



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

ESCENARIOS ESPACIALES EXPLÍCITOS DE USO MÚLTIPLE DE  
COMBUSTIBLES PARA COCCIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO  
RESIDENCIAL MEXICANO Y SU POTENCIAL DE MITIGACIÓN DE GASES DE  
EFECTO INVERNADERO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MONTSERRAT SERRANO MEDRANO

TUTOR PRINCIPAL  
OMAR MASERA CERUTTI, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN  
ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD

COMITÉ TUTOR  
ADRIAN GHILARDI, CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFIA  
AMBIENTAL  
FABIO MANZINI POLI, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGÍA  
RENOVABLE  
CLAUDIA SHEINBAUM PARDO, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
VICTOR BERRUETA SORIANO, GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE  
TECNOLOGÍA RURAL APROPIADA A.C.

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2016

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: DR. ADRIÁN GHILARDI ÁLVAREZ

Secretario: DR. FABIO MANZINI POLI

Vocal: DR. OMAR MASERA CERUTTI

1<sup>er</sup> suplente: DRA. CLAUDIA SHEINBAUM PARDO

2<sup>do</sup> suplente: DR. VÍCTOR MANUEL BERRUETA SORIANO

### **Lugar o lugares donde se realizó la tesis:**

Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México

## **TUTOR DE TESIS**

DR. OMAR MASERA CERUTTI

---

**FIRMA**



## **DEDICATORIA**

Con todo mi amor, dedico esta tesis a mi hija Lucianita y a mi esposo Jorge.

A mis padres: Román Serrano y Yolanda Medrano; así como a mi hermano Román.

También a mis abuelitos: Esther, Blas y Valentina.

## **AGRADECIMIENTOS**

### *Institucionales*

Esta tesis fue posible gracias a la ayuda de muchas personas. En particular quiero agradecer al Dr. Omar Masera Cerutti por la guía, el apoyo y la paciencia durante el desarrollo de la misma. Sin su atención esmerada e incondicional, este trabajo no hubiera sido posible. Muchas gracias por las pláticas, los muchos ratos amenos y las oportunidades para desarrollarme no sólo académica y profesionalmente, sino como persona.

A la Dra. Claudia Sheinbaum Pardo, por todo el apoyo recibido durante cada una de las etapas de esta investigación doctoral. Sus comentarios fueron muy valiosos para mejorar este documento. Muchas gracias por la oportunidad de poder colaborar en proyectos que me permitieron fortalecer mi formación académica; a los doctores Víctor Berrueta Soriano y Adrián Ghilardi, por sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorar esta tesis. Igualmente mil gracias por invitarme a participar en proyectos que me permitieron aplicar los conocimientos adquiridos en esta etapa académica. Al Dr. Fabio Manzini Poli, por sus enriquecedores comentarios para mejorar esta investigación doctoral.

Al Dr. Carlos García Bustamante, por compartirme sus conocimientos, por las reflexiones y los insuperables comentarios para el desarrollo de esta tesis. Al Ing. Enrique Riegelhaupt y a la Dra. Ilse Ruiz Mercado por sus observaciones y reflexiones sobre este tema de investigación.

A los técnicos académicos, al M.C. René David Martínez Bravo, por su apoyo en el desarrollo de la caracterización de las especies vegetales para estimar la oferta de leña, la cual fue muy importante para el desarrollo de esta investigación; Heberto Ferreira Medina,

Alberto Valencia García, José Antonio Navarrete Pacheco y Hugo Alejandro Zavala Vaca por su apoyo en la instalación y capacitación para el uso de software especializado durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a la UNAM, a la Facultad de Ingeniería (FI) y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por permitirme realizar mis estudios de doctorado. A todos los investigadores y trabajadores de ambas dependencias universitarias por brindarme su apoyo.

A los contribuyentes que, a través de una beca Conacyt, financiaron mis estudios, conjuntamente con el UNAM-PAPIIT bajo el proyecto IT101512, y a la UMSNH.

## *Personales*

Expreso aquí toda mi gratitud a mi hija Luciana y a mi esposo Jorge, por todo el apoyo incondicional, las porras, el tiempo, la comprensión durante mis ausencias, por inspirarme y, sobre todo, por su amor. Sin ustedes no lo hubiera logrado.

A mis papás y mi hermano, gracias por todo lo que me han dado: su amor, todo su apoyo y comprensión durante toda mi vida. Los admiro y amo. A mi cuñada Samanta, por las porras y la camaradería en este camino. A mi suegra, también por todo su apoyo.

A la familia Medrano Soto, a mis abuelitos Esther y Blas, a mis tíos y primos, por los rezos y el aliento, en particular por la comprensión ante mis ausencias.

A mi tía Maricela, por mantenerse siempre pendiente de mí.

A mis amigos del IIES-REMBIO: Carlos, René, Hilda, Iván, Víctor, Adrián, Myriam, Ilse, Alfredo, Raúl, Tania, Jorge, Vane, Gaby, Karla, Víctor R., Paulo, Ana Lau, Manu y muchos otros. Gracias por su agradable compañía e invaluable apoyo.

A mi Libi, Cincin, Johanna, Jav, Erika, Esther y Bill, por sus palabras de aliento, a pesar de la distancia.

A mis amigos, Ruth y Raúl, por mantenerse al tanto de mí durante este proceso.

A mis amigos de siempre Lore, Libi, Miyi, Sandra, Olga, Paco, Moni, Quique, Omega y Betzy.

Y, finalmente, como mencionó mi amigo Carlos, “gracias a todos los que han luchado por un país mejor, desde sus respectivas trincheras, con sus abundantes o limitados recursos”.

## CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Dedicatoria</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Lista de gráficos</b>  | <b>11</b> |
| <b>Resumen</b>  | <b>14</b> |
| <b>Introducción</b>   | <b>17</b> |
| Objetivos: general y específicos  | 22        |
| <b>1 Marco teórico</b>  | <b>28</b> |
| 1.1 Implicaciones del uso de leña   | 28        |
| 1.2 Transición energética: del modelo “energy ladder”<br>al uso múltiple de combustibles (o “stacking”) | 30        |
| 1.2.1 Intervenciones con estufas eficientes de leña   | 33        |
| 1.3 Aspectos espaciales del uso de leña en México   | 34        |
| 1.3.1 Modelo WISDOM   | 34        |
| 1.4 Escenarios y modelación energética  | 36        |
| <b>2 Metodología</b>  | <b>40</b> |
| 2.1 Escenario base  | 40        |
| 2.1.1 Estimación del consumo de leña para el año base 2010  | 40        |
| Estimación de la saturación usuarios de leña  |           |
| Estimación consumo per cápita   |           |
| Proyección del consumo de leña al año 2030  |           |
| Proyección de la saturación por uso de leña   |           |
| Proyección de población   |           |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.1.2    | Estimación de las emisiones de los GEI por uso de leña   | 48        |
|          | Factores de emisión  |           |
|          | Estimación del factor de no renovabilidad (FNRB)   |           |
| 2.2      | Escenarios alternativos  | 54        |
| 2.2.1    | Estimación de la penetración de estufas<br>eficientes instaladas por programas gubernamentales               | 54        |
| 2.2.2    | Establecimiento de las metas de sustitución<br>de tecnologías convencionales por tecnologías eficientes      | 55        |
| 2.2.3    | Penetración de estufas eficientes a nivel municipal,<br>del acuerdo al índice de prioridad de cada escenario | 55        |
| <b>3</b> | <b>Resultados</b>  | <b>58</b> |
| 3.1      | Escenario base   | 58        |
| 3.1.1    | Consumo de leña  | 58        |
|          | Consumos per cápita de leña espacialmente distribuidos   |           |
|          | Consumo y usuarios totales de leña   |           |
|          | Consumo de leña espacialmente distribuido  |           |
| 3.1.2    | Emisiones de gases efecto invernadero (GEI)  | 65        |
|          | Obtención de la fracción no renovable del uso de leña  |           |
|          | Área de bosque accesible de oferta de leña   |           |
|          | Emisiones de gases efecto invernadero  |           |
| 3.2      | Escenarios alternativos  | 76        |
| 3.2.1    | Estufas eficientes instaladas por programas gubernamentales  | 76        |
| 3.2.2    | Sustitución de fogones por estufas eficientes de leña  | 80        |
| 3.2.3    | Penetración de estufas eficientes de leña por municipio,   |           |

|  |            |
|--|------------|
| de acuerdo al índice de prioridad de escenario   | <b>81</b>  |
| 3.2.4 Consumos alternativos de leña por escenario  | <b>89</b>  |
| 3.2.5 Emisiones de gases efecto invernadero (GEI)  | <b>90</b>  |
| Comparación de los valores iniciales del FNRB de los municipios<br>en donde se introdujeron estufas eficientes   |            |
| Proyección de los valores del factor de no renovabilidad (FNRB)  |            |
| Emisiones de los GEI   |            |
| 3.2.6 Proyección de la mitigación de los GEI de los escenarios alternativos  | <b>96</b>  |
| 3.2.7 Impacto de la variación del valor del FNRB en la proyección<br>de la mitigación de los GEI de los escenarios alternativos                            | <b>99</b>  |
| <b>Conclusiones</b>  | <b>101</b> |
| <b>Fuentes</b>   | <b>105</b> |
| <b>Apéndices</b>   | <b>117</b> |
| 1. Municipios prioritarios de leña en 6 y 5 de los escenarios de estudio   | <b>117</b> |
| 2. “Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico”  | <b>129</b> |
| 3. Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate<br>change: the case of Mexico’s Patsari improved cookstove Project” | <b>137</b> |

## LISTA DE GRÁFICOS

### *Figuras*

- 1.1 Diagrama del modelo clásico de “escalera energética” (energy ladder)
- 1.2 Explicación gráfica del modelo WISDOM
- 2.1 Diagrama de flujo para estimar la tasa de crecimiento anual acumulada de la saturación de usuarios de leña
- 2.2 Diagrama de flujo para estimar la proyección de la saturación de usuarios exclusivos de leña
- 3.1.1 Distribución del consumo per cápita exclusivo de leña por municipio 2010
- 3.1.2 Distribución espacial del consumo residencial de leña en México 2010
- 3.1.3 Distribución espacial del consumo residencial de leña en México 2030
- 3.1.4 Distribución espacial del consumo per cápita promedio para usuarios totales de leña (exclusivos y mixtos) 2010
- 3.1.5 Distribución espacial de saturaciones críticas de usuarios de leña (exclusivos y mixtos) 2010
- 3.1.6 Clasificación de pendientes del terreno
- 3.1.7 Clasificación de las vías de comunicación de acuerdo con su facilidad de tránsito
- 3.1.8 Clasificación de ríos de acuerdo con el tipo de caudal
- 3.1.9 Identificación de cuerpos de agua
- 3.1.10 Mapa de fricción
- 3.1.11 Mapa de distancia-costo
- 3.1.12 Mapa de zonas accesibles para aprovechamiento de leña

- 3.1.13 Valores del factor de no renovabilidad (FNRB) 2010
- 3.1.14 Proyección de valores del FNRB en 2020 para el escenario base
- 3.2.1 Distribución de las estufas eficientes de leña instaladas por Sedesol y Conafor en 2013
- 3.2.2 Número acumulado de estufas eficientes de leña introducidas al año 2030
- 3.2.3 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 1
- 3.2.4 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 2
- 3.2.5 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 3
- 3.2.6 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 4
- 3.2.7 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 5
- 3.2.8 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 6
- 3.2.9 Municipios prioritarios para la introducción de estufas eficientes de leña
- 3.2.10 Consumo anual de leña residencial para el escenario base y los seis escenarios alternativos 2030
- 3.2.11 Ahorro anual acumulado de leña para el escenario base y los seis escenarios alternativos 2030
- 3.2.12 Proyección de los valores del FNRB durante 2024 para el escenario alternativo 1
- 3.2.13 Proyección de los valores del FNRB en 2030 para el escenario alternativo 1

- 3.2.14 Emisiones anuales de los GEI por uso de leña en el sector residencial para los seis escenarios alternativos
- 3.2.15 Mitigación anual acumulada de los GEI por uso de leña en el sector residencial para los seis escenarios alternativos
- 3.2.16 Mitigación acumulada de los GEI por uso de leña en el sector residencial para los seis escenarios alternativos
- 3.2.17 Distribución espacial de la mitigación acumulada de los GEI por municipio en el escenario alternativo 1 en 2030

