	217
Manuel May Alarcón.....	218
Marcos Antonio Plata Sánchez	220

Semblanza de Autores 221

Raúl González Herrera.....	221
Carlos Narcía López	222
Rodolfo José Palacios Silva	223
Sergio López Mendoza	224
Alondra Gil Ríos.....	224
Pedro Vera Toledo	225
Hugo Alejandro Nájera Aguilar	225
Rubén Alejandro Vázquez Sánchez	226
Carlos Manuel García Lara.....	227
Estudios ambientales	232

Lista de figuras

Capítulo I

Figura 1a. Escarpado de poca pendiente sin separación de flujo	26
Figura 1b. Escarpado con pendiente importante y separación de flujo	27
Figura 1c. Colina de poca pendiente sin separación de flujo.....	27
Figura 1d. Colina con pendiente importante y separación de flujo.....	27
Figura 2. Comportamiento del flujo con respecto al cambio topográfico, este efecto es esquematizado considerando datos encontrados en túneles de viento	29
Figura 3a. Pendiente escarpada entre 17° y 45° con viento ascendente y formación de espiras de separación de flujo	32
Figura 3b. Pendiente con inclinación mayor a 45° con viento ascendente y formación de espiras de separación de flujo	32
Figura 4. Perfil de la velocidad media de la turbulencia longitudinal cercana a la cresta de una colina escarpada con altura de 480 m, pendiente ascendente de 0.48	33
Figura 5. Capa límite interna desarrollada por el cambio de rugosidad del terreno..	35
Figura 6. Esquema del ejemplo de aplicación con datos de diseño.....	39
Figura 7. Esquema de colinas y promontorios, extraído del reglamento AS/NZS1170.2/2002, que corresponde a la figura 4.2.....	39
Figura 8. Datos para el diseño del edificio retomados a partir de la figura 6	41
Figura 9. Colina o promontorio de dos dimensiones ó de tres dimensiones asimétrica. Reglamento ASCE-SEI7-2005 [II] y retomado por MOC-CFE-1993	43
Figura 10. Factor s para colinas y sierras, figura 8.2 del Eurocódigo 1 - 1998	47
Figura 11. Formas topográficas locales que se ubican desde un terreno plano, montículo y valle cerrado, la cual se ubica en la figura 3.2 de las NTC-DV-RCDF-2004	48
Figura 12. Rugosidad del terreno correspondiente a la figura 3.1 de las NTC-DV-RCDF-2004	49

Capítulo II

Figura 1. Tectónica general de México, en la que se señalan las velocidades de desplazamiento relativo de las placas regionales y los límites existentes	56
Figura 2. Modelo geométrico de la Placa de Cocos por debajo del estado de Chiapas, propuesto por Espíndola Castro (1996).	57

Figura 3. Modelo propuesto por Narcía-López (2002). La superficie de la figura representa la discontinuidad entre la corteza y el manto superior.	58
Figura 4. Equipo acelerométrico. La digitalizadora está conectada al sensor, empotrado al suelo. Se usa un <i>no-break</i> que permite disponer de cierto tiempo para guardar la información, en caso de un evento grande.	59
Figura 5. Nivel de ruido del episensor (línea punteada), comparado con los modelos alto (NHNM) y bajo (NLNM) propuestos por Peterson para la Tierra.	60
Figura 6. Ubicación de la estación acelerométrica en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. El triángulo representa la estación.	63
Figura 7. Sismicidad registrada en la estación acelerométrica de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH y ubicada por el SSN.	63
Figura 8. Registro de aceleraciones del sismo ocurrido el 28 de mayo de 2009 a las 8:25:26 hrs (GMT). Se muestran los tres canales con duración mayor a 400 s.	64
Figura 9. Histogramas de profundidad de la sismicidad detectada en la estación, de acuerdo a las localizaciones del SSN.	65
Figura 10. Variaciones del coeficiente de atenuación Q_m propuesto para la Tierra por el PREM, para los primeros 670 km de profundidad.	66
Figura 11. Ubicación de los hipocentros, en donde se distingue perfectamente el proceso de subducción regional. La escala vertical está amplificada ...	67

Capítulo III

Figura 1. Localización y principales aspectos topográficos de la zona de estudio.	76
Figura 2. Régimen pluvial registrado en dos estaciones meteorológicas adyacentes a la zona de estudio. Las letras en la figura agrupan los datos obtenidos para Berriozábal (A) y Apic-pac (B). Los números en la figura representan los datos de precipitación promedio mensual (1) y el registro anual de la precipitación en la zona durante el periodo 1989-2007 (2). Los datos fueron obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional.	78
Figura 3. Inundación del cono de deyección en noviembre de 2007.	79
Figura 4. Esquema general del diseño de análisis utilizando la USLE y el GIS.	81
Figura 5. Nomograma de permeabilidad. En el ejemplo de su uso se ilustra la valoración del factor K para un suelo con el 74 % de limo y arena muy	

<p>fina, 5% de contenido de arena, 3 % de materia orgánica, que presenta una estructura granular muy fina y una permeabilidad lenta a moderada. El valor del factor <i>K</i> en el ejemplo ilustrado es de 0.4 (imagen extraída de Morgan y Urbano López de Meneses 1997)</p>	84
<p>Figura 6. Tipos de clima (a), tipos de suelos (b), topografía (c), cobertura forestal (d) y uso de suelo (e) encontrados en la zona de estudio.....</p>	86
<p>Figura 7. Distribución espacial en el paisaje de estudio del Factor R (a), Factor K (b), Factor LS (c), Factor C (d) y Factor P (e).....</p>	92
<p>Figura 8. Distribución espacial del peligro (a) y vulnerabilidad (b) en el paisaje de estudio</p>	94
<p>Figura 9. Mapa de riesgo a la erosión del suelo en la microcuenca del río Francés</p>	95

Capítulo IV

<p>Figura 1, Localización del sitio.....</p>	105
<p>Figura 2, Propuesta de pozo de venteo para biogás.....</p>	126
<p>Figura 3, Corte lateral de sistema propuesta para captación y control de lixiviados en el sitio.</p>	127
<p>Figura 4, Corte lateral del carcamo de captación de lixiviados del sistema propuesta.....</p>	128
<p>Figura 5a, Perfil antes de los trabajos.....</p>	129
<p>Figura 5b, Perfil propuesto</p>	129
<p>Figura 6, Vista superior, conformación propuesta para el sitio.....</p>	131

Capítulo V

<p>Figura 1. SDF con afloramiento de lixiviados en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas</p>	138
<p>Fig. 2. Planta de ósmosis inversa con una capacidad de tratamiento de 30m³/día.....</p>	149
<p>Fig. 3. Ensayos de coagulación-floculación en lixiviados maduros de Tuxtla Gutiérrez.....</p>	154

Capítulo VI

<p>Figura 1. Características de un sensor químico ideal. Valcárcel <i>et al.</i></p>	168
<p>Figura 2. Clasificación de un sensor químico basada en varios criterios.</p>	

Valcárcel <i>et al.</i>	172
Figura 3. Esquema típico de un sensor químico de fibra óptica. La terminal sensible pertenece a un sensor extrínseco y se muestran las tres formas en que se puede estructurar dependiendo de la aplicación	181
Figura 4. Estructura de una rejilla de Bragg de fibra óptica. Se muestra el espectro de transmisión y la modulación del índice de refracción	184
Figura 5. Espectros de reflexión de tres rejillas de Bragg.....	186
Monitoreadas con un monocromador. La rejilla R2 es sometida a cambios de temperatura	186
Figura 6. Esquema típico de un sensor de fibra óptica puntual con una sola rejilla.....	187
Figura 7. Esquema típico de un sensor de fibra óptica multipunto con varias rejillas	187

Capítulo VII

Figura 1. Patrón de interferencia generado por dos ondas planas que se propagan en las direcciones n_1 y n_2	194
Figura 2. a) Interferómetro de Young b) Interferómetro de Michelson	196
Figura 3. Trazo de rayos en un interferómetro de Michelson.....	197
Figura 4. Detección interferométrica de deformaciones.....	199
Figura 5. Velocimetría por Laser Doppler.....	201
Figura 6. Señal de dos interferómetros oscilando y el resultado obtenido a partir de estos.....	206
Figura 7. Patrón de Moirè registrado con una cámara CCD[26]	207

Lista de tablas y cuadros

Capítulo I

Tabla 1. Multiplicadores de la altura del terreno para las velocidades de viento en todo tipo de terrenos para diseño por estado límite para las regiones A1 hasta A7, W y B. Denominada 4.1(A) por el reglamento AS/NZS1170.2/2002, del cual se transcribe....	42
Tabla 2. Factores de multiplicadores topográficos por exposición C retro-mado del reglamento ASCE-SEI7-2005, del cual se transcribe.....	44
Tabla 3. Factor FTR (Factor de Topografía y Rugosidad del Terreno), la cual se ubica en la tabla 3.3 de las NTC-DV-RCDF-2004, del cual se transcribe	49
Tabla 4. Rugosidad del terreno, δ y α , correspondiente a la tabla 3.2 de las NTC-DV-RCDF-2004, del cual se transcribe.....	50
Tabla 5. Comparación de resultados de los distintos reglamentos usados.....	51

Capítulo II

Tabla 1. Especificaciones técnicas del sensor utilizado en el monitoreo acelerométrico de Ciudad Universitaria de la UNICAH	60
Tabla 2. Características técnicas de la digitalizadora Altus K2 de Kinometrics.	61

Capítulo III

Cuadro 1. Caracterización de la precipitación registrada en dos estaciones meteorológicas adyacentes a la zona de estudio realizada a partir de los datos del periodo de 1989-2007. Los datos fueron obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional.	77
---	----

Capítulo VI

Tabla I. Distribución de áreas del sitio de disposición final de residuos sólidos.....	107
Tabla II. Restricciones para la ubicación de sitios, comparativo con respecto del sitio	117
Tabla III. Componentes típicos encontrados en biogás de los rellenos sanitarios..	119

Capítulo V

Cuadro 1. Rango de composición típica en lixiviados	139
Cuadro 2. Clasificación de los tipos de lixiviados en función de la edad	141
Cuadro 3. Características de los lixiviados del área clausurada del SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México	152

Lista de fotos

Capítulo V

Foto 1. Recepción de residuos del día	108
Foto 2. Tractor de tipo oruga D5, marca Komatsu, para labores del sitio	109
Foto 3. Depósito de residuos en el área asignada	110
Foto 4. Aspectos de la descarga de los residuos en el sitio	111
Foto 5. Vista del acceso al sitio	112
Foto 6. Delimitación del área de trabajo y cobertura de los residuos	113
Foto 7. Residuos peligrosos (más de 200 filtros para aceite) en el sitio de disposición final de residuos sólidos, Chiapa de Corzo, Chiapas	114
Foto 8. Maquinaria Komatsu	115
Foto 9. Talud con una pendiente de aproximadamente 48º	130
Foto 10. Trabajos de conformación del sitio	131

Prólogo

El programa editorial, y en general de difusión de las artes y las ciencias, de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas es notable si consideramos el tamaño y juventud de la institución. Pero lo mejor de esto es que tanto los libros como las revistas y discos que se publican son producto del trabajo comprometido de sus docentes e investigadores.

Independientemente de las diferencias en cuanto al grado de madurez profesional y de consolidación e integración de los grupos de trabajo en las diferentes escuelas y centros de investigación que forman la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, se observa en todos ellos un enorme entusiasmo por alcanzar la excelencia en la generación de nuevo conocimiento y en la creatividad artística, además, por supuesto, de realizar de manera paralela labores de docencia y de gestión.

Entre las escuelas más recientes de la universidad se encuentra la de Ingeniería Ambiental, creada en el año 2004. Sin embargo, a pesar del corto tiempo de su existencia, ha marcado ya una huella indeleble en el quehacer intelectual y cultural de Chiapas mediante el trabajo de sus académicos a través de publicaciones en revistas nacionales e internacionales, así como de libros como el que tengo el honor de prologar, denominado *Estudios ambientales y riesgos naturales. Aportaciones al Sureste de México, tomo II*, coordinado por el doctor Carlos Manuel García Lara.

En la medida en que la actividad humana va alterando y modificando los parámetros originales del medio ambiente y generando nuevos riesgos que se suman a los directamente imputables a la naturaleza, el estu-

dio del entorno se vuelve un campo de investigación además de urgente, estratégico. Urgente porque es de vital importancia darle seguimiento a los cambios que nuestra actividad, nuestro modo de vida, está provocando en los diferentes ecosistemas del planeta; estratégico porque el conocimiento de dichos cambios, los efectos que los mismos tienen sobre la salud del hombre y del planeta en general, permiten desarrollar tecnologías para contrarrestar las potenciales amenazas en que se traducen los cambios, convirtiendo de esta manera las potenciales amenazas en la fuente de nuevas capacidades adaptativas para el ser humano.

Los trabajos reunidos en este volumen exploran varios temas de interés y sus conclusiones contribuyen al conocimiento de los procesos de los que se ocupan, tales como la sismicidad del territorio chiapaneco, los efectos de las topografía sobre el comportamiento de los flujos de viento y la relación de estos con el diseño estructural, la erosión del suelo debido a la precipitación pluvial, la generación y disposición de residuos sólidos urbanos y el estudio de los lixiviados complejos. El conocimiento nuevo sobre estos procesos constituye una aportación de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas a la comunidad académica de la región y del mundo, pero además, en la medida en que estos estudios y sus conclusiones sean tomados en cuenta por las personas indicadas y se traduzcan en beneficios para la sociedad, estos trabajos adquirirán su justa dimensión.

Es imperativo que la cultura científica impregne todos los niveles de nuestra sociedad: que la clase política de nuestro país, cuya mayoría es profundamente ignorante y corrupta, así como la élite empresarial y comercial, generalmente apátrida y depredadora, que la clase media timorata y pretenciosa, así como las clases populares depauperadas, explotadas y analfabetas; vean en la ciencia un instrumento liberador y propiciador de igualdad social y no una herramienta más para la opresión y el ahondamiento de la desigualdad. Estoy seguro que el contenido de este libro abonará el camino.

Carlos Uriel del Carpio Penagos
Investigador y docente de la UNICACH
Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I

Presentación

Este libro, segunda aportación de los integrantes y colaboradores del cuerpo académico Estudios Ambientales y Riesgos Naturales, ofrece una serie de datos referente a las investigaciones que se realizan en torno a fenómenos naturales y ambientales.

El libro está conformado por siete capítulos que abarcan una gran variedad de temas de investigación, agrupados en dos áreas de interés como son fenómenos naturales y fenómenos antropogénicos, desarrollados alrededor de investigaciones bibliográficas y experimentales, las cuales pretenden motivar y a su vez fomentar la investigación en la comunidad universitaria, no sólo de la UNICACH, sino de aquellas involucradas en estas áreas de interés. El documento está integrado de la siguiente forma:

El capítulo I, presenta un análisis sobre la modificación del flujo del viento debido a las características topográficas del área de estudio como colinas y pendientes con inclinaciones pronunciadas, basados en cuatro normas aplicadas en diferentes países, incluyendo México para el diseño eólico, al final se desarrolla un ejercicio comparativo de estas normas mediante el estudio de un caso específico.

El capítulo II, describe las características de las placas tectónicas que intervienen en los procesos de generación de sismos en la región, así como el equipo con que se cuenta para la detección de éstos. Se presentan además datos de eventos sísmicos desde finales de 2007 hasta agosto de 2009, desarrollando un ejemplo del análisis que se realiza de la información para su comprensión y aporte al quehacer científico.

El capítulo III, aborda la problemática de erosión del suelo, realizando una aproximación analítica del riesgo de erosión debido a la preci-

pitación pluvial y otros factores como la topografía, composición y uso del suelo, utilizando herramientas de modelado de erosión e información geográfica, presentando resultados de los estudios realizados en la microcuenca del río Francés y estableciendo posibles acciones para la mitigación del riesgo de erosión en esta zona.

El capítulo IV, realiza una reseña de los antecedentes en materia de generación y disposición de residuos sólidos, así como la normatividad aplicable para tal fin, en el estado de Chiapas. A continuación describe el proceso de normalización de operación del sitio de disposición final de residuos sólidos de la ciudad de Chiapa de Corzo, concentrándose principalmente en dos temas, el manejo del biogás y lixiviados generados en dicho sitio.

El capítulo V, ofrece una amplia explicación en torno a los lixiviados, partiendo de la definición de éstos, sus características, clasificación y tratamientos experimentados a nivel mundial, nacional y local, abordando de manera específica aquellos basados en procesos fisicoquímicos. Proporcionando además, información de lo realizado en el estado y de manera particular, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

El capítulo VI, propone el manejo de fibra óptica como una herramienta para la detección y cuantificación de sustancias contaminantes en diferentes ambientes como agua, suelo y aire. Se realiza una revisión de los antecedentes para analizar cuantitativa y cualitativamente los contaminantes presentes en una muestra, así como su evolución hasta llegar a los sistemas basados en fibra óptica, exhibiendo las ventajas y aplicaciones de este último.

El capítulo VII, analiza a los sistemas interferométricos, desde su modelado matemático hasta su posible aplicación en la detección de variables físicas. Presentado una breve descripción del fenómeno de interferencia, sus posibles configuraciones para la detección de variables como movimiento, temperatura, presión, entre otros; hasta llegar a presentar avances en materia de espectroscopía, técnica utilizada para la detección de contaminantes presentes en una muestra.

Cabe señalar que las aportaciones realizadas fueron apoyadas con observaciones y contribuciones hechas por un cuerpo de investigadores pertenecientes a diferentes instituciones de educación superior y centros

de investigación como la UNACH, UPCH, UV, UNAM y CICESE, expertos en las áreas que se abordan en cada capítulo de este libro.

Es importante señalar, además, la aportación que hace este documento a la divulgación de la ciencia, específicamente de los fenómenos naturales y ambientales, ya que es apenas la segunda aportación de la Facultad de Ingeniería en esta materia y la oportunidad que se abre para la adhesión de estudiantes de licenciatura y de posgrado para el desarrollo de éstas y otras investigaciones a futuro.

Carlos Manuel García Lara
Profesor de Tiempo Completo
Escuela de Ingeniería Ambiental
UNICACH

I. Efecto topográfico en el comportamiento de flujos de viento y sus implicaciones en el diseño de estructuras flexibles

Raúl González Herrera

Resumen

En este capítulo, se describe cómo se modifica la estructura del flujo de fuertes vientos cercanos a la superficie de la Tierra, con efectos tales como la generación de vórtices alternantes y contraflujos. Lo anterior como producto de la presencia de obstáculos topográficos de distintas características que se oponen a los flujos de viento y generan efectos estudiados por la dinámica de fluidos. Para una mejor comprensión se analiza cómo se considera este fenómeno en distintos códigos y reglamentos de diseño eólico en el mundo, a través de un ejemplo práctico de diseño de una estructura flexible.

Modificación del flujo de viento por la topografía

La velocidad del viento puede incrementarse considerablemente por factores de la morfología topográfica de la corteza terrestre, con elementos naturales tales como montañas, montes, valles, colinas, depresiones topográficas, entre otras, o los obstáculos producidos por las construcciones del hombre. Cabe mencionar que también ejerce un efecto importante en el diseño eólico el fenómeno de la rugosidad, el cual se debe a la fricción que surge entre el viento y la cobertura vegetal

del terreno. Para los reglamentos internacionales el efecto topográfico y el de rugosidad se analizan independientemente, no así para el del Distrito Federal como se mostrará en la parte final de este documento. Conviene aclarar que el estudio de la rugosidad queda fuera del alcance de este capítulo.

Los efectos topográficos en el flujo de vientos fueron objeto de importantes investigaciones entre las décadas de 1970 y 1980. Estos estudios buscaban explicar el efecto de viento para optimizar los diseños de turbinas. Los resultados obtenidos permitieron, adicionalmente, entender las características de la velocidad media, su relación con distintas formas topográficas y el grado de cambio de esta velocidad al pasar de una a otra forma topográfica distinta.

Efectos generales de la topografía

Los efectos generales que se ocasionan al flujo de viento laminar por las condiciones topográficas se observan en los cuatro esquemas que se presentan en la figura 1 ^[1]; considerando los incisos desde a y hasta d, se puede observar la trayectoria del flujo de viento en colinas y pendientes ascendentes. El viento al acercarse a una pendiente, reduce su velocidad considerablemente al encuentro con ésta, sin embargo, conforme asciende por el obstáculo el viento incrementa gradualmente su velocidad, hasta que, después de un trayecto donde se normalice la pendiente, la velocidad regresa a las condiciones originales.



a) Escarpado de poca pendiente sin separación de flujo. ^[1]



Figura 1b. Escarpado con pendiente importante y separación de flujo. [1]

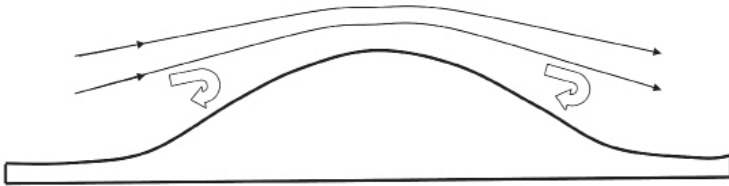


Figura 1c. Colina de poca pendiente sin separación de flujo. [1]

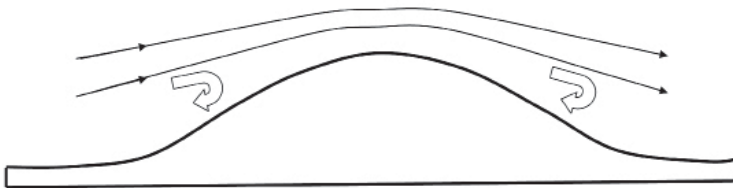


Figura 1d. Colina con pendiente importante y separación de flujo. [1]

Figuras 1. Flujo considerando las características topográficas en pendientes bajas y pronunciadas, desarrolladas a partir de diversas investigaciones. [1]

Más allá de la cresta, la velocidad del flujo se reduce a niveles cercanos a los que tenía antes de enfrentar el accidente topográfico. El ajuste será más rápido entre menor sea la pendiente del escarpado o la colina que el flujo de viento tenga que cruzar.

Otro fenómeno que se observa, en el impacto de flujos de viento con colinas escarpadas o de pendientes topográficas importantes (mayores al 30%), es la separación de corrientes pertenecientes al flujo. Esto ocurre cuando el flujo no puede superar el incremento del gradiente de presiones en la dirección de la corriente de viento dominante. La separación (en vórtices) ocurre durante el ascenso de la corriente de viento

por la pendiente escarpada de la colina, una vez que la corriente llega a la cresta se presenta el descenso del flujo. Esto da lugar nuevamente al fenómeno de desprendimiento de la corriente. Para apreciar lo anterior pueden verse las figuras 1b y 1d ^[1] que ejemplifican, mediante espiras, el fenómeno de la separación y formación de vórtices.

Los valores de estas separaciones de flujo se muestran en los códigos, normas o reglamentos de diseño por viento, mediante factores constantes ubicados en tablas que relacionan ciertos parámetros, e indican el límite superior donde se alcanzan las velocidades dominantes en el ascenso y descenso de la corriente del flujo en la colina o pendiente escarpada.

Los efectos del incremento de la velocidad de los flujos de viento son mayores cerca de la superficie del obstáculo, posteriormente se reducen y vuelven a incrementarse con la altura cercanos al nivel de la cresta o base. Este comportamiento puede afectar los perfiles de las velocidades medias y dominantes, cercanas a la cresta del perfil topográfico, donde se presentan los máximos o picos de la frecuencia de la señal en el tiempo. ^[1]

Los efectos que ejercen los accidentes topográficos sobre la velocidad de viento y las condiciones del flujo, se han analizado y citado en la literatura considerando modelos en dos direcciones, suponiendo una distancia longitudinal normal e infinita, así como una pendiente no tan pronunciada (menor al 30%). También se han utilizado modelos que consideran el efecto topográfico tridimensional, el cual ocurre cuando hay pendientes importantes, con incrementos y decrementos de la velocidad tal como se explicó en párrafos anteriores.

Para el diseño de las estructuras sometidas a flujos importantes de viento, los modelos en tres dimensiones son conservadores. Se ha observado en modelos ensayados en túneles de viento que generalmente el efecto de la tercera dimensión no es tan importante. Esto se debe a que, cuando el objeto topográfico no es muy ancho en su tercera dimensión (o espesor), el viento se desvía lateralmente y no se produce un incremento de velocidad en la cresta del objeto u obstáculo topográfico. Esto se muestra en la figura 2 ^[2], la cual reproduce un ensayo en túnel de viento. En caso de que el objeto sea muy ancho, el efecto de la tercera dimensión no influye en su comportamiento de forma significativa, ya que el ancho reduce bastante la velocidad del viento. Las variables U_1 y

U_2 corresponden a las velocidades de entrada y salida de la señal en el túnel de viento y H es la altura en donde se manifiestan estos efectos.

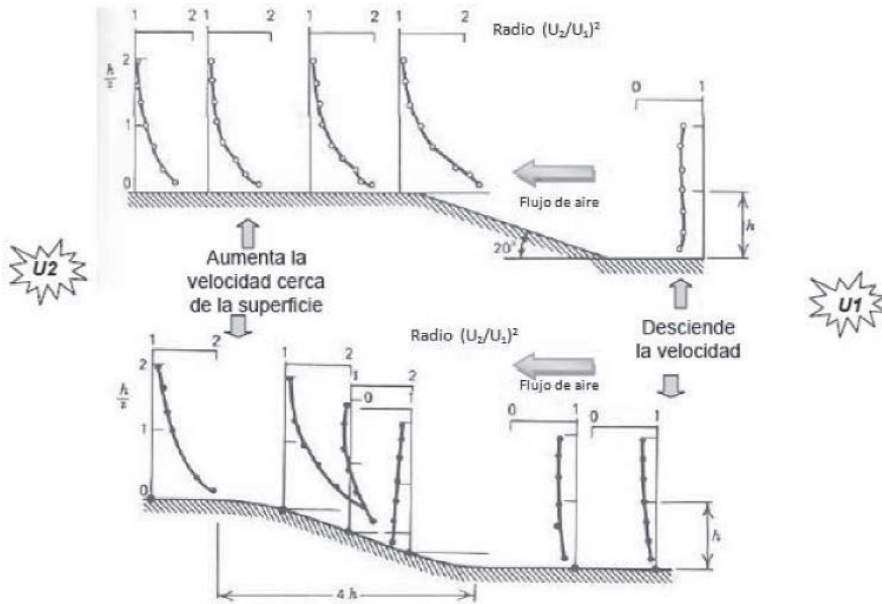


Figura 2. Comportamiento del flujo con respecto al cambio topográfico, este efecto es esquematizado considerando datos encontrados en túneles de viento. [2]

Multiplicadores topográficos

La definición de *multiplicador topográfico* que se usa en este artículo es la siguiente: la razón de la velocidad del viento amplificada por el obstáculo topográfico entre la velocidad del viento anterior a la presencia del elemento u obstáculo. Esta definición aplica para los valores de la media, la máxima ráfaga y la desviación estándar de la velocidad del viento. Estos parámetros se denotan como \overline{M}_t , \hat{M}_t y M'_t , respectivamente.

Los multiplicadores topográficos, ya sean medidos instrumentalmente en estructuras a escala natural, en estructuras construidas a escala en túneles de viento, o con estructuras modeladas a partir de algoritmos computacionales, pueden ser mayores o menores que la unidad. De cualquier manera, los casos de más interés para el diseño

estructural son los que corresponden a los efectos del incremento de la velocidad, para el cual los multiplicadores topográficos (media o ráfaga máxima) son superiores a la unidad.

Colinas de poca pendiente

El análisis que se hace del comportamiento de la capa límite a partir del valor medio del flujo de viento sobre las colinas de poca pendiente, da lugar a la siguiente expresión para calcular la media del multiplicador topográfico, ecuación 1 [3]:

$$\overline{M}_t = 1 + ks\phi \quad (1)$$

donde Φ es el ángulo de la pendiente topográfica, k es una constante dada por los distintos reglamentos a la forma topográfica y s es un factor de posición del flujo de viento analizado. La ecuación 1, ha sido empleada para distintas condiciones topográficas modificando su estructura en varios códigos y reglamentos. Esto indica que la fracción del incremento de velocidad, es igual a $(\overline{M}_t - 1)$ y es directamente proporcional a la pendiente del flujo en la zona de incremento de velocidad, Φ . Este último ángulo se define como $(H/2L_u)$, donde H es la altura de la cresta al nivel de la superficie antes del incremento del flujo, y L_u es la distancia horizontal desde la cresta hasta donde alcanza la elevación del terreno $H/2$. Otros estudios [3] propusieron, tras realizar el análisis de varios modelos, los siguientes valores para la constante k , para diversas formas topográficas:

- 4.0 para elevaciones en dos dimensiones.
- 1.6 para escarpados en dos dimensiones.
- 3.2 para colinas asimétricas en tres dimensiones.

El factor de posición s es de 1.0 cercano a la cresta de la elevación, y disminuye su valor para ambos lados de la colina hasta la altura de la superficie (base de la colina), z . La reducción de s con la altura, es más rápida cerca de la superficie, siendo más gradual conforme crece la altura, z .

Para una primera aproximación de análisis, la longitud de la componente de la turbulencia, σ_u , no cambia sobre la colina o el escarpado.

Lo anterior resulta en la ecuación 2, que se aplica para determinar el multiplicador topográfico de ráfaga, \hat{M}_t :

$$\hat{M}_t = 1 + k' s \phi \quad (2)$$

donde k' , es una constante para el multiplicador topográfico de ráfaga, cuyo valor se puede obtener mediante la ecuación (3):

$$k' = \frac{k}{1 + g \left(\frac{\sigma_w}{U} \right)} \quad (3)$$

donde $\left(\frac{\sigma_w}{U} \right)$ es la intensidad de la turbulencia longitudinal sobre el nivel plano de la superficie y g es el factor pico de la turbulencia.

Las ecuaciones desde 1 hasta la 3 muestran que el multiplicador topográfico (\hat{M}_t) de ráfaga es menor que el factor multiplicador (k') debido al valor medio, para el mismo tipo de accidente topográfico y altura sobre el nivel del terreno. Existe una pequeña dependencia de los multiplicadores topográficos basados en el número de Jensen considerando como la altura de la colina $\left(\frac{H}{z_0} \right)$, lo cual se observa mejor con el ejemplo que se colocó en la parte final del capítulo.

Colinas, acantilados y escarpados

Cuando la pendiente ascendente de la colina o del escarpado se acerca a valores cercanos a 0.30 (alrededor de los 17°), ocurre la separación del flujo de viento en la cara de la pendiente ascendente, las fórmulas simplificadas mostradas en las ecuaciones 1 a la 3 no se pueden aplicar directamente.

Para pendientes con valores cercanos a 0.30 y hasta 1.0 (17° hasta 45°), la espira de separación (vórtice) en la cara de viento ascendente presenta una pendiente efectiva relativamente constante. Los multiplicadores topográficos cercanos a la cresta, son constantes con la pendiente ascendente en este rango. Las ecuaciones 1 y 2 pueden ser aplicadas con Φ remplazada por una pendiente efectiva Φ' , igual a 0.30, como puede observarse en la figura 3a.

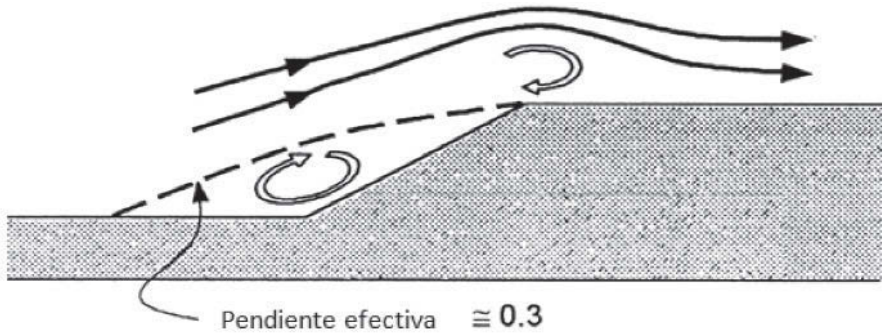


Figura 3a. Pendiente escarpada entre 17° y 45° con viento ascendente y formación de espiras de separación de flujo. ^[1]

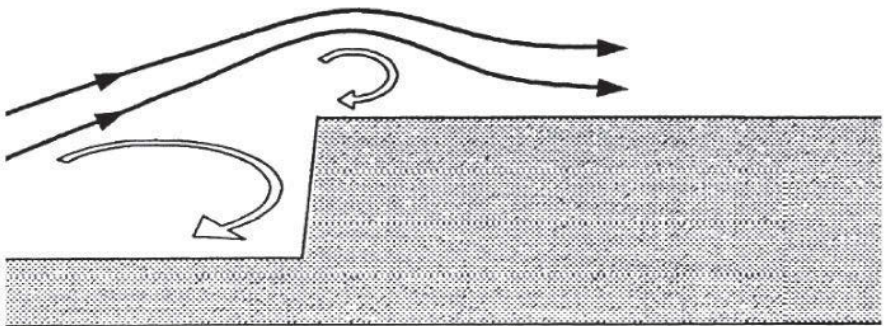


Figura 3b. Pendiente con inclinación mayor a 45° con viento ascendente y formación de espiras de separación de flujo. ^[1]

Para pendientes mayores o cercanas a 1, por ejemplo en colinas escarpadas, las líneas del flujo cercanas a la superficie de la cresta, originadas por el flujo en la cara ascendente cerca de la punta, se separan formando flujos más elevados y vórtices alternantes que generalmente colisionan con las líneas de flujo principal (véase figura 3b). El concepto de multiplicador topográfico definido en este capítulo es poco aplicado para ciertos casos. Algunos de los aparentes incrementos de velocidad son causados más por el cambio del perfil de la capa límite que por la perturbación producida por la pendiente de ascenso de la colina o escarpado (efecto de rugosidad, que es un efecto que no se analiza en este capítulo).

Una complicación adicional de los modelos a escala de colinas, para ser estudiadas en túneles de viento o mediante métodos analíticos, es que la separación del flujo del viento puede ocurrir arriba de o bajo la cresta de la colina (véase este efecto en la figura 3b). En un estudio realizado [4] se encontró que la separación del flujo es cercana a los primeros 50 m de una cresta de 480 m, con una pendiente de tan sólo 0.48, con ángulo promedio de 26° , en la escala natural y escala de modelo 1/1,000. El hecho de escalar una pendiente tan grande tiene el efecto de disminuir la velocidad media e incrementar la intensidad de la turbulencia, como se muestra en la figura 4. [4]

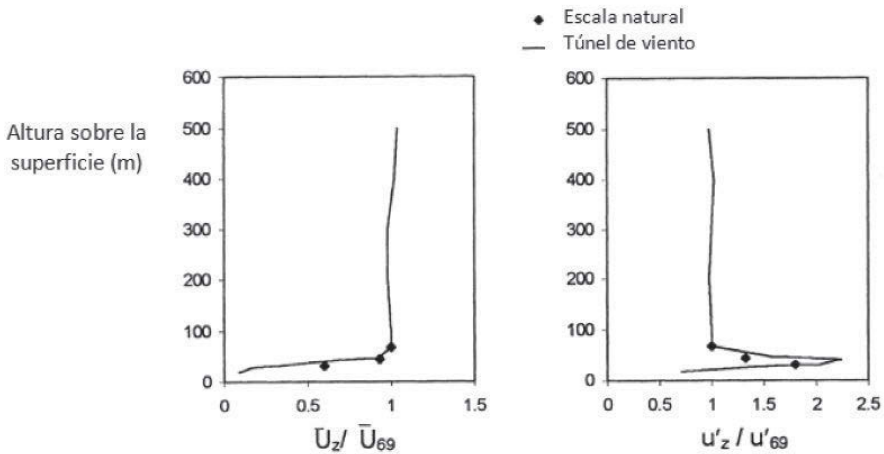


Figura 4. Perfil de la velocidad media de la turbulencia longitudinal cercana a la cresta de una colina escarpada con altura de 480 m, pendiente ascendente de 0.48. [4]

Efecto de la topografía en los ciclones tropicales, huracanes y tormentas eléctricas

El efecto de elementos topográficos sobre el viento cercano a la superficie durante el paso de ciclones tropicales, huracanes y/o tormentas eléctricas ha sido menos estudiado que en otros fenómenos donde se

manifiestan capas límite¹ en larga escala longitudinal sin modificaciones considerables y de muy baja altura.

Los ciclones tropicales son grandes tormentas con capas límite similares a una tormenta o depresión extra tropical en sus límites exteriores. Cercano a la región de fuertes vientos, su capa límite parece tener menor altura, del orden de 100 m. Los elementos topográficos mayores que esta altura, se espera que interactúen con la estructura de la tormenta, generando una colisión que genera daños importantes al huracán y al obstáculo topográfico.

Las tormentas tropicales también muestran capas límite con picos en los perfiles de velocidad entre 50 y 100 m. Este fenómeno no desarrolla perfiles de velocidad parecidos en la capa límite. Se han desarrollado algunos estudios básicos empleando túneles de viento para considerar los factores multiplicadores topográficos bajos comparados con flujos con capa límite desarrollado por otras condiciones más estándares de flujo de viento. Por esta razón, las ecuaciones desarrolladas para los otros casos no son aplicables para estos fenómenos extremos y quedan fuera del alcance de la mayoría de los reglamentos del mundo, salvo algunos que han desarrollado investigación importante en la materia.

Las ecuaciones propuestas corresponden a las más empleadas en la literatura, sin embargo, los fuertes vientos en zonas tropicales o semi-tropicales, producidos por tormentas eléctricas y ciclones tropicales, no son del alcance de este trabajo, por lo cual se debe ser cauteloso en caso de decidirse a emplearlas en estas regiones.

Cambios de rugosidad del terreno

Cuando vientos fuertes fluyen sobre una región que tiene una misma rugosidad, alcanzan una longitud parabólica con una altura a la que se

¹ Se entiende por capa límite, a la altura donde el flujo de viento se mantiene constante, lo cual depende de la rugosidad (fricción del viento sobre la superficie del suelo, esta rugosidad está determinada por el tipo de vegetación, densidad de construcciones o elementos topográficos que atraviesa el flujo). Los huracanes remueven con sus primeros vientos la vegetación, con lo cual se reduce la rugosidad, se extiende el área de rugosidad uniforme y baja la capa límite, ya que entre menos rugosidad la altura de la capa límite se mantiene más baja y viceversa.

denomina capa límite, por ejemplo vientos a campo abierto fluyendo sobre los exteriores o suburbios de la ciudad o pueblo analizado, tendrán una misma capa límite, sin embargo, cuando atraviesen la ciudad los vientos elevarán su capa límite, ya que se presenta mayor rugosidad. El ajuste de la capa límite comienza al nivel del terreno natural y gradualmente se desplaza hacia arriba hasta equilibrarse, pero al cruzar una nueva rugosidad se desarrollará una capa límite interna sobre el nuevo terreno como se muestra en la figura 5.

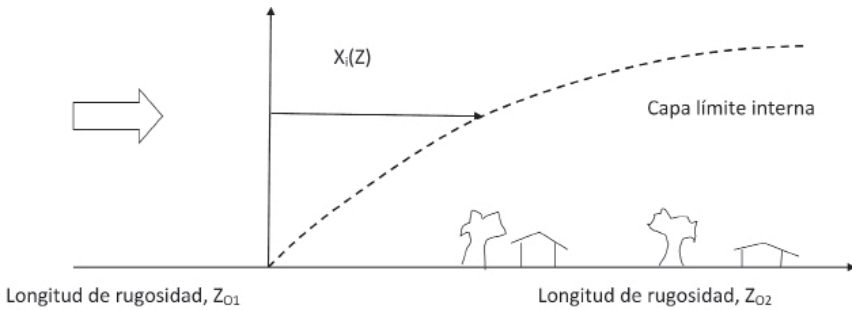


Figura 5. Capa límite interna desarrollada por el cambio de rugosidad del terreno. [1]

Mediante estudios analíticos [5], se desarrollaron las siguientes relaciones (ecuaciones 4 y 5) para la posición horizontal del cambio de la rugosidad del suelo como función de su altura, z .

Para el flujo de un terreno suave (longitud de rugosidad z_{01}) a un terreno rugoso (z_{02}) con $z_{02} > z_{01}$:

$$x_i(z) = z_{02} \left(\frac{z}{0.36 z_{02}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4)$$

Para el flujo de un terreno rugoso (longitud de rugosidad z_{01}) a un terreno suave (z_{02}) con $z_{01} > z_{02}$:

$$x_i(z) = 14z \left(\frac{z_{01}}{z_{02}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Ajustando z_{02} a un valor 0.20 m, aproximadamente el valor del terreno de las afueras de un área urbana (suburbios) con edificios bajos de no más de 5.0 m de altura (correspondientes a uno o dos niveles), y z igual a 10 m, la ecuación 4 da un valor para $x_i(10\text{ m})$ igual a 144 m. Más allá de esta distancia, la forma del perfil de la velocidad media por debajo de 10 m tiene las características de la nueva rugosidad. De cualquier manera la magnitud de la velocidad media para la ciudad continúa reduciéndose durante los siguientes kilómetros, hasta que se ajuste la capa atmosférica a la nueva rugosidad del terreno.

Se encontró ^[6] que la ráfaga de la velocidad de viento a la altura de 10 m, se ajusta a la aproximación del nuevo terreno (cambio de rugosidad) de manera exponencial con una distancia constante de cerca de 2,000 m. En consecuencia el pico de la ráfaga a una distancia x en metros dentro del terreno con cambio de rugosidad se puede obtener con la ecuación 6.

$$\hat{U}_{2,x} = \hat{U}_1 + (\hat{U}_2 - \hat{U}_1) \left[1 - \exp\left(\frac{-x}{2,000}\right) \right] \quad (6)$$

donde \hat{U}_1 y \hat{U}_2 , son asíntotas a la ráfaga de velocidades desarrolladas en distintos terrenos. En esta expresión el subíndice 1, es la velocidad anterior al cambio topográfico, y el subíndice 2, representa la velocidad posterior al cambio topográfico.

La ecuación 6 resultó del ajuste de los datos de un estudio experimental empleando un túnel de viento para flujo que pasa sobre una superficie rugosa, pero que pasa a ser suave y viceversa, considerando cambios importantes de rugosidad.

Otras fuentes para obtener datos del fenómeno

Una buena alternativa para obtener descripciones de fenómenos atmosféricos como el viento, la temperatura, la humedad y la presión, es dada por las publicaciones: Engineering Sciences Data Unit (ESDU) las cuales se editaron ininterrumpidamente desde 1974 y hasta 1999. En sus publicaciones se abordó, entre otros temas, el efecto de la topografía en los flujos de viento y modelos matemáticos de la turbulencia.

Para nuestro país son dos las instituciones que cubren los datos para el territorio nacional: el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Instituto Estatal de Protección Civil (IEPC) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), las anteriores instituciones tienen oficinas en Chiapas y ofrecen información en línea en sus respectivas páginas de internet.

La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) a través de la página de internet de la escuela de Ingeniería Ambiental, presenta mediciones de parámetros ambientales, entre ellos, la velocidad de los vientos registrados en un punto de sus instalaciones en Ciudad Universitaria desde el año 2009 por parte de alumnos y el docente de la asignatura de climatología y meteorología, correspondiente al mismo programa educativo.

Normas de diseño por viento en Chiapas

El Reglamento de Construcción de Tuxtla Gutiérrez (RCTGZ-2004) ^[7] señala, en su artículo 370, que el H. Ayuntamiento expedirá normas técnicas para diseño por sismo o viento, las cuales a la fecha no existen. El análisis por viento de las construcciones en Chiapas se realiza principalmente de acuerdo con alguna propuesta normativa nacional, ya que en el estado se carece de una normativa técnica propia en materia de diseño estructural por viento. Aunque como se mencionó existe un reglamento de construcción (RCTGZ-2004) ^[7] que, en su artículo 377, señala que en casos especiales y por las dimensiones y geometría de las estructuras, se solicite una memoria de cálculo estructural avalada por un director responsable de obra que pertenezca a un colegio o sociedad técnica local.

Por otra parte, se encuentra que las dos opciones de Normas técnicas más empleadas para el diseño por viento en el estado de Chiapas son:

- *Normas técnicas complementarias de diseño por viento del reglamento de construcciones del Distrito Federal*, cuya última versión corresponde a la del año 2004 (NTCV-RCDF-2004) ^[8] y,
- *Manual de obras civiles de Comisión Federal de Electricidad, diseño por viento de 1993 (MOC-CFE-DV-1993)* ^[9]. Este manual está en ac-

tualización y tendrá una nueva filosofía de diseño; su impresión se realizará a finales del año 2009.

De estas dos alternativas, la primera normatividad técnica es la más empleada, a pesar de que está condicionada a una ciudad con características físicas muy distintas de las ciudades del estado de Chiapas, pero tiene la ventaja de que su empleo es más sencillo; a diferencia de la segunda norma, la cual es una propuesta nacional con procedimientos más complejos y detallados y muy similar a las norteamericanas.

Ejemplo de diseño comparativo de distintas normas

A continuación se presenta un ejemplo comparativo donde se observan los efectos topográficos de acuerdo con cuatro reglamentos, códigos o normas de diseño por viento. La construcción corresponde a un edificio de 100 m de altura, el cual se encuentra sobre la cima de un terreno con $z_0=0.20$ m cuyas características se ilustran en la figura 6. Se busca calcular el factor de topografía a 20 m de altura de la base del edificio, se normalizan los resultados con el factor calculado considerando el mismo edificio sobre terreno plano. Para el análisis comparativo se observan los reglamentos más empleados en el mundo y el más empleado en Chiapas.

- Australian and New Zealand Standard Structural Design Actions, part 2: Wind Actions, 4 June 2002 (AS/NZS-1170.2/2002) ^[10]-(Estándares estructurales, acciones de diseño, parte 2: acciones por viento, 4 de junio de 2002).
- Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Section 7 Wind Design, United States, 2005 (ASCE/SEI 7/05) ^[11]-(Cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras, sección 7, diseño por viento, Estados Unidos de América, 2005).
- Eurocódigo 1 ^[12] (Eurocódigos normas europeas experimentales, UNE-ENV 1991-parte 2-4, acciones por viento, mayo 1998).
- NTC-DV-RCDF-2004 ^[8] (Normas técnicas complementarias de diseño por viento del Reglamento de construcciones del Distrito Federal, México, 2004)

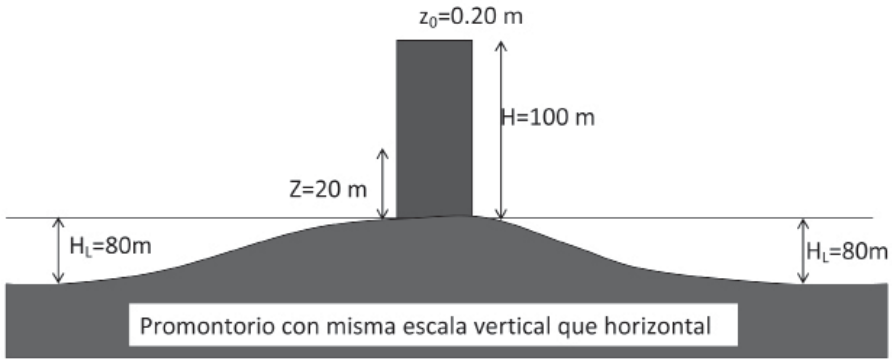


Figura 6. Esquema del ejemplo de aplicación con datos de diseño. [2]

Considerando las normas australianas y neozelandesas 2002 [10], se tiene el siguiente procedimiento:

La determinación del factor de topografía con las normas AS/NZS1170.2/2002 [10] se basa en relacionar las ecuaciones de la sección 4.4.2 del cuerpo de su norma con las variables mostradas en la figura 7, misma que representa la figura 4.2 del documento normativo citado.