### *Cuadros*

- 3.1 Factores de emisión de fogones tradicionales y estufas eficientes de leña en México
  - 3.1.1 Estimación del consumo y usuarios de leña 2010-2030
  - 3.1.2 Variabilidad de los valores en indicadores del uso de leña por municipio 2010-2030
- 3.2 Estufas eficientes de leña instaladas por organismos gubernamentales y no gubernamentales hasta el año 2013
  - 3.2.1 Estufas eficientes de leña instaladas por organismos gubernamentales y no gubernamentales hasta el año 2013
  - 3.2.2 Número de usuarios de leña, fogones y estufas eficientes instaladas por Conafor y Sedesol hasta el año 2013
  - 3.2.3 Diferencia entre los valores iniciales del FNRB según los escenarios de penetración de estufas eficientes
  - 3.2.4 Municipios con algún valor del FNRB en 2014 (escenario base) y en 2030 (escenario alternativo 1)
  - 3.2.5 Análisis de sensibilidad del factor de no renovabilidad (FNRB) por uso de leña

## RESUMEN

**E**l uso tradicional de biomasa con fines energéticos en el mundo representa casi un 10 por ciento del uso global de energía primaria. Aproximadamente 2,600 millones de personas (casi el 40 por ciento de la población mundial) la utilizan como fuente principal de abastecimiento energético para cocinar, principalmente en fogones abiertos de baja eficiencia. En México, el uso de la leña sigue siendo muy relevante, aun cuando el gobierno ha alentado durante décadas el uso de combustibles “modernos”, como el gas LP. A pesar de la repercusión global y regional del consumo de leña, se desconoce la dinámica temporal y espacial del uso de este combustible, así como sus impactos ambientales. El objetivo de esta tesis es contribuir al modelado espacial y al entendimiento de los patrones futuros de uso tradicional de leña para cocinar, así como su impacto ambiental en los países en desarrollo, tomando a México como referencia. Asimismo se analizan los impactos ambientales, en términos de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por la sustitución del uso de tecnologías tradicionales por estufas eficientes de leña, a través de seis escenarios alternativos que se describen a continuación:

- 1) En el primer escenario alternativo de sustitución de fogones por estufas eficientes de leña, se priorizaron los municipios donde el consumo de leña resultó con un cien por ciento de no renovabilidad.
- 2) Los municipios prioritarios fueron aquellos donde se ubicó el mayor número de usuarios mixtos de leña (de leña y de gas LP).

- 3) Se incluyeron los municipios que presentaron el mayor número de usuarios totales de leña (usuarios exclusivos y usuarios mixtos).
- 4) Se priorizaron los municipios donde el balance de leña resultó con el mayor déficit.
- 5) Se incluyeron los municipios donde se presentó el mayor porcentaje de pobreza total (incluida las pobrezas moderada, extrema y por carencias).
- 6) Finalmente, la priorización de los municipios meta para el sexto escenario alternativo se realizó mediante la estimación de sus emisiones de los GEI en el año de estudio base, que es 2010.

En México, se calculó que en 2010 existían cerca de 22.5 millones de usuarios tradicionales de leña y su consumo alcanzó los 19.4 MtMS (aproximadamente 32 Mm<sup>3</sup>). Se proyectó que el número de usuarios y el consumo de leña se mantendrá prácticamente constante hasta el 2030, con casi 22 millones de usuarios y 18.4 MtMS. Las emisiones de los GEI proyectadas durante el periodo 2014-2030, bajo el escenario base, fueron de 15.4 MtMS anuales. La mitigación máxima y mínima acumulada para el periodo en cuestión fue de 87.4 y de 71.8 MtCO<sub>2e</sub> millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> y se presentaron, respectivamente, en los escenarios alternativos 1 y 2; que en cada cual representó una reducción máxima del 33 por ciento y mínima de 27 puntos porcentuales.

Las zonas donde mayor mitigación se presentó se encuentran distribuidas en los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas; asimismo, se observó una mitigación considerable en ciertos municipios del centro del país.

Por otra parte, se conservó este resultado en términos cualitativos durante el análisis de sensibilidad para el factor de no renovabilidad (consistente en la fracción de leña obtenida

de manera no renovable del total de la leña usada en cierta delimitación geográfica, que en lo sucesivo utilizaré con las siglas FNRB).

Las zonas del país donde se encuentran los 135 municipios prioritarios para la introducción de las estufas eficientes de leña que coinciden para los seis escenarios, se ubican en Chiapas, Veracruz, Puebla, Estado de México, Guerrero y Michoacán.

## INTRODUCCIÓN

**L**a biomasa usada con fines energéticos (o bioenergía) es muy importante, ya que proveyó cerca del 10 por ciento (50.3 EJ) de la energía primaria global en 2008. De estos 50.3 EJ, el uso tradicional de leña, dirigido a satisfacer principalmente las necesidades de cocción y calefacción en los hogares más pobres de los países en vías de desarrollo, representa unos 30.7 EJ.<sup>1</sup> Si se toman en cuenta estimaciones que incluyen sectores informales que generalmente son omitidos, se calcula que los biocombustibles sólidos, especialmente la leña y el carbón vegetal, contribuyen actualmente con casi un 14 por ciento de la energía primaria mundial.<sup>2</sup> El uso tradicional de leña también está estrechamente relacionado con retos actuales del desarrollo sustentable como problemas ambientales, tanto locales como globales, cuestiones de salud y de género y, precisamente, con el acceso a energía limpia.<sup>3</sup>

Se calcula que para casi 2,600 millones de personas en el mundo la leña es la principal fuente de abastecimiento energético en la cocción doméstica.<sup>4</sup> Cuando el uso de este recurso se hace mediante tecnologías tradicionales (por ejemplo, fogones abiertos), los usuarios tienen repercusiones en su salud, calidad de vida y dinámicas social y familiar. Por lo general, la combustión de leña en dispositivos tradicionales es incompleta y se emiten contaminantes como material particulado (PM) y monóxido de carbono (CO). La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha calculado que casi cuatro millones de personas en el mundo mueren anualmente debido a la exposición a este tipo de contaminantes intramuros.<sup>5</sup> De ahí que sea importante garantizar el acceso limpio al consumo de leña por medio de dispositivos eficientes.

La baja eficiencia de los dispositivos tradicionales, entre 10 y 20 por ciento,<sup>6</sup> comparada con los dispositivos de gas LP, electricidad, o estufas mejoradas (55, 70 y 30-50 por ciento, respectivamente),<sup>7-9</sup> es otro factor que justifica su sustitución.