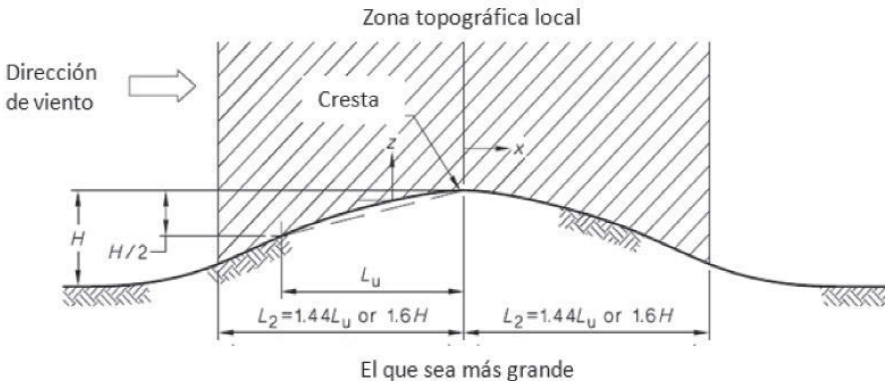


Figura 7. Esquema de colinas y promontorios, extraído del reglamento AS/NZS1170.2/2002, que corresponde a la figura 4.2. [10]

Las ecuaciones de la sección 4.4.2 de la norma australiana y neozelandesa se basan en las siguientes consideraciones: el factor de forma topográfica M_h se toma igual a 1.0, cuando no se tengan irregularidades como la que se muestra en la figura 7 (basada en la figura 4.2 del cuerpo normativo estudiado^[10]) y que se ajusta a la presentada en el dibujo de la figura 6 del problema estudiado, en el caso contrario, el valor de M_h será igual a cualquiera de los reportados en los siguientes tres casos posibles:

Para $H/(2L_u) < 0.05$, $M_h = 1.0$

$$M_h = 1 + \left[\frac{H}{3.5(z + L_1)} \right] \left(1 - \frac{|x|}{L_2} \right)$$

Para $0.05 \leq H/(2L_u) < 0.45$,

Para $H/(2L_u) \geq 0.45$

Con base en lo anterior se tomaron las siguientes consideraciones:

- La zona de separación se obtendrá con la ecuación:

$$M_h = 1 + 0.71 * \left(1 - \frac{|x|}{L_2} \right)$$

donde, H es la altura de la colina, L_u es la distancia horizontal viento arriba de la cresta de la montaña hasta la mitad de la altura bajo la cresta, x es la distancia horizontal viento arriba o viento debajo de la estructura a la cresta de la montaña, L_1 es la escala de longitud en metros, para determinar la variación vertical de M_h , la cual se toma de $0.36 L_u$ o $0.40 H$ y L_2 es la escala de longitud en metros, para determinar la variación horizontal de M_h , la cual es tomada de $4 L_1$ viento arriba para todos los tipos, y viento abajo para colinas y acantilados, o $10 L_1$ viento abajo para montañas y z es la altura de referencia sobre la estructura bajo el promedio del nivel local del suelo.

Considerando las variables de la figura 6 que contiene los planteamientos del enunciado del ejercicio, se puede observar que la región topográfica local se puede determinar a partir de las dimensiones propuestas en el ejercicio. En la figura 8 se muestran los valores de las distintas variables que se emplean en el análisis que se desarrolla a continuación.

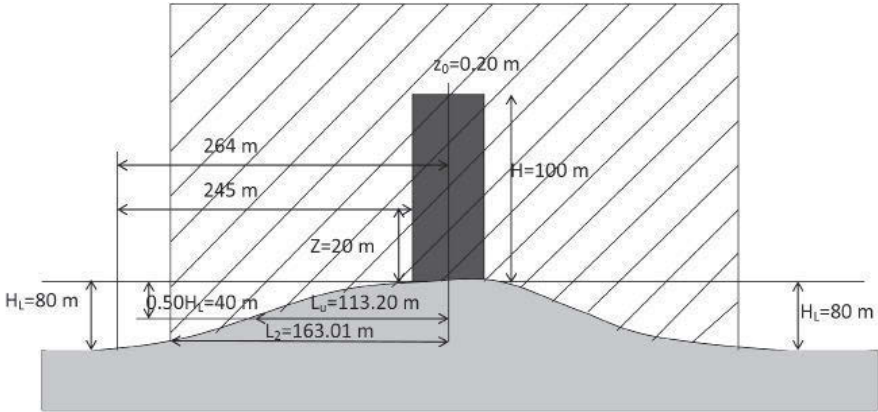


Figura 8. Datos para el diseño del edificio retomados a partir de la figura 6.

Para el presente ejemplo se consideran los siguientes datos:

$HL=80.00$ m, correspondiendo la mitad de la altura a $0.5HL=80*0.50=40.00$ m, con la altura de análisis $z=20.00$ m y la coordenada de inicio $x=0.00$ m. Continuando con los cálculos L_u se obtiene por mediciones a escala de la figura del enunciado y es el punto más alto de la cresta al punto donde se alcanza $H/2$ de la topografía, el cual corresponde a 113.20 m. A continuación se presentan los cálculos de L_1 y L_2 .

$L_2=1.44L_u=1.44*113.20=163.01$ m, de otra manera $L_2=1.60H=1.60*80=128.00$ m.
 $L_1=0.36L_u=0.36*113.20=40.75$ m, de otra manera $L_1=0.40H=0.40*80=32.00$ m.

De acuerdo con las ecuaciones, los valores de la longitud son: $L_u=113.20$ m, $L_2=163.01$ m y $L_1=40.75$ m. De acuerdo con lo anterior:

$\frac{H}{2L_u} = 0.353 > 0.05$, por lo cual para calcular M_h , se puede emplear la ecuación:

$$M_k = 1 + \left[\frac{H}{3.5(z + L_1)} \right] \left(1 - \frac{|x|}{L_2} \right) = 1 + \left[\frac{80}{3.5(20 + 40.75)} \right] \left(1 - \frac{0}{163.01} \right) = 1.376.$$

Para normalizar el valor obtenido para una zona con un $Z_o=0.20$ m, con respecto a una zona plana con un $Z_o=0.02$ m, se obtienen los valores de exposición del terreno por medio de la tabla de la sección 4.2.2, del reglamento estudiado (AS/NZS1170.2/2002) ^[10], la cual se denomina tabla 1.

Tabla 1. Multiplicadores de la altura del terreno para las velocidades de viento en todo tipo de terrenos para diseño por estado límite para las regiones A1 hasta A7, W y B. Denominada 4.1(A) por el reglamento AS/NZS1170.2/2002, del cual se transcribe. ^[10]

Altura (z), m	Terreno/Multiplicador de la altura (M_x , categoría)			
	Terreno categoría 1	Terreno categoría 2	Terreno categoría 3	Terreno categoría 4
≤3	0.99	0.91	0.83	0.75
5	1.05	0.91	0.83	0.75
10	1.12	1.00	0.83	0.75
15	1.16	1.05	0.89	0.75
20	1.19	1.08	0.94	0.75
30	1.22	1.12	1.00	0.80
40	1.24	1.16	1.04	0.85
50	1.25	1.18	1.07	0.90
75	1.27	1.22	1.12	0.98
100	1.29	1.24	1.16	1.03
150	1.31	1.27	1.21	1.11
200	1.32	1.29	1.24	1.16
250	1.34	1.31	1.27	1.20
300	1.35	1.32	1.29	1.23
400	1.37	1.35	1.32	1.28
500	1.38	1.37	1.35	1.31

Nota: Para valores intermedios de la altura z y la categoría del terreno, usar interpolación lineal.

De la tabla 1, se obtienen los datos para un $Z_0=0.20\text{m}$, $Ma_z=0.94$, mientras que para un terreno con rugosidad $Z_0=0.02\text{m}$, $M_z=1.08$. Aplicando los datos encontrados resulta:

$$F_{M_z M_z (Z_0=0.20)} = 1.376 * 0.94 = 1.293, \text{ al normalizarlo se tiene:}$$

$$F_{M_z M_z (Z_0=0.20)} / M_z (Z_0=0.02) = \frac{1.293}{1.08} = 1.198, \text{ el cual se coloca en la tabla 5}$$

para su comparación con los otros métodos.

Considerando las normas estadounidenses [1] del año 2005, se tiene el siguiente procedimiento de revisión:

La determinación del factor de topografía con las normas ASCE/SEI7/05, [1] se basa en utilizar las figuras de la página 45 de la norma citada y sus respectivas ecuaciones. Para el caso presente se emplea la figura que corresponde a promontorios asimétricos o rígidos de esa norma. Las variables involucradas en la determinación del factor que toma en cuenta la topografía y demás datos se muestran en la figura 9.

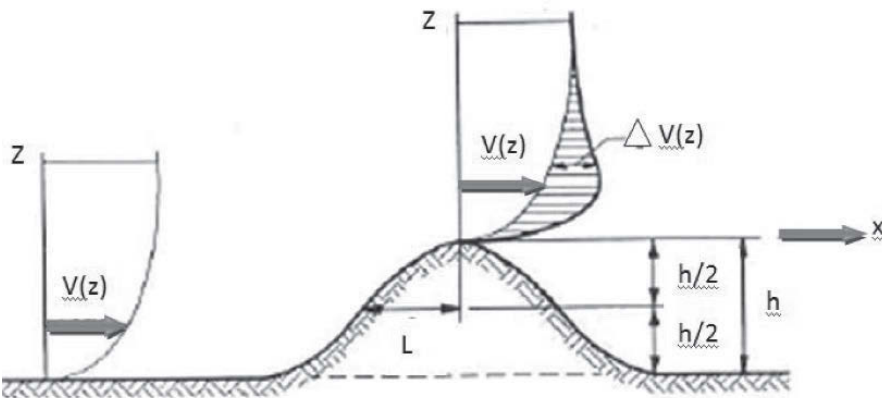


Figura 9. Colina o promontorio de dos dimensiones o de tres dimensiones asimétrica. Reglamento ASCE-SEI7-2005 [1] y retomado por MOC-CFE-1993. [9]

Las normas del MOC-DV-CFE-1993, ^[9] empleaban el mismo procedimiento que esta norma norteamericana, por lo cual no se realizó la revisión con esta norma y sólo se hizo con la original. Para la actualización reciente del manual de CFE se modificó el procedimiento a uno más congruente con la filosofía de diseño de la República Mexicana, aunque ha de señalarse que su empleo es sugerido pero no normativo en ninguna región del país.

En este caso se utilizan los valores calculados que corresponden a las variables identificadas en la figura 8. Recordar que esta figura contiene los datos que se emplearon para la revisión que se realizó con la norma AS/NZS1170.2-2002. ^[10] Estos se sustituyen por aquellos obtenidos en cada uno de los reglamentos que se analizan en este capítulo y además se consideran los factores propios del reglamento ASCE-SEI7-2005, ^[11] los cuales se encuentran agrupados en la tabla 2.

Tabla 2. Factores de Multiplicadores topográficos por exposición C retomado del reglamento ASCE-SEI7-2005, del cual se transcribe. ^[11]

H/L _n	K ₁ Multiplicador			x/L _n	K ₂ Multiplicador		z/L _n	K ₃ Multiplicador		
	2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill		2-D Ridge	Todos los demás casos		2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04
							0.90	0.07	0.11	0.03
							1.00	0.05	0.08	0.02
							1.50	0.01	0.02	0.00
							2.00	0.00	0.00	0.00

Notas para la tabla 2.

1. Para valores de H/L_h , x/L_h y z/L_h se permite la interpolación lineal.
2. Para $H/L_h > 0.5$, se acepta que $H/L_h = 0.50$ para evaluar K_1 y se substituye $2H$ por L_h para evaluar K_2 y K_3 .
3. Los multiplicadores están basados en la suposición que el viento se acerca a la colina o promontorio a lo largo de la dirección con la máxima pendiente.
4. Notación:
 - H : altura del monte o promontorio relativo al terreno viento arriba, en pies o metros.
 - L_h : distancia viento arriba de la cresta, donde la diferencia en la elevación del terreno es la mitad de la altura del monte o promontorio, metros.
 - K_1 : factor que considera la forma de la topografía y el efecto de la máxima velocidad creciente.
 - K_2 : factor que considera la reducción de la velocidad creciente con la distancia viento arriba o viento abajo en la cresta.
 - K_3 : factor que considera la reducción de la velocidad creciente con la altura cerca del terreno local.
 - x : distancia (viento arriba y abajo) desde la cresta al lugar del edificio, en metros.
 - z : altura bajo el nivel del terreno local, en metros.
 - μ : factor de atenuación horizontal.
 - γ : factor de atenuación en la altura.

Considerando los elementos hasta ahora obtenidos para la norma estudiada y del esquema mostrado en la figura 8, se recuperan los siguientes datos: $x=0.00$ m, $z=20.00$ m, $H=80.00$ m, $L_h=113.20$ m y $2H=160$ m. A partir de lo cual se puede calcular:

$$H / L_h = \frac{80.00}{113.20} = 0.707.$$

Dado que $H/L_h > 0.5$, se toma el valor de $H/L_h = 0.50$ para evaluar K_1 y se substituye $2H$ por L_h para evaluar K_2 y K_3 tal como se menciona en

el punto dos de las notas de la norma ASCE/SEI7-2005, con lo que se tienen los siguientes valores de la tabla 2, a partir de esta información se obtiene $K_1=0.53$ en la columna denominada 3-D Axisymmetric Hill. ^[11]

$x/2H = \frac{0.00}{2*80} = 0.00$, en la tabla se tiene $K_2=1.00$ (Para todos los demás casos). ^[11]

$z/2H = \frac{20.00}{2*80} = 0.125$, en la tabla se tiene $K_3=0.62$ (3-D Axisymmetric Hill). ^[11] Este valor se obtuvo mediante interpolación entre 0.10 y 0.20. ^[11] Donde:

$$K_{xy} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 = (1 + 0.53 * 1.00 * 0.62)^2 = 1.758$$

Para un $z_0=0.20\text{m}$, $K_z=0.834$; mientras que para un terreno con rugosidad $z_0=0.02$, $K_z=1.157$. Con estos datos se puede normalizar el factor topográfico y el valor es:

$$K_{top(z_0=0.20)} / K_z(z_0=0.02) = \frac{1.758 * 0.834}{1.157} = 1.267$$

Considerando las normas europeas 1998, ^[12] se tiene el siguiente procedimiento de obtención del factor topográfico.

La determinación del factor de topografía del Eurocódigo 1-1998, se basa en utilizar las figuras 8.1 y 8.2 de las páginas 28 y 29 del cuerpo de la norma, para el caso presente se emplea la figura 10 correspondiente a la 8.2 ^[12], la cual se muestra a continuación:

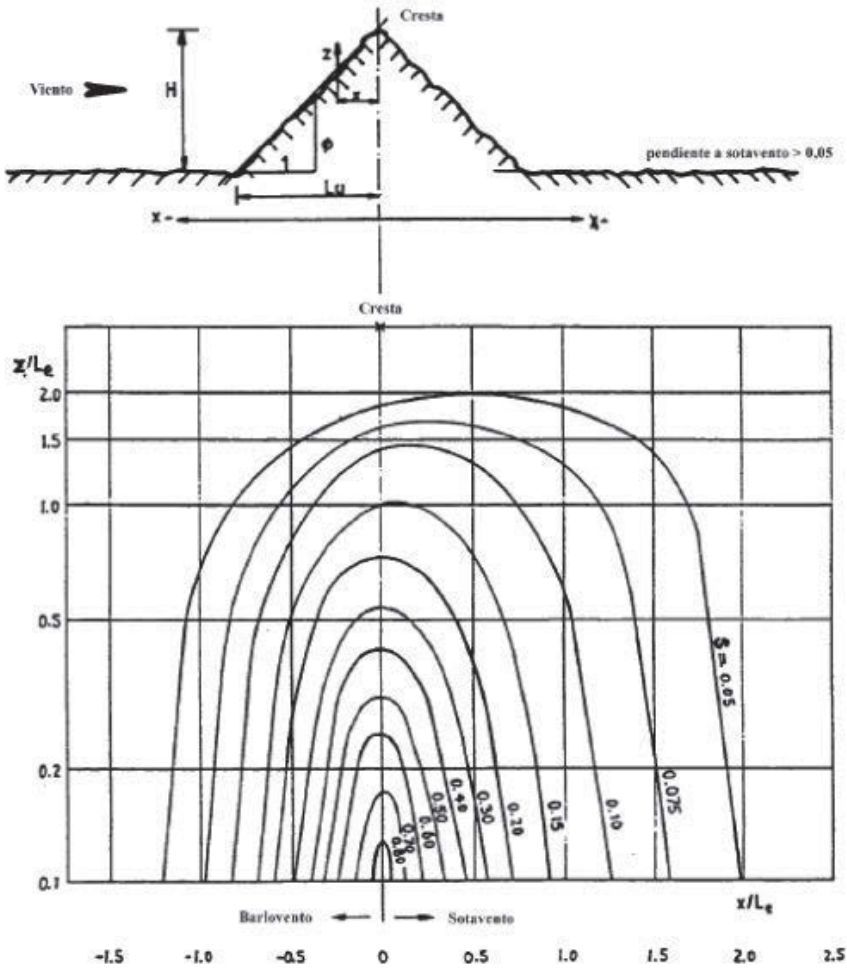


Figura 10. Factor s para colinas y sierras, figura 8.2 del Eurocódigo 1 - 1998. [12]

Considerando los elementos hasta ahora obtenidos de la norma estudiada y del esquema mostrado en la figura 8, se recuperan los siguientes datos: $H=80.00$ m, $L=163.01$ m y $z=20.00$ m. A partir de los datos anteriores se calculan los siguientes parámetros:

$$\Phi=H/L=80.00/163.01=0.49 > 0.30 \text{ y } L_e=H/\Phi=80.00/0.30=266.67 \text{ m}$$

$$z/L_e=20.00/266.67=0.075, \text{ dado que } z/L_e, \text{ considerando la figura 10 de}$$

la norma europea [12], se observa que es un valor muy pequeño, por lo cual se considera que el valor de $s=1.00$, tras analizar lo anterior resulta:

$$C_t = 1 + 0.60s = 1 + 0.60 * 1.0 = 1.60$$

El factor de exposición del terreno es $C_r=1.209$ para $z_0=0.02$ m y $C_r=0.806$ para $z_0=0.20$ m, considerando lo anterior al normalizar se obtiene:

$$C_r(z_0=0.20) / C_r(z_0=0.02) = \frac{0.806 * 1.60}{1.209} = 1.067$$

Finalmente considerando las [Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones del Distrito Federal], México [8], resulta el siguiente procedimiento:

La determinación del factor de topografía de las NTC-DV-RCDF de 2004, se basa en utilizar las figuras 3.1 y 3.2 del cuerpo de la misma norma técnica mexicana [8]. A continuación se muestra el esquema en la figura 11:

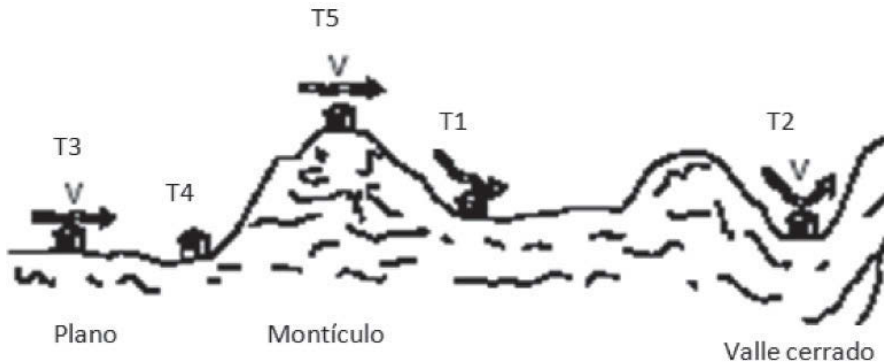


Figura 11. Formas topográficas locales que se ubican desde un terreno plano, montículo y valle cerrado, la cual se ubica en la figura 3.2 de las NTC-DV-RCDF-2004. [8]

Para el caso del factor de topografía, se observa que el reglamento lo coloca en función de la rugosidad del terreno, dicho factor se determina a partir de la tabla 3.

Tabla 3. Factor F_{TR} (factor de topografía y rugosidad del terreno), la cual se ubica en la tabla 3.3 de las NTC-DV-RCDF-2004, del cual se transcribe. [8]

Tipos de topografía	Rugosidad de terrenos en alrededor		
	Terreno tipo R_2	Terreno tipo R_3	Terreno tipo R_4
T_1 Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.80	0.70	0.66
T_2 Valles cerrados	0.90	0.79	0.74
T_3 Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos, con pendientes menores de 5% (normal)	1.00	0.88	0.82
T_4 Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10%	1.10	0.97	0.90
T_5 Cimas promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10% cañadas o valles cerrados	1.20	1.06	0.98

El factor de topografía seleccionado en la tabla 4 de las NTC-DV-RCDF-2004, [8] corresponde a un terreno tipo R_3 normalizado respecto al valor de R_2 , como se puede observar en la figura 12.

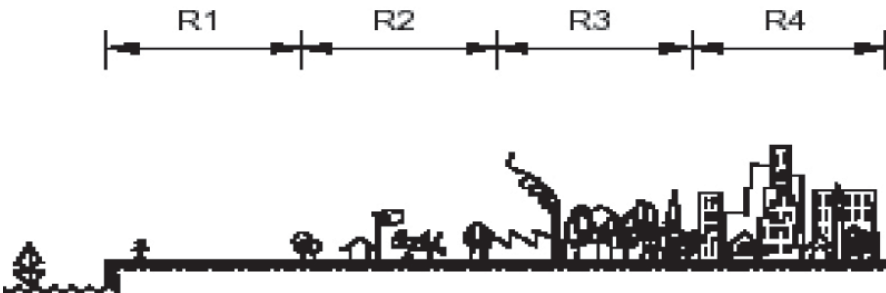


Figura 12. Rugosidad del terreno correspondiente a la figura 3.1 de las NTC-DV-RCDF-2004. [8]

Tabla 4. Rugosidad del terreno, δ y α , correspondiente a la tabla 3.2 de las NTC-DV-RCDF-2004, del cual se transcribe. [8]

Tipos de terreno	α	δ , m
R ₁ Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto	0.099	245
R ₂ Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	0.128	315
R ₃ Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del Tipo R ₄	0.156	390
R ₄ Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m	0.170	455

Considerando los elementos hasta ahora obtenidos de la norma estudiada y del esquema mostrado en la figura 8, se recuperan los siguientes cálculos con los datos señalados anteriormente:

De la siguiente ecuación se tiene:

$$F_{\alpha} = \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha} \quad \text{si } 10\text{m} < z < \delta$$

$$F_{\alpha} = \left(\frac{20}{10}\right)^{0.128} = 1.093 \quad \text{para la región } R_2 \text{ y } F_{\alpha} = \left(\frac{20}{10}\right)^{0.156} = 1.114 \quad \text{, para la región } R_3$$

La normalización resulta:

$$F_{\alpha(z_0=0.20)} / F_{\alpha(z_0=0.02)} = \frac{1.06 * 1.114}{1.093} = 1.080$$

A continuación se presenta un resumen de los valores normalizados de acuerdo con los cuatro reglamentos estudiados:

Tabla 5. Comparación de resultados de los distintos reglamentos usados

Norma estudiada	Factor de exposición normalizado con respecto al correspondiente a una longitud de rugosidad $z_0=0.02$ m
AS/NZS1170.2/2002	1.198
ASCE/SEI 7/2005	1.267
Eurocódigo 1-1998	1.067
NTC-DV-RCDF-2004	1.080

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 5 se observa que el Reglamento norteamericano (ASCE/SEI 7/2005) ^[11] es el más conservador, mientras que las Normas técnicas complementarias del Distrito Federal (NTC-DV-RCDF-2004) ^[8] y el Eurocódigo 1-1998 ^[12] son los menos conservadores, por lo cual se explica que en todo México se recurra a la Norma Técnica de la capital del país para diseño por viento. Otro elemento a considerar es la sencillez de cálculo de los dos códigos menos conservadores, lo cual motiva su uso masivo.

Comentarios finales

Los reglamentos estudiados son más complejos que los que se utilizan en México para el diseño por viento. Estas normativas estudian con más detalle el efecto de la topografía en la velocidad del viento y se basan en datos experimentales. Entre ellas destacan los reglamentos: AS/NZS1170.2/2002 (australiano y neozelandés) ASCE/SEI7/05 (norteamericano, principalmente para la costa este de los Estados Unidos de América).

Los países en que se han desarrollado estos reglamentos cuentan con historial en investigación e instrumentación en la materia. Por esta razón, la normativa mexicana, tradicionalmente, los ha tomado como base (aunque mayormente el MOC-CFE-1993, no así las NTC-DV-RCDF-2004). Cabe mencionar que en México el *Manual de obras civiles* (MOC-CFE-1993) tradicionalmente ha desempeñado el papel de norma nacional, sin embargo no es de cumplimiento obligatorio.

Existe una diferencia muy amplia entre lo que señala el reglamento norteamericano y lo que presentan las normas mexicanas. Pero más allá de la diferencia numérica y sus implicaciones, se debe estar consciente de las diferencias existentes en las investigaciones que los generaron. Las NTC-DV-RCDF-2004 son un reglamento desarrollado para una ciudad con las características del Distrito Federal. Por lo tanto es muy sencillo de emplear y por lo mismo conservador para algunos casos, pero no para todos como se mostró en el ejemplo. Sin embargo, hace falta trabajar en reglamentos locales para aquellas localidades que tienen una mayor presencia de estos fenómenos, tal como ocurre con algunas de las ciudades chiapanecas.

Agradecimientos

Agradezco al doctor Emilio Zordo Sabay por las enseñanzas durante la materia ingeniería eólica en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, este trabajo se basa en ellas e incluso retoma un ejemplo de la materia para fortalecerlo.

Quiero manifestar un agradecimiento especial al doctor Alejandro Ruiz Sibaja, ya que desarrolló una revisión técnica pormenorizada y profesional, lo que permitió la mejora técnica del documento, pero sobre todo la claridad en el proceso de divulgación.

Bibliografía

- [1] Holmes, J., 2001, *Wind Loading of Structures*. Spon Press by Taylor & Francis Group, London, England.
- [2] Sordo, E., 2006, *Apuntes de la materia de Ingeniería eólica*. Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, D.F.
- [3] Jackson, P. y J. Hunt, 1975, "Turbulent flow over a low hill" en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101: 929-55.
- [4] Glanville, M. y K. Kwok, 1997, "Measurements of topographic multipliers and flow separation from a steep escarpment. Part II" en *Model-scale measurements*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69-71: 893-902.
- [5] Deaves, D., 1981, "Computations of wind flow over changes in surface roughness" en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 7: 65-94.
- [6] Taylor, P. y R. Lee, 1984, "Simple guidelines for estimating wind speed variation due to small scale topographic features", en *Climatological Bulletin* 18: 3-32, Canada.
- [7] RCTGZ, 2004, *Reglamento de construcción de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, México.

- [8] NTC-DV-RCDF, 2004, "Normas técnicas complementarias de diseño por viento" en Reglamento de construcciones del Distrito Federal, México.
- [9] MOC-DV-CFE, 1993, Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca Morelos.
- [10] AS/NZS-1170.2, 2002, Australian and New Zealand Standard Structural design actions, part 2: wind actions, 4 June.
- [11] ASCE/SEI 7, 2005, Minimum design loads for buildings and other structures, section 7 Wind design, United States.
- [12] Eurocódigo 1, 1998, Eurocódigos Normas europeas experimentales, UNE-ENV 1991-parte 2-4, acciones por viento.

II. Sismicidad registrada en la estación acelerométrica de la UNICACH

Carlos Narcía-López

Dedicado a: Max, Paulo, Betty y Héctor.

Introducción

Desde Noviembre de 2007, la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, cuenta con un monitoreo permanente de la sismicidad generada en la región. El interés por llevar a cabo este registro se fundamenta en la necesidad de contar con parámetros mesurables que permitan el desarrollo de estudios de peligro y vulnerabilidad sísmica.

La actividad geológica natural, expresión del calor interno del planeta, permite ocuparse, al menos por interés propio, del peligro sísmico intrínseco de la región. Este capítulo se formó con la intención de explicar las características espaciales que presentan los sismos regionales, mediante la exposición de 131 eventos registrados desde noviembre de 2007 hasta finales de agosto de 2009.

Marco tectónico

En la región interactúan tres grandes placas tectónicas que generan la mayor cantidad de sismos: Cocos, Norteamérica y Caribe (figura 1). El movimiento entre las placas del Caribe y de Norteamérica es de tipo

lateral izquierdo, cuyo límite transformante está representado por una serie de fallas geológicas que todavía presentan un trazo incierto [1]. Por otra parte, la placa de Cocos subduce por debajo de las placas mencionadas y el límite convergente en donde empieza este proceso está representado por la trinchera mesoamericana localizada a 5500 m por debajo del nivel medio del océano Pacífico. Este proceso aporta mayor cantidad de energía sísmica al fenómeno y ha generado sismos de profundidades considerables.

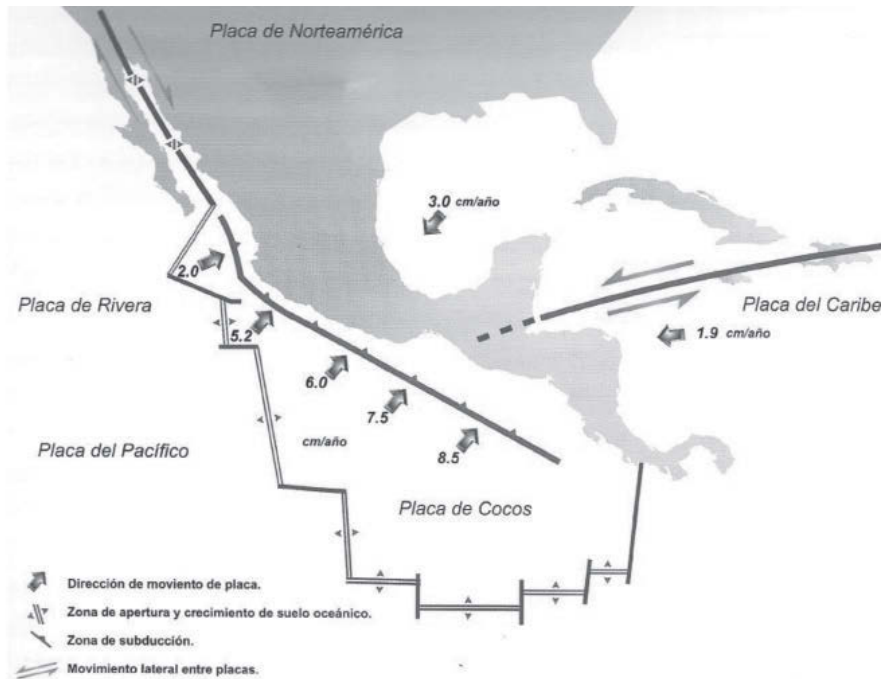


Figura 1. Tectónica general de México, en la que se señalan las velocidades de desplazamiento relativo de las placas regionales y los límites existentes [2].

La placa de Cocos subduce, en la parte sureste del estado, a una tasa de 7.5 cm por año, según el modelo tectónico NUVEL-1 [3], con una característica tectónica importante: existe un incremento del ángulo de subducción desde regiones al este del Istmo de Tehuantepec, desde 25°,

hacia zonas por debajo del estado y Centroamérica, hasta 40° [4]. En la figura 2 podemos observar el modelo propuesto por Espíndola [5].

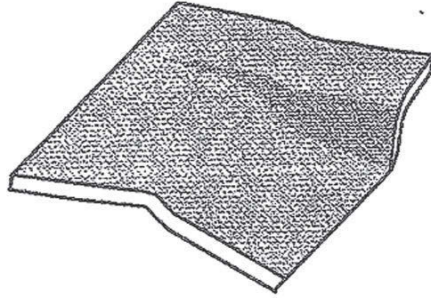


Figura 2. Modelo geométrico de la placa de Cocos por debajo del estado de Chiapas, propuesto por Espíndola Castro (1996).

Esta característica física de la litósfera juega un papel importante en la sismogénesis regional, ya que en la parte somera de la placa de Cocos, al contacto con la placa de Norteamérica, se generan eventos interplaca con mecanismos focales vinculados a fallas inversas. Esta compresión debe ser, en buena parte, también la causante indirecta de la sismicidad somera generada en las fallas internas del estado.

Por otro lado, la parte de la placa de Cocos que penetra hasta profundidades intermedias (aproximadamente hasta 300 km), genera sismos intraplaca, debido a rompimientos internos, con mecanismos focales asociados a fallas normales. Por debajo de esta zona, según el pensamiento tectónico actual, la placa se funde y sus materiales penetran a la corteza por debajo, dando lugar a la formación de volcanes, que también en su dinámica interna son generadores de microsismos, con mucha menor energía que los sismos generados en el proceso de subducción, que a mi juicio son los más peligrosos.

Finalmente, la interacción entre las placas del Caribe y Norteamérica, en su movimiento lateral izquierdo, también genera sismicidad somera que puede liberar mucha energía, como es el caso del sismo generado el 28 de Mayo de este año, a 10 km de profundidad, al que se le asoció una magnitud de 7.3, al norte de Honduras, en los límites entre las placas mencionadas.

Además de las propiedades de subducción y movimiento transformante, la corteza en Chiapas presenta variaciones significativas, característica que también puede modificar el nivel de peligro al que nos enfrentamos. Según los resultados obtenidos en mi tesis de maestría [6], la corteza en Chiapas puede tener espesores en el rango de 17 a 53 km. En la Figura 3 se muestra el modelo propuesto, que representa a la discontinuidad de Moho, entre la corteza y manto superior, vista desde arriba.

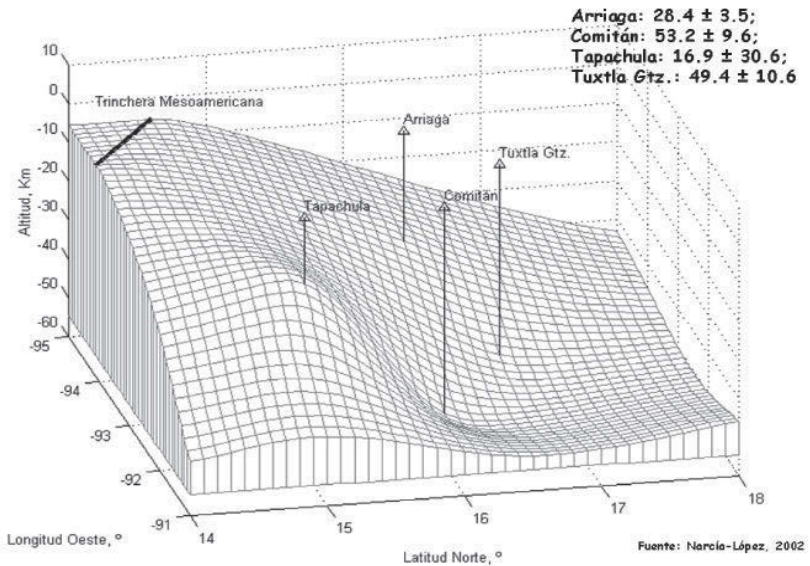


Figura 3. Modelo propuesto por Narcía-López (2002). La superficie de la figura representa la discontinuidad entre la corteza y el manto superior.

Aquí es conveniente detenernos a pensar en las consecuencias de lo anteriormente descrito, sobre todo en lo referente a los sismos profundos. Es necesario pensar en la manera que el manto superior afecta las señales sísmicas generadas de manera intraplaca con fallamiento normal. Algunas preguntas que considero al respecto son: ¿Qué respuesta sísmica tiene de manera intrínseca el manto superior por debajo de Chiapas? y ¿Cómo afectan las propiedades físicas que generan la respuesta sísmica al peligro sísmico regional?

Características del equipo de monitoreo

El equipo que ha operado en la Escuela de Ingeniería Ambiental consta de un sensor triaxial de aceleración de balance de fuerzas modelo Epi-sensor FBA ES-T [7] y una grabadora digital modelo Altus K2, ambos de Kinometrics [8]. Este equipo se muestra en la figura 4.



Figura 4. Equipo acelerométrico. La digitalizadora está conectada al sensor, empotrado al suelo. Se usa un *no-break* que permite disponer de cierto tiempo para guardar la información, en caso de un evento grande.

El acelerómetro triaxial es un sensor de bajo ruido y ancho de banda extendida (hasta 200 Hz) para superficie libre, optimizado para registro sísmico. En la tabla 1 se presentan las características técnicas del aparato [7 y 8].

Una característica importante de este sensor es su bajo nivel de ruido, lo que permite hacer mediciones confiables de vibraciones pequeñas, inclusive de ruido natural. En la figura 5 se muestra la comparación entre los modelos alto y bajo de ruido terrestre, propuestos por Peterson (1993) [9], y el ruido del aparato [7]. Como se observa, aproximadamente desde 0.06 Hz, el ruido del aparato es menor que el modelo alto de ruido terrestre.

Tabla I. Especificaciones técnicas del sensor utilizado en el monitoreo acelerométrico de Ciudad Universitaria de la UNICAH [7]

Especificaciones Técnicas del EpiSensor ES-T	
Rango dinámico	155 dB
Ancho de Banda	Hasta 200 Hz
Rango de escala completa	Seleccionada por el usuario: $\pm 0.25 \text{ g}$, $\pm 0.50 \text{ g}$, $\pm 1 \text{ g}$, $\pm 2 \text{ g}$ y $\pm 4 \text{ g}$
Salidas	Seleccionada por el usuario: $\pm 2.5 \text{ V}$ y $\pm 10 \text{ V}$ (terminal única) $\pm 5 \text{ V}$ y $\pm 10 \text{ V}$ (diferencial)
Ajuste de ceros	Manual
Linearidad	$< 1000 \mu\text{g}/\text{g}^2$
Histéresis	$< 0.1 \%$ de la escala completa
Consumo de energía	12 mA desde $\pm 12 \text{ V}$ (amperaje estándar) 35 mA desde $\pm 12 \text{ V}$ (amperaje de bajo ruido)
Tamaño	13.3 cm de diámetro, 6.2 cm de alto
Temperatura de operación	Desde -20° hasta 70° C (de 0° a 160° F)
Peso	Aproximadamente 1.8 kg (4 lbs)

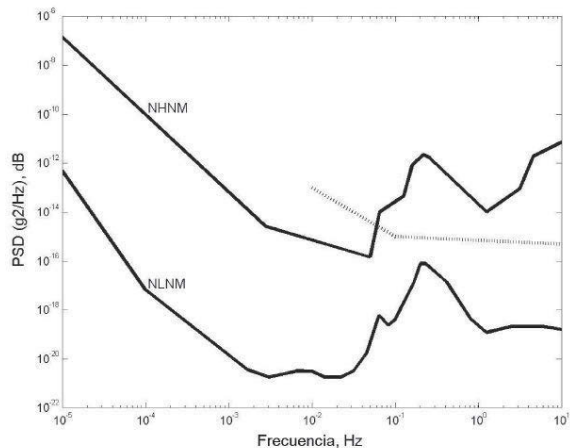


Figura 5. Nivel de ruido del EpiSensor (línea punteada), comparado con los modelos alto (NHNM) y bajo (NLNM) propuestos por Peterson para la Tierra.

La grabadora, por otro lado, es una digitalizadora de movimientos fuertes de alto rango dinámico, con las características técnicas señaladas en la tabla 2. La función principal de este aparato es monitorear la señal enviada por el sensor, comprobar si satisface los criterios de detección y, en caso de hacerlo, convertir la señal eléctrica a formato digital para almacenarla en tarjetas de memoria y poder descargar, posteriormente, a cualquier equipo de cómputo.

Tabla 2. Características técnicas de la digitalizadora Altus K2 de Kinometrics [8].

Especificaciones Técnicas del Altus K2	
Canales de entrada	6 canales de sensores externos 2.5 V de nivel de entrada x1, x3, x10, x30 y x100 de ganancia (usuario)
Adquisición de datos	24 bits de resolución Filtro FIR anti-alias, con corte al 80 % y 120 dB abajo de Nyquist Rango dinámico > 114 dB a 200 muestras por segundo (mps) Frecuencia de respuesta hasta 80 Hz a 200 mps Tasa de muestreo de 20, 40, 50, 100, 200 y 250 mps (usuario) Modo de adquisición continuo o por disparo
Disparo	Independiente por canal Umbral elegible desde 0.01% de la escala completa
Almacenamiento	Dos bandejas para tarjetas PCMCIA
Energía	24 Vdc desde cargador Rango de operación de 10.5 a 15 V Batería interna de 12 V 12 Ah
Ambiente	Rango de temperatura desde -20° hasta 70° C Humedad de operación de 0 a 100%

Este equipo de monitoreo se adquirió en 2006 para desarrollar el proyecto de investigación CHIS-2005-C05-063, aún en proceso, con aportaciones de los Fondos Mixtos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Chiapas (COCyTECH) y la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH).

En un inicio, el equipo fue usado para hacer mediciones de vibración ambiental, como parte de los objetivos internos del proyecto mencionado. Después de eso, y con la finalidad de aportar información para el desarrollo de espectros de diseño para la zona y otros estudios de riesgo sísmico, tomé la decisión de instalarlo permanentemente en mi espacio de trabajo en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH.

Actualmente, la detección y registro de eventos se hace mediante umbral de disparo, correspondiente al 0.01% de la escala completa, con memoria de pre-evento de 40 s y post-evento de 120 s. Esto implica que cuando la grabadora detecta una aceleración en el terreno de aproximadamente 0.2 cm/s^2 comienza a grabar el movimiento del terreno e incluye el movimiento ocurrido desde 40 s antes de la detección. Desde luego que estos parámetros permiten que muchos movimientos pequeños ocasionados por el quehacer diario de la población que ocupa espacios cercanos sean grabados, como la actividad de explotación de la roca caliza por la compañía Caleras Maciel S.A de C.V, ubicada en las cercanías de la estación, sin embargo, también permiten la detección de muchos sismos regionales de mediana magnitud y algunos telesismos de alta magnitud.

Datos

Como he mencionado anteriormente, el acelerómetro fue instalado a finales de 2007. Su ubicación actual tiene las coordenadas 16.774° de latitud norte y 93.123° de longitud oeste, a 593 metros sobre el nivel medio del mar, en la parte norte de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (figura 6).

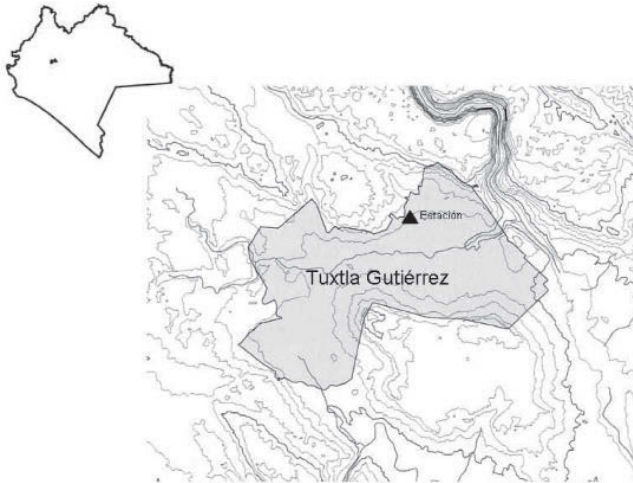


Figura 6. Ubicación de la estación acelerométrica en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.
El triángulo representa la estación

Hasta finales de agosto de 2009 han sido registrados 158 sismos con diferentes características. De esta sismicidad, 131 eventos han sido ubicados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), que muestro en la figura 7.

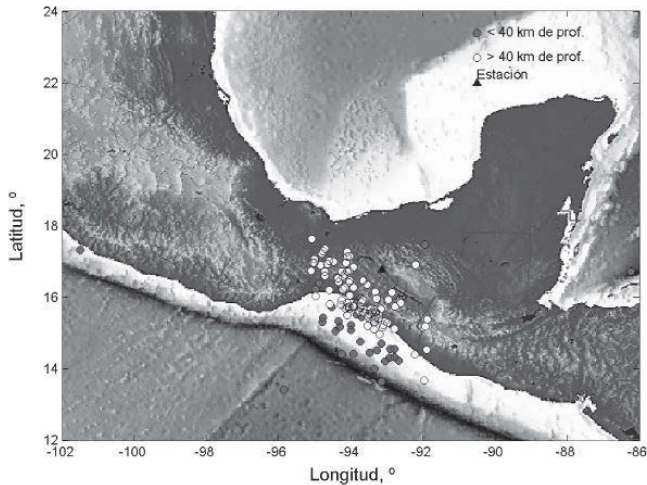


Figura 7. Sismicidad registrada en la estación acelerométrica de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH y ubicada por el SSN.

Una vez registradas y descargadas en la computadora, las señales digitales son sometidas a un proceso que permite suprimir el ruido que el aparato suma a la señal del terreno. Esto se hace mediante el software *Strong Motion Analyst* (SMA), usando el formato del Centro de Movimientos Fuertes (SMC) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para convertir la señal obtenida del acelerómetro a series de aceleración, velocidad y desplazamiento del terreno. La corrección se hace usando el método propuesto por Trifunac, que el programa trae por defecto.

En la siguiente figura se muestra la señal correspondiente al evento del 28 de mayo de 2009, ocurrido en las costas de Honduras, a 10 km de profundidad, en la región limítrofe entre las placas de Norteamérica y Caribe [10]. La aceleración máxima registrada en la estación, a 735 km de distancia epicentral, fue ligeramente mayor a 2.6 gals. Como mencioné anteriormente, el sismo se estimó de magnitud 7.3.

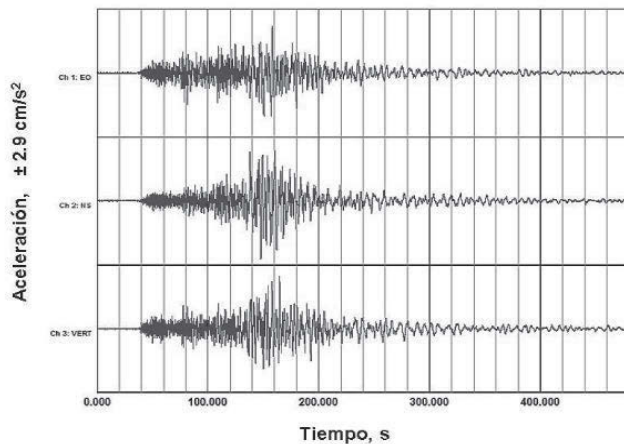


Figura 8. Registro de aceleraciones del sismo ocurrido el 28 de mayo de 2009 a las 8:25:26 hrs (GMT). Se muestran los tres canales con duración mayor a 400 s.

Análisis

En la figura 7 se observa que además de la sismicidad regional, la estación ha detectado dos sismos lejanos, ubicados a 735 y 894 km de distancia, lo que señala la sensibilidad del equipo.

De la sismicidad registrada, el 57% se generó a profundidades mayores de 40 km y el resto a profundidades someras, menores a 40 km. Lo anterior se muestra en la figura 9, en donde se observa la sismicidad generada a cada 20 km (9a) y 40 km (9b) de profundidad.

En la Figura 9b, la primera barra representa 36 eventos (43%) ocurridos en los primeros 40 km, representativos de la sismicidad cortical, ya que es el rango del espesor de la corteza en la región [6].

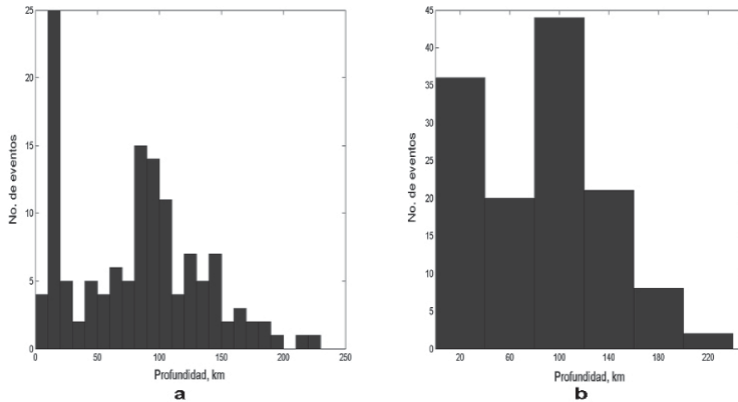


Figura 9. Histogramas de profundidad de la sismicidad detectada en la estación, de acuerdo a las localizaciones del SSN.

Además de lo anterior, se observa que la mayor parte de la sismicidad cortical se genera entre los 10 y 20 km (25 eventos), lo que se muestra en la figura 9a y que probablemente se deba a la zona de mayor interacción compresiva entre las placas tectónicas. De los sismos generados en el manto superior, la mayoría ocurre entre los 80 y 110 km de profundidad, que corresponde a la zona de transición entre la litósfera y la astenósfera, de acuerdo a los datos aportados por el *Modelo de Referencia Preliminar de la Tierra* (PREM).

Según el PREM [11], existe una zona entre los 80 y 220 km de profundidad en la que el coeficiente de atenuación a cortante (Q_m) se reduce desde 600 hasta 80. En la figura 10 se presenta el modelo hasta los primeros 670 km de profundidad. Un coeficiente de amortiguamiento bajo implica atenuación muy fuerte y viceversa, lo que puede implicar que el peligro

sísmico regional disminuya, ya que se genera un porcentaje importante de eventos sísmicos en el rango de profundidad mencionado.

Por otro lado, en algunas regiones de convergencia tectónica como Japón, se ha estudiado acoplamiento de señales que se propagan por la placa que subduce, generando movimientos amplificadas en la superficie de la Tierra [12]. El sismo del 20 de octubre de 1995 fue catalogado por el doctor Cecilio Rebollar Bustamante (R.I.P.), del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), como de este tipo, ya que alcanzó aceleraciones hasta de 436 cm/s^2 , cuando sismos de magnitudes similares y menor profundidad han producido aceleraciones menores en otras regiones de México [13]. Este hecho podría aumentar el nivel de peligro en la zona.

Los casos mencionados en los párrafos anteriores se relatan con la finalidad de concientizar al lector de este capítulo en la necesidad de desarrollar estudios confiables que permitan conocer las propiedades físicas de la litósfera y astenósfera por debajo de la región, para desarrollar modelos de peligro sísmico acordes con la naturaleza del fenómeno sísmológico regional.

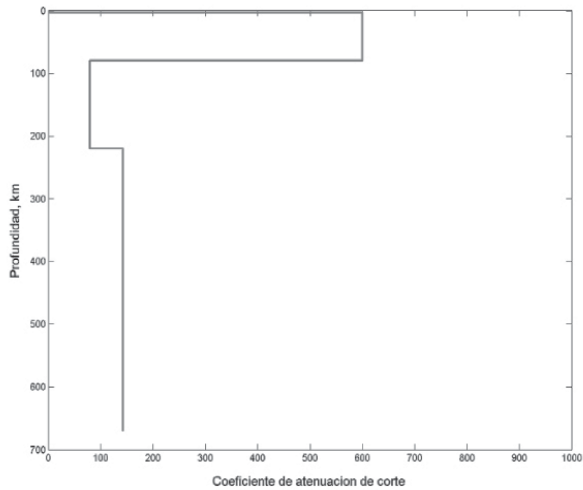


Figura 10. Variaciones del coeficiente de atenuación Q_m propuesto para la Tierra por el PREM, para los primeros 670 km de profundidad.

Finalmente, en la figura 11 se muestra la sismicidad en tres dimensiones, desde una perspectiva perpendicular a la dirección de 20° Noroeste (N20E), que representa la dirección promedio de subducción en la zona. En esta imagen se observa perfectamente la zona de Benioff-Wadati de la placa de Cocos, que representa la región de la placa que genera sismos. El proceso de subducción se observa claramente.

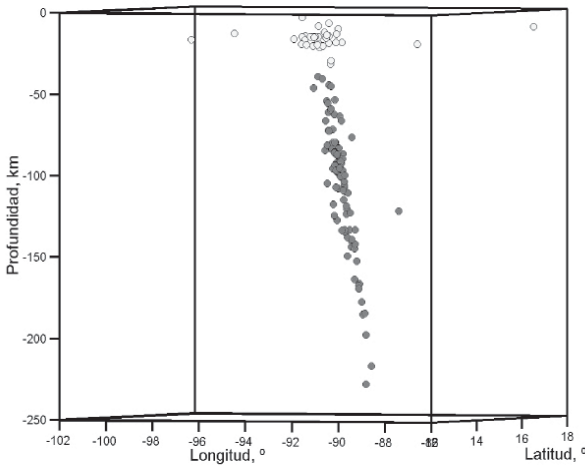


Figura 11. Ubicación de los hipocentros, en donde se distingue perfectamente el proceso de subducción regional. La escala vertical está amplificada.

Conclusiones

El estado de Chiapas se encuentra localizado dentro de una región que muestra un marco tectónico complejo, que probablemente sea una de las causas de la escasa cantidad de estudios desarrollados en torno a las características tectónicas regionales.

La variación lateral que presenta la placa de Cocos desde ángulos casi horizontales en Oaxaca y occidente hasta inclinaciones de 40° a 45° hacia Centroamérica genera sismos en la región de profundidad intermedia (hasta 300 km) en porcentaje alto.

La zona de mayor generación de sismos profundos en la región está incluida en la zona que el PREM predice con alto grado de atenuación, en la zona de transición entre la litósfera y la astenósfera, lo que podría disminuir el peligro sísmico de esa zona, a pesar de la alta sismicidad que se presentan en diferentes mapas sísmicos, si los datos del PREM son adecuados para la región.

Por otro lado, el acoplamiento de la energía sísmica puede, en algunos casos, amplificar las señales sísmicas, aumentando en cierto grado el peligro sísmico.

De cualquier manera, es necesario desarrollar más estudios que aborden las situaciones expuestas de manera científica y, posteriormente, desarrollar panoramas de peligro sísmico y vulnerabilidad de acuerdo con las características sismotectónicas regionales.

Agradecimientos

Agradezco al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado mediante el proyecto CHIS-2005-C05-063, sin el cuál hubiera sido imposible contar con el equipo de medición.

Quiero expresar un agradecimiento especial a mi maestro y amigo, M.C. Jorge A. Aguilar Carboney, por haberse dado el tiempo para la revisión del capítulo, por sus atinados comentarios y gran ayuda.

Bibliografía

- [1] Narcía-López, C., 2009, "Importancia del estudio de los sismos en Chiapas", en: *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales, aportaciones al sureste de México*. UNICACH, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- [2] <http://atl.cenapred.unam.mx/>
- [3] Sedlock, R.L., F. Ortega Gutiérrez y R.C. Speed, 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. GSA Books Science. Colorado, USA. (special paper, 278).
- [4] Rebollar, C.J., V.H. Espíndola, A. Uribe, A. Mendoza y A. Pérez-Vertti, 1999, "Distributions of stresses and geometry of the Wadati-Benioff zone under Chiapas", en *Geofísica Internacional*. 38(2). 95-106 p, México.
- [5] Espíndola Castro, V.H., 1996, *Sismicidad asociada a la zona de subducción de Chiapas*, tesis de Maestría, División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología, CICESE. Ensenada, Baja California, México.
- [6] Narcía López, C., 2002, *Espesor de la corteza en Chiapas mediante ondas directas y convertidas*, tesis de Maestría, División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología, CICESE. Ensenada, Baja California, México.

- [7] Kinematics, 2005, EpiSensor, Force Balance Accelerometer, Model FBA ES-T, User Guide.
- [8] Kinematics, 2002, Altus Digital Recorder, User Manual.
- [9] Peterson, J., 1993, Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey. Albuquerque, New Mexico, USA. (Open-file report 93-322). 94 pp.
- [10] <http://www.iris.edu/>
- [11] Lay T. and T Wallace, 1995, Modern global seismology. Academic Press. San Diego, California, USA.
- [12] Molas, G.L. and F. Yamazaki, 1995, Attenuation of earthquakes in Japan including deep focus events. Bulletin of the seismological society of America. 85(5). 1343-1358 p.
- [13] Rebolgar, C.J., L. Quintanar, J. Yamamoto y A. Uribe. Source Process of the Chiapas, México, Intermediate-Depth Earthquake (Mw=7.2) of 21 October 1995. Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 2, 348-258 p.

III. Evaluación del riesgo a la erosión de suelo en la microcuenca del río Francés

Rodolfo Palacios-Silva,
Sergio López-Mendoza y
Alondra Gil-Ríos

Introducción

El estudio del riesgo que presenta un sistema a un fenómeno natural es una aproximación utilizada en muchas disciplinas científicas y tecnológicas, incluyendo en ellas a la Ingeniería Ambiental. El objetivo de este capítulo es mostrar una aproximación analítica que permite establecer el riesgo de erosión producida por la precipitación pluvial y la combinación de variables edafológicas, topográficas y de uso de suelo que se presentan en un paisaje en particular. El estudio fue realizado asumiendo un paralelismo entre la estimación de riesgo con la ecuación universal para estimar la pérdida de suelos (USLE, abreviación de las siglas en inglés por las que se conoce el modelo general: Universal Soil Loss Equation), extendiendo la USLE a una microcuenca utilizando un Sistema de Información Geográfica (GIS, abreviación de las siglas en inglés del concepto Geographic Information System). Hacia el final del capítulo se discute la validez y utilidad de aplicar este acercamiento metodológico para determinar áreas críticas dentro de la zona de estudio.

Erosión del suelo

La erosión es el evento que determina la distribución espacio-temporal del suelo superficial porque regula el balance de dos procesos, la generación y la remoción del suelo. Las actividades humanas han modificado en muchas formas este balance natural porque suprimen la formación de suelo o aceleran su desplazamiento (la agricultura, las edificaciones, la deforestación, entre muchas otras). El suelo es un recurso natural no renovable en corto plazo, por lo que la recuperación de sus propiedades resulta difícil y costosa. En la actualidad, el cambio en el balance generación-remoción del suelo es considerado uno de los principales problemas ambientales.^[1]

Se estima que alrededor de dos mil millones de hectáreas en el mundo (15% de la superficie terrestre) sufren algún tipo de degradación del suelo severa.^[2] Es difícil asignar un costo de la degradación de la calidad edáfica porque el suelo proporciona una gran cantidad de bienes y servicios ambientales como el sostenimiento de la biodiversidad, la regulación del ciclo hidrológico, el reciclaje de nutrientes así como el amortiguamiento, la retención o transformación de sustancias contaminantes. Sin embargo, es posible dar una valoración económica de la erosión de suelo porque la degradación está inversamente relacionada con el nivel productivo de las áreas forestales o agrícolas. Para dar una magnitud del impacto de la pérdida del suelo cabe mencionar que en algunos países del sur de Asia se calcula que la disminución en la productividad del suelo representa la pérdida de siete mil millones de dólares al año,^[3] mientras que en EU, la pérdida de productividad tiene un costo que alcanza los 44 mil millones de dólares por año.^[4]

La mayoría de los estudios relacionados a la evaluación de la erosión del suelo se han realizado en países desarrollados. En América latina y otros países en desarrollo, el estudio de las causas y consecuencias de la erosión ha sido poco abordado a pesar que resulta un aspecto fundamental por la relación que tiene la calidad del suelo con la obtención de bienes y servicios ambientales.^[5] El estudio de las causas y consecuencias ambientales de la erosión, así como las formas de mitigar su impacto negativo, es un reto que deberá ser atendido con celeridad para alcanzar la sostenibilidad del desarrollo social en futuras generaciones.

Modelación del riesgo a la erosión de suelo por actividad pluvial

La erosión hídrica depende de cuatro factores: clima, suelo, vegetación, y topografía. El impacto del clima se relaciona con la cantidad y la intensidad de la lluvia.^[6] Si la precipitación es mayor, la erosión potencialmente también puede ser mayor. Sin embargo, el tamaño de las partículas del suelo y su capacidad de retención, permeabilidad y contenido de agua son determinantes en la intensidad de la erosión.^[7] Por ejemplo, si las partículas son más pequeñas o el suelo contiene más agua o la permeabilidad es baja entonces existe un mayor poder abrasivo. La vegetación por otro lado, también desempeña un papel importante; reduce el impacto mecánico de las gotas de agua al caer sobre el suelo y determina el flujo hídrico.^[8] Los suelos desnudos son más susceptibles a la erosión que los suelos con cobertura vegetal. La influencia de la topografía a la erosión se asocia básicamente a la pendiente, cuanto mayor es la pendiente, mayor es el potencial para la erosión de agua.^[9] Los cuatro factores mencionados anteriormente, en su conjunto, predicen el tipo de erosión y su magnitud.

La modelación numérica sintetiza los factores que producen la erosión en una ecuación. Para la erosión hídrica permite entender los procesos causales de la degradación de los suelos, evaluar local y regionalmente el impacto ya sea en zonas naturales o en sistemas productivos, e identificar las estrategias de control a la erosión.^[10] En este contexto la modelación numérica permite evaluar las prácticas de conservación que buscan la reducción de la erosión de suelos.^[10] Existen muchos tipos de modelos diferentes entre sí en su capacidad predictiva y aplicaciones que evalúan la pérdida de suelos como resultado de los procesos hidrológicos.^[11] Básicamente los modelos se agrupan en empíricos (conjunto de ecuaciones empíricas) y analíticos (conjunto de ecuaciones que modelan la deposición de sedimentos). Generalmente los modelos empíricos son útiles para estudios a gran escala (temporal y espacial) y se distinguen también porque los datos necesarios para estimar sus parámetros son relativamente fáciles de obtener. Los modelos analíticos son más precisos y puntuales pero necesitan ser alimentados por una mayor cantidad de datos.^[12]

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) ha incrementado significativamente la aplicación de los modelos en la evaluación de la pérdida de suelos y el diseño de estrategias para su control.^[13] El poder de esta herramienta radica en su capacidad para relacionar diferentes tipos de datos como imágenes de satélite, fotografías aéreas, además de muchas y diferentes fuentes de datos geográficos, así como su capacidad para la integración de datos con diferentes escalas. También, los GIS son una herramienta que facilita la toma de decisiones ya que permite evaluar cuantitativamente diferentes escenarios de manejo y mostrar en forma simple las estrategias de mitigación o conservación de suelos.^[14]

Los mapas de riesgo a la erosión hídrica son evaluaciones del paisaje realizadas a partir del análisis espacial de datos climáticos, edáficos, topográficos y de uso de suelo. Las evaluaciones de riesgo plasmadas en mapas clasifican superficies del terreno en función del grado del riesgo en una unidad de territorio definida. Los métodos para la evaluación de riesgo fueron propuestos en 1970 y desde entonces, han evolucionado notablemente debido a la expansión del interés por el estudio de la erosión y los cambios ambientales asociados a la pérdida de la calidad de los suelos.^[15] Actualmente, los mapas de riesgo generalmente involucran métodos de síntesis de variables de distinto tipo y de origen diferente.^[13]

Objetivos del capítulo

El uso de la tecnología ha proporcionado una herramienta muy importante para construir modelos de análisis más robustos en la evaluación de riesgo y también han servido para proporcionar información de fácil acceso a tomadores de decisiones. El presente estudio constituye un ejemplo de la utilización de dos herramientas, un modelo de erosión (USLE) y el GIS, para inferir el riesgo a la erosión del suelo. El enfoque principal del capítulo es que a través de la técnica GIS es posible tener una adaptación de la USLE a un área pequeña (delimitada como una microcuenca) y de esta forma se convierte en una herramienta de aproximación metodológica para determinar áreas susceptibles a la erosión edáfica en el paisaje.

Zona de estudio

Localización

La microcuenca del río Francés se localiza en los 16° 51' 29" y 16° 55' 00" Latitud Norte y 93° 17' 18" y 93° 27' 28" de Longitud Oeste. Pertenece a la cuenca Grijalva-Tuxtla Gutiérrez y por lo tanto a la región hidrológica Grijalva-Usumacinta. La zona de estudio presenta una intersección del 60% con el municipio de Berriozábal y del 40% con el municipio de Ocozocoautla de Espinosa. Tiene un tamaño de aproximadamente 13,380 ha y 78 km² de perímetro y su altitud varía entre los 660 hasta los 1230 msnm (figura 1). La microcuenca fue delimitada a partir del cono de deyección que se encuentra en la parte norte de la cuenca, sitio donde el río Francés, una corriente perenne poco caudalosa, se infiltra por varias decenas de pequeños sumideros (con un perímetro menor de 1.5 m) para convertirse en una corriente subterránea.

Descripción del paisaje

En términos generales el clima de la región presenta una temperatura media anual que oscila entre los 22° y los 30°C, mientras que la precipitación media anual de la zona es de 1200 mm/año y se concentra temporalmente en el verano, otoño e invierno.^[16]

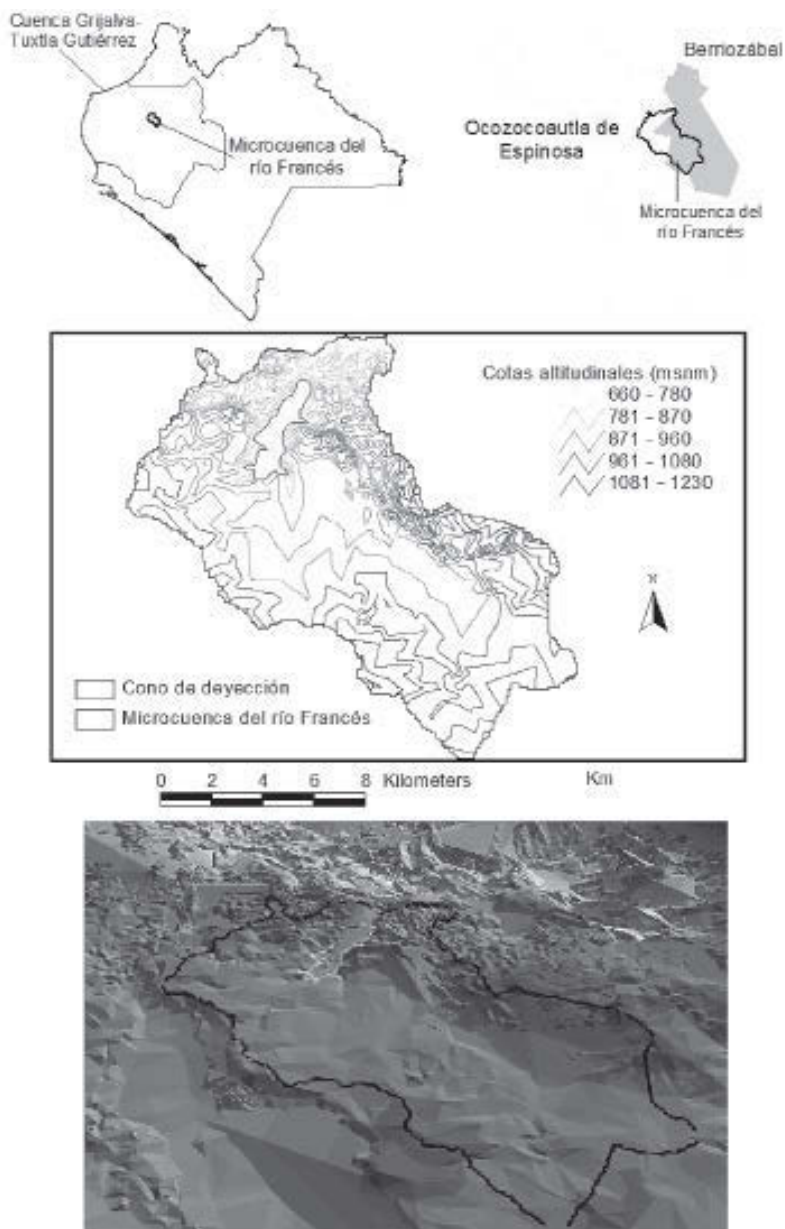


Figura 1. Localización y principales aspectos topográficos de la zona de estudio.

No se tiene un registro puntual de la precipitación, pero las dos estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio muestran que llueve aproximadamente 70 días al año, la precipitación generalmente es menor a los 10 mm y raramente excede los 80 mm de lluvia al día (cuadro 1), la variación temporal oscila entre los 600 a los 1800 mm anuales (figura 2).

Cuadro 1. Caracterización de la precipitación registrada en dos estaciones meteorológicas adyacentes a la zona de estudio realizada a partir de los datos del periodo de 1989-2007. Los datos fueron obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional.

	Berriozábal		Apic-pac	
Precipitación (mm)	Frecuencia absoluta	Porcentaje	Frecuencia absoluta	Porcentaje
0	5598	79.57	4930	70.08
0.1-10	823	11.7	903	12.84
10.1-20	282	4.01	463	6.58
20.1-30	158	2.25	207	2.94
30.1-40	87	1.24	90	1.28
40.1-50	42	0.6	53	0.75
50.1-60	17	0.24	16	0.23
60.1-70	11	0.16	21	0.3
70.1-80	8	0.11	4	0.06
80.1-90	3	0.04	7	0.1
90.1-100	1	0.01	0	0
>100	5	0.07	0	0

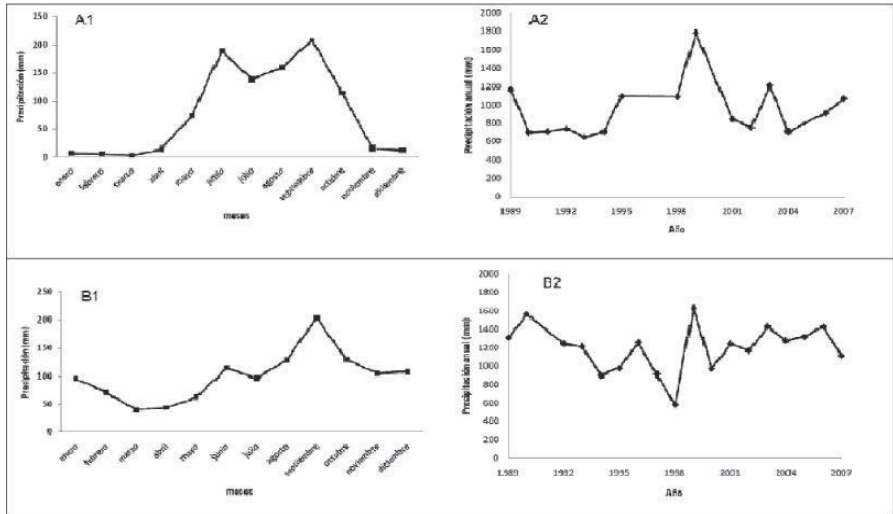


Figura 2. Régimen pluvial registrado en dos estaciones meteorológicas adyacentes a la zona de estudio. Las letras en la figura agrupan los datos obtenidos para Berriozábal (A) y Apic-pac (B). Los números en la figura representan los datos de precipitación promedio mensual (1) y el registro anual de la precipitación en la zona durante el periodo 1989-2007 (2). Los datos fueron obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional.

La lluvia de verano en la zona de estudio es muy intensa y de corta duración, producida por la invasión de masas de aire húmedo tropical proveniente tanto del Atlántico como del Pacífico, mientras que la lluvia de otoño e invierno es menos intensa pero prolongada, debido a la incidencia de masas de aire frío que llegan del norte.^[17] Generalmente las lluvias no producen una modificación significativa del río Francés y la zona de inundación en el cono de deyección no es mayor de 400 m². Sin embargo bajo ciertas condiciones meteorológicas periódicas (producidas cada 5-15 años), el río puede alcanzar su nivel máximo y la zona de inundación ocupa 330 ha (con un perímetro de 12.5 km), capaz de producir un embalse de más de 3,000,000 de litros de agua en el cono de deyección por varios días, provocando impactos negativos en la agricultura, la ganadería y directamente a cuatro asentamientos humanos donde habitan cerca de 500 habitantes (figura 3).



Figura 3. Inundación del cono de deyección en noviembre de 2007.

La geomorfología de la microcuenca se dispone principalmente en un solo eje sinclinal compuesto por depósitos de caliza y caliza-lutita del cretácico inferior y superior (era mesozoica), respectivamente.^[18] El suelo predominante es aluvial de los tipos acrisol, luvisol, litosol y rendzina,^[19] suelos pobres con alto contenido de materia orgánica. El tipo de vegetación natural de la región es selva mediana, actualmente modificada casi en su totalidad por las actividades humanas a vegetación secundaria, pastizal inducido (potreros) y campos agrícolas. Particularmente los campos agrícolas pueden ser mono o policultivos, primordialmente de subsistencia, los monocultivos son principalmente de maíz y los policultivos pueden incluir café, piña y especies de valor utilitario (especies comestibles, medicinales, combustibles y ornato).^[16] La microcuenca es habitada por un poco más de 8,000 habitantes distribuidos en alrededor de un centenar de localidades categorizadas con valores de alto y muy alto grado de marginación.^{[20] [21]}

Metodología

Ecuación universal para estimar la pérdida de suelo (USLE)

La erosión del suelo es ocasionada por la forma particular en la cual muchas variables físicas y de manejo se combinan en un sitio determinado. La USLE es un modelo empírico que se dio a conocer en 1978,^[9] representa la síntesis de varios enfoques con los que se venía abordando el estudio de la erosión de suelos desde principios del siglo pasado y actualmente, es un modelo general que sirve de referencia a múltiples adaptaciones,^[22] fue diseñada para predecir la pérdida de suelo en paisajes donde se realizan prácticas agrosilvopastoriles, aunque ha sido también adaptada a zonas con vegetación natural o con bajo nivel de perturbación. La ecuación calcula una tasa de remoción de suelo causada por la precipitación pluvial y su estimación proporciona un valor medio de pérdida de suelo, en una región, (en condiciones particulares de manejo) esperado en un periodo largo de tiempo.

La USLE es un modelo empírico desarrollado para asignar un valor predictivo a partir de la obtención de un número mínimo de parámetros, en su forma esencial se resuelve con la estimación numérica de seis factores principales combinados en la siguiente expresión matemática:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

A = Pérdida de suelo promedio anual [t/ha/año]

R = Factor erosividad de las lluvias [MJ/ha*mm/hr]

K = Factor erodabilidad del suelo [T/ha*MJ*ha/mm*hr]

LS= Factor topográfico (función de longitud-inclinación-forma de la pendiente) [adimensional]

C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal) [adimensional]

P= Factor de prácticas de conservación de la estructura del suelo [adimensional].

Adaptación de la USLE al Sistema de Información Geográfica

El GIS, cuando es integrado a un modelo de análisis, es una herramienta muy poderosa para evaluar la erosión del suelo debido a que este evento tiene implícitas una serie de factores con una distribución espacial. La integración USLE-GIS es un método ampliamente utilizado para simular la variación espacial del proceso de erosión. En este estudio se utilizó un formato ráster para realizar la evaluación del paisaje. La estructura ráster consiste en la representación de entidades espaciales en una cuadrícula compuesta de celdas (píxel) ya que es una estructura simple y fácil de manejar que además tiene gran capacidad de superposición. El esquema de análisis utilizado se simplifica en la figura 4, que muestra el diseño aplicado para la obtención de datos para su transformación y análisis.

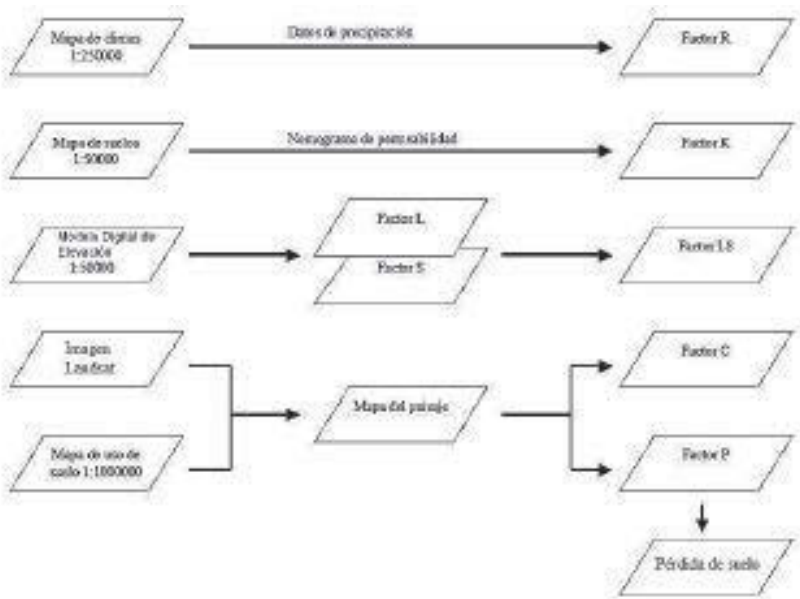


Figura 4. Esquema general del diseño de análisis utilizando la USLE y el GIS.

Erosividad de la lluvia (Factor R)

Es el potencial erosivo de la lluvia estimado por la energía que produce la precipitación dada su intensidad y duración. Aunque la precipitación en la zona presenta una marcada variación temporal, dentro del año y entre diferentes años, en este trabajo se consideró sólo la variación espacial de la lluvia definida a partir de los climas encontrados en la zona de estudio^[23] (figura 6a).

La energía cinética producida por la lluvia fue calculada aplicando un modelo binomial utilizado para evaluar la erosividad en México,^[24] una ecuación empírica con la siguiente construcción:

$$R = 2.4619 + 0.006067Pa^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

R = Factor erosividad de las lluvias [MJ/ha*mm/hr]

Pa = Precipitación anual

La ecuación fue ponderada según el tipo de clima presente en la zona de estudio,^[23] al cálido húmedo (Am) se le asignó una precipitación de 1400 mm, mientras que a los subhúmedos [Aw1 y Aw0 (w)] fue considerado un valor de 1100 y 800 mm respectivamente.

Erodabilidad del suelo (Factor K)

Es la susceptibilidad del suelo a erosionarse por la actividad de la lluvia estimada como la energía necesaria para degradar una tonelada de suelo en una hectárea. El factor K representa el efecto de las propiedades del suelo así como de las características del perfil del suelo. Los valores de K fueron asignados usando el nomograma de erodabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, porcentaje de materia orgánica, el código de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil^[23] (figura 6b). Para evaluar el factor K a partir del nomograma se utilizó información generada por el ordenamiento de los tipos de suelo en la zona de estudio^[19] (figura 5). Para todos los

tipos de suelo se asignó un contenido de limo y arena muy fina del 10 % sin presencia de arena (0%), si el suelo no presenta rendzina o bien, si la rendzina es el suelo de tercer orden en su composición se consideró un contenido de materia orgánica del 0%, si se presenta la rendzina en segundo orden, se asignó un valor del 2 % de materia orgánica y si es el componente principal del suelo se asignó un valor del 4 % a la materia orgánica. La estructura fue evaluada según la fase física del suelo, si el suelo presenta una fase lítica se consideró una estructura granular gruesa de otra forma fue considerada una estructura prismática. Finalmente, la permeabilidad fue categorizada según la textura, un suelo con textura fina se le asignó una permeabilidad muy lenta, mientras que al suelo con textura media se le asignó un valor de permeabilidad moderada. Con estos valores se calculan los valores del factor K con la ecuación del nomograma:

$$K = \left(\frac{1}{7.5994} \right) * \frac{[(2.1 * (10 - 4)) * (12 - MO) * M1.14 + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)]}{100} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

K = Factor de erodabilidad del suelo [t./ha.MJ*ha/mm*hr].

MO = Materia orgánica [%].

S = Código de la estructura del suelo.

P = Código de permeabilidad.

M = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias ó % limo + % arena muy fina)*(100 - % arcilla).

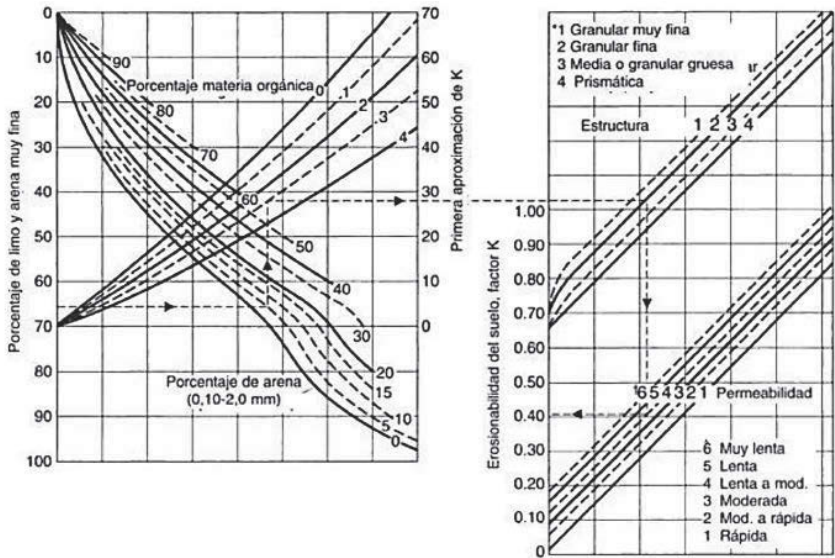


Figura 5. Nomograma de permeabilidad. En el ejemplo de su uso se ilustra la valoración del factor K para un suelo con el 74 % de limo y arena muy fina, 5% de contenido de arena, 3 % de materia orgánica, que presenta una estructura granular muy fina y una permeabilidad lenta a moderada. El valor del factor K en el ejemplo ilustrado es de 0.4 (imagen extraída de Morgan y Urbano López de Meneses 1997).

Topografía (Factor LS)

La topografía es un factor determinante para la erosión de los suelos, el factor LS sintetiza el efecto de la pendiente con la longitud de la ladera. Para calcular la pendiente y la orientación de la ladera en la microcuenca del río Francés se utilizó un Modelo Digital de Elevación^{[18] [19]} (figura 6c).

La longitud de pendiente se definió como la distancia horizontal desde el origen de un flujo hasta el punto donde el gradiente de la pendiente se reduce significativamente y la deposición del flujo comienza, o bien, donde el escurrimiento es concentrado en un canal definido. Para su cálculo se utilizó la fórmula propuesta por Wischmeier y Smith (1978):

$$L = \left[\frac{I}{72.6} \right] * m \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

L = Factor de longitud de pendiente

l = Longitud de la pendiente [pies]

m = Exponente de la longitud de la pendiente

El exponente de longitud de pendiente m que determina la relación entre erosión causada por flujo de agua en el terreno y la erosión causada por impacto de gotas de lluvia en el terreno, puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$m = (0.1342 * LN(q) + 0.192) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

m = Exponente de la longitud de la pendiente

q = Angulo de pendiente [%]

Para calcular el efecto de la inclinación de la pendiente en la erosión del suelo se utilizó la siguiente ecuación para pendientes que tuvieran una longitud mayor a cinco metros:

$$S = 10.8 * (\text{sen } q - 0.03) \quad (\text{Ec. 6})$$

Cuando $S < 9\%$

$$S = 16.8 * (\text{sen } q - 0.5) \quad (\text{Ec. 7})$$

Cuando $S > 9\%$

Donde:

S = Factor de inclinación de pendiente

S = Inclinación de pendiente [%]

q = Angulo de pendiente [°]

En este estudio, se calculó el valor del factor LS como el valor promedio para cada casilla del raster y las ocho casillas de su vecindario.

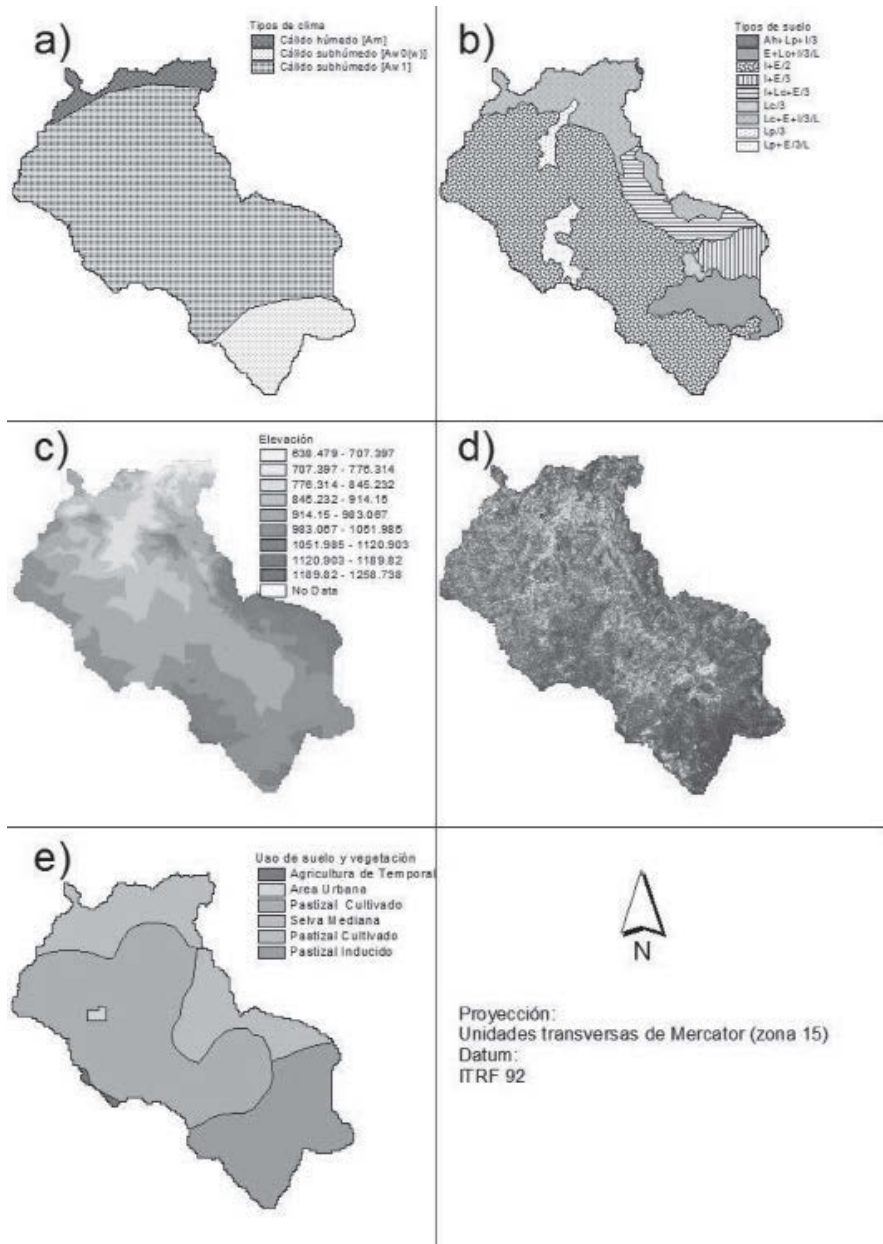


Figura 6. Tipos de clima (a), tipos de suelos (b), topografía (c), cobertura forestal (d) y uso de suelo (e) encontrados en la zona de estudio.

Cobertura vegetal (Factor C)

El factor C es la estimación de la protección del suelo debido a la vegetación. La cantidad y velocidad con la que el agua remueve el suelo depende de la vegetación que lo cubre. Los suelos de paisajes con vegetación permanente son muy estables pero tan pronto como la vegetación es removida, la erosión se acelera significativamente. Existen diferentes formas de estimar la cobertura vegetal en un paisaje, en este estudio se utilizó una reclasificación simple de una imagen de satélite tipo Landsat (6 d). Los valores asignados oscilaron entre 0.1 hasta 1, donde los sitios sin vegetación tienen valor de 1 mientras que los sitios con vegetación densa (según el análisis espectral considerado) tomaron valores de 0.1.

Prácticas de manejo (Factor P)

El factor P es la estimación del impacto de las prácticas de uso de suelo sobre la erosión del paisaje. Las actividades humanas pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión; las actividades agrícolas convencionales han aumentado la erosión de forma considerable debido a que generalmente se quema el rastrojo dejando el suelo desnudo y con mayor susceptibilidad a la erosión. En este estudio, se asignaron valores arbitrarios de acuerdo a la descripción del uso de suelo en la microcuenca^[26] (figura 6e), a las zonas urbanas se les asignó un valor de 0, a las zonas conservadas un valor de 0.1, mientras que las zonas de manejo, tanto agrícola como de pastoreo se les asignó un valor de 0.5.

Adaptación del binomio USLE-GIS a un modelo de riesgo

En este estudio la evaluación de la USLE no fue utilizada en su forma convencional al obtener un valor predictivo de la tasa de suelo erosionado en un intervalo de tiempo (ec. 1), sino que se asumen los supuestos implícitos en el modelo matemático para asignar un valor relativo de riesgo a la erosión hídrica. Es decir que la extensión espacial de la USLE con el GIS permitió delimitar superficies con diferente nivel de exposición de riesgo que no pueden ser traducidas directamente a un

valor de pérdida de suelo, sino simplemente, a un valor de riesgo a la erosión relativo a los atributos de la microcuenca del río Francés. La evaluación de riesgo es el cálculo del producto de dos eventos probabilísticos independientes entre sí, el peligro y la vulnerabilidad. El peligro es el impacto que puede ocasionar un fenómeno natural en el ambiente, mientras que la vulnerabilidad está determinada por la susceptibilidad de un sistema a ser alterado por un fenómeno natural en particular.

En el presente trabajo se identifican superficies con diferentes niveles de peligro determinadas por el valor del factor R (ec. 2), el sentido de utilizar los valores de este parámetro es para considerar una relación geométrica entre la intensidad de la lluvia y el impacto que podría ocasionarle al suelo. Los valores de probabilidad se asignaron con un patrón espacial uniforme en una matriz compuesta por celdas de 50x50 m. El valor de cada celda fue asignado con base en la siguiente expresión:

$$P_i = \left(\frac{R_i}{\sum NR} \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde

P_i =Peligro de erosión en el pixel i ésimo relativo al impacto esperado de la lluvia según su ubicación en la microcuenca.

R_i =Valor del factor R calculado para el pixel i ésimo.

NR =Niveles del factor R.

En este estudio se delimitaron superficies con diferentes niveles de vulnerabilidad determinadas por los factores K, LS, C y P. Para realizar el cálculo de la vulnerabilidad no se consideró la naturaleza de los datos de origen, tanto el factor K como el LS son variables numéricas, con distribución geométrica y polinomial respectivamente, mientras que el factor C y P son variables categóricas designadas arbitrariamente al paisaje, simplemente se asume un evento que resume un sistema complejo de elementos físicos y biológicos. Los valores de probabilidad se asignaron en una matriz compuesta por celdas de 50x50 m. El valor de cada celda fue asignado con base en la siguiente expresión:

$$Vi = \left(\frac{Ki * LSi * Ci * Pi}{\max(K * LS * C * P)} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde

V_i =Vulnerabilidad de erosión del pixel i ésimo relativo a la susceptibilidad esperada por los atributos edáficos, topográficos y de manejo que presenta.

K_i =Valor del factor K calculado para el pixel i ésimo.

LS_i =Valor del factor LS calculado para el pixel i ésimo.

C_i =Valor del factor C calculado para el pixel i ésimo.

P_i =Valor del factor P calculado para el pixel i ésimo.

$\max(K_i * LSi * C_i * P_i)$ =Valor máximo obtenido en el paisaje del producto de los factores K, LS, C y P.

De tal forma que para obtener el valor de riesgo se reescribió la ecuación 1 en la siguiente expresión numérica:

$$Ri = Pi * Vi \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde

R_i =Riesgo de erosión del pixel i ésimo en función del peligro y vulnerabilidad.

Resultados y discusión

El riesgo de erosión de suelo fue modelado en la microcuenca del río Francés, utilizando como guía base la ecuación universal para estimar la pérdida de suelo (USLE). La utilidad de la USLE como modelo predictivo de la tasa de suelo erosionado ha sido aprobada por varios estudios, pero también, se ha señalado que puede llegar a ser una herramienta con una alta imprecisión para escalas temporales y espaciales pequeñas.^[8] En este trabajo no se presentan los valores de los parámetros R, K, LS, C y P en el sentido predictivo que primordialmente tienen. Lo anterior porque consideramos que existen algunas indeterminaciones importantes de los datos de entrada e incluso, que hacen falta algunos ajustes operativos para recuperar el beneficio original del modelo. Sin embargo, la extensión de la USLE a través del GIS nos parece un ejercicio exploratorio relevante

que permite realizar el planteamiento de algunas hipótesis del comportamiento de la remoción de suelo en la zona de estudio.

Los valores del Factor R obtenidos en la microcuenca del río Francés utilizando isoyetas de 800, 1100 y 1400 mm de precipitación anual fueron de 5852, 10049 y 15338 MJ/ha*mm/hr respectivamente (figura 7a), el Factor R tuvo una moda de 10049 MJ/ha*mm/hr debido a la dominancia del clima cálido subhúmedo del tipo Aw1 (figura 6a). La estimación de la erosividad del suelo a partir de valores medios esperados de energía liberada por la magnitud e intensidad de la lluvia en periodos anuales es una fuente de imprecisión en la USLE cuando existe una marcada variación temporal o espacial.^[27] En la zona de estudio no sólo existe una variación estacional sino también una variabilidad de años secos con tres veces menos lluvia que en los años más húmedos (figura 2). Debido a los atributos climáticos de la zona de estudio será necesario ajustar la parametrización del Factor R para obtener datos más robustos en la USLE.