Pese a que el gas LP es el otro gran combustible residencial a escala mundial, con casi dos mil millones de usuarios, el sector doméstico (residencial y comercial) utiliza en promedio el 50 por ciento de su demanda mundial),<sup>10</sup> la transición hacia los dispositivos que usen este combustible “moderno” es difícil.

Diversos factores influyen para que se sustituyan totalmente las tecnologías y combustibles tradicionales, por ejemplo, la mayoría de las combinaciones tanto de dispositivos como de combustibles más eficientes, como las estufas de gas LP o electricidad, no cubren simultáneamente todas las tareas que los dispositivos tradicionales cumplen (como la preparación compleja de alimentos locales, calentamiento, etc.).

En su vertiente económica, una familia pobre no siempre tiene el dinero para garantizar el abasto de gas LP, o no lo usa para tareas de cocción que demanden un tiempo prolongado de preparación.<sup>3</sup> Al pasar de un dispositivo tradicional a uno más eficiente, generalmente se presenta una combinación de ambos (*stacking*, por razones no sólo económicas, sino de tradiciones culturales, sociales, así como por el sabor de los alimentos.<sup>11, 12</sup>

Debido al interés en reducir el uso tradicional de bioenergía, así como mitigar sus impactos, han tenido lugar varias intervenciones en el ámbito doméstico. Especialmente, se ha promovido la distribución de estufas eficientes de leña, en los niveles global y nacional.<sup>13, 14</sup>

En México, la principal fuente de energía en los hogares rurales es la leña. Su importancia se debe, entre otros factores, a su accesibilidad económica y ambiental, así

como a factores sociales.<sup>15-18</sup> El gas LP ha sido el principal sustituto y complemento de la leña en cuanto a cocción se refiere a nivel nacional. El uso del gas LP ha tenido una tendencia creciente, principalmente en áreas urbanas, desde los años setenta, aunque también se ha difundido en el sector rural.<sup>19</sup> Más que sustituir directamente a la leña, se ha documentado que el gas LP se utiliza de manera complementaria con aquel combustible, sobre todo en hogares rurales y periurbanos.<sup>20</sup>

Como se señaló anteriormente, el uso tradicional de biomasa conlleva impactos medio-ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero y forzadores climáticos de vida corta (FCVC) que contribuyen al cambio climático, debido a que, cuando la extracción de leña excede la tasa de regeneración de las fuentes de abastecimiento, existe una emisión neta de CO<sub>2</sub> (la leña se extrae de manera no sustentable, por lo cual deja de ser una fuente renovable de energía).

Además, cuando se usan dispositivos tradicionales, la combustión se realiza de manera incompleta, y es aquí cuando, además del bióxido de carbono, se liberan forzadores climáticos de vida corta (o FCVC), por ejemplo, metano y carbono negro. Actualmente se calcula que el uso tradicional y no sustentable de leña contribuye con un 2 por ciento en las emisiones totales de los GEI, y hasta en 30 por ciento de las de carbono negro.<sup>21, 22, 23</sup>

Debido a los impactos antes citados, es relevante estudiar la dinámica de los patrones del uso tradicional de biomasa. La complejidad del modelado, tanto de la oferta como la demanda de leña, depende de la disponibilidad de información del sitio o región de estudio. Un aspecto importante es determinar el impacto del uso tradicional de leña sobre las fuentes de abastecimiento o sobre la oferta. Este impacto dependerá de la tasa de extracción del recurso leñoso en el área de interés, pues cuando esta tasa es mayor que la productividad del bosque, existe un uso no renovable de biomasa que ocasiona degradación o

deforestación del bosque, así como la emisión de bióxido de carbono a la atmósfera.<sup>3</sup> La fracción de leña que se recaba de manera no renovable (FNRB) se logra relacionando la demanda y la cantidad de leña que se obtiene sustentablemente (por ejemplo, a partir del incremento anual medio, o IMA, del recurso leñoso).

La estimación precisa de la demanda y de la oferta de leña es complicada, pues ambos aspectos varían de un sitio a otro; por ejemplo, aunque en algunas ocasiones la demanda se calcula a partir de estadísticas nacionales, no se sabe con precisión qué tanta leña se recolecta o se compra en mercados informales. Tampoco es posible precisar los sitios específicos de oferta de leña, puesto que estos dependen principalmente de la cobertura vegetal.<sup>24, 25</sup>

Existen diversos estudios en los que se ha modelado la demanda y la oferta de leña. De hecho, los primeros análisis datan de los años setenta, y se impulsaron gracias a la llamada “other energy crisis”, en la que se predecía una escasez severa de biomasa con fines energéticos.<sup>26</sup> En las últimas dos décadas, se han realizado diversos estudios acerca de la dinámica entre demanda y oferta de leña, con enfoques temporales, espaciales y escalares.

Particularmente, la contribución de los estudios espacio-temporales ha sido importante, pues los patrones de oferta y demanda de leña varían de un lugar a otro y, por ende, también sus impactos ambientales, de salud y sociales.<sup>24</sup>.

Como puntualizan Masera *et al.*,<sup>3</sup> a pesar de que los análisis con una cobertura geográfica amplia permiten identificar zonas prioritarias, las generalizaciones acerca del uso de leña encubren su variabilidad a través del territorio y en el tiempo. En cambio, los estudios a nivel local permiten tener resultados más confiables, pero requieren de mayores esfuerzos monetarios y logísticos.

Recientemente se realizaron otros estudios espacio-temporales en la reserva natural de Wolong, en el suroeste de China, acerca del impacto de la extracción de leña en el hábitat de los osos panda.<sup>27-31</sup>

En Kirguistán, Cantarello *et al.*<sup>32</sup> también utilizaron un modelo espacio-temporal para evaluar el impacto de la extracción de biomasa con fines energéticos, en la biodiversidad de una zona de bosques protegidos. Christensen *et al.*<sup>33</sup> también evaluaron los impactos de la extracción de leña sobre la biodiversidad en la región rural de Nepal, para balancear la extracción con la conservación.

De igual manera se han hecho estudios espacio-temporales en los que se exploran los impactos para reducir la demanda de biomasa (ya sea al sustituir tecnologías tradicionales de leña por tecnologías eficientes o, por un cambio en el tipo de combustible empleado).<sup>34-</sup>

37

A pesar de esto, los modelos que integran información temporal y espacial siguen siendo escasos, su alcance por lo general es local y la modelación de la demanda se hace de manera general.