El Factor K tomo valores en el paisaje que oscilaron entre el 0.4 y 0.9 t/ha*MJ*ha/mm*hr (figura 7b). Debido a que el suelo de la microcuenca es aluvial donde domina el tipo litosol con rendzina de textura media (figura 6b), el valor medio del Factor K en el paisaje fue de 0.7 t/ha*MJ*ha/mm*hr. Los valores de erodabilidad alcanzaron valores más altos de los esperados, posiblemente por la caracterización de los datos de entrada que exigen una mayor apreciación de las condiciones físicas y químicas del suelo para la correcta interpretación del nomograma de permeabilidad, sin embargo es pertinente señalar que algunas aproximaciones de campo parecen apuntar a tener una condición relativamente homogénea del suelo en el paisaje de estudio.

Los resultados encontrados en nuestro trabajo muestran que el factor LS tomó valores que oscilan entre el 0.02 y 11.9 (figura 7c). La mayoría de la pendiente del paisaje es menor a los 9°, aunque existen pendientes que alcanzan los 45° no son laderas demasiado pronunciadas, la mayoría de las laderas de la zona son menores a los 1000 m de longitud. El valor promedio del Factor LS en el paisaje fue de 0.87. A diferencia de los Factores R y K que caracterizan el impacto de las gotas de lluvia a las partículas del suelo, el Factor LS busca sintetizar el escurrimiento laminar y el movimiento en hondonadas.

Los modelos de escorrentía son una herramienta útil para predecir y simular los caudales de una cuenca con base en una conceptualización simplificada de varios procesos físicos, como la infiltración, evaporación, flujo superficial y flujo subterráneo.^[28] El cálculo del Factor LS es en sí mismo un modelo de escorrentía que caracteriza la dirección y acumulación del flujo del agua superficial y explica las avenidas fluviales así como el incremento del caudal del río Francés en los eventos de inundación del cono de deyección que suceden de forma extraordinaria pero periódicamente (figura 3).

Los métodos de teledetección han sido utilizados ampliamente para generar mapas de cobertura vegetal.^[29] Respecto a la estimación de los valores del Factor C en el paisaje de estudio, se encontraron valores que oscilan entre los 0.05 y 1 (figura 7d). En este estudio se utilizó un sistema de reclasificación simple que sobrevalora la cantidad de cobertura arbórea en la zona de estudio debido a que un error común en la reclasificación simple es que suceden confusiones entre categorías parecidas.

La vegetación arbórea determina de forma importante una baja erosión del suelo. En un bosque denso, las raíces y la tierra forman una red que permite el paso del agua sin descomponer la estructura del suelo. Las plantas y los animales que viven en el subsuelo remueven la tierra y la mantienen porosa, de modo que el agua se infiltra en vez de correr por la superficie provocando erosión.^[30] En la zona de estudio existen fragmentos naturales remanentes de selva mediana, aunque la mayoría son fragmentos arbóreos pequeños de vegetación secundaria. Algunos estudios muestran que la vegetación secundaria puede actuar en el mismo sentido que el bosque maduro como medio protector a la erosión.^[31]

La clasificación del paisaje para el Factor P osciló entre 0 y 1 (figura 7e). Al área urbana de la comunidad de Ocuilapa de Juárez le asignamos el valor de 0 y el valor máximo de 0.5 fue asignado a la mayoría del paisaje por estar compuesto de potreros y zonas de cultivo. Es común que los Factores C y P se agrupan bajo un solo parámetro porque actividades como la construcción de caminos o edificios, así como algunas prácticas de cultivo, ganadería y de aprovechamiento forestal remueven la cobertura vegetal y modifican la estructura del suelo, lo que incrementa la pérdida de suelo.^[9] En este estudio, el análisis fue realizado para determinar categorías de riesgo a la erosión del suelo relativas al

paisaje y de esta forma detectar áreas críticas dentro de la unidad de estudio. No obstante, en ausencia de datos que permitan la validación de los resultados obtenidos, la USLE no deberá ser considerada una estimación predictiva de la cantidad de suelo que se pierde en el paisaje.

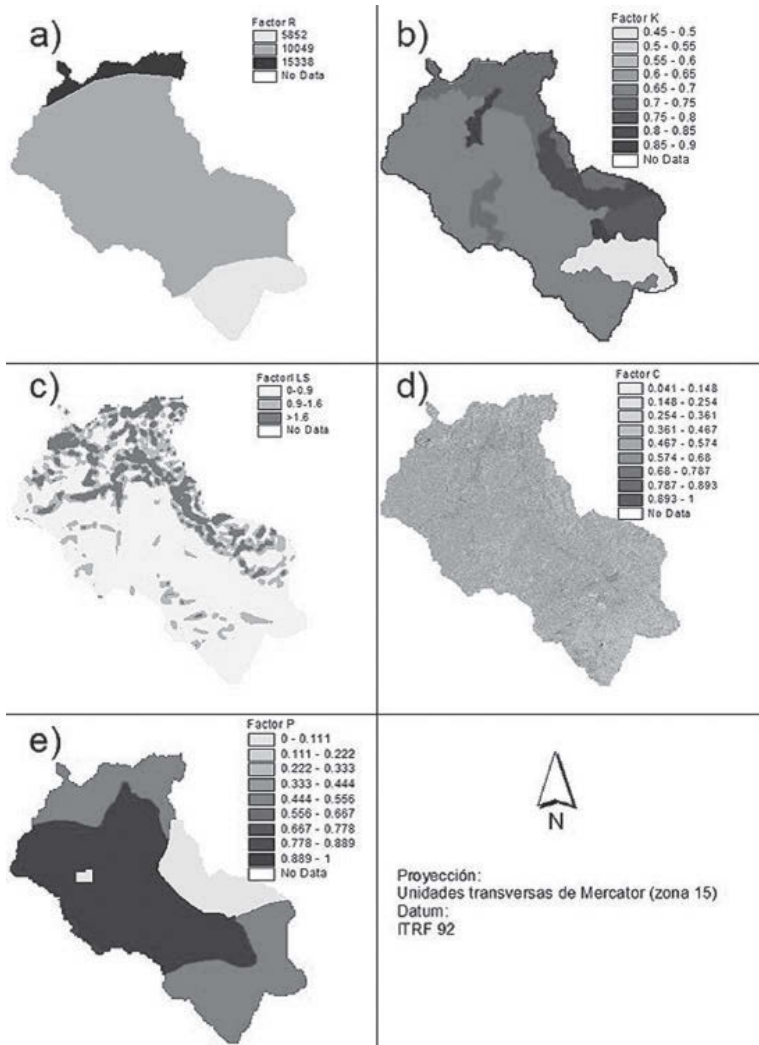


Figura 7. Distribución espacial en el paisaje de estudio del Factor R (a), Factor K (b), Factor LS (c), Factor C (d) y Factor P (e).

Debido a que en esencia se realizó el mismo cálculo para obtener “valores de probabilidad” que determinan el riesgo a la erosión en la microcuenca del río Francés no se presentan los valores absolutos de la evaluación de peligro y vulnerabilidad porque carecen de una escala de referencia, no obstante, sostenemos que esta aproximación permite delimitar un patrón de erosión potencial que resulta de la combinación sistemática de factores climáticos, edáficos, topográficos y biológicos.

Nuestros resultados asumen que el peligro tiene una distribución espacial uniforme mientras que la vulnerabilidad presenta una autocorrelación espacial (figura 8). Definitivamente los patrones observados corresponden a la naturaleza de los datos de origen pero no dejan de tener cierto sentido, la precipitación puede tener un comportamiento temporal impredecible, pero en el espacio pueden delimitarse superficies relativamente homogéneas de lluvia (cortinas). Mientras que la vulnerabilidad está determinada por factores asociados espacialmente entre sí (suelo, topografía y componentes biológicos).

Con base en el ejercicio realizado en este trabajo el 13 % de la microcuenca se encuentra en un nivel bajo de peligro, el 82 % de la zona tiene nivel medio y el restante 5 % un nivel alto (figura 8a). Mientras que en términos de la vulnerabilidad, el 75 % de la zona tiene un nivel bajo, 23 % un nivel medio y el 2 % restante un nivel alto de vulnerabilidad (figura 8b). En estudios realizados en algunas zonas tropicales se ha encontrado que el Factor R es el determinante en el riesgo a la erosión.^[32]

Los resultados encontrados indican que alrededor del 1 % del paisaje se encuentra en un alto grado de riesgo, 8 % presenta un nivel medio y el 91 % restante tiene un nivel bajo a la erosión (figura 9). La distribución de las zonas de mediano y alto riesgo se encuentra en las laderas que rodean el cono de deyección, ubicadas en la parte norte de la zona de estudio donde se encuentra la parte más baja de la microcuenca.

La reforestación puede considerarse como una estrategia de corrección hidrológica que puede aplicarse en las laderas con mayor riesgo a la erosión. El incremento de la cubierta vegetal permite mayor infiltración y tiempo de concentración del agua, la corrección hidrológica puede llevarse a cabo considerando distancias de siembra y el cultivo de especies que estimulen el sotobosque para lograr un sistema eficiente en la intercepción de agua.

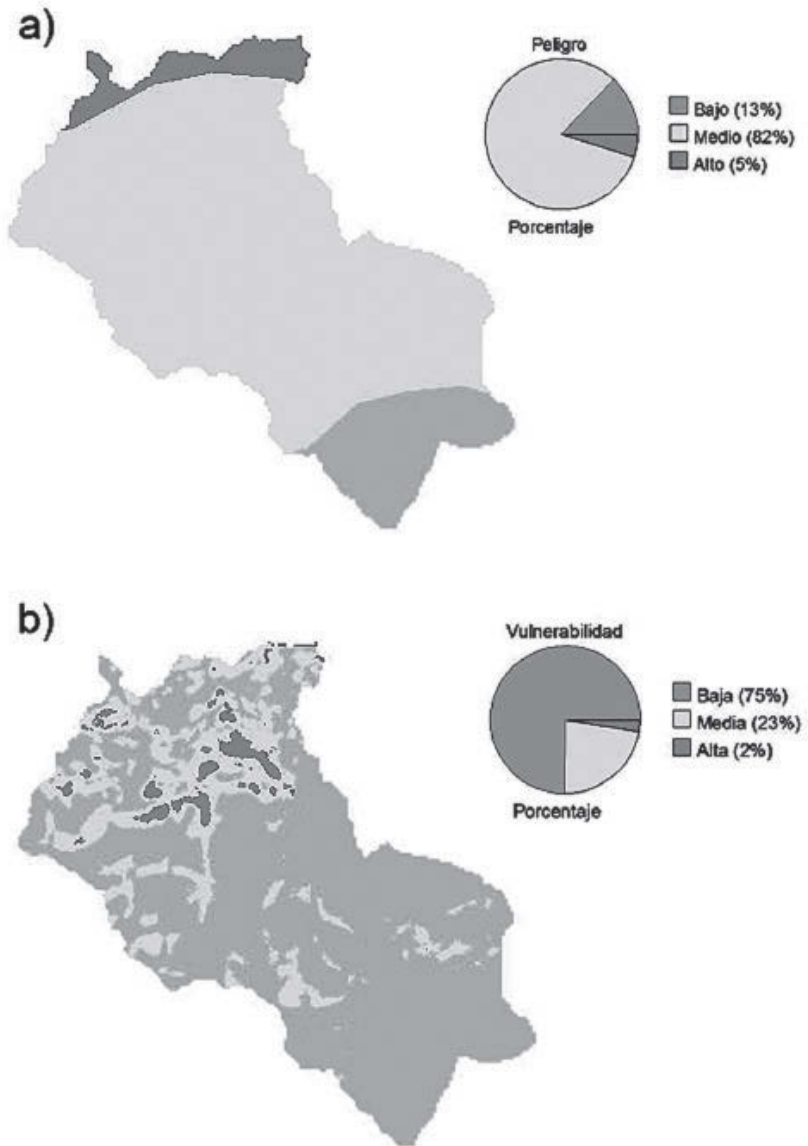


Figura 8. Distribución espacial del peligro (a) y vulnerabilidad (b) en el paisaje de estudio.

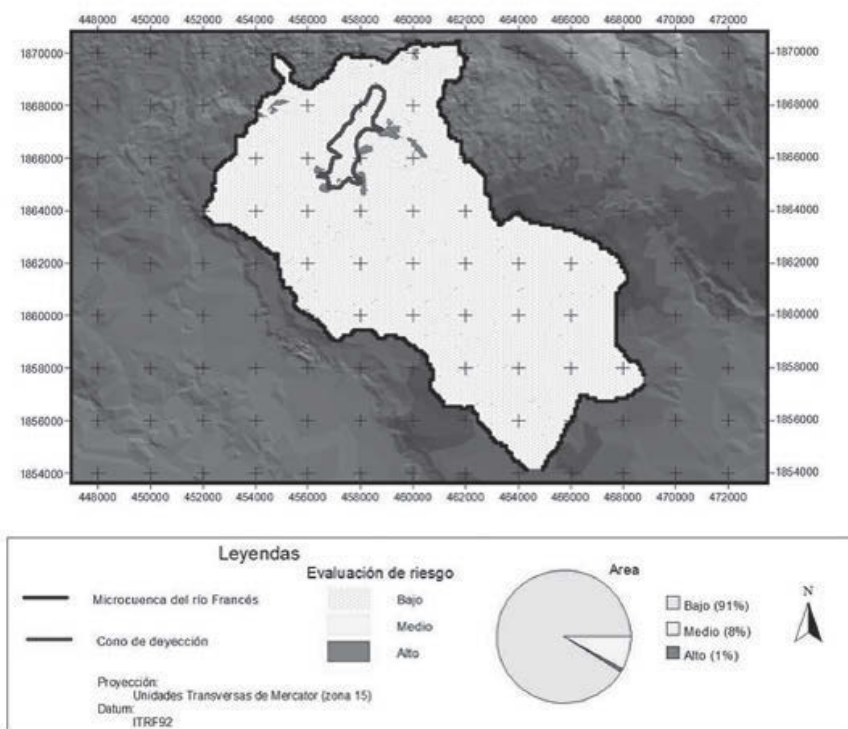


Figura 9. Mapa de riesgo a la erosión del suelo en la microcuenca del río Francés.

Particularmente en la zona de estudio se sugiere la reforestación de subsistencia, es decir el diseño y aplicación de sistemas forestales desarrollados para permitir la regeneración de la cobertura vegetal, la disminución de la erosión y que además permita satisfacer la demanda de leña de la comunidad. Algunas especies de rápido crecimiento como el quebracho (*Acacia spp*) y el humo (*Nectandra spp*), especies preferidas como leña en la zona de estudio, podrían propagarse intencionalmente como estrategia para disminuir la pérdida de suelo así como para obtener combustible.

Como medidas complementarias a la reforestación se podría considerar la utilización del rastrojo remanente de las siembras para conservar los suelos así como la construcción de diques, espigones, zanjas

o presas para contener o dirigir el desplazamiento laminar del suelo en las laderas de mayor riesgo a la erosión. Así como también, realizar capacitación técnica a los campesinos de la comunidad para modificar las prácticas de labriego hacia acciones de manejo que consideren la conservación de los suelos.

Consideraciones finales

Los métodos de evaluación de la erosión constituyen una parte importante en el diagnóstico de los recursos naturales y la tendencia es a una mayor influencia de la matematización y el uso de nuevas tecnologías informáticas. La aplicación del binomio USLE-GIS en la zona de estudio permitió obtener información útil para el entendimiento de la dinámica del suelo, que además puede ser empleada para proponer estrategias de manejo y conservación. En este estudio se utilizó una herramienta sencilla que puede ser de relativa fácil interpretación, aunque no fue empleada para cuantificar la pérdida de suelo, la clasificación de riesgo puede ayudar a identificar áreas críticas, así como alternativas para el control de la erosión en la zona de estudio.

Bibliografía

- [1] Oyarzun-Ortega, C., 1993, *Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío*. Bosque 14: 45-54.
- [2] Lal, R, 1998, "Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality" en *Critical Reviews in Plant Sciences* 17 pag. 319-464.
- [3] FAO, 1994, *Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people*. UNEP.
- [4] Lal, R, 2001, "Soil degradation by erosion" en *Land degradation & development* 12 pag. 519-539.
- [5] Bautista F, y Palacio, G., 2005, *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de Yucatán y Universidad Autónoma de Campeche.
- [6] Blanco, H., y Lal, R., 2008. *Principles of soil conservation and Management*. Springer.
- [7] Walling, D., y Webb, B., 1983, "Patterns of sediment yield" en K. Gregory (ed.). *Background to palaeohydrology*, Wiley.

- [8] Morgan, P, C, C, Urbano López de Meneses, J., de M., 1997, *Erosión y conservación de suelos*. Mundiprensa. Disponible en línea: <http://books.google.es/books?id=jcFqaFI-ulUC&printsec=frontcover> (consultado en julio del 2009).
- [9] Wischmeier, W, y Smith, D, 1978, "Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservación planning" en *agricultura handbook*, No. 537. US Department of Agriculture.
- [10] Shao, Y., 2001, *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Academic Publisher.
- [11] Yu, B., 2003, "A unified Framework for water erosion and deposición equations", *Soil Science Society American Journal* 67:251-257.
- [12] Mihara, M, Yamamoto, N, y Ueno, T, 2005, Application of USLE for the prediction of nutriente losses in soil erosion processes. *Paddy Water Environmental* 3:111-119.
- [13] Gournellos, T., Evelpidou, N., y A., Vassilopoulos, 2004, "Developing an erosion risk map using soft computing methods (case study at Sifnos islán)" en *Natural Hazards* 31 pag. 63-83.
- [14] Fistikoglu, O., y Harmancioglu, N., B., 2003, "Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion" en *Water Resources Management* 16: 447-467.
- [15] Morgan, P., C., Quinton, J., N., y Rickson, R., J., 1994, Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach, *Outlook in Agriculture* 23 pag. 5-9.
- [16] Escobar M, C, 2003, *Diagnóstico participativo sobre el uso, demanda y abastecimiento de leña en el ejido Ocuilapa de Juárez, Ocozocuautila de Espinosa, Chiapas*. El Colegio de la Frontera Sur.

- [17] Toledo, A., 2003, *Ríos, costas y mares: hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y El Colegio de Michoacán.
- [18] INEGI, 2002, *Carta edafológica digital 1:250000 E151I*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [19] INEGI, 2002, *Carta geomorfológica digital 1:250000 E151I*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [20] INEGI, 2005, *II Censo de población y vivienda*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [21] CONAPO, 2005, *Índices de marginación*. Consejo Nacional de Población.
- [22] Patriche, C., Captana V., y Stoica D., L., 2006, Aspects regarding soil erosion spatial modeling using the USLE/RUSLE within GIS. *Geographia Technica* 2 pag. 88-97.
- [23] INEGI, 1990, *Carta climática digital 1:1000000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [24] SEMARNAT, 2005, *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en línea: http://appl.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04 (consultado en julio del 2009).
- [25] Renschler C., S., Mannaerts C., y Diekkrüger B., 1999, "Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk—rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain" en *Catena: an interdisciplinary journal of soil science, hydrology, geomorphology focusing on geocology and landscape evolution*, 34 pag. 209-225.

- [26] INEGI, 1990, *Carta de vegetación y uso de suelo digital 1:1000000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [27] Petkovsek, G., y Matjaz M., 2004, "Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia" en *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 49 pag. 869-877.
- [28] Perrin, C., Michel, C., y Andreassian, V., 2003, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulaci3n. *Journal of Hydrology* 27 pag. 275-289.
- [29] Homer, C., Ramsey, D., Edwards, T., y Falconer, A., 1997, Landscape Cover-Type Modeling Using a Multi-Scene Thematic Mapper Mosaic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63: 59-67.
- [30] Dewberry, S., y Davis, L., 2008, *Land development handbook*. McGraw-Hill.
- [31] Garcia-Fayos, P., 2004, "Interacciones entre la vegetaci3n y la erosi3n h3drica" en: Valladares, F (ed.). *Ecolog3a del bosque mediterr3neo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF.
- [32] Erdogan E, Erpul, I, y Bayramin I, 2007, Use of USLE/GIS Methodology for Predicting Soil Loss in a Semiarid Agricultural Watershed. *Environmental Monitoring and Assessment* 131:153–161

IV. Disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, estudio de un caso en Chiapas

Pedro Vera Toledo

Resumen

Se analiza la generación *per cápita* de los residuos, posteriormente los de sitios de disposición final de residuos tanto controlados, como no controlados, así como la legislación aplicable en el rubro, *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos* y mucho más específica la NOM 083-SEMARNAT-2003 “Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras, complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial”.

Se aborda la problemática de la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, analizando el caso específico de uno de los sitios de disposición final de residuos sólidos que posee el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, se concluye con una propuesta orientada a minimizar los impactos ambientales por la disposición inadecuada de los residuos.

Introducción

En el pasado, la generación de residuos sólidos no representó problema alguno, ya que éstos eran fáciles de incorporar a la naturaleza, de tal manera que el equilibrio de los ecosistemas no se veía alterado.

Actualmente México enfrenta grandes retos en el manejo integral de sus residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial (RME) debido, principalmente, al elevado índice de crecimiento demográfico e industrial del país, al cambio de hábitos de consumo de la población, la elevación de los niveles de bienestar, la creación de nuevos materiales y la tendencia a abandonar las zonas rurales para concentrarse en los centros urbanos^[17]. Asimismo, la población se incrementó en el periodo desde 1950 hasta 2000 de 30 a más de 98 millones, contribuyendo a una generación de residuos (RSU y RME) a nivel nacional estimada en 83 mil 830 toneladas diarias para el año 1998^[17]. De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social, desde 1960 hasta 2000 la generación de RSU y RME se incrementó nueve veces y su composición cambió de ser prácticamente orgánica, fácilmente integrable a los ciclos de la naturaleza, a un 50% de componentes, cuya descomposición es lenta y requiere de procesos complementarios para efectuarse (básicamente materiales plásticos o plastificados),^[15] a fin de reducir sus impactos al ambiente.

Entre los resultados negativos de la inadecuada disposición de residuos sólidos se encuentran: contaminación del ambiente, mal aspecto y deterioro del paisaje, producen malos olores, son foco de infección y lugar de reproducción de bacterias, hongos y otros microorganismos patógenos, fuentes alimenticias y de reproducción para especies consideradas nocivas, que a su vez son portadores de vectores de ciertas enfermedades perjudiciales para la salud pública y competencia directa de la fauna silvestre^[7].

En Chiapas, los municipios del estado no escapan de esta problemática, y se enfrentan a un sinnúmero de retos en cuanto a la gestión de los residuos sólidos; entre ellos destaca la disposición final de los RSU y RME. En Chiapas, estado de la república con 118 municipios, es de esperarse que exista el mismo número de sitios destinados para la disposición final de los residuos o como se conocen coloquialmente “tiraderos a cielo abierto”, pero en realidad existen muchos más para este fin^[16]. En el año de 1998, en el Estado se tenían detectados 104 sitios controlados y 769 sitios no controlados; para el 2006, se llegaron a reportar 313 sitios controlados y 767 no controlados. Sin embargo, entre las estadísticas de los diferentes niveles de gobierno, se refleja una discrepancia muy grande, ya que en la Agenda Estadística Chiapas (2001), se reporta

únicamente 7 sitios denominados “tiraderos de basura a cielo abierto” que son el equivalente en la actualidad a los denominados “sitios no controlados”, ubicados en los municipios de Tuxtla Gutiérrez, Tapachula, Comitán, Palenque, Pichucalco, Motozintla y Mapastepec, con una superficie total de 172 hectáreas y 2 rellenos sanitarios ubicados en San Cristóbal y Palenque, con una superficie conjunta de 11 hectáreas^[1]. La proyección basada en estos datos y considerando los 118 municipios que conforman el estado, arrojarían una superficie de 2 mil 899.43 hectáreas para la disposición final de los residuos y con ello, evidentes impactos al ambiente. Sea cual sea la cantidad de sitios y la superficie que ocupen, lo cierto es que este número generalmente aumenta y se modifica cada fin de administración municipal, en ese mismo caso se encuentra el municipio de Chiapa de Corzo, en donde se conocen por lo menos cuatro sitios, de ellos tres se encuentran abandonados y uno en operación ^[6].

Finalmente en Chiapas la generación *per cápita*, de residuos sólidos corresponde a 0.83 kg/hab.-día que producen 3 mil 360 ton/día de residuos sólidos, de los cuales, 40 por ciento (mil 344 ton) se produce en cabeceras municipales que cuentan con servicio de recolección y el resto en zona rural que no cuenta con sistemas eficientes de recolección (Plan Chiapas 2007-2012), de manera que los residuos que no se recolectan, se dispersan en: calles, lotes baldíos, parques, jardines, etcétera y son arrastrados por la lluvia o el viento generalmente a ríos y arroyos, por otra parte, en muchos municipios la disposición final, no es la adecuada y a esto se le suma el ingreso de residuos peligrosos^[19].

Legislación aplicable

Para el año 1994, en México se contaba con normas oficiales específicas para la disposición final de los residuos sólidos que para ese entonces se denominaban Municipales, la primera NOM-083-SEMARNAT-1996, “Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales” y la NOM-084-SEMARNAT-1994, “Que establece los requisitos para el diseño de un relleno y la construcción de sus obras complementarias”, ambas abrogadas, sin embargo por muchas razones la aplicación y cumplimiento

de las citadas para muchos municipios, era prácticamente imposible, lo que se reflejaba en la abundancia de sitios de disposición final de residuos sin control alguno.

Para el año 2003, se expide la Norma NOM-083-SEMARNAT-2003, que entró en vigor en diciembre de ese mismo año, entre otras novedades esta norma categoriza a los sitios en función de la cantidad de residuos que ingresa a ellos, además, otorgaba a los municipios que posean sitios que no cumplan con los requisitos presentados en la citada, un plazo no mayor de 18 meses, para que presenten un plan de regularización (PR) ante las autoridades ambientales federales y estatales. En él se establecerán las adecuaciones que serán necesarias efectuar al sitio en operación, de tal manera que se ajuste a las especificaciones de la norma, o bien planteando su clausura bajo los lineamientos marcados en la misma regulación oficial. En ambos casos, el PR deberá constar de un proyecto de ingeniería que describa a detalle las adecuaciones y/o las actividades de clausura para su realización por parte de los responsables de los sitios, ya sean los ayuntamientos o los particulares.

La *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos*, publicada el 8 de octubre de 2003, se refiere a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. Además de la formulación y conducción de la política en materia de prevención, valorización y gestión integral de los residuos, la expedición de disposiciones jurídicas y la emisión de actos que de ella deriven, así como en la generación y manejo integral de residuos, según corresponda y específicamente la selección de sitios para la disposición final de residuos, lo que representa el punto final en el manejo integral de los mismos y de conformidad con las normas oficiales mexicanas, con los programas de ordenamiento ecológico y desarrollo urbano; la realización inmediata de acciones de remediación de los sitios contaminados, para prevenir o reducir los riesgos inminentes a la salud y al ambiente.

En el marco legal de las denuncias populares y con relación a la NOM-083-SEMARNAT-2003, en Chiapa de Corzo se llevó a cabo una visita de inspección al sitio por parte del Instituto de Historia Natural y Ecología, autoridad encargada de normar todo lo relacionado con residuos sólidos no peligrosos en el estado en ese momento, como resultado de

la inspección, se inició el procedimiento administrativo en contra del Municipio de Chiapa de Corzo, por los impactos ambientales derivados de la inadecuada disposición final de los residuos sólidos en el sitio destinado para ese fin.

Ubicación y descripción de las condiciones generales del sitio de estudio

De acuerdo al Plan Chiapas (2007-2012) la generación *per cápita* en el estado asciende a 0.83 kg/hab.-día, para el caso específico de la ciudad de Chiapa de Corzo, cabecera del municipio del mismo nombre, ubicada a escasos 15 kilómetros de la capital del estado, cuenta con una población de 35 000 habitantes de los 70 000, que componen la población total del municipio (INEGI 2005), con esa población en la cabecera se generan un promedio de 30 ton/día.^[2]

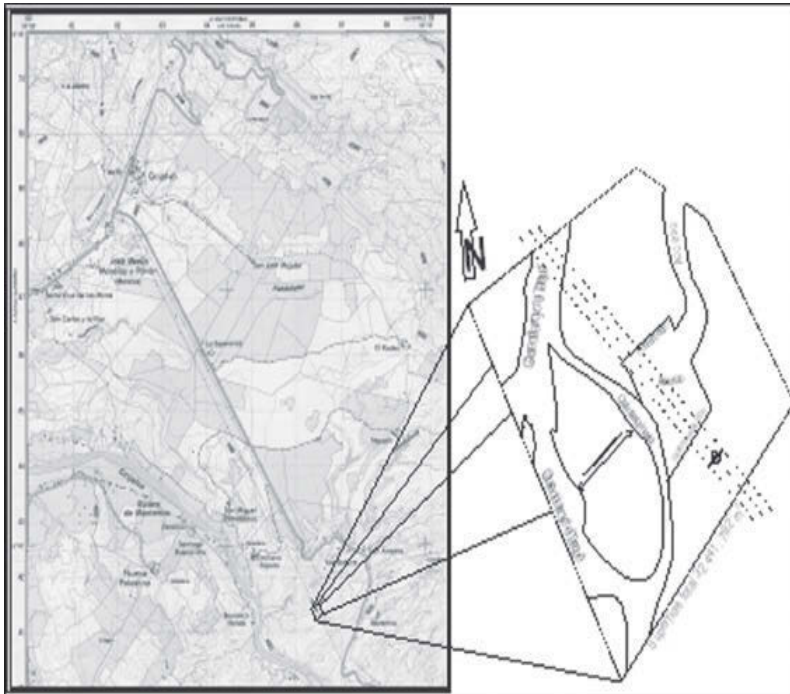


Figura 1. Localización del sitio.

El sitio de disposición final de residuos sólidos de la ciudad de Chiapa de Corzo se encuentra, aproximadamente, a 300 metros de la carretera estatal Chiapa de Corzo-Villa de Acala, el acceso se ubica en el kilómetro 7 + 950; en el extremo oriente, a 600 metros aproximadamente del ejido Emiliano Zapata 2, la ubicación geográfica del frente de trabajo del sitio de disposición final de residuos sólidos es 1842945 latitud norte y 15506044 longitud oeste, UTM (United Tecnic Mercator).

El sitio se encuentra rodeado de cuerpos de agua, intermitentes y perennes, a los pies del talud de los residuos se localiza el arroyo El Tanque, a 400 metros en dirección poniente el río Nandaburé y a 600 metros en dirección sur-poniente el río Grijalva; por último a un costado del lugar existe un canal de *escurrimientos*, que en temporada de estiaje se seca. En los sitios de disposición final de residuos, generalmente la presencia de lixiviados se debe a las aguas de lluvia que se infiltran en el cuerpo de la basura (Instituto de Ingeniería UNAM, 2006); no obstante lo anterior, no se observó la presencia de lixiviados en el arroyo El Tanque; sin embargo, se percibían olores característicos de éstos, además de fauna nociva (moscas, zancudos, mosquitos, etcétera) propios de los sitios de disposición final de residuos sólidos a "cielo abierto". Como toda obra pública o privada, además de cumplir con las disposiciones aplicables, un sitio de disposición final debe respetar todas las restricciones y servidumbre de paso, zona federal, etcétera, sin embargo en el costado del sitio, a escasos 20 metros en dirección sur-oriental, se ubica una torre que soporta la línea de conducción de energía eléctrica, de 440 KV, lo anterior, no pasa desapercibido, porque en el cotidiano operar del sitio se socavaba la base de la misma, aunado a esto no se respetó el derecho de vía federal para este tipo de infraestructura. El inicio de operaciones en el sitio data de principio del año 2005, que concuerda con el inicio de la administración 2005-2007.

Dimensiones del sitio

El predio en donde se ubica el sitio de disposición final de los residuos sólidos de la ciudad de Chiapa de Corzo, es propiedad de un particular, que arrendó al municipio una porción de su predio, posee una superfi-

cie de 15 hectáreas, de las cuales, se tienen destinadas para la disposición final de los residuos 32 mil 441.72 m², la distribución de las áreas se presenta en la tabla I.

Tabla I. Distribución de áreas del sitio de disposición final de residuos sólidos

Uso	Área en m ²
Disposición de los residuos sólidos	3,304.00
Extracción de materiales pétreos	500.00
Estacionamiento de maquinaria	100.00
Sin uso	28,537.72
Total	32,441.72

Descripción de la operación

Horario

El horario establecido por el municipio para el ingreso de los vehículos recolectores al sitio, es de 7:00 a 15:00 hrs. Sin embargo, dependiendo de la época del año y de las necesidades de la ciudad, este horario sufría modificaciones.

La operación del sitio de disposición final de la ciudad de Chiapa de Corzo esta conformada por dos etapas:

A) Recepción de las unidades provenientes de las rutas establecidas en la ciudad:

Esta actividad consiste en que las unidades acceden al sitio y pasan por una somera inspección visual, con el objeto de evitar el ingreso de residuos no permitidos en el sitio; indicándole enseguida al operador de la unidad el lugar conveniente para descargar los residuos transportados.



Foto 1. Recepción de residuos del día.

B) Disposición final de los residuos sólidos:

Posterior a la descarga de los RSU en el frente de trabajo establecido, se permite el ingreso de los pepenadores para recolectar los materiales con valor monetario. Posteriormente, al final de la jornada los residuos que se encuentran aglomerados en el frente de trabajo, se dispersan y compactan con la ayuda de un tractor de tipo oruga D5, marca KOMATSU, que como mínimo, circula dos veces sobre los residuos antes de disponer una capa de aproximadamente 25 centímetros de material pétreo como cobertura final, el método de disposición final utilizado se denomina “de área”, tal como se observa en la foto 2.



Foto 2. Tractor de tipo oruga D5, marca Komatsu, para labores del sitio

Personal, responsabilidades y funciones asignadas

El personal que realiza actividades en el sitio asciende a veintiún, de estos, cuatro son operadores de unidad de recolección, dieciséis recolectores y un operador de maquinaria.

A continuación se describen las responsabilidades y funciones de cada puesto:

Operador de unidad de recolección.

Función: Operar la unidad realizando recorridos de las rutas de recolección al sitio de disposición.

Responsabilidad: Colocar la unidad en el sitio asignado para depositar los residuos, cerciorarse de que la descarga sea total.



Foto 3. Depósito de residuos en el área asignada.

Operador de maquinaria pesada

Función: Operar la maquinaria, realizando actividades de excavación, empuje, acomodo y compactación de los RSU y de los materiales de cobertura en el sitio, además de realizar actividades para desmontar, excavar canales, nivelar terrenos y otras obras semejantes a las de construcción de caminos y bordos. Además, está capacitado para realizar pequeñas reparaciones a la máquina.

Responsabilidad: Preparar el lugar de descarga a las unidades en el frente de trabajo, para posteriormente esparcir, compactar y cubrir los residuos sólidos ingresados al sitio; mantener en óptimas condiciones la maquinaria.

Recolectores

Función: Destapar la unidad cuando esta cuente con lona u otro aditamento y descargar manualmente los residuos cuando sea el caso.

Responsabilidad: Que la unidad descargue la totalidad de los residuos transportados.



Foto 4. Aspectos de la descarga de los residuos en el sitio

Ingreso de vehículos recolectores

Para el cotidiano operar en los sitios se debe contar con accesos que garanticen el ingreso de los vehículos transportadores de los residuos durante todo el año. El sitio cuenta solamente con un acceso, localizado en el entronque de la carretera estatal Chiapa de Corzo–Villa de Acala, a la altura del kilómetro 7 + 950. La distancia de la cinta asfáltica al frente de trabajo es de 300 metros, en un camino de terracería, que se encontraba en condiciones aceptables durante prácticamente todo el año para el tránsito de vehículos y personas, esto se aprecia en la foto 5.



Foto 5. Vista del acceso al sitio

Asignación del sitio de descarga

En esta etapa, el operador de la maquinaria pesada es quien le asigna a cada vehículo el sitio donde deberán descargar sus residuos, cabe aclarar que no existía planificación en lo referente a la disposición de los mismos, la única constante es el sentido común del personal que labora en estas actividades y que en algunos casos cuentan hasta con 12 años de experiencia en estas labores.

Disposición de residuos

Las actividades de distribución de los residuos, su compactación y la conformación del sitio, se llevan a cabo en el frente de trabajo establecido en el día. El equipo empleado se describe en maquinaria y equipo y es mostrado en las labores cotidianas en las fotos 2, 6 y 8. Conforme a la NOM 083-SEMARNAT-2003 los residuos deben ser esparcidos y compactados en capas. Lo anterior con la finalidad de eliminar huecos en la celda y ahorrar espacio dentro del sitio, mejorar sus condiciones mecánicas de estabilidad y conformación del cuerpo de basura, reduciendo los peligros de producción de incendios o explosiones (por bol-

sas de biogás), la formación de encharcamientos y deslizamientos. De igual manera ayuda a reducir el riesgo de anidación de animales como roedores. La compactación consiste en el paso repetido del equipo pesado sobre los residuos (2 veces), por el tipo de maquinaria utilizada. Se recomienda que las capas a compactar no rebasen los 0.5 m de altura antes de ser compactados, ya que a espesores mayores la eficiencia de compactación del equipo se reduce (*Manual para la supervisión y control de rellenos sanitarios*, 2006).

La compactación está directamente relacionada con el método de operación del SDF, para el caso del sitio, el método aplicado para la conformación del frente de trabajo es el de “área”.

Al finalizar la jornada laboral se efectuaba la cobertura de los residuos con material de cubierta, salvo que se suscitara un imprevisto como, por ejemplo, la descompostura de la maquinaria o la falta de combustible. El material utilizado para las labores de cubierta procede de un banco del mismo terreno, a escasos 40 metros de distancia del frente de trabajo, el espesor de la cobertura, tiene como promedio 25 cm.



Foto 6. Delimitación del área de trabajo y cobertura de los residuos



Foto 7. Residuos peligrosos (más de 200 filtros para aceite) en el sitio de disposición final de residuos sólidos, Chiapa de Corzo, Chiapas

Maquinaria y equipo

La maquinaria y equipo que se utilizaba en el sitio:

Tractor 1:

- Cargador frontal marca Komatsu modelo D5 de oruga.
- Año de fabricación: 1970 modelo: 70DRP050-1B
- Estado físico: en condiciones deficientes.

Tractor 2:

- Cargador frontal, Massey Ferguson.
- Año de fabricación: 1970
- Estado físico: en condiciones aceptables.



Foto 8. Maquinaria Komatsu.

El tractor núm. 2, sólo se utilizaba cuando la otra maquina sufría algún desperfecto. El equipo descrito se rentaba y el desempeño en términos de eficiencia, no era el esperado por dos razones, la primera continuamente presentaba problemas mecánicos, y la segunda no se suministraba el combustible necesario, por parte del municipio.

Instalaciones

En la NOM-083-SEMARNAT-2003, se categorizan a los SDF en función de la cantidad de residuos que ingresan al mismo, para el caso del sitio de acuerdo a la citada norma, el sitio de Chiapa de Corzo caería en un tipo C y las obras complementarias que deben poseer estos sitios son: *caseta de control, báscula, cerca perimetral, vestidores y servicios sanitarios, franja de amortiguamiento, drenes pluviales y otros*. En el sitio no existe ninguna de esas instalaciones. Se contaba con un cerco de alambre de púas en la totalidad del predio (15 hectáreas), sin que se delimitara el área específica para la disposición final.

Para la franja de amortiguamiento

Aunque no existe un área de amortiguamiento delimitada, la disposición de los residuos se realiza al interior del predio ubicándose en una cañada, por lo que los alrededores se podrían considerar la zona de amortiguamiento, tomando en cuenta que existe cierta vegetación y por otro lado la distancia más corta con los predios vecinos desde el frente de operación del sitio es de 250 metros. Con el inicio de la administración 2005 -2007, el H. Ayuntamiento alquiló el sitio. A este sitio lo atraviesa una línea de conducción de energía eléctrica de 400 kv, y a escasos 20 m del frente de trabajo se ubica una torre de la citada, lo que representa una restricción más en la operación del sitio.

Volumen de residuos

El director de Servicios Primarios del Municipio, reportó que el volumen de los residuos depositados diariamente oscilaba en el rango de las 10 a 15 toneladas, de manera general el principal origen de los residuos recibidos en el sitio, es domiciliario, seguido de los residuos de mercados, parques y jardines. No obstante, también existen otras fuentes generadoras como, por ejemplo, las plantas industriales que se encuentran en el territorio municipal con quienes el municipio tiene acuerdos firmados para la disposición de los mismos. Para estar en condiciones de hacer una buena proyección en términos de vida útil del sitio se realizó una estimación rápida de la cantidad de residuos que ingresaban por día al sitio con una pesada de los carros recolectores, que arrojó un total al día de 28 toneladas, lo que representaba una cantidad de 10 mil 220 toneladas dispuestas en el sitio hasta ese momento, además de que se utilizó el levantamiento topográfico, para calcular el volumen que ocupaban los residuos, con un total de 28 992.60 m³, y un peso volumétrico de 352.50 kg / m³.

Evaluación del sitio con respecto a la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARANAT-2003

En la evaluación cualitativa del sitio, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARANAT-2003, donde se contemplan las especificaciones para la selección de los sitios de disposición final de residuos sólidos, se enlistan las restricciones para la ubicación del sitio, en la tabla II se plasma el comparativo de las restricciones que maneja la norma con respecto del sitio de estudio.

Tabla II. Restricciones para la ubicación de sitios, comparativo con respecto del sitio.

Concepto	Norma	Sitio
6.1.1. Distancia con respecto a aeródromo o aeropuertos.	Menor a 13 Km con estudio de riesgo aviario.	Cumple
6.1.2. Áreas Naturales Protegidas.	No ubicar	Cumple
6.1.3. Distancia con respecto a la mancha urbana.	Mínimo 500 m.	Cumple
6.1.4. Marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, zonas arqueológicas, cavernas, fracturas o fallas geológicas.	No ubicar.	No Cumple
6.1.5. Zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años.	No ubicar.	No Cumple
6.1.6. La distancia del sitio con respecto a cuerpos de aguas de caudal continuo, lagos, lagunas.	Mínimo 500 m	No Cumple
6.1.7. Distancia con respecto a cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento.	Mínimo 100 m. horizontales La distancia será menor a 500 m.	No Cumple No Cumple

Las consideraciones y criterios para determinar el cumplimiento o no de las restricciones se explican a continuación:

- Cumple con lo establecido en el numeral 6.1.1 la distancia mínima con respecto a aeródromos o aeropuertos, es mayor a 13 kilómetros, es importante hacer mención que en ese momento el aeropuerto internacional “Ángel Albino Corzo”, ubicado dentro del municipio de Chiapa de Corzo no había iniciado operaciones.
- Cumple con el numeral 6.1.2 de la NOM, ya que este sitio no se encuentra ubicado dentro de un área natural protegida, la más cercana, es el Parque Nacional “Cañón del sumidero” el cual se encuentra aproximadamente a 25 kilómetros de distancia en línea recta con dirección al norte-poniente.
- Distancia con respecto a la mancha urbana (punto 6.1.3), en este sentido, como se ilustra en puntos anteriores, el sitio se encuentra a escasos 600 metros en línea recta de la localidad Emiliano Zapata 2, en dirección al sur-oeste, por lo tanto, el sitio cumple con esta restricción, tal como se puede apreciar en la figura 1.
- De acuerdo a las condiciones topográficas del sitio, éste se encuentra enclavado en una zona de recarga de acuíferos por lo tanto no cumple con lo establecido en el punto 6.1.4.
- No se poseen datos precisos en cuanto a la zona de inundación, sin embargo, por la conformación natural del sitio se puede decir que las zonas bajas del predio pueden sufrir inundaciones, por lo tanto el sitio no cumple con el punto 6.1.5. de la NOM.
- La distancia del sitio con respecto a cuerpos de aguas de caudal continuo, es de 40 m como se aprecia en la figura 1, por tanto el sitio no cumple con lo establecido en el punto 6.1.6.
- Si bien no se detectaron pozos en los alrededores, si se observó un afloramiento de agua el cual, se ubica aproximadamente a 200 metros aguas arriba, al norte el sitio, por lo que no cumple con lo establecido en el numeral 6.1.7.

Diseño y conformación del sitio

Uno de los principales subproductos que se generan en cualquier sitio donde se dispongan residuos con alto contenido de materia orgánica en ausencia de aire, es el biogás, producto de una serie de complicadas reacciones bioquímicas, conocidas como digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos, es una mezcla de gases en cuya composición se reconocen un gran número de gases trazas, como: monóxido de carbono, nitrógeno, oxígeno, compuestos orgánicos, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y saturado de agua, además dos principales: dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), estos últimos, son prácticamente el 100% del total. [8] [18]

El biogás es una mezcla de gases que típicamente presenta los siguientes componentes:

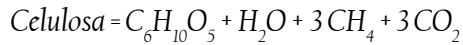
Tabla III. Componentes típicos encontrados en biogás de los rellenos sanitarios

Componente	Porcentaje (Base volumen seco)
Metano	45 -60
Bióxido de carbono	40 -60
Nitrógeno	2 - 5
Oxígeno	0.1 - 1
Sulfuros, disulfuros y mercaptano	0 - 1
Amoníaco	0.1 - 1
Hidrógeno	0 - 0.2
Monóxido de carbono	0 - 0.2
Constituyentes trazas	0.01 - 0.6

Control del biogás

Cualquier lugar donde los residuos domiciliarios se encuentran siendo depositados en grandes cantidades, es en principio, un bioreactor que genera gases y líquidos percolados, y su producción dependerá de una serie de variables relacionadas a las características de los residuos, lu-

gar de disposición, forma de disposición, clima, etc. Tal y como sucede en el sitio de disposición final de residuos sólidos de la ciudad de Chiapa de Corzo y que se abordara más adelante. En un relleno sanitario, los componentes orgánicos de la basura se degradan anaeróbicamente a diferentes tasas. Por ejemplo, los alimentos se descomponen más rápido que los productos de papel. Aunque el cuero, la goma y algunos plásticos también materia orgánica, usualmente se resisten a la biodegradación. Algunos materiales lignocelulósicos, plásticos, textiles y otras materias orgánicas son muy resistentes a la descomposición vía organismos anaeróbicos. A pesar de la falta de uniformidad de la descomposición anaeróbica, se han desarrollado algunas fórmulas empíricas para predecir la cantidad de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) que se genera de la descomposición de la celulosa y otros materiales orgánicos. Por ejemplo, algunos autores han utilizado la relación:



La ecuación 1, indica que se producen cantidades iguales de metano y dióxido de carbono, sin embargo, como el dióxido de carbono es soluble en agua, y forma parte de los líquidos percolados en cualquier relleno sanitario o sitio de disposición final, se tiene que la cantidad de dióxido de carbono es menor. El período de tiempo que se requiere para que la basura doméstica se degrade y se produzca biogás dependerá de diversas variables, entre ellas el número de microorganismos presentes en los residuos, nutrientes, temperatura, acidez, pH, contenido de humedad, cobertura y densidad de compactación, entre otros.

Composición de la basura

A mayor cantidad de residuos alimenticios en la basura, más rápido se generará biogás. El papel y materias orgánicas similares se degradan a una tasa menor y se resisten a la biodegradación.