En México, por ejemplo, el consumo de leña por vivienda y el porcentaje de población rural que emplea la leña para cocción (ya sea exclusivamente o en combinación con el gas LP) es muy heterogénea a nivel nacional.<sup>24</sup> De ahí que conocer más detalladamente estas variaciones espaciales y el tipo de consumo de leña (exclusivo o mixto) resulte fundamental para entender qué tipo de intervenciones tendrán más eficacia y en qué sitios, así como si es fundamental para determinar los posibles impactos ambientales futuros del consumo residencial de energía en México.

De hecho, en nuestro país se carece de escenarios detallados a mediano y largo plazo (es decir, la evolución futura) sobre las tendencias del consumo residencial de energía para

cocción de alimentos, desagregados espacialmente y que contemplen el uso múltiple de leña-gas LP. Tales elementos son esenciales para entender los impactos en la matriz energética nacional, en los impactos sociales y de salud en los usuarios, así como en las emisiones futuras de los GEI.

## **OBJETIVOS**

### **General**

El objetivo general de esta investigación es contribuir al modelado espacial y el entendimiento de los patrones futuros de uso tradicional de leña, así como su impacto ambiental en los países en desarrollo, tomando a México como referencia.

En particular, aquí se desarrolla un modelo espacio-temporal nacional de demanda de leña, el cual incluye el impacto del uso de tecnologías eficientes, en términos de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI).

### **Específicos**

Pese a que sólo son cuatro, destacan por lo siguiente:

- 1) Determinar la saturación y consumo de leña por municipio en México, a partir del año 2010 (incluyendo usuarios múltiples).
- 2) Desarrollar un modelo espacialmente explícito sobre la accesibilidad y uso múltiple de combustibles, que contemple variables biofísicas y socioeconómicas.

- 3) Analizar la evolución del uso múltiple de combustibles para cocción en el sector residencial mexicano, mediante la modelación de escenarios de distribución espacial de los combustibles de cocción a mediano plazo (año 2020) y largo plazo (año 2030), tomando en cuenta patrones históricos de uso (escenario de referencia) y acciones de uso eficiente (escenarios de las políticas públicas).
- 4) Determinar los impactos de los distintos escenarios en términos de la mitigación de emisiones de los GEI.

Para llevar a cabo los objetivos mencionados anteriormente, se desarrolló un modelo de proyección de consumo de leña al año 2030 en donde se tomó en cuenta la proporción de usuarios mixtos de leña (es decir, usuarios que usan leña y gas LP de manera simultánea). El modelo tomó en cuenta los datos de los censos de Población y Vivienda 1990 y 2000, acerca de la población que usaba leña como principal combustible para cocinar. De acuerdo con Díaz,<sup>38</sup> el uso de leña para cocción representa casi el 90 por ciento del uso de biomasa en el sector residencial, por lo que la cifra de personas que usan biomasa para preparar alimentos es una buena aproximación al número de usuarios exclusivos de leña.

Con base en estudios de caso, se ha determinado que los usuarios mixtos representan un 25 por ciento adicional a los usuarios exclusivos de leña.<sup>24, 38</sup> Para incluir el efecto del número creciente de usuarios mixtos<sup>11</sup> durante el periodo de proyección, se supuso que crecían a una tasa del 1 por ciento anual a partir del año base del modelo (2010), en los municipios donde la saturación (es decir, la proporción de usuarios exclusivos de leña entre la población total del municipio) de usuarios exclusivos de leña era menor del 75 por ciento.

El consumo per cápita se mantuvo constante, considerando que no hay una inclusión significativa de tecnologías de uso eficiente de leña. La población fue la determinada y proyectada en el Consejo Nacional de Población (Conapo).<sup>39</sup>

También se realizó una primera estimación a nivel nacional de la fracción de leña no renovable (FNRB) por municipio, para estimar los impactos ambientales del uso de biomasa, en términos de emisiones de los GEI. La estimación del FNRB se hizo a partir de la metodología Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM), desarrollada por Maserá y colaboradores.<sup>40, 41</sup> Esta metodología se define como “un método espacialmente explícito para destacar y determinar áreas prioritarias de intervención y apoyar la planeación y formulación de políticas relacionadas con el uso de la biomasa como fuente de bioenergía”.

La oferta sustentable, como se plantea en la metodología WISDOM, es la que se obtiene a partir del incremento medio anual (IMA) del recurso. Uno de los supuestos principales en este trabajo es que la leña utilizada proviene y se consume dentro del mismo municipio (es decir, en la misma unidad espacial). Por lo que no se consideran los flujos de oferta entre unidades espaciales contiguas o distantes.

Una vez concluido el modelo base de proyección del consumo de leña, se desarrollaron seis escenarios de uso alternativo, a través de la introducción de estufas eficientes. En los seis escenarios se distribuyeron estufas eficientes de leña para cubrir el cien por ciento de las viviendas usuarias, tanto exclusivas como mixtas, pero con distintos criterios de distribución espacial. Esto es, aunque la cantidad de estufas que se distribuyeron anualmente es similar en los seis escenarios, su distribución municipal se hizo con cinco diferentes criterios de priorización:

- 1) Por fracción de leña no renovable (es decir, donde la demanda excede la tasa de crecimiento de biomasa).
- 2) Por número total de usuarios mixtos.
- 3) Por número total de usuarios exclusivos de leña.
- 4) Por balance de leña.
- 5) Por pobreza total (es decir, porcentaje de pobreza por ingreso y por carencias).
- 6) Por emisiones de los GEI iniciales totales en el año base.

Así se analizó el efecto de la prioridad en la distribución espacial de las estufas eficientes en la mitigación de los GEI, al final del periodo de estudio. Para examinar el efecto de la variación en los valores del FNRB, en la mitigación estimada para cada escenario alternativo, se realizó un análisis de sensibilidad de este factor.

Se encontró que la modificación en la distribución espacial de estufas eficientes repercute considerablemente la mitigación de los GEI. La priorización de los municipios por su FNRB (en el escenario alternativo 1 o “EscAlt1”), es la que resulta con una mayor mitigación. Le siguen la priorización por balance de la leña y emisiones al año base (escenarios alternativos 4 y 6). Aunque la priorización por pobreza en el escenario alternativo 5 no se situó en los tres primeros lugares, conviene subrayar que fue la cuarta alternativa mejor situada (por encima del escenario alternativo 3, en el que se priorizaron los municipios con mayor número de usuarios totales de leña).

Además, con base en el análisis de sensibilidad, se observó que, aunque los valores absolutos de mitigación de cada escenario se modificaron, el impacto relativo en la mitigación de cada escenario permaneció constante; es decir, la distribución espacial de

estufas eficientes en el escenario alternativo 1 se mantuvo como la opción en la que la mitigación es mayor, seguida por las establecidas en los escenarios alternativos 4 y 6.

\* \* \*

Esta tesis está estructurada como se indica a continuación: en primer lugar, se encuentran el resumen y la introducción, con los objetivos general y específicos ahí mismo enunciados. En el primer capítulo se presenta el marco teórico en el que se sustenta este trabajo. Aquí se detallan las implicaciones del uso de leña en el sector residencial, los modelos teóricos con los que se han descrito los patrones de uso de biomasa residencial, los aspectos espaciales de los que depende y cómo se ha modelado y proyectado su uso a futuro.

En el segundo capítulo se presenta la metodología para el establecimiento del modelo y de los escenarios futuros. En tanto que el tercer capítulo lo conforman los resultados sobre consumos y emisiones del escenario base y de los seis escenarios alternativos.

En penúltimo lugar, se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios. Y como parte final se encuentran los anexos: en el primero se enlistan los 135 municipios prioritarios para introducir las estufas eficientes de leña (localidades que coinciden para seis y cinco de los escenarios).

En los anexos segundo y tercero se incluyeron los artículos, así como los hipervínculos a estos mismos —para quienes estén interesados en leerlos en línea— derivados de esta investigación: “Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico” publicado en la revista *Energy for Sustainable Development* (anexo 2) y “Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating

climate change: the case of Mexico's *Patsari* improved cookstove project", publicado en la revista *Climatic Change* (anexo 3).

## 1 MARCO TEÓRICO

### 1.1 Implicaciones del uso de leña

**E**l consumo de leña ha sido históricamente considerado más un problema de desarrollo y amenaza ambiental, que una opción energética viable. La controversia acerca del consumo de leña se rastrea a través de las implicaciones de su uso tradicional. Inicialmente, la utilización del recurso leñoso ha sido repetidamente relacionada con la deforestación de las zonas aledañas a los centros de consumo. El origen de esta aseveración data de los años setenta, con la esperada “crisis global de leña”, producto de la aparente tendencia decreciente de las reservas de leña en los países en vías de desarrollo y el incremento de la demanda de energía debido al crecimiento de la población en pobreza.<sup>27</sup>

Por otra parte, debido a que la biomasa se incinera generalmente en fogones abiertos, ubicados en las cocinas de los hogares rurales, la combustión es incompleta e incontrolada, lo que deriva en la emisión de partículas y de gases que afectan seriamente la salud de los usuarios, así como la calidad del ambiente local y global del entorno. Particularmente, la inhalación del humo de leña se relaciona con efectos negativos para la salud, que conllevan un incremento en las tasas de mortalidad y causas de enfermedad en el ámbito mundial.<sup>42-45</sup> El humo de leña también se ha clasificado como un posible agente carcinógeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés).<sup>46</sup>

En resumen, los problemas de salud ocasionados por la exposición a estos agentes contaminantes abarcan desde dificultades para respirar, hasta enfermedades respiratorias

crónicas que conducen a la muerte prematura, en especial de mujeres y niños, hasta evidencia de asociación con bajo peso al nacer y cataratas.

Se calcula que la exposición a la contaminación intramuros es responsable de casi dos millones de muertes en países en vías de desarrollo y de 4 por ciento de las causas de enfermedad a nivel mundial.<sup>47</sup>

En relación con la afectación de la calidad del aire dentro de las viviendas, debido al uso tradicional de leña, se ha observado que las concentraciones de partículas y gases contaminantes en los hogares usuarios sobrepasan incluso las generadas por los sectores del transporte y de la industria en las grandes ciudades. Durante la cocción de los alimentos, las concentraciones medidas de material particulado  $PM_{10}$  dentro de las viviendas han alcanzado hasta  $30,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , rebasando sobradamente los límites máximos permisibles (del orden de  $300$  a  $3,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en 24 horas.<sup>48, 49, 50</sup>

En el caso del monóxido de carbono (CO) se han reportado valores entre 10 y 500 ppm durante la cocción, equivalentes a valores de entre 2 y 50 ppm en 24 horas, lo que rebasa ampliamente el límite máximo permisible de 9 ppm en ocho horas, propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés).<sup>47, 51,</sup>

52

Desde el punto de vista social, la utilización de leña en los hogares es una actividad fundamental en la vida diaria de las mujeres del medio rural, pues, aunque la recolección no depende únicamente del sexo femenino, la cocina sí.<sup>53</sup> El tiempo destinado a la recolección o al cocinado con leña es considerable dentro de las actividades diarias de las mujeres más pobres de los países subdesarrollados. El tiempo empleado por las mujeres en tareas relacionadas con el uso de leña es determinante en su calidad de vida, si se tiene en cuenta

que, además, trabajan más horas al día que los hombres, no sólo en actividades del hogar, sino también en las arduas actividades agrícolas.<sup>54</sup>

Por último, de acuerdo con la información disponible, las repercusiones en la calidad del aire debidas a la emisión de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por el uso de leña, comparada con la derivada del uso de combustibles fósiles, es mucho menor (o neutra, si se considera un uso renovable del recurso), la combustión incompleta de biomasa produce, asimismo, emisiones de otros contaminantes, así como otros gases de efecto invernadero (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO), más potentes que el CO<sub>2</sub>, además de carbono negro (CN), por lo que incide también en los factores del cambio climático.<sup>55-63</sup>

## **1.2 Transición energética: del modelo “energy ladder” al uso múltiple de combustibles (o “stacking”)**

La explicación convencional sobre los cambios de uso de combustibles en el plano macrorresidencial ha tenido como base el modelo denominado “energy ladder”.<sup>64-68</sup> De acuerdo con esta teoría, los materiales tradicionales para cocinar son rápidamente desplazados por combustibles “modernos”, una vez que se tiene acceso a los mismos y el ingreso monetario del hogar aumenta (figura 1.1).