Contenido de humedad

El contenido de humedad es uno de los parámetros más determinantes en un relleno sanitario. Si éste aumenta levemente se acelera el proceso de generación de gas considerablemente. De ahí que en los rellenos sanitarios se recomienda recircular los líquidos percolados para adicionar humedad a la basura, o incluso agregar agua, disminuyendo al mismo tiempo los impactos ambientales de su descarga y los costos de tratamiento. El clima es uno de los elementos determinantes del contenido de humedad en un relleno, y su efecto depende en alguna medida de las características de la cobertura y del grado de impermeabilidad de la base del relleno y los pretiles.

Nutrientes

Aunque los organismos anaeróbicos se desarrollan naturalmente entre los residuos, estos mismos también se encuentran en las heces humanas y de animales, por lo que el proceso de generación de biogás se acelera cuando en un relleno también se disponen los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas servidas. Además esto agrega humedad.

Mezcla

En un relleno sanitario o sitio de disposición final de residuos sólidos, es necesario contar con un régimen de mezcla lo más homogénea posible que permita poner en contacto los organismos aneróbicos con su fuente alimenticia. Lo mismo hace la recirculación de líquidos percolados.

Cobertura

La cobertura periódica y sistemática de los residuos, evita que entren en contacto con el aire permitiendo la generación de condiciones anaeróbicas que la degradan y producen biogás. Mientras más rápido se encuentren estas condiciones, más rápido comienza a degradarse la fracción orgánica de los residuos.

Compactación

La compactación de la basura genera el contacto con los nutrientes y la humedad, y tiende a expulsar el oxígeno presente, lo que a su vez tiende a reducir el tiempo en que se inicia la biodegradación anaeróbica, explicada con anterioridad. Algunos autores, ^[4] ^[3] sugieren que en los sitios o basureros a cielo abierto en los cuales los residuos no son compactados ni cubiertos, ocurre una baja descomposición anaeróbica. En los casos donde la descomposición de la basura ocurre en condiciones aeróbicas se generaría en su mayor parte CO₂, agua y prácticamente nada de metano.

Tras años de experiencia práctica y de investigaciones se ha logrado alcanzar cierto nivel de entendimiento acerca de los procesos de degradación anaeróbica de la basura y de la producción de biogás y su composición. En general la biodegradación de la basura sigue un patrón de cinco etapas:

Etapa 1

Esta etapa es una aeróbica, debido a la cantidad de aire que se encuentra atrapado en los poros de los residuos y comienza inmediatamente después que los residuos son depositados en el sitio, durante la cual las sustancias de fácil biodegradación, comienzan a desdoblarse a partir de su contacto con el oxígeno del aire y el trabajo de las bacterias presentes. Este es un proceso de compostaje donde se produce CO₂ y la temperatura de los residuos comienza a elevarse. En general es una etapa relativamente corta.

Etapa 2

Esta etapa también se lleva a cabo en condiciones anaerobias, aquí ocurre un proceso de fermentación donde se generan ácidos en los líquidos percolados y se produce una caída importante en el pH; En estas condiciones el biogás está compuesto básicamente de CO₂ debido a que es una reacción predominantemente aerobia

Etapa 3

En esta etapa se han establecido condiciones anaeróbicas y la actividad microbiana propensa a condiciones metanogénicas. El biogás empieza a contener cantidades crecientes de metano y la concentración de CO_2 comienza a decrecer. En la medida que los ácidos orgánicos se convierten en biogás, el pH de los líquidos percolados comienza a aumentar, su carga orgánica disminuye y el contenido de amoníaco aumenta.

Etapa 4

Esta etapa es conocida como la fase de estabilidad metanogénica. Es también la fase anaeróbica donde la producción de metano alcanza su más alto nivel, con una concentración de metano estable en el rango desde 40 hasta 60 por volumen de biogás. Los ácidos orgánicos en los líquidos percolados se descomponen inmediatamente en biogás. La carga orgánica de los percolados es baja y consiste principalmente de componentes orgánicos de alta biodegradabilidad. Como las condiciones son eminentemente anaeróbicas los percolados tendrán una alta concentración de amoníaco.

Etapa 5

Durante esta etapa de estabilización, la producción de metano comenzará a disminuir. Esta condición ocurrirá en plazos más cortos en rellenos de baja profundidad que en rellenos más profundos, donde se alcanza después de décadas.

Las etapas 1 y 2 pueden tener una duración de algunas semanas hasta dos o más años. En general, una mayor temperatura ambiental tenderá a acelerar los procesos de biodegradación. Altas tasas de compactación y acumulación de la basura en capas delgadas también tendrán el mismo efecto. La acumulación de la basura en celdas pequeñas también acelerará las reacciones tendiendo a reducir la duración de estas etapas. Las etapas 3 y 4, en tanto, pueden llegar a durar aproximadamente 5 años en su nivel más elevado para luego decaer progresivamente, de-

pendiendo de las condiciones de operación del relleno y en particular del contenido de humedad de la basura. Como la humedad tiende a acelerar las bioreacciones que ocurren en la basura, las precipitaciones tenderán a reducir la duración de estas etapas y a aumentar la generación de biogás en el tiempo. La recirculación de los líquidos percolados hacia las celdas de disposición contribuye al contenido de humedad de la basura y a acelerar las reacciones. La etapa 5 del ciclo de vida de un relleno sanitario dependerá en gran parte de las condiciones de operación desarrolladas desde un principio en un relleno. Sin embargo, puede tomar décadas e incluso siglos para que la basura depositada en un relleno finalmente se estabilice.

Rendimiento

La descomposición anaeróbica de la materia orgánica ocurre en ausencia de oxígeno. El metano y el CO_2 son los principales constituyentes del biogás y se producen durante la descomposición anaeróbica de la celulosa y las proteínas en la basura de los rellenos. Además de los gases nombrados, en los rellenos también se genera una pequeña proporción de compuestos orgánicos no metanogénicos. Estos compuestos incluyen contaminantes atmosféricos peligrosos y compuestos orgánicos volátiles (COV).

De acuerdo a la bibliografía reportada, la cantidad de biogás que se genera de una tonelada de carbono biodegradable corresponde a mil 868 metros cúbicos normales. En países industrializados, la cantidad teórica es de 370 Nm^3 de biogás por cada tonelada de basura depositada. Sin embargo, en general, la evidencia empírica en los países desarrollados ha demostrado que la biodegradación ocurre en forma dispareja e imperfecta, por lo que se considera que la generación de biogás se aproximaría más a los 200 Nm^3 por cada tonelada de basura depositada que a la cifra anterior.

Por otro lado, el programa de generación de biogás de rellenos ^[9] (*Landfill Methane Outreach Program*) de la agencia de protección al ambiente (Environmental Protection Agency) de Estados Unidos recomienda varios métodos para estimar con mayor o menor precisión la generación de biogás en un relleno sanitario. El “Método A: aproximación Simple” es, como su nombre lo indica una aproximación basada

en la cantidad de basura depositada en un relleno. El procedimiento se basa en una razón empírica entre cantidad de basura y flujo de biogás observada en los muchos y variados proyectos de recuperación de biogás de rellenos sanitarios estudiados por este programa. Es un reflejo de las características del relleno promedio y puede no representar con precisión las distintas características de la basura, el clima y otras variables que pueden estar presentes en un relleno específico. En general la EPA recomienda utilizar esta regla sólo como un proceso preliminar para determinar si es necesario utilizar métodos más complejos. Esta regla simple de aproximación sólo requiere conocimientos acerca de la cantidad de basura depositada en el relleno de interés y se nutre del juicio y experiencia de expertos de la industria, que han establecido que la generación de biogás varía entre 0,05 y 0,20 pies cúbicos (ft³) al año por cada libra (lb) de basura. Lo que se plasma en la ecuación 2:

$$\begin{aligned} \text{Generación anual de biogás (Ft}^3\text{)} &= \\ 0,10 \text{ Ft}^3/\text{lb} \times 2000 \text{ lb/ton} \times \text{cantidad basura depositada (ton)} \end{aligned}$$

Para el caso particular del sitio de Chiapa de Corzo por tratarse de un sitio con escasa vida para esa época (doce meses), la estimación del volumen generado de biogás de acuerdo a la ecuación 2 es:

$$\begin{aligned} \text{Generación anual} &= 0,10 \text{ Ft}^3/\text{lb} \times 2000 \text{ lb/ton} \times 10\,220 \text{ ton/Año} \\ &= 2\,044\,000 \text{ Ft}^3/\text{Año} \\ &= 57\,879.63 \text{ m}^3/\text{Año} \end{aligned}$$

Para tener un control del biogás, se propuso un sistema pasivo a base de un pozo de venteo vertical en el centro del sitio, que liberará los gases generados por la descomposición de la materia orgánica. [17]

Descripción del pozo de venteo

La implementación del pozo de venteo tiene la función de liberar los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica presente en la basura; a continuación se describe el proceso:

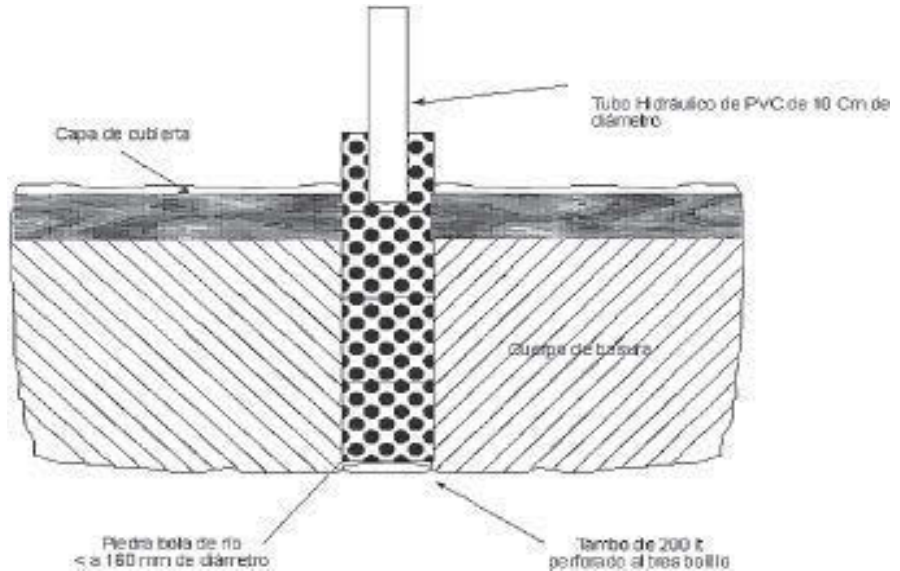


Figura 2. Propuesta de pozo de venteo para biogás

Planteamiento del sistema

Para el control de la lixiviación lateral se propuso un sistema que recuperara la mayor cantidad de líquidos producidos. En la zona correspondiente al pie de talud donde se observa la posibilidad de escurrimiento de lixiviado, se procede a excavar, en forma paralelamente al costado, una trinchera cuyas dimensiones son 0.5 m de ancho por 0.5 m de profundidad, misma que será impermeabilizada en su base y en las paredes, con una altura de 0.20 m con la finalidad de facilitar el escurrimiento de los lixiviados, en el centro del dren se coloca tubería de PVC de 4 pulgadas, el propósito de esta es evitar la colmatación del dren (ver figuras 3 y 4). Los lixiviados recolectados se dirigen a un cárcamo, estructura de captación cuyas dimensiones son de 3.0 metros de largo x 3.0 m de ancho x 1 m de profundidad; este depósito de captación de lixiviados deberá ser construido a base de concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ armado con varilla de $3/8''$ de pulgada de diámetro, construido con muros de tabique

rojo recocido y aplanado pulido interior con cemento-arena, así como una tapa de registro, la cual deberá llevar en su interior dos tuberías de PVC o polietileno de alta densidad del mismo diámetro, la primera para el monitoreo del nivel de captación, y la segunda, para la extracción cuando este sea reinyectado al interior del cuerpo de los residuos (figuras 2, 3 y 4). La manera de reinyectar los lixiviados al cuerpo de los residuos en el sitio es bombeándolos desde el cárcamo de captación para ser enviados directamente a las plataformas.

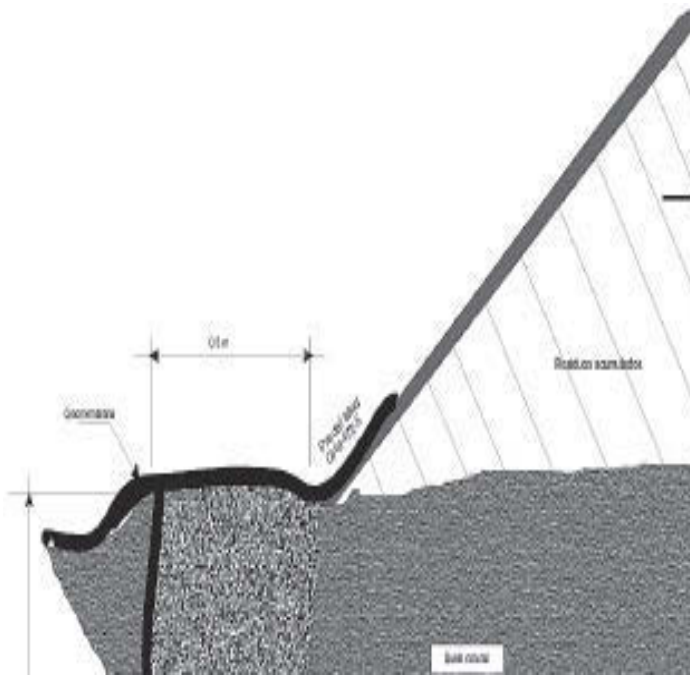


Figura 3. Corte lateral de sistema propuesta para captación y control de lixiviados en el sitio.

La zanja de recolección de lixiviado deberá ser construida de manera tal que se minimice en lo posible la captación de líquido resultado de la precipitación pluvial directa, y por otra parte que se maximice la captación de líquido percolado como resultado de la migración la-

teral de este a través de los taludes conformados en el sitio. La manera de realizar lo anterior consiste en colocar dentro de la zanja colectora previamente impermeabilizada con geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5 mm de espesor, material granular (grava de río) de tamaño promedio de dos pulgadas, el cual deberá ser colocado como se muestra en la figura 3, adicionalmente deberá colocarse a manera de cubierta otra capa impermeable de geomembrana con las mismas características que la anterior y posteriormente cubrirla con material de suelo con la finalidad de evitar el ingreso directo del agua pluvial al interior de la trinchera colectora.

El ingreso del lixiviado hacia la zanja colectora será a través del material granular colocado al pie del talud del tiradero.

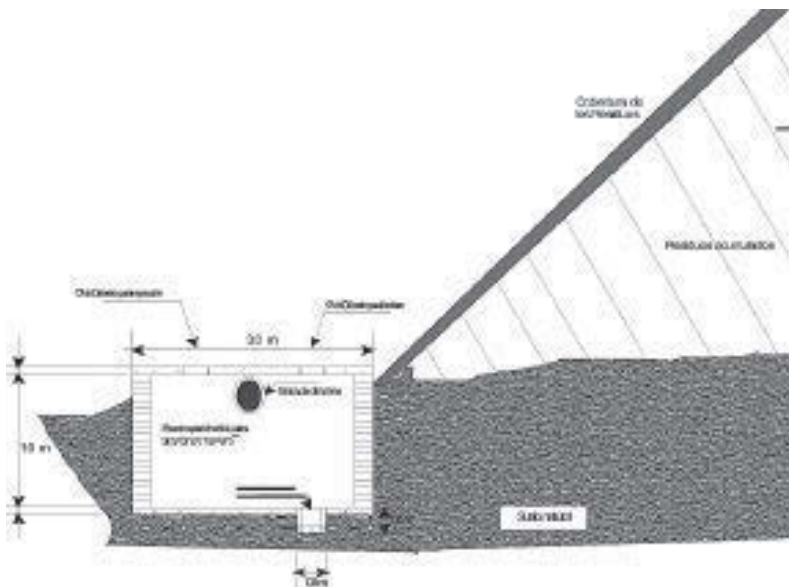


Figura 4. Corte lateral del cárcamo de captación de lixiviados del sistema propuesta.

Para estar en condiciones de proponer soluciones a la problemática detectada además de contar con elementos técnicos en la toma de decisiones y como parte de las medidas adoptadas, se realizó un levantamiento

tamiento topográfico para calcular el volumen de los residuos acumulados, determinar el peso volumétrico y la pendiente del terreno y así establecer las adecuaciones necesarias; las curvas de nivel se colocaron a medio metro de distancia entre ellas.

Por la relativamente poca altura del talud (17.50 m), por seguridad se propuso la construcción de dos taludes, con proporción de (3:1) para asegurar el comportamiento estable de los residuos acumulados.

La propuesta generada y los trabajos emergentes, se enfocaron, por un lado garantizar la estabilización del talud de los residuos y por otra la adecuada disposición final de los residuos, en la figura 5 a y b se presenta el perfil propuesto para la estabilización del talud.

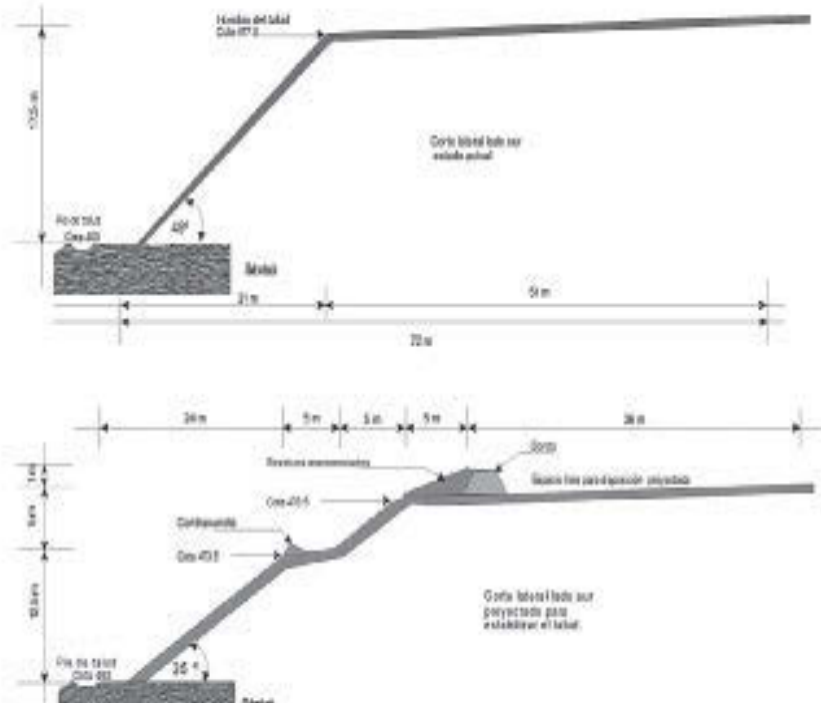


Figura 5a. Perfil antes de los trabajos.

Figura 5b. Perfil propuesto.

Conformación del sitio

En el sitio se contaba con un solo frente de trabajo, de aproximadamente 56 m de longitud, en donde al final de la plataforma se conformó un talud por la acumulación de los residuos, con un ángulo de aproximadamente 48° de inclinación respecto a la horizontal, lo que representaba un riesgo de obstruir el cause del arrollo *El Tanque*, si se desplomaba.

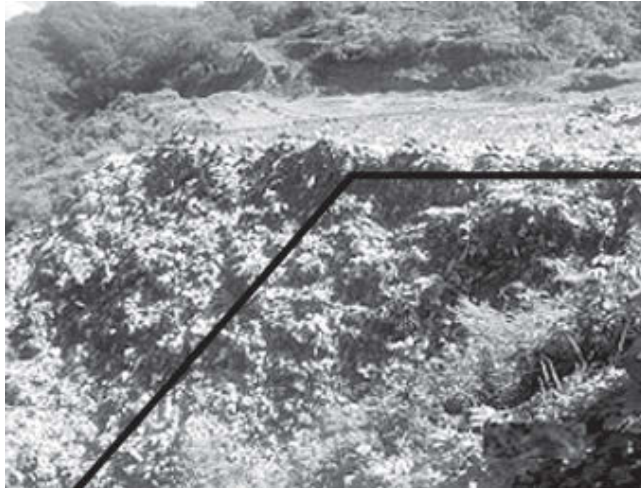


Foto 9. Talud con una pendiente de aproximadamente 48° .

Los trabajos de conformación del sitio inician con la apertura de una berma, con la movilización de alrededor de 2000 toneladas de residuos y material de cobertura, que se reacomodó en la cresta de la primera plataforma, se construyó un bordo donde se inicia la segunda plataforma. En la figura 6, se muestra una vista general sobre la conformación final del sitio, incluyendo las plataformas a utilizar.

En la fotografía 10, se observa el avance de los trabajos, inicialmente la apertura de la berma, reacomodo de residuos e inicio de la segunda plataforma.



Foto 10. Trabajos de conformación del sitio.

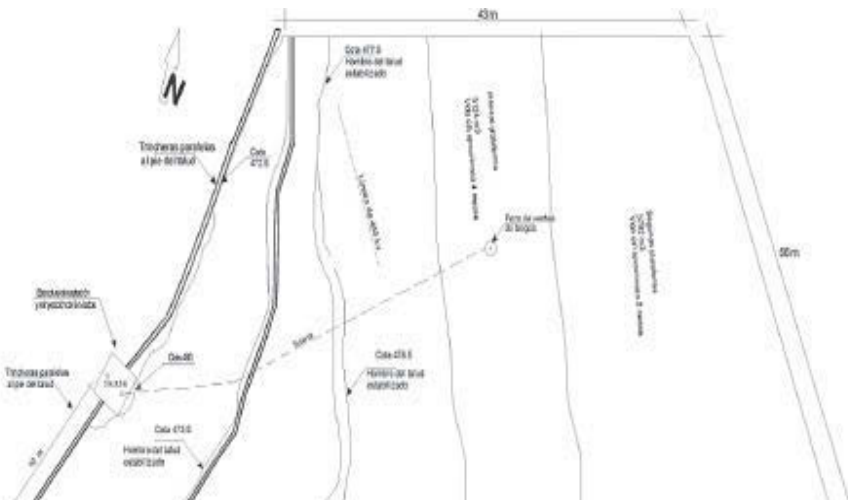


Figura 6. Vista superior, conformación propuesta para el sitio.

Conclusiones y recomendaciones

Aún hay mucho que hacer en materia de manejo integral de los residuos sólidos y específicamente en la disposición final, cabe señalar que

para finales del 2008 en 91 municipios del estado se requería clausurar los sitios en donde disponen sus residuos ^[6], por los problemas generados al ambiente y el riesgo que representan a la salud pública, dentro de estos municipios se encuentra Chiapa de Corzo. Paralelamente a la clausura, se debe llevar a cabo el emplazamiento de un relleno sanitario que cumpla con todas las especificaciones para garantizar la correcta disposición final de los residuos, evitar contaminación al medio y proteger la salud pública.

Por otra parte el municipio de Chiapa de Corzo no cuenta con los elementos técnicos ni económicos para enfrentar esta problemática, y se considera que existe un reto mayúsculo en lo relacionado a la educación ambiental ya que son de importancia sobresaliente las labores de sensibilización dirigidas a los tomadores de decisiones en los diversos niveles gubernamentales, a la población, a los estudiantes de todos niveles, así como a los servidores públicos encargados de las labores de recolección transporte y disposición final de los residuos. Por otro lado es impostergable trabajar en el sentido de crear leyes más coercitivas en materia ambiental y por supuesto la aplicación de las mismas, en todos los niveles gubernamentales. Finalmente se sugiere que a nivel local se realice la gestión para la obtención de recursos, dirigidos a realizar las obras de clausura, construcción del relleno sanitario, banda de segregación de materiales, sistemas de tratamiento, flotillas de camiones recolectores, maquinaria pesada para operación del rellenos, la propia operación del relleno, etc.

Bibliografía

- [1] Agenda estadística, Chiapas 2001. Gobierno del Estado de Chiapas.
- [2] Alvarado, Centeno Humberto, 2009, *Estudio de generación y caracterización de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en la cabecera municipal de Chiapa de Corzo, Chiapas.*
- [3] Bitrán y Asociados, 2003, *Estudio de políticas de abatimiento de gas de efecto invernadero y desarrollo económico: sinergias y desafíos en el sector de los rellenos sanitarios en el caso de Chile.* Economía de los recursos naturales y el medio ambiente. Chile.
- [4] S.a., Eastern Research Group, Inc., 2001, "Emission Inventory Improvement Program", Volume III, Chapter 15, EPA, s.f.
- [5] INEGI 2001, *CENSO estadístico 2001*
- [6] IHNE 2008, *Situación de los sitios de disposición final de residuos sólidos en Chiapas*, tercer ciclo de seminarios, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, no publicado.
- [7] Instituto de Historia Natural y Ecología del Estado de Chiapas, Secretaría de Salubridad y Asistencia, Secretaría de Turismo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003, *Manual de manejo adecuado de los residuos sólidos municipales*, México.

- [8] Instituto de Ingeniería UNAM, 2006, Manejo de lixiviados y biogás generados en un Relleno sanitario (generación, control, tratamiento y aprovechamiento)
- [9] EPA, *Landfill Methane Outreach Program*, 1996.
- [10] Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, 2003.
- [11] NOM-083-SEMARNAT-1996 “Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales”
- [12] NOM- 083 – SEMARNAT – 2003
- [13] NOM-084-SEMARNAT-1994 “Que establece los requisitos para el diseño de un rellenos y la construcción de sus obras complementarias”.
- [14] Gobierno del estado, *Plan de Desarrollo Chiapas Solidario 2007-2012*, Talleres Gráficos, 2007.
- [15] Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL 2001, *Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos*, primera reedición. México.
- [16] Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL 2007, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. *Rellenos sanitarios*. México D. F.
- [17] Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1999. Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos.
- [18] Tchobanoglous G; Thaisen H, Vigil S., 1997, *Gestión integral de residuos sólidos*, Editorial McGraw hill Vol. I. pág. 130, 430

- [19] Volke-Sepúlveda, T. y J. A. Velasco-Trejo, 2002, *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- [20] Hernández Barrios C., Heredia Cantillana P. y Wehenpohl G., 2006. *Manual para la supervisión y control de rellenos sanitarios*, tercera edición, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – GTZ agencia de cooperación técnica Alemana, México. pág. 30.

V. Alternativas de tratamiento fisicoquímico en lixiviados recalcitrantes y su manejo en el territorio nacional

Hugo Alejandro Nájera Aguilar

I. Generalidades de los lixiviados

Origen y definición de los lixiviados

Cualquier actividad antropogénica conlleva la generación de residuos sólidos, coloquialmente conocidos con el término de “basura”, los cuales si no son reincorporados a los procesos productivos, generalmente terminan en lugares conocidos como sitios de disposición final (SDF). De acuerdo con las prácticas que se presentan en la región, estos sitios pueden clasificarse de la siguiente manera; relleno sanitario, vertidos a cuerpos de agua y vertidos en el terreno. Obviamente que estas dos últimas no constituyen los mejores métodos de disposición final, sin embargo y desafortunadamente, son los más socorridos en el territorio nacional, principalmente el relacionado con el vertido en el terreno mejor conocido como “tiradero a cielo abierto” (TCA).

En el territorio estatal se cuenta al menos con 118 sitios para la disposición final de los residuos sólidos, operando alrededor del 95% de ellos como TCA (figura 1), sin control alguno y con daños al entorno. Es en estos lugares de acumulación de basura, donde se genera un líquido que provoca una de las mayores afectaciones al ambiente, y es conocido propiamente con el término de lixiviado. Este líquido provie-

ne de desechos muy heterogéneos en composición y arrastra todo tipo de contaminantes, muchos de ellos en concentraciones elevadas, por lo que es catalogado como uno de los más complejos y difíciles de tratar^[1], al contener concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, además de sales inorgánicas^[2,3].



Figura 1. SDF con afloramiento de lixiviados en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003^[4] y la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*^[5], en su artículo 5, fracción XVI, definen a los lixiviados como el “líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”. Algunos autores^[3] definen al lixiviado como el agua de lluvia que pasa a través del SDF además del líquido que se genera en la degradación de los desechos dentro de un relleno sanitario. Otros autores^[6] conciben a estos líquidos como aguas residuales complejas generadas cuando el

contenido de humedad o de agua de los residuos sólidos en un relleno sanitario, es mucho mayor a su capacidad de campo.

Tipos de lixiviados

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a su composición, y tanto la calidad como la cantidad de ellos varía sustancialmente entre sitios y estaciones, dependiendo de factores como el contenido de humedad de los residuos dispuestos; la hidrogeología específica del sitio; el diseño, operación y edad del relleno sanitario; así como la biodegradabilidad relativa de los diferentes contaminantes orgánicos presentes en el relleno sanitario^[7].

Aunque no es posible hablar de una composición promedio, pueden manejarse valores típicos a manera de contar con una referencia. En el cuadro 1, se presenta una composición típica de lixiviados de acuerdo con valores propuestos por Bagchi^[8].

Cuadro 1. Rango de composición típica en lixiviados

Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)	Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)
Sólidos Disueltos Totales	584 - 55,000	Fósforo total	ND - 234.0
Sólidos Suspendidos Totales	2 - 140,900	Boro	0.87 - 13.0
Conductancia específica	480 - 72,500 micromhos/cm	Bario	ND - 12.50
DBO ₅	6.6 - 99,000	Niquel	ND - 7.50
DQO	10.0 - 195,000	Nitrógeno de Nitratos	ND - 250.0
Carbono Orgánico Total	ND - 40,000	Plomo	ND - 14.20
pH	3.7 - 8.9	Cromo	ND - 5.60
Alcalinidad total	ND - 15,050	Antimonio	ND - 3.19

Dureza	0.1 - 225,000	Cobre	ND - 9.0
Cloruros	2.0 - 11,375	Talio	ND - 0.78
Calcio	3.0 - 2,500	Cianuro	ND - 6.0
Sodio	12.0 - 6,010	Arsénico	ND - 70.20
Nitrógeno total	2.0 - 3,320	Molibdeno	0.01 - 1.43
Fierro	ND - 4,000	Estaño	ND - 0.16
Potasio	ND - 3,200	Nitrógeno de Nitritos	ND - 1.46
Magnesio	4.0 - 780	Selenio	ND - 1.85
Nitrógeno Amoniaco	ND - 1,200	Cadmio	ND - 0.40
Sulfatos	ND - 1,850	Plata	ND - 1.96
Aluminio	ND - 85.0	Berilio	ND - 0.36
Zinc	ND - 731.0	Mercurio	ND - 3.00
Manganeso	ND - 400.0	Turbiedad	40 - 500 UTJ

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO: Demanda Química de Oxígeno; ND: No detectado.

Con los datos del cuadro 1, queda clara la gran variabilidad que existe en la concentración de contaminantes en un lixiviado, sólo por mencionar un ejemplo (considerando los parámetros de carga orgánica), se observa que los valores de DBO₅ y DQO pueden fluctuar entre 6.6-99,000 y 10-195,000 mg/L, respectivamente.

Para poder acotar la variabilidad de estos líquidos, en términos generales, pueden ser clasificados como lixiviados tipo I, II y III. Los primeros son también conocidos como lixiviados jóvenes, los segundos como medios y los del tipo III como viejos o estabilizados (cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de los tipos de lixiviados en función de la edad^[9]

Parámetro	Edad del relleno (años) y tipo de lixiviado		
	<5 (joven)	5-10 (medio)	> 10 (viejo)
	I (biodegradable)	II (intermedio)	III (estabilizado)
pH	< 6.5	6.5-7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 20,000	3,000-15,000	< 5,000
DQO/COT	< 2.7	2.0-2.7	> 2.0
DBO ₅ /DQO	> 0.5	0.1-0.5	< 0.1
AGV* (% COT)	> 70	5-30	< 5
Metales pesados (g/L)	2	—	< 50 mg/L

*AGV: Ácidos Grasos Volátiles; COT: Carbono Orgánico Total.

Del cuadro 2 se observa que los lixiviados jóvenes contienen la mayor carga orgánica (DQO mayor a 20,000 mg/L), con una elevada presencia de ácidos grasos volátiles (AGV), lo que explica los bajos valores de pH y como consecuencia altas concentraciones de metales pesados. Asimismo, se observa que al presentar una relación DBO₅/DQO superior a 0.5, más del 50% de la materia orgánica presente es biodegradable. Por su parte, el lixiviado catalogado como viejo, registra una menor carga orgánica con una relación DBO₅/DQO inferior a 0.1, por lo que la mayor parte de los contaminantes orgánicos son de naturaleza refractaria. Debe destacarse, que esta relación es de suma importancia en la elección del sistema de tratamiento para la depuración de estos líquidos. Así, para lixiviados jóvenes como primera etapa de tratamiento, siempre será recomendable pensar en sistemas biológicos; mientras que para un lixiviado viejo, dada su baja biodegradabilidad, de acuerdo con diversos autores^[9,10], los procesos fisicoquímicos se convierten en la mejor opción como primera etapa.

Repercusiones al ambiente

La cantidad generada de lixiviados es baja comparada con los volúmenes producidos en otros tipos de aguas residuales como las domésticas, sin embargo, los contaminantes que contiene son extremadamente peligrosos. De acuerdo con Tizaoui *et al* ^[11], cuando los lixiviados migran de la basura y alcanzan cuerpos de agua, pueden afectar la salud humana y ambientes acuáticos.

En términos generales, cuando estos líquidos no son controlados (captados, almacenados y tratados), pueden permear hasta llegar al agua subterránea o mezclarse con aguas superficiales y contribuir a la contaminación de suelo, agua subterránea y superficial ^[12].

En la actualidad, el nulo manejo de los lixiviados constituye la práctica común en el estado, lo que deja ver el gran vacío, falta de interés y poco conocimiento que hasta la fecha se ha tenido con uno de los líquidos más complejos y contaminantes (sino el mayor), generados ininterrumpidamente en el territorio estatal.

II. Alternativas de tratamiento

En términos generales, las tecnologías disponibles en el tratamiento de lixiviados pueden dividirse en procesos anaerobios, aerobios, sistemas naturales, sistemas de membranas, sistemas avanzados de oxidación, lagunas de evaporación y recirculación ^[13]. Los primeros dos sistemas son por naturaleza empleados para la remoción de materia orgánica, cuando el contenido de materiales biodegradables es elevada. Los sistemas naturales, se emplean como etapas de depuración, cuando el lixiviado ya ha recibido un pretratamiento, o bien, se encuentra diluido. En el caso de los sistemas de membranas, estos han demostrado buenas eficiencias y ser más compactos en el tren de tratamiento; sin embargo, su costo y mantenimiento lo hacen poco atractivos para las condiciones de la región. Autores como Ziyang y Youcai ^[14] citan como ejemplo a la ósmosis inversa, tecnología muy desarrollada en los últimos años pero bastante cara para ser usada en la mayoría de los países en desarrollo debido a su alto consumo de energía, costos operacionales y

contaminación severa en las membranas. Por lo que toca a los sistemas avanzados de oxidación, estos han comenzado a probarse teniéndose eficiencias buenas cuando la materia orgánica contenida en el lixiviado es poco biodegradable (índice de biodegradabilidad <0.3)^[15].

Ahora bien, las dos últimas tecnologías (evaporación y recirculación), son sistemas relativamente fáciles de operar, sin embargo, en el sistema de evaporación por lagunas se demandan superficies considerables, pudiendo presentarse serios problemas durante la época de lluvias debido a una sobreproducción en los lixiviados^[16]. Asimismo, durante el proceso de evaporación, algunos contaminantes (compuestos orgánicos volátiles) se emiten a la atmósfera^[17].

Con lo antes expuesto, puede observarse que prácticamente todas las tecnologías conocidas para el tratamiento de aguas residuales se han probado para el tratamiento de lixiviados de SDF de residuos sólidos, por lo que existe suficiente literatura técnica sobre las aplicaciones de las diferentes tecnologías para el tratamiento de estos líquidos. Sin embargo, la tratabilidad de ellos dependerá de su composición y características^[18], lo que ha propiciado la investigación de los trenes y sistemas acoplados más variados que difícilmente se verá para otro tipo de agua residual. En gran medida, lo anterior puede atribuirse a que a la fecha no existe una sola etapa biológica o fisicoquímica que sea suficiente para remover la gama de contaminantes contenida en cualquier tipo de lixiviado (joven, intermedio o estabilizado). Por ejemplo, Kurniawan *et al.*^[10] realizaron un análisis de 118 trabajos documentados de 1983 a 2005, en donde se reporta que ninguna técnica físico química individual es universalmente aplicable o altamente efectiva para la remoción de compuestos recalcitrantes a partir de lixiviados estabilizados. Siempre ha sido necesario recurrir a sistemas acoplados para el tratamiento de lixiviados jóvenes o maduros, bien sea una combinación de biológico-fisicoquímico, biológico-fisicoquímico-biológico o biológico-fisicoquímico-fisicoquímico para los primeros, o bien, para los segundos, fisicoquímico-biológico, fisicoquímico-fisicoquímico o fisicoquímico-fisicoquímico-biológico^[19].

Tratamientos fisicoquímicos

De acuerdo con la clasificación de lixiviados expuesta en cuadro 2, se observa que la carga orgánica medida como DBO y DQO constituyen parámetros básicos al momento de decidir el sistema de tratamiento a emplearse, especialmente la relación existente entre ambos, dado que define en gran medida la biodegradabilidad del lixiviado. Así, en el presente trabajo teniendo en cuenta los alcances y extensión del mismo, en esta ocasión se abordarán únicamente los tratamientos fisicoquímicos (sin considerar los procesos avanzados de oxidación) disponibles para los lixiviados de baja biodegradabilidad, también conocidos como maduros o del tipo III.

Algunas definiciones acerca de este tipo de lixiviados, lo encontramos con Wang *et al.*^[20], quienes lo conciben como un líquido pobre en biodegradabilidad con una relación o índice de biodegradabilidad menor a 0.17, en tanto que para otros autores cuando es menor a 0.3^[112]. De esta manera, para este tipo de lixiviado como primera etapa de tratamiento, siempre será recomendable aplicar los procesos fisicoquímicos^[10].

Dentro de los tratamientos fisicoquímicos destacan la coagulación-floculación además de la adsorción con carbón activado, la precipitación química y los procesos con membrana. A continuación se destacan los aspectos más importantes de cada uno de estos sistemas, eficiencias alcanzadas, limitaciones y sus aplicaciones en el tratamiento de lixiviados maduros de rellenos sanitarios.

Coagulación-floculación

En el tratamiento de lixiviados, la coagulación se ha empleado como pretratamiento antes de los procesos biológicos o como etapa de pulimento para remover componentes orgánicos no biodegradables, o bien, bajo esquemas acoplados con procesos de oxidación avanzada^[21].

Algunos autores^[9], experimentaron con dos tipos de coagulante cloruro férrico (FeCl_3) y sulfato ferroso [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] aplicado al mismo lixiviado, reportando eficiencias de remoción del 55 y 42% en DQO, respectivamente. De igual manera, otros estudios de coagulación-floculación^[22], condujeron a remociones altas de sólidos suspendidos

(95%) y de color (90%), y regulares en DQO (43%), con el uso de tres tipos de coagulantes: $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$, (FeCl_3) y sulfato ferroso (FeSO_4). Nuevamente el FeCl_3 demostró una mayor efectividad en la remoción de contaminantes. Estos resultados indican que el FeCl_3 es más efectivo que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ como coagulante.

Por su parte, Renou *et al.*^[15] reportan 15 estudios conducidos bajo el proceso de coagulación-floculación alrededor del mundo, donde se ha experimentado con diferentes coagulantes tales como $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$, FeCl_3 e hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, buscando las condiciones experimentales óptimas en lo referente al pH, dosis y velocidades de mezclado. Las eficiencias de remoción alcanzadas (8-90% en DQO) empleando uno o dos de estos coagulantes así como las condiciones de trabajo han sido muy variadas.

Dentro de las limitaciones que presenta este proceso, se encuentran los costos operacionales relativamente altos debido al consumo de reactivos, la sensibilidad del proceso al pH y a la generación de lodos, entre los principales^[10].

Ahora bien, como principales bondades del proceso destacan la remoción de sólidos suspendidos y coloidales^[10], así como los tiempos relativamente cortos que se requiere en el tratamiento, y por consiguiente, de unidades más compactas en comparación con otros sistemas.

Adsorción con carbón activado

Básicamente, la adsorción es un proceso de transferencia de masa en la cual una sustancia es transferida de la fase líquida a la superficie de un sólido. Debido a sus propiedades físicas inherentes, gran área superficial, estructura de sus microporos, alta capacidad de adsorción y reactividad superficial, la adsorción empleando Carbón Activado Granular (CAG) o Carbón Activado en Polvo (CAP), ha tenido mucha aceptación en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos^[23]. Se trata de un método de tratamiento avanzado muy aplicado para la remoción de compuestos orgánicos refractarios y de compuestos inorgánicos así como de metales pesados^[24].

Amokrane *et al.*^[9], lo experimentaron en lixiviados maduros para la remoción de materia orgánica alcanzando eficiencias de remoción del orden del 70% en DQO. Por otro lado, Kurniawan *et al.*^[10] reportan di-

versos estudios donde el CAG muestra gran efectividad en la remoción de metales pesados (cadmio, cobre, cromo, manganeso, plomo y zinc) con remociones del 80-96% de la concentración inicial y en rangos de pH que oscilan en la neutralidad (6.0-7.7).

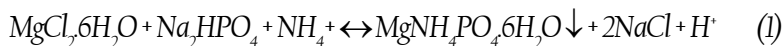
En el territorio nacional, para lixiviados provenientes del rellenos sanitario de la ciudad de Mérida, Yucatán, se llevó a cabo un estudio^[25] mediante el uso de columnas empacadas con carbón activado, a través de las cuales se hizo pasar lixiviado crudo y lixiviado con pH ácido, cercano a 2 y con un índice de biodegradabilidad inferior a 0.3. Los mejores resultados fueron obtenidos en los ensayos en los que se utilizó lixiviados con pH ácido. Para el mismo tiempo de contacto, de 8 horas, se alcanzaron remociones de 65% de DQO para lixiviados sin tratamiento, mientras que en los ensayos con reducción de pH, se obtuvieron remociones de 90%.

En términos generales, considerando que en diversos estudios bajo este proceso más del 90% de la DQO ha sido removida, la aplicación del carbón activado ya sea en forma granular o en polvo, se considera un método efectivo para la remoción de compuestos orgánicos recalcitrantes, pero no para la remoción de nitrógeno amoniacal. Aunado a esto último, otras desventajas que se suman en la aplicación de esta técnica, se encuentra la necesidad de una regeneración frecuente de la columna de carbón activado y el alto costo del CAG, lo cual puede representar una limitante para su aplicación al tratamiento de lixiviados maduros en países en desarrollo^[10].

Precipitación química

Este proceso se inicia con la adición de sustancias químicas (tales como las sales de fierro y aluminio, así como la cal y polímeros orgánicos) que alteran el estado físico de los sólidos disueltos y suspendidos para su posterior remoción por sedimentación. En algunos casos, el mismo coagulante es el principal responsable de la remoción al formar un precipitado voluminoso^[26].

Dependiendo de lo que se quiera remover (nitrógeno amoniacal o metales pesados), la estruvita y la cal son los productos químicos más empleados. La precipitación con estruvita a compuestos insolubles para la separación de la fase líquida, queda representado por la siguiente ecuación:



Partiendo de esta reacción, con una relación molar Mg^{+2} , NH_4^+ y PO_4^{-3} , 1:1:1, Li *et al.*^[27] aplicaron a lixiviados de un relleno sanitario de Hong Kong, la precipitación con estruvita para la remoción de nitrógeno amoniacal, alcanzándose remociones del orden del 98% y a un pH de 9. La remoción en DQO fue apenas del 53%.

Una de las grandes ventajas de la precipitación con estruvita, es que el lodo producido después del tratamiento puede ser utilizado como fertilizante con fuente de nitrógeno, siempre que el lixiviado no contenga metales pesados.

En términos generales, en la aplicación de la precipitación química al tratamiento de lixiviados maduros^[9], se han logrado altas eficiencias de remoción del orden del 90% en metales pesados, 70-90% en la remoción de color, turbiedad y sólidos suspendidos; aunque en la remoción de materia orgánica cuantificada como DQO, se han alcanzado remociones por debajo del 55%.

Finalmente, al igual que sucede con otros procesos fisicoquímicos, la precipitación química demanda altas dosis del precipitante, sensibilidad al pH y la generación de lodo^[10].

Filtración con membrana

Los sistemas de tratamiento a base de membranas aplicado para los diferentes efluentes, son tecnologías de gran expansión en las últimas dos décadas. En el caso del tratamiento de lixiviados, ya sea de manera directa o acoplada, se ha probado con la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa, entre las principales.

Por ejemplo, en una combinación de procesos avanzados de oxidación con fisicoquímicos, se probó^[18] un sistema integrado (Reacción Fenton – Ultrafiltración), donde se alcanzaron remociones del 80% de DQO. En este caso, la ultrafiltración fue utilizada como etapa de depuración para los lixiviados viejos.

Por otro lado, en reactores biológicos también se han adaptado sistemas de micro y ultrafiltración para la separación de sólidos de los

efluentes de lixiviados^[13] (en sustitución de las etapas de sedimentación), teniendo reactores más compactos pero con mayores problemas en la operación, dado a que los módulos de membranas son más complicados de operar y mantener que un sedimentador.

En lo que respecta a la ósmosis inversa, las aplicaciones han sido para lixiviados viejos, o bien, para lixiviados a los cuales se les ha realizado un pretratamiento previo, presentando esta tecnología la ventaja de demandar bajos consumos energéticos comparados con otros sistemas de tratamiento^[13].

Ahora bien, en sistemas integrados se han probado tanto la ósmosis inversa como la microfiltración de manera combinada con reactores anaerobios, siempre que los contaminantes de naturaleza orgánica sean en su mayoría biodegradables. Por ejemplo, Li T. *et al.* ^[28] experimentaron con un sistema de tratamiento compuesto por reactor UASB – reactor secuencial por lote – microfiltración – ósmosis inversa, alcanzándose una eficiencia global de remoción de DQO de 99.8%. De igual manera, en este sistema integrado tanto la microfiltración como la ósmosis inversa fueron empleados como etapas de depuración.

Dentro de los principales problemas asociados a los sistemas con membrana, destacan sus altos costos operativos, la disminución en los flujos por problemas de colmatación y el taponamiento mismo en las membranas, lo que propicia que deba tenerse el suministro adecuado de reemplazos de membrana. Asimismo, se considera que esta tecnología no elimina propiamente la carga contaminante de los efluentes, sino que sólo la transfiere de la fase líquida a la sólida, lo que la pone en desventaja ante otros sistemas como los procesos avanzados de oxidación, que son capaces de transformar los contaminantes recalcitrantes a compuestos menos peligrosos y más fáciles de remover en etapas adicionales, a través de la implementación de procesos convencionales. En la figura 2 se muestra una planta de ósmosis inversa donde se realizaron ensayos durante el 2008 para el tratamiento de una fracción de lixiviados recalcitrantes producidos en el relleno sanitario de Bordo Poniente Distrito Federal.