La descripción del proceso de cambio de un combustible a otro, también se basa en un patrón de desplazamiento “uno a uno”, en el que las necesidades previamente cubiertas por el combustible tradicional son totalmente satisfechas por una sola alternativa comercial o moderna.

A partir de este modelo, se asume que la leña es un bien económico inferior y, por ende, se caracteriza como el “combustible de los pobres”, usado casi de manera única más

por necesidad que por elección,<sup>69</sup> principalmente en los hogares con un ingreso económico bajo.

Otra suposición implícita es que el usuario, de manera innata, prefiere utilizar combustibles modernos en lugar de los tradicionales y el único impedimento es su capacidad para costear fuentes de energía comerciales.<sup>69</sup> Aun cuando en la mayoría de los hogares rurales el ingreso monetario no es constante, dificultando con ello el consumo regular de combustibles modernos,<sup>20</sup> el proceso de selección de combustibles es más complejo y no sólo depende del nivel de ingreso económico, por lo que este enfoque convencional es aún más problemático en el medio rural que en el urbano.

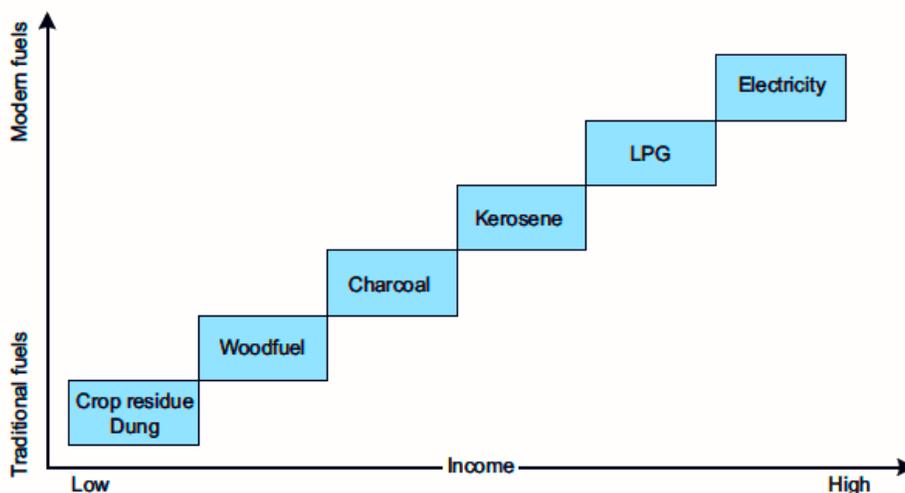
A pesar del uso generalizado del modelo de la escalera energética (o “energy ladder”), diversas discrepancias han surgido al tratar de entenderlo de manera universal para explicar la dinámica del cambio de combustibles, cuando el usuario pasa de un entorno rural a uno urbano, o de un nivel de ingreso bajo a otro superior. Debido a la influencia de este modelo, muchos de los esfuerzos al estudiar estas discrepancias se han centrado en explicar las restricciones a las que se enfrentan los consumidores cuando eligen un combustible; en lugar de estudiar, en primer lugar, por qué preferirían elegir una opción diferente a la esperada por el modelo.<sup>69</sup> Las deficiencias del modelo de la “energy ladder” para explicar la dinámica de la transición energética se han reportado en varios análisis. A su vez, es muy difícil encontrar estudios cuyos resultados no contradigan al menos algún supuesto de este modelo.<sup>69</sup>

Por todo lo anterior, el proceso de cambio o sustitución de combustibles (“fuel switching”) en los hogares rurales se ha explicado mediante un modelo alternativo de “usos múltiples” (o acumulativo) de combustibles (“fuel stacking”), lo cual responde de una

mejor manera al patrón de elección entre diversas opciones energéticas observado en los hogares rurales.<sup>20, 11, 70</sup>

Este modelo propone que los hogares acumulan diferentes opciones energéticas, las cuales se utilizan de acuerdo a razones específicas y, por lo tanto, hasta las opciones energéticas más tradicionales son raramente relegadas por completo. El modelo del “fuel stacking” ha sido la base para explicar la resiliencia del consumo de leña, aún con ingresos a la alza y con la presencia de combustibles modernos; además de considerarse el punto de partida para nuevos estudios que corroboran su pertinencia en regiones tan lejanas como el África Subsahariana.<sup>69, 91</sup>

**Figura 1.1 Diagrama del modelo clásico de escalera energética (“energy ladder”)\***



**Fig. 1. The classic energy ladder.**

FUENTE: Kowsari y Zerriffi (2011: 7505-7517).

\* Excepto donde se señale, todos los elementos gráficos (cuadros, diagramas, esquemas, gráficas, mapas y demás) citados en este trabajo son de elaboración propia.

### 1.2.1 Intervenciones con estufas eficientes de leña

El uso de tecnologías eficientes, como las estufas eficientes de leña (ICS, por sus siglas en inglés), ayuda a reducir el consumo de leña y a mitigar sus impactos (por ejemplo, la emisión de los GEI y la reducción de contaminación intramuros).<sup>71</sup> La magnitud de los beneficios del uso de estufas eficientes de leña dependerá del grado de desplazamiento de los dispositivos tradicionales (es decir, si se sustituye totalmente el dispositivo tradicional o se presenta un uso múltiple o “stacking”), pues las necesidades que satisfacen los dispositivos tradicionales no son cubiertas por las tecnologías alternativas. Por ejemplo, las opciones alternativas no son tan flexibles como las tradicionales:

- 1) No se adaptan al cocinado de platillos tradicionales.
- 2) Pueden requerir de un mayor procesamiento de las piezas de leña.
- 3) Aumento de las recargas de combustible, etcétera.