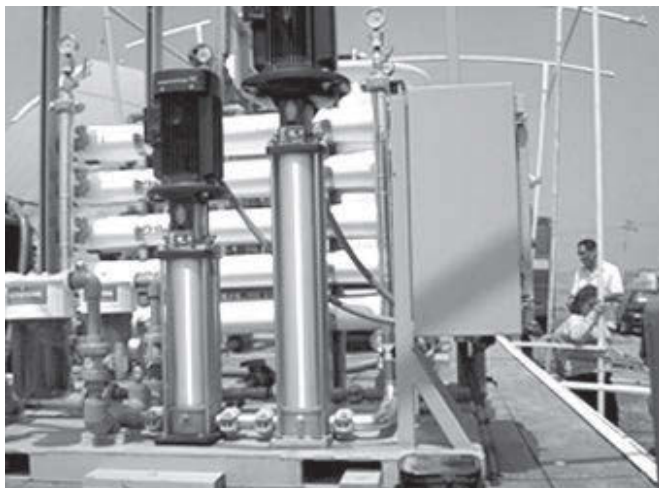


Fig. 2. Planta de ósmosis inversa con una capacidad de tratamiento de $30\text{m}^3/\text{día}$.

Finalmente, aunque no es propiamente un sistema de membranas fabricadas, es digno mencionar que bajo el mismo principio utilizado en el tratamiento de efluentes a través de membranas, pero con la ventaja adicional de contar con una gama de poblaciones microbianas bien establecidas en el lecho, se han utilizado camas filtrantes de basura estabilizada, como es el caso de Gupta y Singh^[29], quienes reportan eficiencias de remoción del 82% como DQO. Esta nueva modalidad de cama filtrante (biofiltro) tuvo sus inicios con Zhao *et al.*^[30] obteniendo eficiencias del 90% de materia orgánica medida como DQO. De igual manera, usando esta etapa pero con 2 bioreactores en serie, Lei *et al.*^[31] reportan remociones del orden del 95% de DQO. Cabe señalar que en el ámbito internacional, esta técnica representa de los últimos trabajos innovadores con resultados muy favorables para el tratamiento de lixiviados.

III. Tratamiento de lixiviados en el territorio nacional

Tratamiento de lixiviados en el ámbito nacional

A nivel nacional, a pesar de que los lixiviados son líquidos con alto poder de contaminación y que siempre se producirán en los lugares donde

la basura sea dispuesta, aún son escasas las investigaciones acerca de su tratabilidad. Dentro de estas investigaciones podemos citar el tratamiento de lixiviados con carbón activado realizado en la ciudad de Mérida, Yucatán^[25], con el que se obtuvieron eficiencias de remoción de materia orgánica del orden del 65%. De igual manera, Méndez *et al.*^[32], realizaron pruebas de tratabilidad fisicoquímica en estos líquidos, obteniendo eficiencias bajas de remoción de materia orgánica, medida como DQO, con valores apenas del 40%. Por otro lado, Monje y Orta^[21], evaluaron la coagulación y ozonación como un proceso alternativo para la remoción y transformación de materia orgánica recalcitrante de lixiviados estabilizados provenientes de un relleno sanitario salino-relleno sanitario Bordo Poniente. Con la coagulación con cloruro férrico removieron 67% de materia orgánica reportada como DQO y 96% de color. El porcentaje remanente de DQO fue removido con ozono. De igual manera, Orta *et al.*^[33], experimentaron un co-tratamiento con lixiviados de este sitio, a través de pruebas de tratabilidad por dilución en el sistema de lagunas facultativas ubicadas en el lago de Texcoco, a menos de 2 km de donde se generan los lixiviados, obteniéndose eficiencias de remoción de materia orgánica del 71% medida como DBO, incorporando un 10% de lixiviado por 90% de agua residual doméstica.

Ahora bien, el tratamiento de estos líquidos fuera de los laboratorios (a escala piloto) prácticamente es inexistente en los miles de sitios de disposición final que se tienen en el país, donde como se sabe, se opere de una forma controlada o no controlada, estos líquidos siempre serán generados. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía^[34], en el país existen 104 rellenos sanitarios y 23 sitios controlados, lo que haría suponer que el manejo de lixiviados en ellos es adecuado y sin afectaciones al entorno, sin embargo y desafortunadamente, esto no se presenta. De los rellenos sanitarios considerados, menos de 15 contaban con laguna de evaporación. En el resto, los lixiviados escurren libremente pudiendo contaminar cuerpos de agua de los alrededores.

Dentro de los rellenos sanitarios que cuentan con laguna para la evaporación de los lixiviados y recirculación de los mismos a estratos de basura y plataformas de celdas, se tienen al de las ciudades de Méri-

da, Durango, Nuevo Laredo, Puebla, León, Aguascalientes, Monterrey, Distrito Federal y del estado de México (Tlanepantla, Bordo Poniente, Tecamac, entre los principales). La acción de utilizar la evaporación y recirculación de estos líquidos como sistema de tratamiento se encuentra en discusión dada la generación de aerosoles y de otros compuestos peligrosos con la subsecuente exposición de los trabajadores, además de otros impactos negativos tales como posibles daños a la vegetación^[17]. Por ello es necesario proporcionar tratamientos adecuados a los lixiviados, como los utilizados en las aguas residuales convencionales (sistemas biológicos o fisicoquímicos).

Del total de rellenos sanitarios existentes en el país, únicamente los de Tlanepantla -Estado de México- y de Bordo Poniente, cuentan además de lagunas de evaporación de lixiviados y sistemas de recirculación, con otros sistemas de tratamiento. El primero, emplea un serpentín de 6 km de longitud para acelerar la evaporación en los lixiviados; el segundo, utiliza un proceso fisicoquímico (la única planta de tratamiento de lixiviados en México hasta el año 2008), para tratar los lixiviados maduros que se producen en la zona conocida como primera etapa del relleno que comprende una superficie de 70 Ha. La planta opera con un gasto de 2-3 L/seg tratando alrededor de 25 m³/día, con concentraciones promedio en el influente en DBO₅ y DQO de 675 y 3500 mg/L, respectivamente (resultados del año 2005), con un índice de biodegradabilidad de 0.19. El agua tratada es utilizada para el riego de caminos de la 4ta. etapa del relleno sanitario, dando cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y los lodos producidos -3-4 m³/día- una vez pasados por un equipo de centrifugación, son dispuestos en los frentes de trabajo del relleno. En el proceso se emplean como coagulantes cloruro férrico y sulfato de aluminio.

Tratamiento de lixiviados en el estado de Chiapas

En el estado de Chiapas son escasos los estudios relacionados con el manejo de lixiviados. Por un lado puede citarse al Instituto de Historia Natural y Ecología, quien realizó un diagnóstico acerca del manejo de la basura, sin tratar el fondo de la problemática de las emisiones líquidas.

Por otro lado, se tiene al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez que en colaboración con el laboratorio de monitoreo ambiental del Instituto de Historia Natural y Ecología, realizaron en los años 2005 y 2006 muestreos mensuales (3 en el año 2005 y 12 en 2006) para la caracterización de los lixiviados que se producen en el SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Por la edad que lleva operando este sitio, los lixiviados resultaron ser predominantemente del tipo III o estabilizados, con cargas orgánicas promedios durante el año 2006 de 21,424 y 3,434 mg/L en DQO y DBO₅, respectivamente. Estos resultados de caracterización pueden observarse en el cuadro 3, en donde se manejan únicamente los promedios y el rango de cada uno de ellos así como su desviación estándar.

Cuadro 3. Características de los lixiviados del área clausurada del SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Parámetros	2006 ^[35]				2008 ^[36]			
	Conc. (mg/L)			Desv.	Conc. mg/L			Desv.
	Prom.	Mín.	Máx.	est.	Prom.	Mín.	Máx.	est.
pH	8.022	7.01	8.43	0.638	8.556	8.37	8.83	2.9715
DQO	21424	159	15855	32595	6177.8	4657.5	7102	84.273
DBO	3434.3	6362	44033	11979	926.8	103.5	1301	36.069
IB	0.160	0.004	0.525	0.606	0.146	0.02	0.19	0.4359
Alcalinidad	10011	2900	16640	6679.7	9133.7	8546	9769	98.838
SST	559.25	37.5	2730	1275.2
Fierro	31.539	9.34	111.51	46.382	21.159	17.12	25.197	5.7113
Niquel	1.092	0.646	1.969	0.6161	1.64	1.4	1.88	0.3394
Plomo	0.244	0.135	0.475	0.205	1.851	0.477	3.225	1.9431
Zinc	1.631	0.632	2.94	1.768	3.425	2.445	4.405	1.3859
Cobre	0.119	0.063	0.171	0.062	0.190	0.144	0.235	0.0643
Cadmio	0.026	0.008	0.038	0.097	2.727	3.49	1.964	1.079
Cromo	1.919	0.623	3.977	2.234	0.827	0.4122

IB: índice de Biodegradabilidad; SST: Sólidos Suspendidos Totales.

Continuando con los estudios en este sitio, en el año 2008^[36], se realizaron otra serie de muestreos corroborando que en ambos periodos de tiempo el IB promedio estuvo en el rango de 0.15 a 0.16. Este índice toma gran relevancia dado que define en gran medida el tipo de lixiviado y tratamiento al cual deberá someterse el líquido en cuestión. De acuerdo con diversos autores^[112], registros inferiores a 0.3 determinan que el lixiviado es maduro o de tipo III y por tanto, autores como Aziz *et al.*^[22] lo catalogan como poco biodegradable con la presencia de materiales orgánicos recalcitrantes que son parcialmente estables y biológicamente resistentes. De igual manera, los valores de pH y alcalinidad registrados corresponden a un lixiviado del tipo III, con valores entre el rango de 6.8-9.0 y 1,020-12,300 mg/L, respectivamente^[20]. De esta manera, la literatura recomienda^[10] que ante lixiviados de tal composición, los tratamientos fisicoquímicos deben ser considerados como primera etapa. Es así, que entre los años 2008 y 2009, se experimentó^[36] el tratamiento de estos líquidos bajo el proceso de coagulación-floculación (figura 3) utilizando cloruro férrico y sulfato ferroso. Los resultados del estudio arrojaron que el primer coagulante fue por mucho más efectivo que el segundo, en la eliminación de materia orgánica medida como DQO con un 67.3% de remoción. En suma, dentro de las principales conclusiones derivadas de este trabajo, se tuvo que el proceso de coagulación-floculación aplicado a los lixiviados maduros del SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, demostró ser efectivo en la remoción de carga orgánica medida como DQO cuando se empleó FeCl_3 como coagulante, obteniéndose las mejores eficiencias de remoción (67%) a pH 6 y a una dosis de 1.4 gr/L, bajo las condiciones de 250 y 30 rpm de mezcla rápida y lenta, respectivamente.



Fig. 3. Ensayos de coagulación-floculación en lixiviados maduros de Tuxtla Gtz.

Por tanto, con lo anterior se demuestra que el proceso de coagulación-floculación puede ser aplicado como un pretratamiento dentro de un sistema integrado de tratamiento para los lixiviados maduros producidos en el SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, quedando pendiente de remover a través de un proceso avanzado de oxidación o de un sistema biológico, la carga orgánica remanente.

Comentarios finales

El panorama general presentado en este documento sobre las características de los lixiviados tipo III, sus repercusiones al medio y las investigaciones entorno a su tratabilidad a través de procesos fisicoquímicos en diferentes partes del mundo, así como su manejo en los SDF del territorio nacional, arrojan como puntos relevantes los siguientes comentarios:

- Los lixiviados representan hoy en día, uno de los problemas más desafiantes en el campo de la ingeniería del tratamiento de las aguas residuales, dada la heterogeneidad en su composición y la complejidad y cantidad de sus constituyentes.

- Los diferentes procesos fisicoquímicos probados en el tratamiento de lixiviados recalcitrantes alrededor del mundo, contrario a los resultados que ellos ofrecen en aguas residuales menos complejas, no son suficientes como única etapa medular dentro de un tren de tratamiento, dado que siempre estarán acompañados de otras técnicas fisicoquímicas, de procesos avanzados de oxidación, o bien, de sistemas biológicos para la remoción de los contaminantes, hasta alcanzar las concentraciones permisibles de descarga a cuerpos receptores o usos posteriores.
- En México, las investigaciones en el tema aún son escasas, constituyendo un gran reto y oportunidad para los centros de investigación, las universidades, las instituciones gubernamentales, las empresas privadas y todo aquel individuo interesado en hacer frente a uno de los líquidos más complejos de tratar hoy en día y de gran potencial de contaminación al entorno por su fácil liberación al ambiente, lo que sin duda está representando riesgos a la salud de la población.
- En países desarrollados, los lixiviados realmente se están sometiendo a sistemas de tratamiento para la depuración de los mismos, contrario a las prácticas comunes a las que se recurre en países como el nuestro, en la que la “tecnología” empleada es a base de lagunas de evaporación y sistemas de recirculación, que en su mayoría son deficientes y cuestionables por los problemas de salud que puede representar para los trabajadores. Prácticamente esta forma de manejar los lixiviados en México, ha caído en desuso en aquellos países, donde la legislación dicta que los lixiviados a pesar de su complejidad, sean vistos prácticamente como un agua residual más a la que es necesario tratar.
- Finalmente, con lo antes expuesto, queda claro el gran campo por explorar en la búsqueda de tecnologías que hagan frente a la complejidad de estos líquidos, los sistemas hasta hoy aplicados en el país ya no son suficientes... si es que algún día llegaron a serlo.

Bibliografía

- [1] Luna, Y., Otal, E., Vilches, L., Vale, J., Querol, X., Fernández, C., 2007, "Use of zeolitised cal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study", en *Waste Management*. 27, pág. 1877-1883
- [2] Lopes, J., y Peralta, P., 2005, "Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates", en *Journal of Hazardous Materials*. B123. 181-186.
- [3] Wiszniowski, J., Robert, D., Gorska, J., Miksch, K., Weber, J., (2006), "Landfill leachate treatment methods: A review", en *Environ Chem Lett*. 4 (1). pág. 51-61
- [4] Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. "Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial". 20 de Octubre de 2004. p. 3
- [5] Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003). Publicada en el DOF el 08 de Octubre de 2003. Última reforma DOF 19-06-2007.
- [6] Wang, F., Smith, D., & El-din, M., 2003, "Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment – A review", en *Environmental Eng. Sci.* 2: 413-427.

- [7] Reinhart, D., Townsend, T., 1998, *Landfill Bioreactor Design & Operation*, Lewis Publishers. p. 18-19.
- [8] Bagchi, A. 1990, *Design, construction and monitoring of Sanitary Landfill*, Ed. Wiley. p. 44.
- [9] Amokrane, A., Comel, C., & Veron, J., 1997, "Landfill leachates pre-treatment by coagulation-flocculation", en *Water Research*. **31** (11), 2775-82.
- [10] Kurniawan, T., Lo, W., y Chan, G., 2006, Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. B129. 80-100.
- [11] Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L. & Ghrabi, A. (2007). Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. *Journal of Hazardous Materials*. **140**. 316-324.
- [12] Deng, Y., 2007, Physical and oxidative removal of organics during Fenton treatment of mature municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. **146**. 334-340
- [13] Giraldo E., 2001, Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes. No. 14.
- [14] Ziyang, L. & Youicai, Z., 2007, Size-fractionation and characterization of refuse landfill leachate by sequential filtration using membranes with varied porosity. *Journal of Hazardous Materials*. **147**. 257-264.
- [15] Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P., 2008, Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. **150**. 468-493.
- [16] Castillo, B., Salazar, G., Méndez, N., & Sauri, R., 2006, Remoción

de metales pesados en el lixiviado de un relleno sanitario mediante un tratamiento fisicoquímico. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*.

- [17] Gray, D., Pollard, S., Spence, L., Smith, & Gronow, J. (2005). Spray irrigation of landfill leachate: Estimating potential exposures to workers and bystanders using a modified air box model and generalized source term. *Environmental Pollution*. **133**. 587-599
- [18] Primo, O., Rueda, A., Rivero, M., y Ortiz I. (2008). An Integrated process, Fenton reaction – ultrafiltration, for the treatment of landfill leachate: Pilot plant operation and analysis. *Ind. Engineering Chemical Research*. **47**. 946-952.
- [19] Deng, Y., y Englehardt J. (2006). Treatment of landfill leachate by the Fenton process. *Water Research*. **40**. 3683-3694.
- [20] Wang, F., Smith, D., & El-din, M. (2003). Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment – A review. *Environmental Eng. Sci.* **2**: 413.127.
- [21] Monje, R. & Orta, de V. (2004). Removal and transformation of recalcitrant organic matter from stabilized saline landfill leachates by coagulation-ozonation coupling processes. *Water Research*. **38**. 2359-2367.
- [22] Aziz, H., Alias, S., Assari, F., y Adlan M. (2007). The use of alum, ferric chloride and ferrous sulphate as coagulants in removing suspended solids, color and COD from semi-aerobic landfill leachate at controlled pH. *Waste Management & Research*. **25**. 556-565.
- [23] Ramalho R. S. (1993). Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté.
- [24] Romero G. (2000). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios por métodos fisicoquímicos: influencia del pretratamiento sobre el proceso de adsorción como etapa de pulimiento. Tesis de Maestría. UNAM.

- [25] Méndez, N., Medina, H., Quintal, F., Sauri, R. & Castillo, B. (2002). Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Ingeniería* 6-3. Facultad de Ingeniería – UADY. pp. 19.
- [26] Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales “Tratamiento, vertido y reutilización”*. Volumen I. 3ª Edición. Mc Graw Hill.
- [27] Li, X., Zhao, Q., Hao, X. (1999). Ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation. *Waste Management*. **19**. 409-415.
- [28] Li, T., Li, X., Chen, J., Zhang, G., y Wang, H. (2007). Treatment of landfill leachate by electrochemical oxidation and anaerobic process. *Water Environment Research*. **79** (5). 514-520.
- [29] Gupta, S., y Singh, G. (2007). Assessment of the efficiency and economic viability of various methods of treatment of sanitary landfill leachate. *Environ Monit Assess*. **135**. 107-117.
- [30] Zhao, Y.C., Li, H., Wu, J., Gu, G.W. (2002). Treatment of leachate by aged-refuse-based biofilter. *Journal Environmental*. **128**, 662-668.
- [31] Lei, Y., Shen, Z., Huang, R., y Wang, W. (2007). Treatment of landfill leachate by combined aged-refuse bioreactor and electro-oxidation. *Water Research*. **41**. 2417-2426.
- [32] Méndez, N., Castillo, E., Sauri, M., Quintal, C., Giacoman, G., Jiménez, B. (2004). Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería* 8-2. Facultad de Ingeniería – UADY. p. 155.
- [33] Orta, de V., Rojas, V., Yañez, I., Monje, I., & Londoño, J. (2006). Alternativa de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en plantas de aguas residuales urbanas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Vol. I. Núm.1.

- [34] Instituto Nacional Estadística y Geografía (2008). Área Metropolitana del la Ciudad de México. Estadísticas ambientales. Tema: Medio Ambiente. Asentamientos y Actividades Humanas. Residuos.
- [35] Cisneros, P., Ventura, C., Meza, G., Chávez, M., Colado, A., y Castañón, G., (2007). Composición fisicoquímica de los lixiviados generados en el basurero municipal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Bol. Soc. Quím.* 1. 39-41.
- [36] Nájera, H.; Castañón, J.; Figueroa, J. y Rojas-Valencia, M. (2009). Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Barranquilla, Col. p. 1-9

VI. Sensores químicos y de parámetros físicos basados en fibra óptica

Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Introducción

En la actualidad se ha tenido una importante inclinación hacia la investigación de problemas que afectan al medio ambiente, así como también de las posibles soluciones. La calidad del aire, del suelo y del agua son áreas que tienen un importante interés debido a que forman parte del entorno en el cual la vida se desarrolla. Como es de nuestro conocimiento, un ambiente con aire o agua altamente contaminados es un lugar no apto para el desarrollo de la vida, de igual forma un suelo contaminado. Cuando se trata de medir uno o varios parámetros físicos ya sea del agua, aire o suelo o si se trata de detectar la presencia de alguna sustancia y cuantificarla, es necesario utilizar primeramente algún tipo de sensor que nos proporcione datos confiables para poder aplicar soluciones que mitiguen los riesgos que existan. Hasta ahora los tipos de sensores más utilizados para estos fines son mecánicos, electroquímicos, y en investigación y, para algunos parámetros ya en aplicación, se encuentran los sensores ópticos.

En este capítulo se hace una revisión a cerca de las aplicaciones de la fibra óptica en sensores, más específicamente, aquellos que pueden aplicarse en la detección y cuantificación de sustancias contaminantes en distintos ambientes, así como en la medición de parámetros físicos.

Antecedentes

El monitoreo del medio ambiente es necesario hoy en día para evitar desastres ecológicos. El dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles que proceden de las emisiones de los vehículos, de fábricas, refinerías, industrias en general, laboratorios, están presentes en concentraciones “normales” en el aire que respiramos. Pero ¿qué sucedería si repentinamente esas concentraciones aumentan sin darnos cuenta? La respuesta es: un desastre ecológico. De igual forma, sustancias tales como los pesticidas y herbicidas, partículas microbiológicas, compuestos volátiles orgánicos, se encuentran presentes en el agua de uso doméstico, en ríos, en mantos acuíferos subterráneos, en concentraciones “normales” a las que el ser humano se ha acostumbrado. Pero si esos niveles de concentraciones aumentan, la salud humana estaría en riesgo. Es por ello que es necesario contar con un sistema de monitoreo del medio ambiente a través de sensores para saber si nuestro río está vivo, si nuestro suelo no contiene sustancias tóxicas derramadas accidentalmente o si nuestro aire contiene sustancias que antes no presentaba.

Hoy en día están emergiendo nuevas investigaciones a cerca de las aplicaciones de la fibra óptica en biosensores, sensores bioquímicos y químicos, sensores medioambientales, sensores biomédicos, etcétera. Esto es debido a que los sensores de fibras ópticas tienen importantes ventajas sobre los sensores electrónicos y mecánicos: tienen inmunidad a interferencia electromagnética; estos sistemas explotan a la luz como la portadora de la información, son ligeros, son de tamaño pequeño; pueden tener acceso a lugares inaccesibles para los sistemas electrónicos y mecánicos, alta sensibilidad, gran ancho de banda; se puede transportar gran cantidad de información en una sola fibra, se pueden realizar sensores remotos y distribuidos, naturaleza pasiva; pueden aplicarse en lugares altamente inflamables en donde los sensores electrónicos estarían descartados, como la fibra es hecha de vidrio es inmune a ciertas sustancias químicas; esto es, puede utilizarse en ciertos tipos de suelos o en atmósferas corrosivas, etcétera, por mencionar algunas. Pero a pesar de estas ventajas, la tecnología de los sensores de

fibra óptica tiene una desventaja: su alto costo, aún así, esta tecnología sigue en aumento estimulado por los avances en la optoelectrónica especialmente para aplicaciones en telecomunicaciones: fuentes de luz, fotodetectores, conectores y fibras ópticas pueden fácilmente adaptarse para propósitos de sensores.

Sensores químicos

En los primeros años de la química, la mayor parte de los análisis se realizaban separando los componentes de interés de una muestra (llamados analitos) mediante procedimientos de precipitación, extracción o destilación. Cuando se trataba de un análisis cualitativo, los componentes separados se trataban seguidamente con reactivos originándose unos productos que se podían identificar por su color, su punto de ebullición o de fusión, su solubilidad en una serie de disolventes, su olor, su actividad óptica o su índice de refracción. Cuando se trataba de análisis cuantitativos, la cantidad del analito se determinaba mediante medidas gravimétricas o volumétricas. En las primeras se determinaba la masa del analito o la de algún compuesto generado a partir del mismo. En los procedimientos volumétricos se determinaba el volumen o el peso de algún reactivo patrón que reaccionase completamente con el analito^[1].

Estos métodos clásicos para la separación y determinación de los analitos se usan todavía en muchos laboratorios. Sin embargo su grado de aplicación general va disminuyendo a medida que los métodos instrumentales los van desplazando, esto debido a una remarcada diferencia en el tiempo de análisis. Mientras que un método clásico de análisis puede durar días, un método instrumental puede arrojar resultados en cuestión de minutos.

A principios del siglo XX, para resolver los problemas del análisis, los investigadores químicos empezaron a utilizar fenómenos distintos a los utilizados. Las medidas de sus propiedades físicas tales como la conductividad, el potencial de electrodo, la absorción o emisión de la luz, la fluorescencia; además, en la separación de mezclas complejas, técnicas como la cromatografía y técnicas electroforéticas muy efica-

ces empezaron a reemplazar a la destilación, extracción y precipitación como etapas previas a la determinación cualitativa o cuantitativa. Todos estos métodos modernos de separación y determinación de especies químicas se les conocen en conjunto como métodos instrumentales de análisis^[1].

El desarrollo de estos métodos instrumentales de análisis ha ido paralelo al desarrollo de la electrónica moderna (optoelectrónica) y al de sistemas computacionales.

En una lista de métodos instrumentales de análisis y la propiedad química o física que utilizan se puede mencionar por ejemplo: espectroscopia de emisión que está basada en el análisis de la radiación emitida por el analito, la espectrofotometría y fotometría que están basadas en el análisis de la radiación absorbida, la espectroscopia Raman que está basada en el análisis de la radiación dispersada, etcétera. Dentro de estos métodos instrumentales existen los instrumentos para el análisis, los cuales, por ejemplo en un análisis químico, transforman la información de las propiedades físicas o químicas del analito en información que puede ser interpretada por el ser humano. Esto significa que un instrumento para el análisis es un sistema de comunicación entre el objeto de estudio y el científico^[1]. Un ejemplo de un instrumento para el análisis es un espectrofotómetro, en el cual un haz de luz compuesto por una banda estrecha de longitudes de onda se pasa a través de una muestra de estudio y se determina la razón entre la luz incidente y la emitida lo cual es una medida de la concentración del analito. Otro de los instrumentos de análisis son los sensores químicos o bioquímicos los cuales son dispositivos que proporcionan información cualitativa y cuantitativa de analitos contenidos en una muestra química.

Aunque no se ha conseguido dar una definición de sensor que englobe a las diversas áreas en donde se utiliza, básicamente, se denomina sensor al dispositivo analítico capaz de responder en continuo, *in situ*, en tiempo real y de modo reversible a los cambios producidos en un parámetro físico o en la concentración de una especie química.

Definición

O. S. Wolfbeis *et al* ^[2] definen un sensor químico como un pequeño dispositivo analítico que puede proporcionar información en tiempo real e *in situ* sobre la presencia de compuestos específicos o iones en una muestra compleja. En una forma más fácil, un sensor químico es una sonda que se inserta dentro de la muestra de interés para obtener una señal analítica que puede ser convertida a unidades de concentración.

Valcárcel *et al* ^[3] proponen dos definiciones de sensor químico de acuerdo a su operación y a su composición (estructura). Así en una primera definición, un sensor es un dispositivo analítico (no un instrumento ni un aparato) que responde de forma directa, reversible, continua, rápida, exacta, en tiempo real, e *in situ* a los cambios en la concentración (actividad) de especies químicas (ver figura 1). Basándonos en la estructura, un sensor químico se puede definir como un dispositivo analítico que está formado de tres partes:

- a. Una fase o terminal sensible, que es un elemento de reconocimiento capaz de interactuar selectivamente con la especie de interés, con el resultado de un cambio físico o químico del sistema cuya intensidad estará relacionada con la concentración de la especie a analizar.
- b. Un transductor de tipo óptico, eléctrico, térmico, magnético, etcétera, encargado de transformar la interacción química en una señal física que pueda ser medida.
- c. Un sistema electrónico, que está encargado de amplificar y procesar las señales físicas de forma tal que puedan ser desplegadas en un display u ordenador.

De esta forma se puede tener lecturas confiables de pH, molaridad, cantidad de sustancia, presión, etcétera.

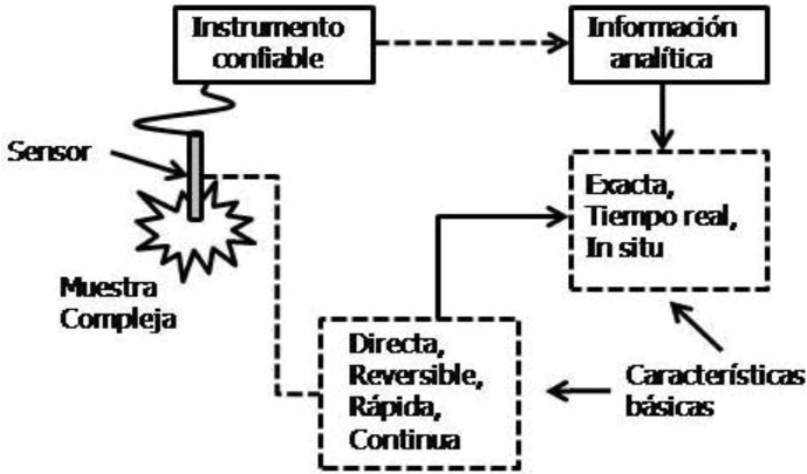


Figura 1. Características de un sensor químico ideal. Valcárcel *et al* ^[3]

En la figura 1 se muestra un sensor con todas las características deseables. Debido a que una gran variedad de sensores descritos en la literatura no cumplen con ciertas características como precisión, sensibilidad, selectividad requeridas para asegurar resultados confiables, el término tiempo real o *in situ* carece de significado por lo que las dos definiciones anteriores están consideradas en términos ideales.

Clasificación

Valcárcel *et al* ^[3] realizan una clasificación de los sensores químicos de acuerdo a varios criterios, se excluyen aquellos sensores que son diseñados para monitorear un parámetro físico tal como temperatura, presión o viscosidad, figura 2:

- Según el parámetro de medida el sensor puede ser químico o bioquímico: Una primera clasificación general de los sensores químicos puede hacerse atendiendo a la naturaleza química o bioquímica del analito (y ocasionalmente de la muestra). Esto estaría en aparente contradicción con otra clasificación basada en la naturaleza del elemento de reconocimiento. Así, un sensor

que emplea una enzima inmovilizada para determinar un analito de interés biológico (glucosa por ejemplo) puede ser considerado un biosensor. Por otra parte, si se utiliza un ligando cromogénico para determinar un ión metálico hablaríamos de sensor químico. Sin embargo, se puede utilizar el término sensor químico o biosensor indistintamente para referirnos a aquél dispositivo que incorpora materiales biológicos para analizar un sustrato químico (o un inhibidor en una muestra biológica).

- La existencia o no de un proceso químico: Los sensores químicos pueden ser activos o pasivos dependiendo de si incorporan o no una “fase sensible” donde tiene lugar la reacción química de reconocimiento. Hay que mencionar que los sensores pasivos no cumplen en principio los requisitos incluidos en la definición de sensor en cuanto a su estructura (existencia de una fase sensible) puesto que simplemente se trata de una medida directa de una propiedad físico-química del analito; sin embargo, son los más fáciles de realizar, operan de forma similar a los sensores activos y tienen la ventaja añadida de una completa reversibilidad, por lo que son los más utilizados en la mayoría de las aplicaciones industriales.
- La inclusión o no de un proceso de separación adicional: muchos sensores están basados en un proceso de separación que tiene lugar en la fase sensible. El proceso es usualmente el de absorción y secuencial o simultáneamente con la detección en presencia o ausencia de una reacción química.
- El tipo de transductor empleado: esta clasificación es sin duda la más intuitiva ya que está basada en el tipo de transductor empleado para revelar los cambios físico químicos que ocurren en la fase sensible en la presencia del analito. Estos transductores pueden ser ópticos, electroquímicos, mecánicos, acústicos, magnéticos, etcétera, históricamente, los transductores ópticos y mecánicos han ganado terreno debido a muchos factores entre ellos su uso en ambientes hostiles y peligrosos en donde un transductor eléctrico no se puede emplear.

- La relación entre la fase sensible y el transductor: otra clasificación de los sensores químicos establece dos categorías en función de la forma de acoplamiento del elemento de reconocimiento y el transductor. Estos dos elementos esenciales pueden estar conectados ópticamente, por ejemplo mediante el empleo de una fibra óptica, o eléctricamente; o bien el transductor y la fase sensible pueden estar integrados en un único elemento.
- El tipo de interacción con el analito: en función del tipo de interacción con el analito, los sensores se pueden clasificar en: reversibles, cuando la fase reactiva no se consume durante su interacción con el analito. Este tipo de sensores responden tanto a altas como a bajas concentraciones de analito y proporcionan una respuesta nula en ausencia del mismo. De esta forma un sensor químico reversible debe responder al igual que un sensor físico, por ejemplo un termómetro^[2]. Irreversibles: cuando existe consumo de la fase reactiva. A su vez, se pueden subdividir en regenerables y no regenerables. Los primeros son aquéllos que dan lugar a una respuesta similar a la de un sensor reversible, pero con la diferencia de que no operan de forma continua, ya que requieren una etapa de regeneración para poder ser utilizados de nuevo. En el caso de los sensores irreversibles no regenerables, también denominados “sondas” para diferenciarlos de los auténticos sensores, sólo responden a incrementos en la concentración del analito saturándose con facilidad, por lo que se suelen emplear para una única medida.
- Su forma externa o configuración: de acuerdo a la apariencia externa o configuración del sensor y a la forma como la fase sensible interacciona con la muestra podemos distinguir entre: sensores tipo sonda, sensores planos y sensores tipo célula de flujo. En el primer caso, la fase reactiva está localizada en el extremo del terminal sensible (electrodo o fibra óptica), que a su vez se encuentra en contacto directo con la muestra. En el caso de los sensores planos, el elemento sensor está localizado sobre una superficie plana sobre la que se depositan unas gotas de la muestra, un

ejemplo típico es el sensor comercial utilizado por pacientes diabéticos para el monitoreo del nivel de glucosa en sangre. Finalmente, en los sensores tipo célula de flujo, la muestra es aspirada (o inyectada) y transferida a una célula de flujo donde se sitúa la fase sensible. Su principal característica es que la fase sensible se dispone en el sistema de detección, es decir, los procesos de reacción y detección son simultáneos.

- El modo de operación: en cuanto al modo de operación, los sensores químicos pueden trabajar en modo discontinuo o discreto y en modo continuo. Mientras que los sensores tipo sonda pueden ser utilizados tanto en modo continuo como en modo discontinuo, los sensores tipo célula de flujo sólo pueden operar en régimen continuo.
- Finalmente, según el número de especies detectadas: los sensores químicos pueden clasificarse de acuerdo al número de analitos que son capaces de monitorear en una misma muestra. Así, la mayoría de los sensores responden a la concentración de una única especie (uniparamétricos), mientras que existen algunos capaces de determinar simultáneamente varios analitos (multiparamétricos). Entre éstos últimos podemos distinguir dos tipos: (1) aquéllos que incorporan un elemento de reconocimiento por cada analito en la misma fase sensible; (2) aquéllos que hacen uso de un único elemento de reconocimiento conectado o integrado a un transductor capaz de realizar un análisis de señales diferentes generadas por cada analito.

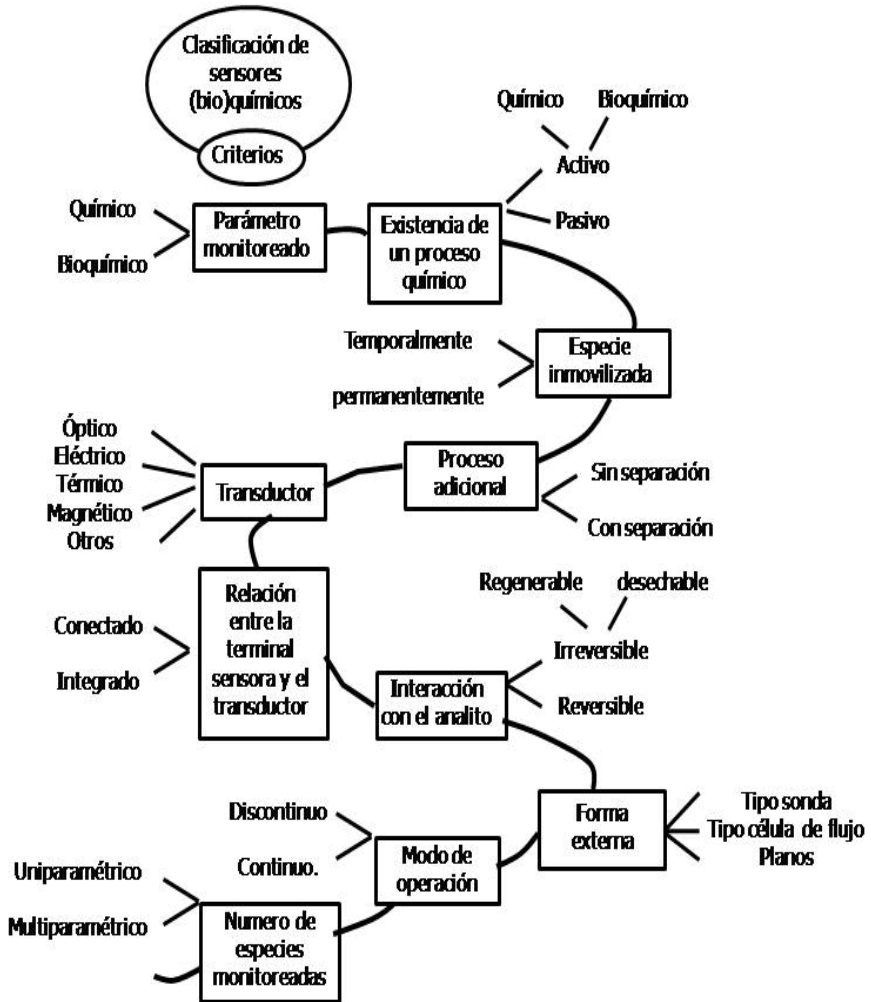


Figura 2. Clasificación de un sensor químico basada en varios criterios. Valcárcel *et al* [3].

Propiedades

La gran diversidad de sensores químicos que existen es fácilmente atribuible al conjunto de propiedades que poseen todos ellos, estas propiedades están basadas en características analíticas, características de operación y características temporales^[4,5].

- Selectividad, sensibilidad y resolución en las medidas: la selectividad describe el grado al cual el sensor responde a solamente una especie deseada en una muestra con poca o nula interferencia de especies no importantes. La sensibilidad describe la mínima concentración y cambios en la concentración que pueden ser detectadas por el dispositivo en forma exitosa y repetida. Se puede decir que para sensores químicos la sensibilidad es un sinónimo de resolución.
- Pequeño tamaño: requisito imprescindible para la fabricación de sistemas de medida portátiles, necesarios en medidas de campo en donde se puede utilizar una simple batería como fuente de alimentación, facilitando al mismo tiempo el contacto entre el terminal sensible y la muestra en lugares de difícil acceso.
- Durabilidad: esta propiedad se refiere al tiempo de vida del sensor, es decir, el sensor debe mantenerse activo sin perder ninguna de sus propiedades, el mayor tiempo posible. No obstante, una menor durabilidad del sensor puede verse compensada, en ocasiones, con la fabricación de terminales de corto tiempo operacional pero económicamente rentables. Además, esta propiedad incluye el intervalo de tiempo que existe entre el momento de fabricación del sensor y su utilización.
- Bajo costo: depende fundamentalmente de la electrónica de los equipos de medida y, generalmente, constituye un obstáculo insalvable para la comercialización de sensores ya optimizados a nivel de laboratorio. Esta propiedad es una desventaja de los sensores de fibra óptica ya que los componentes, por ejemplo, diodos láser, acopladores, WDM's, rejillas de Bragg, etcétera, son aún de alto costo.
- Reversibilidad: idealmente un sensor debe ser completamente reversible, es decir, tras la interacción con el analito o especie de interés debe ser capaz de recuperar las condiciones iniciales. Este requisito no constituye, sin embargo, una limitación para sistemas fácilmente regenerables e incluso en aquellos completamente irreversibles cuyo bajo costo permita la fabricación de sensores desechables.

- Respuesta rápida: al contrario que otras técnicas analíticas clásicas que requieren una toma de muestra previa al análisis en el laboratorio, los sensores permiten detectar situaciones de alarma en tiempo real respondiendo en cuestiones de minutos a segundos.
- Sencillez: el sistema de medida y la fabricación del sensor deben facilitar un correcto manejo del mismo por personal no especializado, permitiendo al mismo tiempo la construcción de terminales sensibles reproducibles.
- Robustez: tanto del principio de medida, que debe permanecer inalterable, como de la fase sensible, imprescindible en medidas de campo donde el sensor se enfrenta en numerosas ocasiones a medios hostiles o peligrosos. Esta propiedad es característica de los sensores de fibra óptica, especialmente los pasivos o directos, ya que al no incluir una fase sensible son capaces de trabajar en tales ambientes, por ejemplo en centrales nucleares.

Aplicaciones

La aplicación de los sensores químicos es muy amplia y va desde el monitoreo de contaminantes en el medio ambiente hasta la detección de explosivos en aplicaciones militares^[67]. En ciencia e investigación, estos sensores son utilizados para caracterizar muestras de gas en experimentos de laboratorio y para el seguimiento de derrames químicos peligrosos en el suelo y el agua. Nuevas aplicaciones incluyen la localización y seguimiento de infestaciones de insectos, tales como las termitas, las cuales dejan un olor característico debido a la digestión de la celulosa y para el monitoreo de los ciclos menstruales del ganado, esto último para mejorar la efectividad de la inseminación artificial. En la industria, los sensores químicos son utilizados para el proceso y control de calidad en la fabricación de plásticos y en la producción de metales en donde los gases que se liberan en la fundición pueden afectar las características del metal, tales como el carácter quebradizo. Los sensores químicos encuentran nuevas aplicaciones como narices electrónicas y son empleados para la prueba y control en la industria

alimenticia, para monitorear la distribución de pesticidas en la agricultura y para graduar bebidas. En la medicina, los sensores son utilizados para determinar la salud del paciente monitoreando el oxígeno y ras-tros de gas contenidos en los pulmones y en las muestras de sangre, así mismo, son empleados como indicadores en los problemas de digestión en pacientes. Estas son algunas aplicaciones de los sensores químicos, se puede seguir nombrando más áreas de aplicación, pero se cubriría todo un capítulo.

Sensores químicos de fibra óptica

Los primeros desarrollos de la fibra óptica fueron los pasos iniciales para el desarrollo de los sensores de fibra óptica. Desde el momento en que se comprobó que se podía guiar radiación luminosa a través de la fibra óptica con pérdidas mínimas, se pensó que era posible que una o varias de las propiedades de la radiación fueran modificadas en forma predecible y controlada ante los cambios en las condiciones físicas del medio. Así surgieron los sensores de fibra óptica, los cuales ya se comercializan para medir ciertos parámetros. Con la utilidad de la fibra óptica en sensores físicos, la aplicación en sensores químico no se hizo esperar y es que debido a la atractiva posibilidad de realizar los análisis *in situ* en lugar de recoger y, posteriormente, analizar las muestras en el laboratorio, además de combinar las ventajas de las fibras ópticas con la selectividad y especificidad de los sistemas químicos, impulsó el nacimiento de los sensores químicos de fibra óptica. Desde aquel momento el científico dispone de la opción de permanecer en el laboratorio mientras se reciben, a gran velocidad y de manera continua, todos los datos del análisis químico del medio a controlar.

En forma general, esta subclase de sensores químicos consta de una estructura que se caracteriza por tener una fase sensible situada en la terminal sensible que en algunas ocasiones puede ser la misma fibra óptica en donde puede o no encontrarse inmovilizado un indicador, cuyas propiedades ópticas (absorbancia, luminiscencia, reflectancia) se modifican en función de la concentración de analito presente en la muestra. La señal óptica así generada es transmitida por la misma fibra

óptica hasta un detector, para luego ser amplificada y procesada convenientemente.

Los sensores de fibra óptica y en especial los sensores químicos son más conocidos dentro de la comunidad científica como optodos u optrodos. El primer término fue utilizado originalmente en 1975 por los investigadores alemanes Optiz y Lübbers haciendo referencia a un sistema óptico de medida de CO_2 [2-4]. El segundo término se refiere más bien a un electrodo óptico, pero nombrado incorrectamente debido a que estos sensores analizan una señal óptica y no eléctrica.

Ventajas y limitaciones de los sensores químicos de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica presentan las mismas ventajas atribuibles al resto de los sensores, a las que se unen adicionalmente algunas propiedades características de los optodos que los hace particularmente atractivos en áreas tan dispares como la biotecnología, el medio ambiente, la química clínica o el control de procesos industriales^[5]:

- No requieren señal de referencia. A diferencia de, por ejemplo, los electrodos potenciométricos y amperométricos que miden diferencias absolutas de potencial, los optodos no necesitan una señal de referencia.
- Posibilidad de construir sensores remotos. La utilización de fibras ópticas de baja pérdida como guías de luz posibilita la medida a grandes distancias, facilitando el acceso del sensor a los lugares de medida. Las grandes profundidades en lagos o medios expuestos a interferencias electromagnéticas o radiación ionizante, al contrario que en sensores eléctricos convencionales, no constituyen un problema para estos sistemas, ya que la distancia entre el terminal sensible y el transductor puede adaptarse a las condiciones de medida sin que ello suponga pérdida de información. En Química Clínica, la utilización de este tipo de sensores evita la conexión directa del paciente al equipo eléctrico y, al no interferir sobre las fibras la radiación externa, son especialmente útiles en radioterapia^[4-8].

- Medición multiparamétrica. Debido al gran ancho de banda de las fibras ópticas, es posible transmitir mucha más información que los cables eléctricos. Esto es, las señales ópticas que se originan por la presencia de diferentes analitos en la muestra pueden diferir unas de otras en longitud de onda, fase, modulación de intensidad o polarización, por lo tanto se puede hacer un multiplexado de estas señales para que se pueda tener un sensor multiparamétrico.
- Terminales sensibles fácilmente intercambiables. El análisis multiparamétrico puede llevarse a cabo también por intercambio de terminales sensibles específicos, cuyos indicadores basados en el mismo principio de medida permitan la utilización de un solo dispositivo instrumental. Esta ventaja de los sensores químicos de fibra óptica es particularmente útil en Química Clínica, ya que facilita la esterilización de los terminales y posibilita la utilización de sensores desechables^[4 5].

Estas y otras ventajas mas existen para este tipo de sensores como son la flexibilidad de la fibra, la no dependencia de la fibra con la temperatura, las dimensiones pequeñas de la fibra, etcétera. Pero a pesar de las enormes ventajas que poseen los sensores ópticos, para poder optimizar un método basado en los diferentes tipos de medidas es necesario tener en cuenta una serie de factores limitantes, de difícil solución en algunos casos pero no insalvables, gracias a los continuos avances de la técnica y la química, estos son:

- Se deben proteger de la luz del ambiente. La señal óptica detectada por el equipo de medida debe proceder única y exclusivamente del indicador, ya que es esta señal la que se encuentra en relación directa con la concentración de la sustancia determinante. Por este motivo, debe evitarse la exposición de la terminal sensible a la luz ambiente, o bien modular la señal procedente del indicador con objeto de poder diferenciarla de la luz externa^[4 5 9].
- Lavado o fotodegradación de los indicadores. La exposición durante horas del sensor a fuentes de luz puede provocar la fotodegradación de los indicadores. Por otro lado, éstos se encuentran

generalmente inmovilizados en membranas o soportes poliméricos en los que, en algunas ocasiones, puede producirse lavado. Los avances introducidos en el campo de los sensores ópticos han subsanado estos dos inconvenientes introduciendo nuevos métodos de medida en los que la cantidad de analito presente en la muestra no depende de la cantidad de indicador inmovilizado en el terminal sensible (sensores basados en medidas de la cinética de luminiscencia del indicador). En el resto de métodos ópticos se evita, en la medida de lo posible, la influencia de estos factores mejorando los procedimientos de inmovilización, utilizando indicadores fotoestables o bien con la oportuna calibración del sensor^[4].

- Tiempos de respuesta, en ocasiones, elevados. Esto es porque la transferencia de masa del analito al indicador es lenta, además de la cinética de interacción entre ambos^[9].
- Irreversibilidad. La existencia de pocos procesos en los que la interacción analito-indicador sea completamente reversible condiciona el carácter desechable o de obligada regeneración del sensor^[4].
- Además de estas limitaciones existen otras como son: dependencia de la concentración de analito, interferencias o limitaciones introducidas por la fibra óptica, dependencia del método de la optoelectrónica del equipo; en esto último el alto costo de la instrumentación empleada como son fuentes luminosas estables y de larga duración, láseres de semiconductor, fibras ópticas especiales, etcétera, incrementa el costo total de los sensores. Pero comparado a las ventajas que poseen, se espera un incremento en la aplicación de estos sistemas.

Clasificación de los sensores químicos de fibra óptica

Para clasificar a estos sensores se debe tomar en cuenta diferentes criterios al igual que los basados en otras tecnologías, pero una clasificación general que se presenta es la siguiente^[4 5 8]:

a) Dependiendo del tipo o naturaleza del analito o parámetro objetivo:

- Sensores químicos: son sensores que detectan especies químicas o bioquímicas (pH, O₂, CO₂...). Dentro de estos se encuentran los biosensores los cuales son empleados para detectar ciertos tipos de bacterias.
- Sensores físicos: son sensores que responden a parámetros físicos, tales como la temperatura, presión, tensión, movimiento (vibración), espesor, tamaño de la partícula...etcétera.

b) Dependiendo de la propiedad óptica medida los sensores pueden dividirse en:

- Sensores de absorbancia.
- Sensores de reflectancia.
- Sensores de luminiscencia.

1) Fluorescencia.

2) Fosforescencia.

3) Quimioluminiscencia.

c) Dependiendo de la función de la fibra óptica en el sensor y la configuración de la terminal sensible:

- Sensores extrínsecos: sensores en los que la fibra óptica actúa únicamente como guía de luz. Esto es, la fibra óptica es utilizada solamente para transportar radiación luminosa hacia y desde la región en donde la radiación es influenciada por la medición. Dentro de los sensores extrínsecos se puede dar la siguiente clasificación:
 1. Sensores extrínsecos directos (de 1ª generación): sensores que detectan una propiedad óptica del analito mismo, proporcional a su concentración y directamente medible. Se han utilizado para realizar análisis espectrofotométricos a grandes distancias como por ejemplo, para aquellas aplicaciones en las que no es posible el contacto físico con la muestra. Entre las ventajas de su empleo se puede destacar su resistencia, simplicidad, estabilidad, durabilidad y que no necesitan ser calibrados. Sin embar-

go, pueden ser poco selectivos y el número de analitos para los que pueden utilizarse es limitado. Para su aplicación es necesario considerar parámetros tales como el índice de refracción del medio o la apertura numérica de la fibra que determina su cono de luz. También se denominan sensores pasivos remotos^[2,4,5,10].

2. Sensores extrínsecos indirectos: la sustancia objeto de la determinación (el analito) no posee ninguna propiedad óptica intrínseca que pueda ser medida directamente. Esto es, se necesita de una fase sensible en un extremo de la fibra óptica en donde se aloja un indicador (transductor) cuyas propiedades ópticas se modifican en función de la concentración del analito presente en la muestra (sensores de 2ª generación) o el sensor requiere la presencia de una biomolécula que, o bien es generada por el analito y es detectada por el indicador, o de lo contrario interacciona con la sustancia a determinar para que ésta pueda detectarse (sensores de 3ª generación)^[4,8].

Los sensores de 2ª y 3ª generación también se denominan sensores activos. Podemos destacar de ellos que son más selectivos que los pasivos y no se van a ver afectados por el índice de refracción del medio. Las desventajas incluyen el posible lavado o fotodescomposición del indicador en contacto con la muestra, mayores tiempos de respuesta, la mayor complejidad de construcción y en algunos casos la presencia de artefactos originados por el hinchamiento de la membrana o resinas utilizadas en su construcción^[5]. En la figura 3 se puede ver un esquema típico de un sensor químico de fibra óptica. La fuente de luz provee el medio en donde se va a imprimir la información. La salida del acoplador divisor se envía hacia un fotodetector y luego hacia un sistema de adquisición de datos en donde se procesan adecuadamente. También, se puede utilizar un espectrómetro conectado directamente en la salida del acoplador. La terminal sensible puede ser de tres tipos si se trata de un sensor extrínseco.

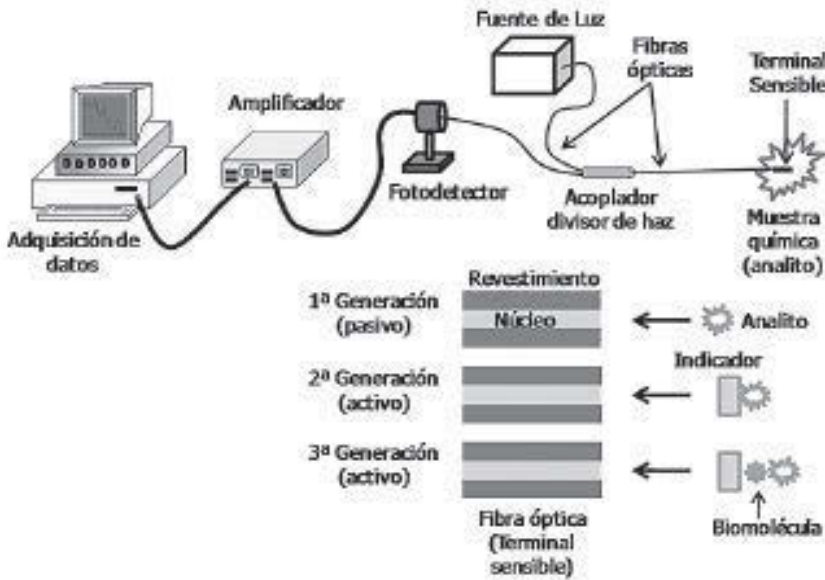


Figura 3. Esquema típico de un sensor químico de fibra óptica. La terminal sensible pertenece a un sensor extrínseco y se muestran las tres formas en que se puede estructurar dependiendo de la aplicación.

Sensores intrínsecos (activos o de onda evanescente): Muchos de los sensores de fibra para la detección de vapores orgánicos son intrínsecos. Dentro de esta categoría se pueden distinguir diferentes tipos de sensores dependiendo de la modulación de la señal óptica guiada a través de la fibra. En estos sensores el parámetro objetivo interactúa con el núcleo o la superficie de la fibra, modificando alguna de las propiedades de ésta. En este caso el dispositivo que actúa como guía de luz es, al mismo tiempo, el propio sensor. Una característica muy importante de estos sensores es que se pueden utilizar como sensores distribuidos, es decir, la medida puede realizarse en cualquier punto de la fibra óptica determinándose tanto su magnitud como su posición en la misma^[4-5]. Dentro de este grupo de sensores se puede hacer la siguiente clasificación.

1. Sensores refractométricos: la onda evanescente, transmitida desde el núcleo hacia el exterior de la fibra, interactúa con el analito (generalmente un líquido) cuyo índice de refracción modifica las constantes de propagación de la fibra.
2. Sensores de campo evanescente: las características espectrales del campo evanescente, interfaz situada entre el núcleo y el revestimiento externo de la fibra, se ven modificadas debido a la absorción de luz por parte de moléculas situadas en él.
3. Sensores basados en la modificación del núcleo de la fibra: en este caso el analito modifica directamente las propiedades del núcleo, zona de mayor densidad de luz. La respuesta del sensor depende directamente de la accesibilidad del analito al núcleo^[3-5].

d) Otro tipo de clasificación de los sensores químicos de fibra óptica es la que considera la forma, según la cual el sistema transductor modula la señal^[5].

- Sensores de amplitud (o modulados en intensidad): la sustancia objeto de análisis modifica la intensidad de la señal óptica observada (absorción, reflexión, luminiscencia...).
- Sensores interferométricos: en este tipo de sensores se produce un cambio en el patrón de interferencia de la radiación electromagnética conducida a través de la fibra óptica.
- Sensores de tiempo de vida: la cinética de desactivación del estado excitado, emisor del indicador situado en el terminal sensible, varía en función de la concentración de analito presente en la muestra.
- Sensores de modulación modal: el transductor modula en estos sensores los rayos que viajan a distintos ángulos en la fibra.
- Sensores polarimétricos: el cambio se produce en el ángulo de polarización de la luz.

Aplicaciones de los sensores químicos de fibra óptica

Dentro de las aplicaciones de estos sensores puede mencionarse las siguientes: la monitorización ambiental, el control de procesos industriales, la biomedicina y la defensa. Se han desarrollado ya con éxito

sensores ópticos para la monitorización de oxígeno molecular, dióxido de carbono, pH, hierro, sulfuro, alcoholes, humedad, temperatura, detergentes, aceites, pesticidas, glucosa, acetil colina y colesterol, etcétera, además, de la unión de los sensores ópticos con moléculas biológicas (enzimas, anticuerpos, ADN...) se construyen los biosensores los cuales son empleados en diferentes áreas como diagnósticos médicos, aplicaciones biológicas (detección de bacterias)^{[10][11]}, monitoreo del agua y aire, etcétera.

Sensores físicos de fibra óptica

Existe una amplia variedad de sensores físicos hoy en día y son llamados así porque miden parámetros como la velocidad, presión, tensión, campo magnético, temperatura, campo eléctrico, niveles de ruido, resistencia, vibraciones (movimiento), nivel de líquidos, etcétera, por nombrar sólo algunos, ya que existe una inmensa cantidad de parámetros. Asimismo, se utilizan diversas formas de transductores para llevar a cabo la medición. Estos pueden ser: mecánicos, eléctricos, ópticos, químicos, magnéticos, etcétera, así como optoelectrónicos, electroquímicos, optomecánicos. Dentro de los sensores del tipo óptico se encuentran los de fibra óptica, los cuales utilizan la radiación luminosa como el medio en donde se imprime la información codificada del parámetro medido. Estos sensores son robustos y estables a diferencia de los sensores químicos^[9]. Al igual que los sensores químicos, estos sensores los podemos clasificar en sensores extrínsecos en donde la fibra óptica solamente transmite y colecta la información codificada, esto es, la fibra óptica no interacciona con el medio y sensores intrínsecos en donde la fibra, además de ser el medio transmisor de luz, es el sensor. Dentro de los sensores intrínsecos están los de onda evanescente, los sensores de microcurvaturas y los basados en rejillas de Bragg. En esta sección sólo hablaremos de los basados en rejillas de Bragg, los cuales han tenido éxito debido a la flexibilidad de ser aplicados en diversas áreas.

Sensores físicos basados en rejillas de Bragg de fibra óptica

Las rejillas de Bragg de fibra óptica son dispositivos en los cuales el índice de refracción del núcleo de una fibra monomodo ha sido modulado debido a la radiación intensa de luz ultravioleta cuando la fibra es expuesta en forma transversal. En la figura 4 se observa el esquema de una rejilla de Bragg. De la radiación incidente sólo se refleja la parte que corresponde a la longitud de onda de Bragg, la otra parte es transmitida.

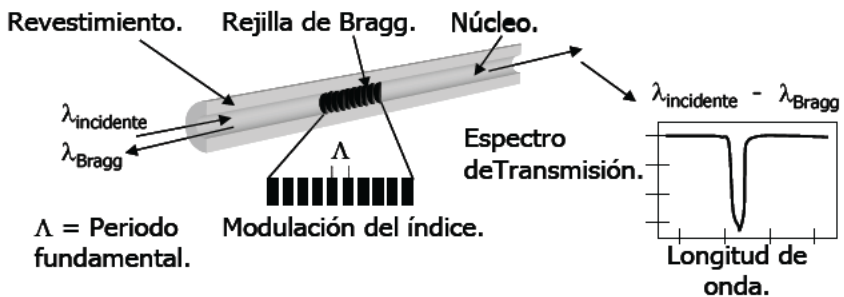


Figura 4. Estructura de una rejilla de Bragg de fibra óptica. Se muestra el espectro de transmisión y la modulación del índice de refracción^[12].

La ecuación que relaciona los parámetros de la rejilla con la longitud de onda de Bragg reflejada es la siguiente.

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

En donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo de la rejilla, Λ es el periodo de la modulación y λ_B es la longitud de onda de Bragg de la radiación incidente que la rejilla reflejará.

Si analizamos la ecuación (1), podemos ver que la longitud de Bragg puede manipularse si cambiamos ciertos parámetros de la rejilla. Si incrementamos o disminuimos la temperatura o si aplicamos presión o tensión a la rejilla, cambiamos tanto el periodo Λ como el índice de refracción efectivo n_{eff} cambiando con ello la longitud de Bragg λ_B . De esta forma podemos hacer lo siguiente.

$$\Delta\lambda = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (2)$$

Esto es, si modificamos la longitud o la temperatura tenemos un cambio en ambos índices de refracción efectivo y en el periodo de modulación. El primer término corresponde al efecto de tensión en la fibra. Esto corresponde a un cambio en el espaciamiento de la rejilla. Se puede expresar como:

$$\Delta\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma}(1 - p_{\epsilon})\mathcal{E}_z \quad (3)$$

Donde p_{ϵ} es una constante de la tensión óptica efectiva definida como:

$$P_{\epsilon} = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (4)$$

P_{11} y P_{12} son componentes del tensor de tensión óptica, y ν es la razón de Poisson. De esta forma, una fibra óptica de germanio-silicio con $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$ y $n_{\text{eff}} = 1.482$, experimenta un cambio en la longitud de onda central λ_B de 1.2 pm como resultado de aplicar $1 \mu\epsilon$ a la rejilla de Bragg. Se debe aclarar que $1 \mu\epsilon$ es igual a modificar la longitud de la rejilla en una millonésima parte de su tamaño total.

El segundo término de la ecuación 2 representa el efecto de la temperatura en la rejilla de Bragg. Debido a la expansión térmica la rejilla experimenta un cambio en el periodo de modulación o espaciamiento de la rejilla y del índice de refracción efectivo. Esto provoca un cambio en la longitud de onda de Bragg. Así, el cambio fraccional de la longitud de onda para un cambio ΔT puede escribirse como:

$$\Delta\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma}(\alpha_{\Lambda} + \alpha_n)\Delta T \quad (5)$$

Donde α_{Λ} es el coeficiente de expansión térmica de la fibra y para el silicio es de aproximadamente 0.55×10^{-6} . El otro término α_n es el coeficiente termo-óptico, el cual es aproximadamente 8.6×10^{-6} para la fibra de germanio con núcleo de silicio. De esta forma, para una rejilla centrada a $\lambda_B = 1550$ nm se espera un cambio de 13.7 pm por cada $^{\circ}\text{C}$ de

aumento en temperatura^[13]. En la siguiente figura se presentan los espectros de reflexión de tres rejillas centradas en una longitud de onda λ_B de 1535.04, 1535.4 y 1536.4 nm. La rejilla de 1535.4 nm es sometida a cambios de temperatura observándose un desplazamiento hacia la derecha de su espectro hasta que alcanza a la rejilla de 1536.4 nm.

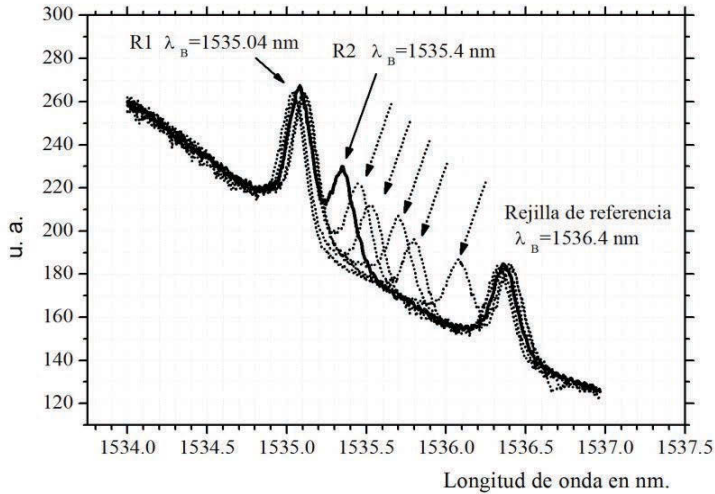


Figura 5. Espectros de reflexión de tres rejillas de Bragg monitoreadas con un monocromador. La rejilla R2 es sometida a cambios de temperatura.

La aplicación de las rejillas de Bragg en sensores radica en lo anterior, esto es, la rejilla puede colocarse en ambientes donde se desea medir temperatura o en estructuras donde se desea medir tensión o presión y codificar la medida en términos de longitudes de onda. En la figura 6 se muestra el esquema típico de un sensor puntual con una rejilla de Bragg. La rejilla es expuesta a cambios de temperatura o tensión y se puede monitorear tanto el espectro reflejado como el transmitido. La rejilla debe ser iluminada con una fuente de banda ancha y se utiliza un acoplador en el caso de que se quiera monitorear la señal reflejada.

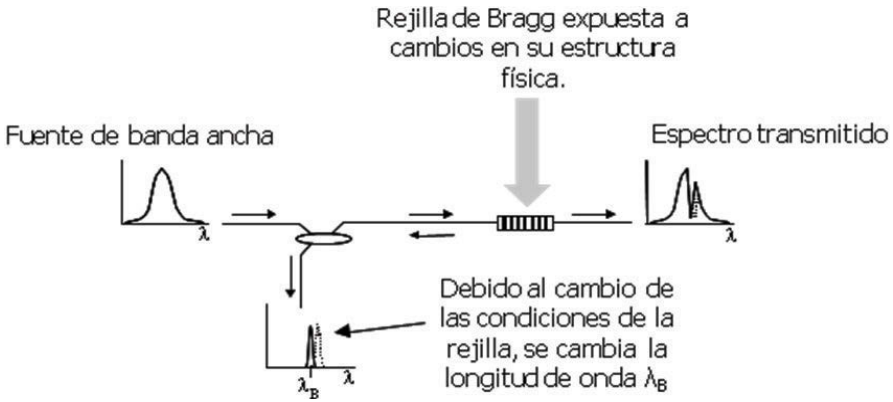


Figura 6. Esquema típico de un sensor de fibra óptica puntual con una sola rejilla.

Si se desea medir en varios puntos, se construye un sensor multipunto con varias rejillas con diferente longitud de onda central, como se muestra en la figura 7. Para seguir la longitud de onda central, es necesario un arreglo o sistema de escaneo^[14], como el de la figura 7, o en su caso, disponer de un analizador de espectros ópticos (OSA).

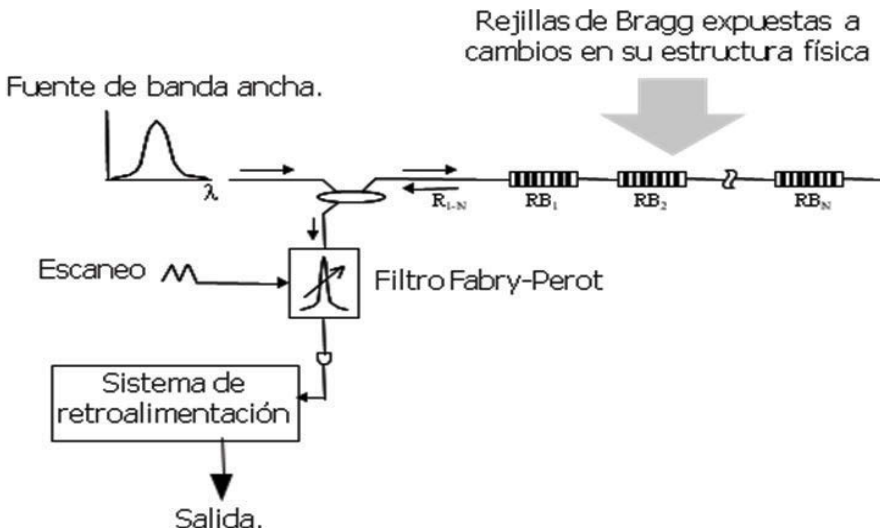


Figura 7. Esquema típico de un sensor de fibra óptica multipunto con varias rejillas.

Aplicaciones de los sensores físicos de fibra óptica

Como se menciono anteriormente, estos sensores pueden utilizarse en diversas áreas, tales como control de procesos industriales, aplicaciones en Ingeniería civil para el monitoreo de la tensión dinámica en estructuras tales como puentes o edificios, para aplicaciones médicas como sensores de temperatura en el tratamiento del cáncer (hipertermia) en donde los sensores de tipo eléctrico se ven afectados por la radiación electromagnética, como sensores de fuga de corriente en transformadores de alta potencia, en centrales nucleares donde se necesita el monitoreo de forma remota, aplicaciones en acelerómetros, como sensores de campo magnético, incluso como sensores químicos en donde la rejilla es fijada a un material polímero que al contacto con la sustancia a detectar induzca una tensión o presión a la rejilla, etcétera.

Conclusiones

Se presentaron las diversas características, de forma general, que poseen los sensores de fibra óptica, en especial los utilizados para monitorear sustancias químicas y parámetros físicos. Se expusieron las diversas aplicaciones que pueden tener en el área de Ingeniería ambiental para el monitoreo del medio ambiente, en lo que respecta a estudios de la calidad del agua, suelo y aire. Asimismo, se presentó la habilidad que tienen estos sensores para trabajar en ambientes hostiles en donde los sensores de tipo eléctrico simplemente no funcionarían.

Bibliografía

- [1] Skoog D. A., Holler F. J. and Nieman T. A., 2001, “Principios de análisis instrumental”, Ed. Mc Graw Hill, 5ª Ed. . pág. 1-2.
- [2] Otto S. Wolfbeis and Bernhard M. Weidgans, 2006, “Fiber optic chemical sensors and biosensors. A view back”, en *Optical chemical sensors*, springer, Chap. 2.
- [3] Valcárcel M., and Luque de Castro M. D., 1994, “Flow-through (bio) chemical sensors”, en *Elsevier Science B. V.* Capítulo I.
- [4] Bustamante Álvarez Nelía, 2001, *Sensores de temperatura, PH y detergentes para control medioambiental con un prototipo que utiliza fibra óptica y luminiscencia con resolución de fase.* tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid.
- [5] Marazuela Lamata María Dolores, 1997, *Diseño, caracterización y aplicación analítica de (bio)sensores de fibra óptica para la determinación de co2, O2 y metabolitos de interés clínico,* tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid.
- [6] Handbook of Modern Sensors : Physics, designs, and applications / Jacob Fraden.–3rd ed. Cap. 17
- [7] Alois Tipek, Modern sensors handbook, s.f., edited by Pavel Ripka.

- [8] Lobnik Aleksandra, Turel Matejka, Mojca Korent Spela, 2006, "Optical chemical sensors and personal protection" en *Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program*, pág. 299 - 303.
- [9] Rudolf Seitz W., 1999, "Chemical sensors based on fiber optics". *Sensors*.
- [10] Arnold M. A., "Fiber-optical chemical sensors". *Analytical Chemistry*, vol. 64, No. 21, Nov. 1, 1992, Pp. 1015-1025.
- [11] M. Espinosa Bosch, A. J. Ruiz Sánchez, F. Sánchez Rojas and C. Bosch Ojeda. 2007. "Recent Development in Optical Fiber Biosensors", *Sensors*, 7, 797 – 859.
- [12] Hayman R. B., "Fiber optic biosensors for bacterial detection". Editado por M. Zourob. *Springer Science*, Cap. 7, 2008.
- [13] Libro del Cuerpo Académico: *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales. "Aportaciones al sureste de México"*, Editorial UNICACH, Cap. 6, pp. 188.
- [14] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. 1999. *Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House Boston – London.
- [15] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey. "Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-Sensor System with a Fiber Fabry-Perot Wavelength Filter", *Optics Letters*, Vol. 18, No. 16, Pp. 1370-1372, August 1993.

VII. Sistemas interferométricos para la detección de variables físicas

Carlos Manuel García Lara

Introducción

Las formas de colores que se pueden observar sobre las burbujas de jabón son el resultado del fenómeno conocido como interferencia. En 1801 el inglés Thomas Young dio un gran impulso a la teoría ondulatoria explicando el fenómeno y midiendo las longitudes de onda correspondientes a los distintos colores del espectro. Para ese entonces la teoría corpuscular era inadecuada para explicar el hecho de que dos rayos luminosos, al incidir en un punto, pudieran originar oscuridad. La interferencia de la luz ocurre cuando dos ondas mutuamente coherentes se superponen en algún lugar del espacio. Se considera que las ondas son mutuamente coherentes cuando el origen de estas es la misma fuente, son monocromáticas y tienen exactamente la misma frecuencia^[1].

Cuando dos o más ondas ópticas están presentes, simultáneamente en un mismo punto, la función de onda total es la suma de las funciones de onda individuales. Este principio básico de superposición está acorde con la linealidad de la ecuación de onda. Para ondas monocromáticas de igual frecuencia, el principio de superposición es también aplicable para amplitudes complejas. Esta es consistente con la linealidad de la ecuación de Helmholtz.

El principio de superposición no aplica para la intensidad óptica. La intensidad de la superposición de dos o más ondas no es necesari-

riamente la suma de sus intensidades. La diferencia es atribuida a la interferencia entre estas ondas. La interferencia no puede ser explicada con los fundamentos de óptica de rayos, toda vez que es independiente de la relación de fase entre las ondas superpuestas.

En general, las ondas que provienen de fuentes distintas son incoherentes entre sí, de hecho, la luz emitida por cada punto de una misma fuente es incoherente con la emitida por los otros puntos de la misma fuente. La luz es emitida por átomos y sus características dependen críticamente del estado dinámico del átomo, y cada átomo experimenta en general una dinámica completamente independiente de la de los átomos vecinos (colisiones, vibraciones, agitación térmica). La independencia estadística entre átomos resulta en incoherencia de la luz emitida. De lo anterior se debe inferir que coherencia está relacionada directamente con el ancho de banda finito de la fuente y con su extensión finita en el espacio^[1].

Para obtener ondas coherentes que puedan interferir se recurre a hacer interferir una onda consigo misma. Teniendo en cuenta que para las fuentes de luz comunes el tiempo de coherencia es muy corto, es decir, el intervalo temporal en el que podemos predecir razonablemente la fase de la onda luminosa en un punto dado del espacio. Para que exista interferencia la diferencia de tiempos $\Delta\tau$, entre el camino directo y el indirecto debe ser menor que el tiempo de coherencia $\Delta\tau < \tau_c$.

Descripción general

A partir de la definición de interferencia, se tienen dos ondas descritas por

$$u_1 = U_1 e^{i\phi_1} \quad (1)$$

$$u_2 = U_2 e^{i\phi_2} \quad (2)$$

las cuales se traslapan. La teoría de ondas electromagnéticas predice que la simplificación del campo resultante es la suma de las ondas

$$u = u_1 + u_2 \quad (3)$$

Donde la cantidad observable es la intensidad, la cual está dada por

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (4)$$

Donde

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (5)$$

Como se observa la intensidad resultante no es únicamente la suma de las intensidades de las ondas incidentes, sino que las ondas interfieren y $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi$ es conocido como el término de interferencia. Se observa además que cuando

$$\Delta\phi = (2n + 1)\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots$$

Se tiene que $\cos \Delta\phi = -1$, por lo que la intensidad alcanza su mínimo. Las dos ondas están en antifase lo que indica que interfieren destructivamente. Sin embargo, cuando

$$\Delta\phi = 2n\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots$$

Se tiene que $\cos \Delta\phi = 1$, por lo que la intensidad alcanza su máximo. Por lo que ahora las dos ondas están en fase, lo que indica que interfieren constructivamente. Para el caso de dos ondas de igual intensidad, siendo $I_1 = I_2 = I_0$, la ecuación 4 se simplifica en

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (6)$$

donde la intensidad varía entre 0 y $4I_0$.

Interferencia entre dos ondas planas

En la figura 1, se muestran dos ondas planas u_1 y u_2 con direcciones de propagación n_1 y n_2 que viajan en el plano xz a un ángulo θ_1 y θ_2 respecto del eje z .

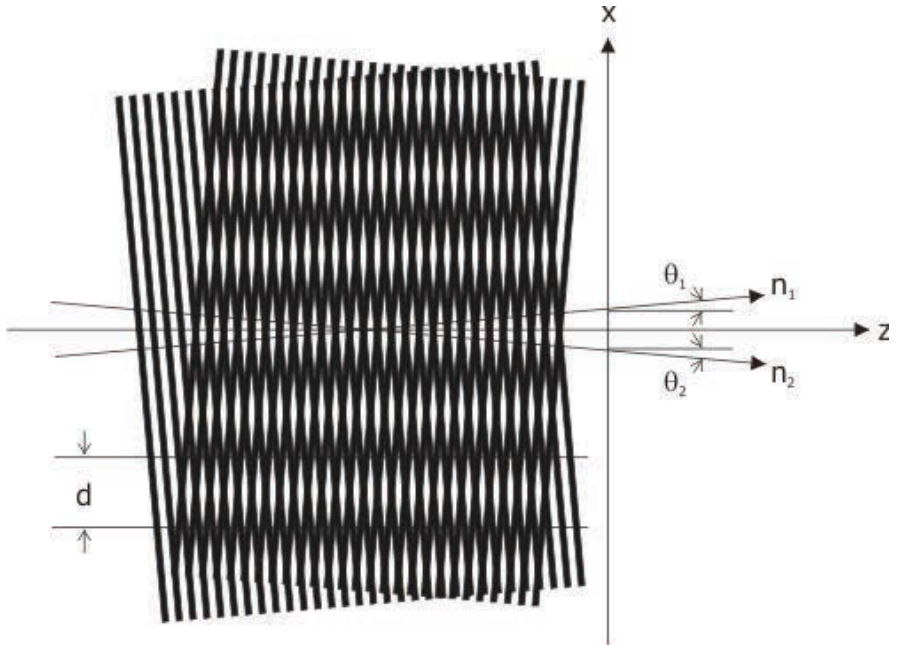


Figura 1. Patrón de interferencia generado por dos ondas planas que se propagan en las direcciones n_1 y n_2 .

De la figura 1, al ángulo que se observa entre las dos ondas planas que viajan en las direcciones n_1 y n_2 , se le denominará α en el análisis, y al ángulo entre la línea bisectriz del ángulo α y el eje z se le denominará, θ , por lo que

$$\alpha = \theta_1 + \theta_2 \quad (7)$$

Asumiendo que las amplitudes complejas de las dos ondas planas están definidas según las ecuaciones (1) y (2), se tiene ahora que

$$\phi_1 = k \left[x \operatorname{sen} \left(\theta - \frac{\alpha}{2} \right) + z \cos \left(\theta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (8)$$

y

$$\phi_2 = k \left[x \operatorname{sen} \left(\theta - \frac{\alpha}{2} \right) + z \cos \left(\theta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (9)$$

Donde k es el número de onda. La intensidad está dada según la expresión general de la ecuación (4), y sustituyendo las expresiones (8) y (9) en (5) se obtiene

$$\Delta\phi = 2k \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (10)$$

Lo cual proporciona un término de interferencia de la forma

$$\cos\left[\frac{2\pi}{d}(z \operatorname{sen} \theta - x \cos \theta)\right] \quad (11)$$

utilizando una distancia entre franjas de

$$d = \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (12)$$

Por lo que la distancia entre las franjas de interferencia d , es dependiente únicamente del ángulo entre n_1 y n_2 .

Interferometría

Los sistemas experimentales empleados para poder producir interferencia son conocidos como interferómetros. Básicamente existen dos tipos, los de división de frente de onda y los de división de amplitud. En el primer tipo, dos frentes de onda secundarios son generados a partir de un frente de onda primario, éstos son superpuestos posteriormente, generando un patrón de interferencia. En el segundo tipo, la amplitud de un frente de onda primario es dividida en dos partes, éstas se superponen posteriormente, generando también un patrón de interferencia.

De estos dos tipos se han diseñado una gran cantidad de interferómetros, con los que se pueden efectuar medidas sumamente precisas de longitudes de onda, distancias muy pequeñas y de determinados fenómenos ópticos. La figura 2 presenta dos interferómetros muy conocidos, el primero es el sistema de dos rendijas de Young, que produce interferencia por división del frente de onda y el segundo es el de Michelson, que produce interferencia por división de amplitud.

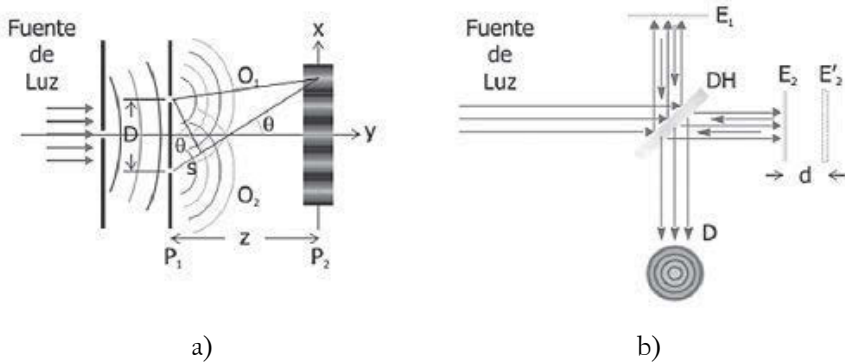


Figura 2. a) Interferómetro de Young b) Interferómetro de Michelson

De la figura 2a, se observa que el frente de onda incidente es dividido en dos ondas O_1 y O_2 al pasar a través de dos huecos pequeños ubicados en una pantalla P_1 . Las ondas esféricas resultantes interferirán, y el patrón de interferencia resultante será observado en la pantalla P_2 . Se puede observar además la diferencia de camino óptico s , de la luz alcanzando un punto arbitrario x sobre la pantalla P_2 . Cuando la distancia z entre P_1 y P_2 es mucho mayor que la distancia D , se tiene que

$$\frac{s}{D} = \frac{x}{z} \text{ por lo que } s = \frac{D}{z}x \quad (13)$$

la diferencia de fase es por tanto

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}s = \frac{2\pi D}{\lambda z}x \quad (14)$$

La cual, al sustituirla en la expresión general para la distribución de intensidad resultante, se obtiene

$$I(x) = 2I\left(1 + \cos\left(2\pi\frac{D}{\lambda z}x\right)\right) \quad (15)$$

El resultado son franjas de interferencia paralelas al eje y , con periodo espacial de $\lambda z/D$ el cual decrece cuando la distancia entre O_1 y O_2 se incrementa. El contraste de las franjas de interferencia sobre P_2 es una medición del grado de coherencia del haz de luz^[2].

De la figura 2.b, se observa que la luz procedente de la fuente de luz incide sobre un divisor de haz que produce dos ondas coherentes, una transmitida y otra reflejada. Las ondas se reflejan cada una en los espejos E_1 y E_2 , y vuelven sobre el divisor de haz, DH, a partir del cual interfieren.

Para el análisis, se considera la fuente de iluminación puntual, por lo que los espejos forman dos imágenes coherentes de la fuente, separadas una distancia $2d$, donde d es la diferencia de longitudes de los brazos del interferómetro, es decir, el camino óptico desde DH hasta cada uno de los espejos. Si la interferencia se forma en el plano focal imagen de una lente convergente, se observará simetría cilíndrica en torno al eje y y con lo que la distribución de intensidad serán anillos en torno al eje x .

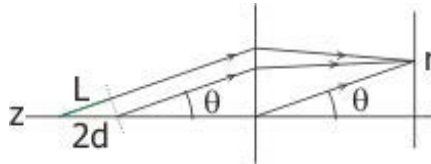


Figura 3. Trazo de rayos en un interferómetro de Michelson

De la figura 3, por el teorema de Malus Dupin, si tomamos la trayectoria de caminos ópticos iguales desde la fuente al plano focal imagen, r , el cual será un lugar geométrico constituido por una superficie perpendicular a todos los rayos, conocida como superficie de onda^[3], se puede determinar la diferencia de fase o camino óptico entre dos ondas que interfieren, denotado por L , suponiendo el mismo índice de refracción de los dos brazos

$$L = 2d \cos \theta \quad (16)$$

Con lo que la condición de máximos es

$$m\lambda = 2d \cos \theta \quad (17)$$

Siendo m números enteros llamados órdenes de interferencia. Esta variación en el camino óptico se logra desplazando uno de los espejos, E_1 o E_2 , como se observa en la figura 2.b. Si existe una distancia d , entre E_2 y E_1' , se generará una diferencia de fase de

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2d \quad (18)$$

Lo que resulta en una distribución de intensidad de

$$I(d) = 2I \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \right) \quad (19)$$

Conforme el espejo E_2 se mueve, el desplazamiento es medido contando el número de máximos registrados por un detector D. Contando el número de máximos por unidad de tiempo se puede determinar la velocidad de desplazamiento del espejo.

Aplicaciones

La Interferometría es una herramienta útil para realizar mediciones de alta precisión. Por ejemplo, si se quiere conocer la longitud de coherencia del haz o medir distancias con una precisión de media longitud de onda, esto es posible con un interferómetro de Michelson, midiendo los cambios de fase provocados por el movimiento de uno de los espejos que integran el arreglo.

Otra aplicación es la medida de deformaciones de una superficie como se observa en la figura 4, las cuales pueden ser causa de fracturas sobre elementos mecánicos, calentamiento normal o anormal de circuitos eléctricos o piezas mecánicas sujetas a fricción. Esta aplicación de las técnicas interferométricas es especialmente útil y poderosa si se apoya con técnicas holográficas. La facilidad de emplear esta técnica radica en que a simple vista es posible observar estas alteraciones al

hacer incidir el patrón de interferencia sobre la superficie de prueba y observar las variaciones de las franjas debido a dichas alteraciones. Posteriormente, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes es posible analizar e interpretar la información.

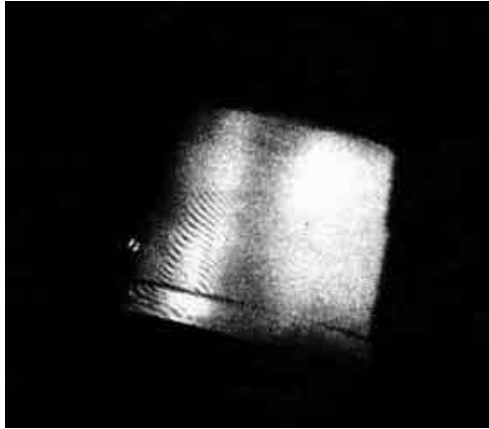


Figura 4. Detección interferométrica de deformaciones.

Debido a la alta precisión con la cual deben ser pulidas las superficies ópticas de algunos instrumentos modernos, de tal forma que no tengan desviaciones mayores a una fracción de la longitud de onda de la luz con respecto a la forma ideal requerida, se hace necesaria la determinación de la forma exacta de dichas superficies. Una técnica empleada para este propósito es empleando franjas de interferencia, las cuales al presentar deformaciones o alteraciones en su periodo, determinarán la calidad de la superficie a prueba.

Otra aplicación básica es la alineación de objetos sobre una línea recta perfecta, tal como en la plataforma de un torno de alta precisión, en donde esta alineación determinará la calidad del trabajo realizado.

Los vidrios ópticos, plásticos o cristales que se utilizan para crear lentes, prismas o cualquier otro tipo de material óptico transparente, requieren de una elevada homogeneidad tanto en su transparencia como en su índice de refracción, por lo que se requiere utilizar técnicas que determinen de forma muy precisa cambios muy pequeños de índice

de refracción y la homogeneidad de estos materiales transparentes con la tolerancia que se requiera, lo anterior se logra empleando técnicas de interferometría. Los índices de refracción de una sustancia se calculan a partir del desplazamiento de las franjas de interferencia causado por el retraso del haz.

Otra aplicación es la de detectar y medir variaciones muy pequeñas de longitud de onda, lo que permite detectar movimientos o cambios, de igual forma, muy pequeños, en la velocidad de un objeto. Lo anterior se logra apoyándose en el efecto Doppler, el cual se observa cuando una fuente luminosa se mueve respecto de un observador, la longitud de onda de la luz tendrá un cambio aparente, alargándose o acortándose; según si la fuente luminosa se aleja del observador o se acerca a él, respectivamente. Esta propiedad se utiliza para una gran variedad de aplicaciones, como por ejemplo la medida de la velocidad de flujo de líquidos o gases^[4].

Una última aplicación puede ser la de utilizar un interferómetro de Michelson para la medición de la aceleración por conteo de franjas, y como calibración de acelerómetros. El método es conocido como desaparición de franjas para la medición de pequeñas amplitudes de desplazamientos, tiene la ventaja de tener gran exactitud por estar referido a una frecuencia muy estable, esto es, a la frecuencia o longitud de onda de una línea espectral, como la de un láser. Con esta técnica se han registrado amplitudes mínimas de medición de alrededor de 150 nm^[5].

Velocimetría por láser Doppler

Es una técnica para medir la velocidad de objetos o partículas en movimiento, con precisión y de un modo no invasivo. Está basada en el efecto Doppler, que explica el hecho de que la luz cambia su frecuencia (longitud de onda) cuando es detectada por un observador estacionario, después de ser dispersada por un objeto en movimiento⁶.

En la figura 5 se observa una partícula en movimiento en una unidad de prueba donde dos ondas planas interfieren incidiendo a un ángulo α , formando franjas brillantes y oscuras separadas a una distancia d , según la ecuación 12.

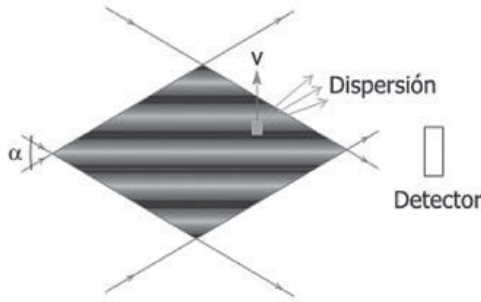


Figura 5. Velocimetría por Laser Doppler

Cuando la partícula se mueva en la unidad de prueba, ésta dispersará luz cuando pase a través de una franja de interferencia brillante y cuando pase por una franja de interferencia oscura no provocará dispersión de la luz^[6]. El pulso de luz resultante puede ser observado por un detector ubicado según se observa en la figura 5.

Para una partícula moviéndose en la dirección normal al plano de interferencia con una velocidad v , el lapso de tiempo entre pulsos sucesivos de luz es

$$t_D = \frac{d}{v} \tag{20}$$

por lo que la frecuencia esta expresada como

$$f_D = \frac{1}{t_D} = \frac{2v \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\lambda} \tag{21}$$

Si existen muchas partículas de diferentes velocidades, se observaran diferentes frecuencias. Estas pueden ser detectadas utilizando un analizador espectral y el espectro de frecuencias resultante servirá para determinar cómo las partículas están distribuidas en las diferentes velocidades.

Esta técnica no distingue partículas moviéndose en direcciones opuestas. Si la dirección del movimiento es desconocida, se puede

modular la fase de una de las ondas planas, por ejemplo utilizando un modulador acusto-óptico, de tal forma que se muevan los planos de interferencia paralelamente a estos a una velocidad conocida. Esta velocidad será disminuida cuando las partículas se muevan en la misma dirección e incrementada cuando se muevan en dirección opuesta.

En la figura 5 se observan las partículas pasando entre la fuente de luz y el detector. Si las partículas dispersan suficiente luz, el detector puede ser colocado en el mismo lado que la unidad de prueba y la fuente de luz.

La velocimetría por láser Doppler puede ser aplicada para medir la velocidad de superficies en movimiento, turbulencia en líquidos y gases, la velocidad de vehículos utilizados para el control de tráfico, etcétera. Al utilizar esta técnica, en ocasiones el líquido o gas a analizar, debe ser alterado con partículas conocidas. Por ejemplo como velocímetro^[7], en mediciones de velocidad de sedimentación^[8], hidrodinámica de barcos^[9], distribuciones de velocidad de gotas de aceite en máquinas de combustión a gasolina y diesel, en medicina se utiliza para medir con alta resolución el flujo sanguíneo en arterias delicadas como la femoral y coronaria^[10], como dispositivo para medir pequeñas oscilaciones^[11] y como sismógrafo^[12], además se puede utilizar para determinar curvas de resonancia de sistemas oscilatorios, como piezoeléctricos, entre otros.

Interferómetro de Michelson de doble frecuencia

También conocido como interferómetro de corriente alterna, proporciona el desplazamiento en función de variaciones en frecuencia, en vez de variaciones en intensidad como en un interferómetro de Michelson. Sin embargo, este interferómetro es menos afectado por variaciones, como turbulencias de aire en el camino óptico^[13].

El principio de funcionamiento se basa en que dos ondas de diferente frecuencia no producen interferencia observable, al combinar dos ondas

$$u_1 = e^{i2\pi[(\nu_1) - \nu_2]t} \quad (22)$$

$$u_z = e^{i2\pi\left(\frac{z}{\lambda_2} - \nu_2 t\right)} \quad (23)$$

de diferente frecuencia, la intensidad resultante es

$$I = 2 \left[1 + \cos 2\pi \left(\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) z - (\nu_1 - \nu_2) t \right) \right] \quad (24)$$

Si la diferencia de frecuencia $\nu_1 - \nu_2$ es muy pequeña y constante, la variación de la intensidad I con respecto del tiempo puede ser detectada. Lo anterior es utilizado en este tipo de interferómetros para medición de longitudes o desplazamientos, los cuales se determinan a partir de la expresión

$$d = \nu t = \frac{\Delta f \lambda t}{2} \quad (25)$$

Donde Δf es la diferencia en frecuencias, λ es la longitud de onda del haz laser y t el tiempo. Este tipo de interferómetros puede medir distancias mayores a 60 m con una resolución de $\lambda/4$ ($\sim 0.16\mu\text{m}$), la cual puede ser ampliada electrónicamente por un factor tan alto como cien. La precisión es de 5×10^{-7} y la velocidad puede ser medida a partir de valores superiores a 0.3 m/s, hasta valores que dependen del equipo de medición empleado. La técnica de doble frecuencia, también es conocida como detección heterodina^[14]. Con las técnicas ópticas interferométricas es posible detectar desplazamientos típicos de una superficie de alrededor de 1 a 10 nm, frecuencias de operación de hasta 10 MHz, objetos con superficies rugosas, en movimiento y dentro de ambientes hostiles, etcétera; sin embargo, se presentan inconvenientes, debido a las características propias de los interferómetros^[15]. El de Michelson es muy sensible a variaciones de temperatura y a vibraciones mecánicas^[1]. Además de que la relación entre la vibración y la señal proporcionada por un fotodiodo es no lineal, lo que hace necesario un ajuste para que la proporción sea lineal. Otro problema es que en ambientes industriales se tiene frentes de onda no uniformes (speckle)^[16], lo cual hace más complicado el sistema óptico, además de provocar una disminución de la razón señal-ruido (SNR).

Otra alternativa son los sistemas interferométricos adaptativos^[17], que solucionan los problemas de ajuste, corrimientos de fase lentos y el uso de frentes de onda deformados. Existen tres diferentes arreglos, el de mezclado de cuatro ondas, el de mezclado de dos ondas y el de efecto de fuerza foto-electro-motriz (Fuerza FEM). En los dos primeros se tiene la limitante de que el tiempo de grabado de hologramas dinámicos es grande (≈ 0.1 milisegundos), por lo cual son utilizados a frecuencias de vibración lentas. El tercero utiliza una muestra fotoconductor como foto-detector adaptativo^[18]. Este tipo de arreglo puede detectar movimientos rápidos del patrón de interferencia, aún speckle, formalmente, los primeros experimentos con detección adaptativa de vibraciones mecánicas del orden de picómetros utilizando un detector de fuerza FEM de GaAs se reportaron por Stepanov^[19]. La modulación en fase del haz de prueba fue asegurada por medio de la vibración de uno de los espejos de un interferómetro en la configuración experimental. Desde un punto de vista práctico, los experimentos en detección adaptativa de vibraciones reales mecánicas de superficies rugosas son por supuesto de mucha mayor importancia.

Se han realizado experimentos utilizando detectores de fuerza FEM de GaAs a una longitud de onda de 632.8 nm con un laser de He-Ne^[20], donde los modos de vibración de un piezo-eléctrico cubierto por una superficie rugosa fueron analizados para un rango de frecuencias de 1 a 50 kHz.

Para determinar la frecuencia de vibración de objetos con técnicas adaptativas se utilizan dos arreglos interferométricos, uno de ellos corresponde a un haz reflejado del objeto bajo prueba y el otro arreglo corresponde a la señal de búsqueda, la cual puede ser manipulada para determinar la frecuencia de vibración del primer arreglo interferométrico. Al tener estos dos arreglos una frecuencia de oscilación diferente, se detectará un nivel bajo de señal debido al batimiento de señales de fuerza FEM presentes, como se muestra en la figura 5, mientras que para el caso de frecuencias de oscilación iguales, el batimiento desaparecerá generando un realce de la corriente debido al efecto de fuerza FEM.

Analizando el caso más simple, donde las potencias incidentes en la muestra son aproximadamente iguales, $I_0 \approx I_1 \approx I_2$, el contraste entre las

franja $m \approx 1$ y la frecuencia espacial es la misma para ambos $K \approx K_1 \approx K_2$, se obtiene que la expresión de irradiancia para cada patrón de interferencia es

$$I_{1,2} = I_0 \{1 + \text{sen}[Kx + \Delta_{1,2} \text{sen}(\Omega_{1,2}t) + \Phi]\} \quad (26)$$

donde el parámetro Φ , indica una fase inicial, Δ_1 está relacionado a la amplitud de modulación de fase debida a la vibración del objeto bajo prueba y Δ_2 a la amplitud de modulación de fase de la señal de búsqueda. Para frecuencias y amplitudes de modulación diferentes ($\Omega_1 \neq \Omega_2$ y $\Delta_1 \neq \Delta_2$), la expresión de fuerza FEM está dada por^[21]

$$J^i = A(\Delta_1 + \Delta_2) \text{sen}(\Omega_{ref} t + \Phi) \cos(\delta\Omega \cdot t) + A(\Delta_1 - \Delta_2) \cos(\Omega_{ref} t + \Phi) \text{sen}(\delta\Omega \cdot t) \quad (27)$$

Si se tienen frecuencias de oscilación diferentes ($\Omega_1 \neq \Omega_2$), pero de igual amplitud ($\Delta_1 = \Delta_2$), se obtiene que la corriente presente en la muestra debido al efecto de fuerza foto-electro-motriz proporcional al desplazamiento del patrón de interferencia en ese momento en particular está dado por

$$J^i = 2 A \Delta \text{sen}(\Omega_{ref} t + \Phi) \cos(\delta\Omega t) \quad (28)$$

donde A es una constante debida a los otros parámetros involucrados en el efecto de fuerza FEM, Ω_{ref} es la frecuencia de referencia definida por $\Omega_{ref} = (\Omega_1 + \Omega_2)/2$ y, $\delta\Omega = (\Omega_1 - \Omega_2)/2$, es la diferencia entre las dos frecuencias de modulación^[22], Φ determina si los patrones están o no en fase. En caso de estar fuera de fase, la corriente producida será muy pequeña. Para compensar este desplazamiento es posible incorporar un piezoeléctrico con un voltaje DC aplicado. La señal resultante de la ecuación 25 se presenta en la figura 6, donde se observa una modulación $\delta\Omega$, la cual es la mitad de la diferencia en frecuencias, tanto del objeto a evaluar Ω_1 , como de la frecuencia de búsqueda Ω_2 , mientras que la frecuencia de referencia está ubicada exactamente a la mitad de la diferencia en frecuencias del objeto bajo prueba y búsqueda.

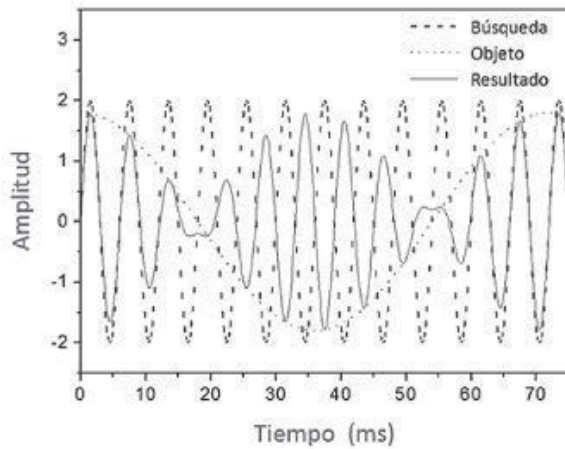


Figura 6. Señal de dos interferómetros oscilando y el resultado obtenido a partir de estos.

Conforme la señal de referencia se aproxime a la frecuencia de vibración del objeto, la diferencia en frecuencias $\delta\Omega$ se irá reduciendo y eventualmente llegará a cero, y como consecuencia el batimiento de la señal desaparecerá.

Ahora, si se evalúa la ecuación 24 con frecuencias de modulación iguales ($\Omega_1 = \Omega_2$), entonces el término cosenoidal alcanza la máxima amplitud y solo queda la parte senoidal, por lo tanto

$$J' = 2 A \Delta (\text{sen } \Omega_{ref} t + \Phi) \quad (29)$$

Los sistemas anteriores han sido ampliamente utilizados para la detección de daños estructurales debido al gran impacto que tienen en cuanto a seguridad en diferentes áreas, particularmente en la industria (aeronáutica, automotriz, etcétera)^[23]. Además de tener la ventaja de ser técnicas no destructivas, fácil de usar, suficientemente rápidas para ser supervisadas en tiempo real y con una reducida incertidumbre en la respuesta, la cual debe ser clara y de fácil interpretación^[24].

Interferometría para espectroscopía

La interferometría externamente dispersada (EDI) es una técnica para realzar la capacidad de espectrógrafos ampliando el ancho de banda utilizado para espectroscopia de alta resolución y velocimetría radial Doppler. Colocando un interferómetro Michelson de espejos ligeramente inclinados, con una diferencia de camino óptico desde 1 hasta 3 cm, cerca de la rendija de un espectrofotómetro, se formarían franjas sobrepuestas en el espectro observado. Este patrón de Moirè proporciona información espectral detallada, tal como se observa en la figura 7. El periodo espacial del patrón Moirè, está determinado de manera unívoca por las frecuencias espaciales de los interferómetros que se superponen, con lo que la frecuencia espacial del patrón Moirè permitirá establecer una relación entre las longitudes de onda de las fuentes que iluminan el interferómetro. Se han reportado datos indicando una resolución de 140,000 líneas de un espectrofotómetro con una capacidad de 25,000^[25] (líneas).

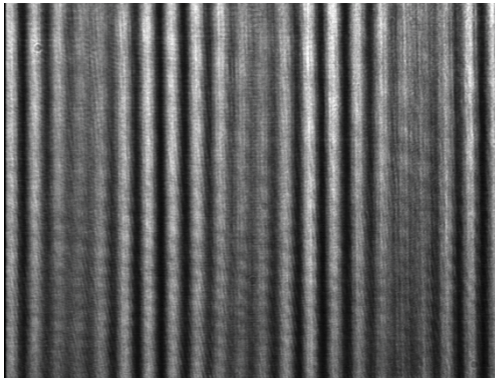


Figura 7. Patrón de Moirè registrado con una cámara CCD^[26].

Este sistema fue originalmente desarrollado para velocimetría radial (bajo un cambio Doppler el patrón Moirè completo cambia en fase). Sin embargo, la capacidad de este sistema para medir con precisión ($\sim \lambda/20,000$) cambios en las franjas de luz blanca entre fuentes espectrales simultáneas múltiples, sugiere muchas posibilidades en metrología. El

sistema EDI posee ventajas en ancho de banda sobre interferómetros internamente dispersos^[27], los cuales tienen limitaciones de ancho de banda debido al cambio rápido en el periodo de las franjas contra la longitud de onda. En comparación con un interferómetro Fabry-Perot disperso el cual produce franjas con un impulso espectral estrecho, las franjas de EDI transmiten grandes flujos promedio, efecto heterodino, y permite la recuperación precisa por trigonometría de información espectral.

Los procesos mencionados anteriormente son un claro ejemplo de la gran variedad de aplicaciones que se les da a los sistemas interferométricos, empleando las ondas de luz como unidad de medida, abarcando áreas como ingeniería, medicina, astronomía, etc. Las aplicaciones que se visualizan para ingeniería ambiental son muchas, desde la medición de variables físicas (como temperatura, densidad, presión, etc.) hasta las características espectrales de elementos utilizando otras herramientas ópticas (como espectroscopia, procesamiento de imágenes, etc.).

Bibliografía

- [1] Eugene Hecht, 2000, *Óptica*, Adelphi University, Addison Wesley, 3a Edición, España, 384-440.
- [2] Kjell J. Gasvik, 2002. *Optical Metrology*, John Wiley & Sons, Third Edition, England, 37-65
- [3] José Rodríguez García, 1997. *Fundamentos de óptica geométrica*, Universidad de Oviedo, España, 40-42
- [4] Durst F., Melling A., and J. H. Whitelaw, 1976. "Principles and practice of laser-Doppler anemometry", en *Academic Press*, New York , p. 410
- [5] Ricardo Ruiz Boullosa y Antonio Pérez López, 1990. "Interferómetro laser y conteo de franjas aplicado a la calibración de acelerómetros y calibradores de vibraciones", en *Revista Mexicana de Física*, Vol. 36, núm. 4, pp. 622-629
- [6] Yeh, Y. & Cummins, H., 1964, *Localised Fluid Flows Measurements with a He-Ne Laser Spectrometer*. *Appl. Phys. Lett.*, 4, pp. 176-178.
- [7] R. H. Belansky and K. H. Wanser, 1993, *Am. J. Phys*, No. 61, p. 1014
- [8] H. Salinas-Tapia, J.A. García-Aragón y C. Díaz-Delgado, 2007, "Análisis experimental del efecto de la turbulencia en la velocidad

- de caída de sedimentos en suspensión", en *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. IX, No. 1, p. 49-58
- [9] Fry, D. J.; Jessup, S.; Huang, T. T., 1987, "Application of Laser Doppler Velocimetry for Ship Hydrodynamic Measurements", *Proceedings of the 18th International Towing Tank Conference*, Kobe, Japan, Volume 2, p. 358
- [10] H. Nishihara, 1982, *Applied Optics*, No. 21, p. 1785 .
- [11] J. B. Diamond, 1990, *American Journal of Physics*, No 58.
- [12] G. Da Costa, G. Kiedansky and R. Siri, 1988, *American Journal of Physics*, No 56.
- [13] Chang YS, Chien PY, Chang MW, 1997, "Distance and Velocity Measurements by the use of an Orthogonal Michelson Interferometer", en *Applied Optics*, vol. 1, No 36, pp. 258-65.
- [14] V. G. Atavin, A. A. Mokhnatov and Yu. V. Khudyakov, 2000, *New Possibilities for Vibration-Amplitude Measurement by Heterodyne Laser Vibrometer*, Springer New York, vol. 43, No. 2, pp. 140-143
- [15] Saleh B. E. A., 1991, *Fundamentals of Photonics*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., M.C. Teich
- [16] Dewhurst R. J., 1999, Q. Shan, "Optical Remote Measurement of Ultrasound", en *Meas. Sci. Technol.* 10, R139-R168
- [17] Stepanov S., 2000, *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, vol. 2, Ed. H. Nalwa, p. 205
- [18] Mitchell P. V., 1995, et al. *Tech. Digest of Photorefractive Materials, Effects and Applications Conf.* (Aspen, Lodge,), p. 432.

- [19] Stepanov S. I., I. A. Sokolov, G. S. Trofimov, V. I. Vlad, D. Popa and I. Apostol, 1990. *Opt. Lett.*, **15**, 1239
- [20] Glass A. M., D. D. Nolte, D. H. Olson, G. E. Doran, D. S. Chemla, and W. H. Knox, 1990, *Resonant Photodiffractive four Wave Mixing in Semi-insulating GaAs/AlGaAs Quantum Wells*, *Opt. Lett.*, vol. **13**, 264-266
- [21] García Lara, Carlos; Vázquez Sánchez, Rubén y Camas Anzueto, Jorge, 2006, "Efecto de fuerza FEM para determinar frecuencias de vibración utilizando una muestra de pozos cuánticos de InGaAs", en *Ciencia y tecnología en la frontera*, Año III, núm. 5, p. 52-62
- [22] Safa Kasap, 1999. *Group Index vs. Wavelength Properties of Glasses, Solved Problems in Optoelectronics*, University of Saskatchewan, Canadá.
- [23] Castellini P., G. M. Revel, 2003. *Damage Detection by Laser Vibration Measurement*, Roma.
- [24] Sokolov Igor A., 1998, *Adaptive Photodetectors for Vibration Monitoring, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*.
- [25] David J. Erskine and Jerry Edelstein, 2004. *Interferometric resolution boosting for spectrographs*, SPIE 5492, Conf. on astronomical instrumentation, Scotland
- [26] Jorge Garcia-Sucerquia, Juan Carrasquilla y Diego Hincapié, 2003. "Medición de la longitud de onda por medio la técnica Moirè", en *Revista Colombiana de física*, vol. 35, núm. 2, pp. 384-387
- [27] J. Harlander, R. Reynolds, and F. Roesler, 1992, "Spatial heterodyne spectroscopy for the exploration of diffuse interstellar emission lines at far-ultraviolet wavelengths", en *Applied Journal* 396, p. 730

Semblanza de revisores invitados

Alejandro Ruiz Sibaja

El profesor Alejandro Ruiz Sibaja nació en Tapachula, Chiapas el 9 de abril de 1964. Estudió la carrera de Ingeniería Civil desde 1982 hasta 1986 en el Instituto Tecnológico de Tapachula (ITTAP), Chiapas y obtuvo el título de Ingeniero Civil en mayo de 1987. En 1986 el Instituto Tecnológico de Tapachula le dio un reconocimiento por ser el mejor alumno de su generación. Estudió la maestría en Ciencias con especialidad en Estructuras de 1988 a 1990 en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Obtuvo el grado con una tesis sobre caracterización dinámica estructural de plataformas marinas de acero mediante mediciones de vibración. Esta tesis consiguió el premio, por parte del Instituto Politécnico Nacional, a la mejor tesis de posgrado en Ingeniería Civil en 1991. En 1990 el Instituto Politécnico Nacional le otorgó un premio por ser el mejor alumno de su generación en la maestría en Ciencias con especialidad en estructuras. De 1992 a 1996 el profesor Ruiz Sibaja dio clases en la maestría en Ciencias con especialidad en estructuras, de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional. En 1995 el Instituto Politécnico Nacional lo premió como Profesor Distinguido de la maestría en ciencias con especialidad en estructuras. Realizó su tesis de maestría como becario del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) de 1990 a 1991, en el Departamento de Análisis de Esfuerzos, de la División de Ingeniería Civil de la Subdirección de Ingeniería de Proyectos de Explotación. Posteriormente de 1992 a 1996, el profesor Ruiz Sibaja

trabajó en el Instituto Mexicano en la misma área en la que realizó su tesis de grado. Sus actividades principales fueron: análisis estructural de sistemas de tuberías para recolección de petróleo, generación de programas de cálculo de estructuras marinas, mediciones de vibración en estructuras marinas y asesoría en campo para la construcción de estas estructuras. A finales de 1996 consiguió una beca del CONACYT para estudiar el doctorado en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en Barcelona, España. En diciembre de 1997, logró el grado de master en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural en la Universidad Politécnica de Cataluña, España. La tesis de master consistió en una revisión crítica de modelos de cálculo para plataformas marinas y se sugirió el más adecuado para las condiciones de los campos petroleros de PEMEX en el Golfo de México. En marzo de 2001, obtuvo el grado de doctor Ingeniero de caminos, canales y puertos en la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España, con una tesis dirigida por el prof. Sergio Oller Martínez. En la tesis de doctorado se propuso un modelo de daño continuo para estimar la degradación de la rigidez estructural por fatiga debida a oleaje en plataformas marinas de acero. De enero de 2002 a mayo de 2003 el profesor Ruiz Sibaja trabajó en la empresa PROYEX-Valencia, en Valencia, España. Sus actividades principales consistieron en evaluar proyectos de estructuras y emitir recomendaciones para un mejor funcionamiento del sistema estructural presentado en los proyectos. De junio de 2003 a agosto de 2004 fue profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana (UV), Campus Xalapa. A partir de septiembre de 2004 y hasta la fecha ha sido profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), Campus I. En la UNACH, ha dado clases de Análisis Numérico, Estructuras Isostáticas, Análisis Estructural, Mecánica de Materiales y Diseño Estructural. Ha colaborado también en el programa de la Maestría en Estructuras de la Universidad Valle del Grijalva dando la clase de Teoría General de Estructuras. Ha publicado artículos en prestigiosas revistas internacionales y congresos nacionales del área de Estructuras e Ingeniería Sísmica. En 2007 la Fundación Carolina de España le concedió una beca para hacer una estancia corta de investigación en el área de Vulnerabilidad Sísmica en la Univer-

sidad Politécnica de Cataluña. De septiembre de 2006 a septiembre de 2008 perteneció al Sistema Estatal de Investigadores de Chiapas. A partir de agosto de 2009 y hasta julio de 2010 el profesor Ruiz Sibaja estará realizando un postdoctorado en el área de Vulnerabilidad Sísmica en el Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, en Granada, España. Entre otras, sus líneas de investigación son: Modelos de daño, Torsión restringida, Mediciones de vibración, fatiga, Ingeniería sísmica, Vulnerabilidad sísmica y Comportamiento de estructuras civiles, marinas e industriales.

Jorge Alfredo Aguilar Carboney

El maestro Jorge A. Aguilar Carboney es ingeniero civil egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana en 1986, realizó estudios de posgrado en la Universidad de Texas en Austin donde obtuvo el grado de maestro en Ciencias en el área de Ingeniería Estructural en 1995.

Fue profesor investigador titular del Área de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana (1991-1999), ha publicado diversos trabajos de investigación en el área de Ingeniería sísmica y estructural. En 1988 el Colegio de Ingenieros Civiles de México le otorgó el Premio Nacional “José Cuevas” por el mejor artículo técnico sobre Ingeniería Civil, en reconocimiento por su publicación: *“Intensidad del sismo de 1985 en la ciudad de México”*.

En su trayectoria profesional se ha desarrollado como consultor en Ingeniería estructural, fue Jefe de proyecto de la empresa de consultoría CANDE Ingenieros, S.A. (1987-1989); Jefe de la Sección de Riesgos Catastróficos de Seguros América, S. A. (1990-1991); Coordinador de Seguridad Estructural de la Universidad Autónoma Metropolitana (1991); ha realizado diversos proyectos estructurales de edificaciones nuevas y rehabilitaciones, así como proyectos de intervención estructural en edificios históricos.

Fue Miembro del Consejo Consultivo de Ciencia y Tecnología del Estado de Chiapas, es miembro del sistema estatal de investigadores del estado de Chiapas y asesor científico del Instituto de Protección Civil del Estado de Chiapas.

Es Secretario Técnico de la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS), de la cual es investigador-fundador desde 1993.

Desde el 2002 es profesor titular de la Universidad Autónoma de Chiapas, donde es líder fundador del Cuerpo Académico de Prevención de Desastres Naturales y Coordinador de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería.

Yareni Perroni Ventura

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel C). Investigadora de Tiempo Completo Académico de Carrera Titular C en el Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Veracruzana. Es bióloga egresada de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Estudió el doctorado en el Instituto de Ecología, Xalapa en el programa de Ecología y Manejo de Recursos Naturales. En su tesis doctoral exploró los mecanismos de conservación de nitrógeno en el suelo de islas de fertilidad en un ecosistema semiárido y la relación del suelo fértil con la riqueza de especies vegetales. Fue becaria posdoctoral en el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco), UNAM por el Consejo Técnico de la Investigación Científica (CTIC-UNAM) en el marco del proyecto *Mecanismos de disponibilidad de N y P del suelo en un desierto del norte de México*. Ha publicado artículos científicos en revistas de alto reconocimiento como el *Journal of Vegetation Science* y *Functional Ecology*. Ha impartido diversas pláticas en diferentes instituciones como en Ciencias Biológicas de la UAT, Tlaxcala; el Centro de Investigaciones Biológicas de la UAEH, Hidalgo y el Max-Planck Institut für Biogeochemie, Jena, Alemania. Es miembro fundador de la Sociedad Científica Mexicana de Ecología (SCME) y miembro regular de la Ecological Society of America (ESA).

Cristina Blanco González

Obtuvo la licenciatura en Ingeniería Química en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y doctorado en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en la Universidad Politécnica de Valencia, España. Diploma-

do en Auditoría Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Diplomada en Educación Basada en Competencias por la Coordinación de Universidades Politécnicas. Es profesora investigador categoría A de la Universidad Politécnica de Chiapas desde septiembre de 2006. Actualmente es líder del Cuerpo Académico en formación “*Ingeniería Ambiental Aplicada*”. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con el tratamiento biológico de aguas residuales, especialmente en la calibración y simulación de plantas de tratamiento que operan bajo el sistema de lodos activados. Ha publicado en la revista internacional *Water Science and Technology*. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores desde 2008 (nivel candidato).

Ma. Neftalí Rojas Valencia

Realizó sus estudios de licenciatura en Biología y de maestría en Ciencias (especialidad en recursos acuáticos) en la Facultad de Ciencias, en la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM). Obtuvo el título de doctor en Ingeniería Ambiental en la Universidad Autónoma Metropolitana el 20 de octubre del 2004. En la actualidad cuenta con 34 cursos complementarios y un diplomado internacional. Hizo dos estancias de investigación, una en el 2002 en el Department of Applied Chemical and Biological Sciences, Faculty of Engineering and Applied Science, Ryerson Polytechnic University, Toronto Canadá y otra en el 2006 en el Departamento Ingeniería Química y Energética de la Universidad de Extremadura de Badajoz, España.

Desde 1993 ha trabajado en el área de Ingeniería Ambiental, en el Instituto de Ingeniería, UNAM en las siguientes líneas de investigación: 1) Ingeniería de procesos y modelos de calidad del agua; 2) Tratamiento, reuso, desinfección y bacteriología ambiental; 3) Control ambiental en rellenos sanitarios, 4) Procesos fisicoquímicos en tratamientos de aguas y residuos y 5) Saneamientos de suelos (en particular en la identificación y cultivo de bacterias biodegradadoras de hidrocarburos) y 6) Manejo de residuos sólidos en viviendas y edificaciones sustentables y gestión integral de residuos sólidos.

Su producción científica y técnica se resume en 47 informes de investigación y 25 artículos en revistas y un artículo que conforma un capítulo de un libro. Ha participado en 21 ponencias nacionales y 54 internacionales, ha colaborado en 27 cursos y 29 pláticas como invitada, (5 de las cuales fueron en el extranjero). Por lo que se refiere a la formación de estudiantes ha dirigido 25 servicios sociales, 25 estancias cortas de investigación, 15 tesis de licenciatura, 5 de maestría y 2 de doctorado y ha participado como jurado de examen de grado en 17 ocasiones.

Ha fungido como asesor técnico y tutor de maestría y doctorado de la Facultad de Ingeniería y Química, de la UNAM. En el Instituto Politécnico Nacional Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, en la maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales. UAM-Azcapotzalco y en el doctorado en Ciencias del desarrollo sustentable de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Universidad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, en el Instituto Nacional de Salud Pública. Escuela Nacional de Salud Pública, maestría en Salud Pública: Área de Salud Ambiental y en el posgrado (maestría y doctorado) de la Facultad de Economía de la UNAM.

En el 2000 inició sus actividades de docencia dando clases en diferentes asignaturas en la Facultad de Química, del 2007 a la fecha imparte clases en el posgrado de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Distinciones: le fue concedido por el Programa de Primas al Desempeño del Personal Académico de Tiempo Completo (PRIDE) el Nivel C en el 2003, en el 2005 recibió la Medalla al Mérito Universitario, otorgado por la Universidad Autónoma Metropolitana y el nombramiento de Investigador Nacional (SNI), Nivel I el 29 de septiembre del 2005 a la fecha.

Manuel May Alarcón

Nació en la Ciudad de Xalapa, Veracruz, el 5 de octubre de 1970. Terminó sus estudios de licenciatura en de la carrera de Instrumentación Electrónica de la Facultad de Física de la Universidad Veracruzana en

junio de 1993. Realizó sus estudios de maestría en Ciencias con especialidad en Óptica en el Centro de Investigación Científica y de Enseñanza Superior de Ensenada (CICESE) durante el periodo de 1995 a 1998. Sus estudios de doctorado los realizó en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) durante el periodo de 1999 a 2003.

Desde agosto de 2003 a la fecha, trabaja como Profesor de Tiempo Completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen. Desde octubre del 2004 se desempeña también como Líder del Cuerpo Académico de Telecomunicaciones. A nivel licenciatura ha impartido los cursos de Electrónica I, Electrónica II, Electrónica III; Electricidad y Magnetismo, Comunicaciones por Fibra Óptica, Diseño Digital I, Diseño Digital II y Teoría Electromagnética. En especialidad ha impartido la materia de Sistemas de Radiocomunicaciones mientras que en maestría ha impartido Tópicos Selectos de Electrónica.

Desde noviembre de 2004 y hasta la fecha ha recibido el reconocimiento de Perfil Deseable por parte del Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores SNI de 2005 a 2008 por parte del CONACYT.

El Cuerpo Académico, en el que está adscrito es el de Telecomunicaciones y sus líneas de investigación son: Ahorro de energía, Telecomunicaciones Inalámbricas y por Fibra Óptica. El CA al que pertenece se encuentra en consolidación desde diciembre de 2009 hasta noviembre del 2012 con Clave ProMeP UACAR-CA-6.

Es autor y coautor de varias publicaciones en revistas y memorias en congresos nacionales e internacionales con el tema de dispositivos optoelectrónicos, láseres y sensores de fibra óptica. Ha dirigido 2 tesis de licenciatura, y 3 tesis de especialidad y una de posgrado mientras que en proceso se encuentran 5 tesis de licenciatura, 1 de especialidad y 1 de maestría. Ha sido revisor de artículos en revistas nacionales y actualmente trabaja como editor de un libro llamado *Radiación, materia y materiales*.

Como investigador, se encuentra actualmente trabajando dos proyectos, que consisten en la construcción de circuitos electrónicos para aplicaciones didácticas, y construcción y caracterización de sistemas optoelectrónicos. En los cuales están involucrados profesores y alumnos de las carreras de Ingeniería en Electrónica de las áreas terminales.

Marcos Antonio Plata Sánchez

Realizó la licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Posteriormente, realizó estudios de maestría y doctorado en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), en la especialidad de Óptica. Parte de sus estudios de doctorado lo realizó a través de Estancias de Investigación en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California (CICESE). Obtuvo el título de doctor en Ciencias en la especialidad de Óptica en mayo de 2007.

La mayor parte de su trabajo lo ha realizado en el área de Holografía. Sus tesis de licenciatura y maestría estuvieron enfocadas en la automatización y control de un sistema para el grabado y recuperación de información holográfica en cristales fotorrefractivos de Niobato de Litio. Posteriormente, durante su doctorado, trabajó con Holografía Dinámica, más específicamente en la investigación experimental detallada de las características más importantes (eficiencia de difracción y el tiempo característico de formación) de Rejillas Dinámicas formadas en fibras dopadas con erbio. Desarrolló un sistema interferométrico adaptativo para la detección óptica de vibraciones mecánicas, sistema enfocado para la detección de ultrasonido generado por láser.

Desde 1992 ha impartido cursos de Matemáticas, Computación y Electrónica en diferentes niveles de educación (desde primaria hasta licenciatura), en diferentes instituciones públicas y privadas. De 2001 a 2002 trabajó en el INAOE como Técnico Investigador Titular A, realizando mediciones interferométricas para la detección de vibraciones mecánicas y variaciones de temperatura. De 2007 a 2008 trabajó como Profesor Investigador Titular A en la Universidad de la Cañada perteneciente al Sistema de Universidades del Estado de Oaxaca (SUNEO). Actualmente se encuentra realizando un segundo año de Estancia Posdoctoral en el CICESE, trabajando en la Investigación de procesos de propagación de luz lenta y rápida en fibras dopadas con tierras raras. Obtuvo la distinción (como candidato) al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde principios del 2009.

Semblanza de Autores

Raúl González Herrera

Originario de Guadalajara, Jalisco, México, su formación profesional es como ingeniero civil egresado de la Universidad de Guadalajara, especialista en Gestión y Vinculación Tecnológica de la Universidad Tecnológica de la Selva, Ocosingo, Chiapas, maestría en Ingeniería en el área de estructuras en la Universidad de los Andes en Bogotá, Colombia, actualmente cursa estudios de Doctorado con énfasis en riesgos.

Tiene varios intereses de investigación, tales como: riesgos naturales y sus costos, materiales sustentables y alternativos para vivienda y vulnerabilidad física.

Ha recibido los siguientes reconocimientos: Miembro del Sistema Estatal de Investigadores, Investigador Tecnólogo I (2006), Perfil PROMEP (2005), Premio Jorge Matute Remus (1997), Premio Concretos APASCO (1997) y Diploma UdeG como estudiante sobresaliente (1997) mejor promedio en Ingeniería Civil. Adicionalmente desde 2005 es fellow del American Concrete Institute, ACI y del Earthquake Engineering Research Institute, EERI.

Dentro de las actividades de gestión ha participado como: vocal de la Asociación Mexicana de Hidráulica de Chiapas, miembro del Consejo Ambiental Municipal de Tuxtla Gutiérrez, vicepresidente de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS) Delegación Chiapas, vocal técnico de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE) Delegación Chiapas, líder de la línea de aplicación y generación de conocimiento Estudios de prevención y mitigación para zonas de

alto riesgo 2004-2006 y coordinador de Ingeniería Ambiental y Ciencias Ambientales de la UNICACH (2004-2006).

Ha realizado labor docente en la Universidad Autónoma de Chiapas (2002-2004) en la licenciatura de Ingeniería Civil y en la maestría en Ingeniería con las asignaturas: Computación aplicada a la construcción, Construcción pesada, Planeación y control de obra, Cimentaciones, Estructuras de concreto, Procesos constructivos, Análisis matricial de estructuras, Mecánica de materiales I y Teoría general de estructuras. Desde 2004 a la fecha participa en el programa de Ingeniería ambiental, Geomática y Topografía e Hidrología de la UNICACH con las asignaturas: Metodología de la investigación, Proyecto terminal, Seminario de tesis, Seminario de Proyectos I y II, Administración de proyectos, Construcción y Mecánica de suelos y en la maestría en Desarrollo sustentable en Teoría de Riesgos.

Participó en los siguientes proyectos de investigación con financiamiento externo: Estimación de los costos esperados por daño sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Método de evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica de grandes grupos de edificaciones-Irregularidad estructural, Modelo de Negocio de Empresas de Supervisión de Estructuras Certificadas, Propuesta de normas de seguridad estructural para Tapachula, Chiapas, entre otros.

Carlos Narcía López

Es originario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Es ingeniero civil egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNICACH) y maestro en Ciencias, con orientación en Sismología, egresado de la División de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Su interés principal de investigación se enfoca en el estudio del fenómeno sísmico y su relación con las propiedades físicas de los medios terrestres, para el entendimiento del riesgo en el sureste de México.

Su tesis de maestría obtuvo el premio "Francisco Medina Martínez", otorgado por la Unión Geofísica Mexicana (UGM), a la mejor tesis nacional de maestría en Ciencias de la Tierra con el tema *Espesor de*

la corteza en Chiapas mediante ondas directas y convertidas, en 2003. En 2006, el Gobierno del Estado de Chiapas le otorgó una mención especial de reconocimiento al mérito juvenil de investigación.

Es miembro de la UGM y de la Sociedad Sismológica de América (SSA). Fue miembro del Sistema Estatal de Investigadores (SEI, 2005-2009) en la categoría de Investigador Científico Nivel I y es autor de algunos artículos científicos y memorias de carácter nacional e internacional.

De 2003 a 2006 fue profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNACH. En este período fue responsable técnico del proyecto “*Espesores de sedimentos bajo la ciudad de Tuxtla Gutiérrez*”.

Desde 2004 ha sido profesor de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), en donde ha sido miembro del Consejo Editorial Universitario (2005-2009), Comité de Evaluación de la Escuela de Ingeniería Ambiental (2006-2008), Comité Editorial de la revista Lacandonia (2007-2009), Comisión Institucional de Investigación y Posgrado (2007), Consejo Académico de la DES de Ingenierías (2008), responsable de la organización y difusión de los Ciclos de Seminarios de la Escuela de Ingeniería ambiental y miembro (2004-2008) y responsable (2007-2008) del cuerpo académico “*Geomática e hidrología*”.

Actualmente es líder de la Línea de Generación y/o Aplicación del Conocimiento *Vulnerabilidad y peligro de fenómenos naturales* del Cuerpo Académico *Estudios ambientales y riesgos naturales* y es responsable técnico de los proyectos de investigación *Vulnerabilidad sísmica de estructuras esenciales ante contingencias en Tuxtla Gutiérrez* (desde 2005) y *Monitoreo acelerométrico de Ciudad Universitaria* (desde 2008).

Rodolfo José Palacios Silva

Especialista en el manejo de Sistemas de Información Geográfica. Biólogo egresado en 1999 de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, adscrito a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas desde el año 2006 y colaborador del Cuerpo Académico de Estudios Ambientales y Riesgos Naturales desde su formación en el 2008. Autor de varias publicaciones en revistas arbitradas nacionales e internacionales, ca-

pítulos de libros y expositor en congresos nacionales e internacionales sobre temas que relacionan la Ecología con el desarrollo sostenible, particularmente, estudios de perturbaciones naturales (plagas, incendios y erosión) y su impacto tanto en la dinámica de sistemas naturales (bosques y selvas) como a diversos sistemas de manejo (áreas protegidas, zonas de cultivo y de aprovechamiento forestal). Actualmente es profesor de las materias de Ecología, Biología y Sistemas de Información Geográfica en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH y asistente de los cursos de Diseño Experimental y Estadística en los posgrados de Salud Pública y Desarrollo Sustentable.

Sergio López Mendoza

Biólogo egresado de la Facultad de Ciencias, UNAM. Doctor en Ciencias por la UNAM. Realizó una estancia post-doctoral en el Colegio de la Frontera Sur, unidad San Cristóbal. Ha impartido cursos de Ecología, Evolución y Estadística, tanto a nivel licenciatura como posgrado. Actualmente es profesor de Tiempo Completo de la Escuela de Ingeniería Topográfica, donde imparte los cursos de Sistemas de Información Geográfica y Análisis de Datos Geográficos. Tiene cuatro artículos publicados de investigación en revistas internacionales y es miembro de los Sistemas Estatal y Nacional de Investigación. Sus áreas de interés son la diversidad biológica, la evolución de los sistemas reproductivos y la restauración ecológica a nivel de paisaje.

Alondra Gil Ríos

Nació en Tonalá, Chiapas, en el año de 1986. Toda su vida ha vivido en Arriaga, Chiapas, lugar donde cursó sus estudios a nivel primaria, secundaria y bachillerato. En el año 2005, inició sus estudios de licenciatura en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez; actualmente es egresada y se encuentra elaborando su tesis de licenciatura, con el tema de erosión de suelos. Ha participado con ponencias locales e internacionales, como el marco de la celebración del Día Mundial del Medio Ambiente, realizado en Tuxtla

Gutiérrez, Chiapas en el año 2008, y la 15^a. Semana Nacional de Ciencia y Tecnología, con sede en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en el año 2008, a nivel local y una ponencia internacional, realizada en la ciudad de Trujillo, Perú, en el Congreso Internacional de Ecología y Medio Ambiente, con el tema *Estimación de la pérdida de suelo en una microcuenca del sureste de México*, en el año 2009. Ha colaborado con la asistencia técnica para la elaboración de estudios de factibilidad ambiental en 2009.

Pedro Vera Toledo

Ingeniero químico y especialista en Ingeniería Ambiental, por el Tecnológico de Tuxtla, maestrante en Ingeniería del Medio Ambiente. Coordinador de la licenciatura en Ingeniería Ambiental de la UNICACH, imparte cursos de: Introducción a la Ingeniería ambiental, Evaluación del impacto ambiental, Química ambiental y tratamiento de residuos, manejo de residuos sólidos no peligrosos; en Ingeniería ambiental, ha participado y dirigido proyectos de investigación en materia de residuos sólidos y agua residual. Ponente en congresos nacionales e internacionales con temas de manejo tratamiento y disposición final de residuos sólidos no peligrosos. Consultor en diversos proyectos y estudios ambientales. Miembro activo de la red nacional de promotores ambientales Giresol. Área de interés Residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

Hugo Alejandro Nájera Aguilar

Cursó la Licenciatura en Ingeniería Bioquímica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez obteniendo el título en el año de 1997. De 1996 a 1999 efectuó los estudios de maestría en la Universidad Autónoma de Yucatán obteniendo el grado de maestro en Ingeniería Ambiental en el año de 1999.

Desde Agosto de 2005 es profesor de medio tiempo de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), impartiendo las asignaturas de Química Inorgánica, Química Orgánica, Química Ambiental y Manejo de Residuos Sólidos I. A partir de enero del 2008 es profesor

de tiempo completo adscrito a la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH.

Su línea de investigación está enfocada hacia el manejo de los residuos sólidos, específicamente al relacionado con la disposición final. Ha participado en proyectos de investigación como es el caso del denominado *Diagnóstico ambiental de los sitios de disposición final de Residuos Sólidos Municipales en las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de Las Casas*, en el cual fungió como responsable técnico. Actualmente dirige el proyecto titulado *Pruebas de tratabilidad en lixiviados maduros*, el cual inició en agosto de 2008 y concluirá en julio de 2010.

Del 2002 a la fecha ha participado en la realización de artículos, así también ha realizado presentaciones en congresos nacionales e internacionales. Cuenta con más de 15 ponencias enfocadas al área de residuos sólidos y ha participado en la elaboración de un capítulo de libro.

Por otro lado, también se desempeña como consultor ambiental realizando diversos estudios ambientales tanto a nivel estatal como federal.

Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Ingeniero en Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en diciembre de 1996, realizó estudios de maestría en Ciencias (agosto 2000) y doctorado en Ciencias (noviembre 2004) con especialidad en óptica en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE).

Cuenta con 36 artículos publicados que incluyen memorias en extenso de congresos, artículos nacionales e internacionales. Participante en congresos nacionales e internacionales. Director de 3 tesis de licenciatura concluidas.

Profesor investigador de tiempo completo en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) desde julio del 2007 en donde imparte las cátedras de Métodos Numéricos, Mecánica de fluidos I y Mecánica de fluidos II.

Sus principales líneas de investigación son la investigación de las propiedades de la fibra óptica para la aplicación en el desarrollo de sen-

sores químicos, biológicos y físicos. Así como también, investigación y desarrollo de sistemas láser para el monitoreo atmosférico.

Director del proyecto investigación y construcción de sensores de fibra óptica con aplicación en la detección de gases contaminantes en rellenos sanitarios y redes de drenaje y alcantarillado público, financiado por PROMEP.

Candidato al Sistema Nacional de Investigadores y cuenta con el reconocimiento al perfil deseable PROMEP.

Carlos Manuel García Lara

Originario de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, es egresado del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en donde obtuvo el doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica en el 2005, sus estudios de doctorado los realizó de 2001 a 2004, en este mismo centro realizó sus estudios de maestría de 1996 a 1998, obteniendo el grado en el año 2000, es egresado del ITTG de la generación 1991-1995, contando con beca del INAOE para la realización de la tesis de licenciatura, obteniendo el grado en 1997.

Profesor de tiempo completo en la UNICACH, desde 2008, en donde imparte las cátedras de Física y Termodinámica en la Escuela de Ingeniería Ambiental, así como en el programa de maestría en Ciencias en desarrollo sustentable en donde ha impartido e imparte las cátedras de Matemáticas aplicadas, Modelos matemáticos en Ingeniería Ambiental y Física Aplicada, ha participado en el programa de doctorado en desarrollo sustentable de la UNICACH impartiendo el taller de redacción de textos científicos; de septiembre de 2006 a octubre de 2008 fue Coordinador de la Escuela de Ingeniería Ambiental. Actualmente se encuentra desarrollando un proyecto PROMEP para el apoyo de fomento a la generación y aplicación innovadora del conocimiento.

Cuenta con publicaciones en revistas nacionales e internacionales, ha participado en congresos nacionales e internacionales, ha realizado dos estancias de investigación, una en el INAOE y la última en el CIO, ha dirigido o participado en 3 proyectos con financiamiento externo.

Ha participado en al menos 12 cursos de capacitación y actualización docente, cuenta con un reconocimiento a la excelencia académica.

Fue miembro de la Sociedad Francesa de Óptica de 2004 a 2005, fue responsable del C. A. Estudios Ambientales y Riesgos Naturales de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH desde 2008 hasta 2010, actualmente es miembro de Sociedad Mexicana de Óptica, del Sistema Nacional de Investigadores, del Sistema Estatal de Investigadores y cuenta con el reconocimiento de perfil PROMEP.

Rectoría

Ing. Roberto Domínguez Castellanos
RECTOR

Mtro. José Francisco Nigenda Pérez
SECRETARIO GENERAL

C.P. Miriam Matilde Solís Domínguez
AUDITORA GENERAL

Lic. Adolfo Guerra Talayero
ABOGADO GENERAL

Lic. Ricardo Cruz González
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN

Mtro. Pascual Ramos García
DIRECTOR DE PLANEACIÓN

Lic. José Ignacio Zepeda Pineda
DIRECTOR DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN

Mtro. Florentino Pérez Pérez
DIRECTOR ACADÉMICO

L.R.P. Aurora Evangelina Serrano Roblero
DIRECTORA DE SERVICIOS ESCOLARES

Dr. Eduardo E. Espinosa Medinilla
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Lic. Noé Fernando Gutiérrez González
DIRECTOR DE SERVICIOS DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

Mtro. Jaime Antonio Guillén Albores
DIRECTOR DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

Mtra. Brenda María Villarreal Antelo
DIRECTORA DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN

Dependencias de Educación Superior

Mtro. Jesús Manuel Grajales Romero
DIRECTOR DE OFERTA EDUCATIVA REGIONALIZADA

Mtra. Érika Judith López Zúñiga
DIRECTORA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA NUTRICIÓN
Y ALIMENTOS

Dr. Ernesto Velázquez Velázquez
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

C.D. Jaime Raúl Zebadúa Picone
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE CIENCIAS ODONTOLÓGICAS
Y SALUD PÚBLICA

Mtro. Martín de Jesús Ovalle Sosa
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS

Ing. Francisco Félix Domínguez Salazar
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Antrop. Julio Alberto Pimentel Tort
DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIO SUPERIORES EN ARTES

Mtro. Carlos Gutiérrez Alfonso
DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MÉXICO
Y CENTROAMÉRICA (CESMECA)

Dra. Silvia Ramos Hernández
DIRECTORA DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN DE
RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Lic. Diego Martín Gámez Espinosa
DIRECTOR DEL CENTRO DE LENGUAS

Dr. Alejandro Nettel Hernanz
DIRECTOR DEL CAMPUS DEL MAR

**Colección
Jaguar**



UNICACH

**Estudios ambientales
y riesgos naturales.
Aportaciones al sureste de México II**

Se terminó de imprimir en el mes de marzo de 2011, con un tiraje de 500 ejemplares, en los talleres de Desarrollo Gráfico Editorial, S.A. de C.V. Teléfono: (55) 5-605-81-75, México, D.F. El diseño tipográfico estuvo a cargo de Salvador López Hernández, la corrección de Karen Dianne Limón Padilla y el cuidado de la edición de la Oficina Editorial de la UNICACH, durante el rectorado del Ing. Roberto Domínguez Castellanos.



S NATURALES
ureste de México
MBIENTALES
NATURALES

Estudios Ambientales y Riesgos Naturales ofrece un espacio de entendimiento y reflexión sobre problemas ambientales. Está compuesto de siete capítulos sustentados en investigaciones experimentales y bibliográficas que contraponen diferentes puntos de vista y presentan a la consideración de la comunidad universitaria y público en general, temas además de interesantes, actuales e imprescindibles, independientemente del área de conocimiento en la que estemos especializados.

El contenido abarca una gran variedad de temas de investigación, agrupados en dos áreas de interés como son fenómenos naturales y fenómenos antropogénicos, ofreciendo un panorama general entorno a varios temas, entre ellos: el análisis del flujo del viento debido a las características topográficas del área de estudio, a las características de las placas tectónicas que intervienen en los procesos de generación de sismos en la región, la problemática de erosión del suelo en la microcuenca del río francés, a los antecedentes en materia de generación y disposición de residuos sólidos en el Estado de Chiapas, al manejo de lixiviados en el estado y de manera particular, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, a la fibra óptica como una herramienta para la detección y cuantificación de sustancias contaminantes y finalmente a los sistemas interferométricos y su posible aplicación en la detección de variables físicas.

Esta segunda aportación del cuerpo académico, *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales*, pretende integrar una amplia gama de ciencias que convergen en torno a la Ingeniería Ambiental, con la intención de concientizarnos en la importancia de la interdisciplinariedad en el desarrollo del medio ambiente.