Por lo que la transición de tecnologías tradicionales a otras más limpias y eficientes resulta ser más compleja de lo que se estimaba.<sup>3</sup> A pesar de lo anterior, existen esfuerzos a nivel mundial, como la Alianza Global de Estufas Limpias (GACC, por sus siglas en inglés), así como esfuerzos nacionales, con programas en México y Perú, que promueven el uso de estufas eficientes.<sup>3</sup> Por ejemplo, los diseños exitosos en México (que se adaptan mejor a las costumbres locales de cocinado, como la estufa *Patsari*), han sustituido efectivamente a las estufas tradicionales, y con ello han beneficiado ampliamente a los usuarios. Con datos duros levantados en campo acerca del uso de las estufas *Patsari*, demuestran que éstas presentan hasta un 67 por ciento de ahorro en el consumo, entre 50-80 por ciento en

reducción de los GEI y hasta 80 por ciento de reducciones en contaminación intramuros.<sup>63,</sup>

72, 52

### **1.3 Aspectos espaciales del uso de leña en México**

Además de presentarse una predilección heterogénea de combustibles en cada uno de los hogares, su consumo también tiene una distribución espacial diversa. Por una parte, el territorio mexicano presenta una amplia gama de temperaturas y de cobertura vegetal. Cada una de esas condiciones presentes en las localidades usuarias, influye en la cantidad y disponibilidad de leña consumida.

Por otra parte, la diversidad sociocultural también es diferente en el sur, centro y norte del país, contribuyendo a un mayor o menor apego al uso de leña como combustible doméstico.

#### **1.3.1 Modelo WISDOM**

El estudio de la heterogeneidad de la distribución espacial de la demanda y suministro de combustibles (leña específicamente) para la cocción lo han estudiado Masera y colaboradores en 2003<sup>40</sup>, dando como resultado la herramienta de planificación denominada Mapeo Integrado de la Oferta y la Demanda de Combustibles de Madera (WISDOM, por sus siglas en inglés). El WISDOM utiliza información geográfica y sociodemográfica de las áreas de interés para generar indicadores construidos a partir de diferentes factores, desagregados por unidades mínimas de análisis, que dependen del grado de la información disponible (localidad o municipio), por ejemplo:

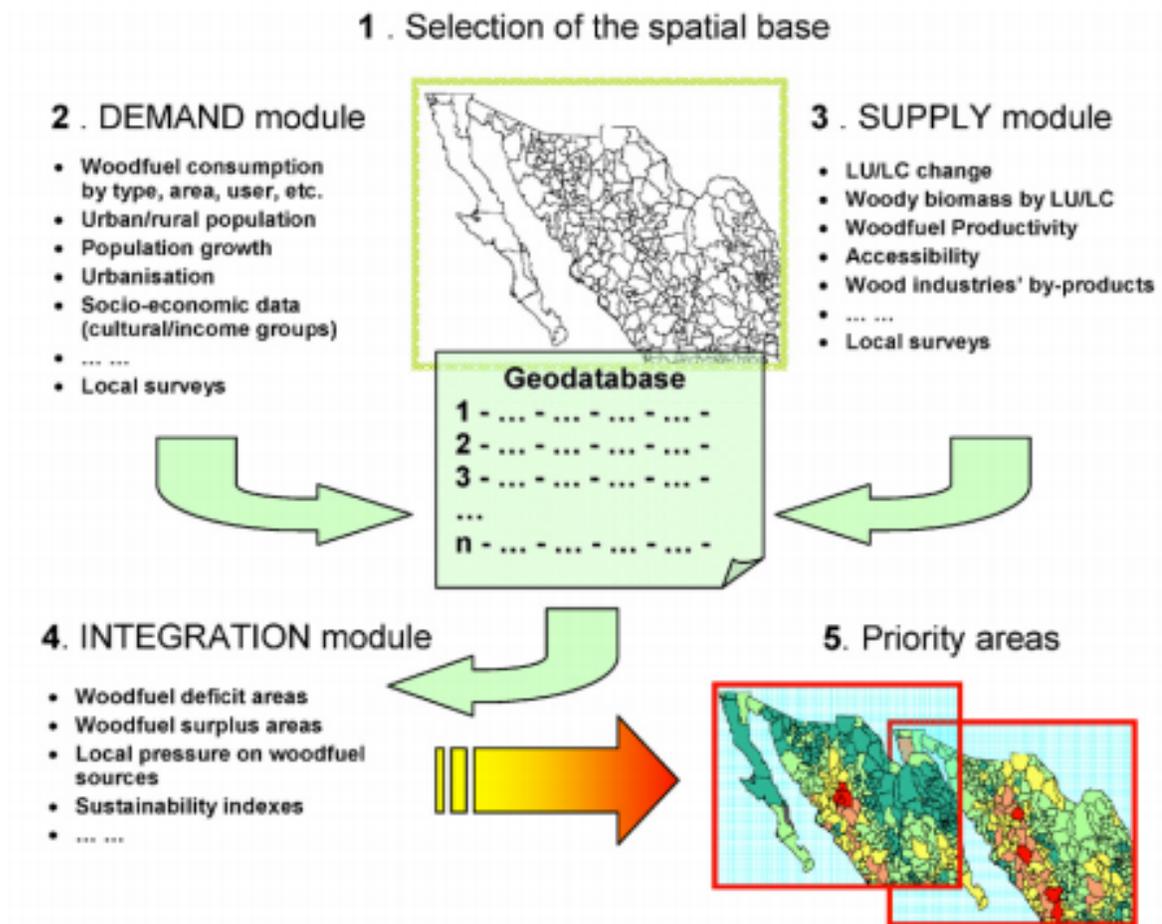
- 1) Por el lado de la demanda: número de usuarios, crecimiento de estos, número de hogares, porcentaje de población indígena y grupos de ingreso monetario.
- 2) Por el lado del suministro: disponibilidad de leña, sus reservas (volumen de biomasa), el cambio de las áreas con disponibilidad, en el tiempo y su productividad. A través del uso del WISDOM es posible determinar áreas prioritarias por uso de leña o “hot spots”, lo que facilita a los tomadores de decisiones preponderar las intervenciones en donde son más urgentes.

Aunque a través del WISDOM se ha estudiado efectivamente la heterogeneidad espacial del consumo de leña, una limitación de los estudios previos es que son estáticos, es decir, se refieren a un horizonte temporal específico,<sup>40, 41, 24, 25</sup> en donde, por definición, se omite la variabilidad que se presenta en el tiempo, lo cual limita el correcto manejo de las intervenciones a mediano y largo plazo.

Además de conocer la distribución espacial de los consumos de energía residencial, conviene establecer escenarios sobre su dinámica futura. De hecho, el desarrollo de escenarios futuros espacialmente explícitos para entender la dinámica de la distribución espacial del uso múltiple de combustibles es un tema muy novedoso, ya que no existen referencias en la literatura nacional y regional.

El estudio del estado actual del uso múltiple de combustibles en el sector residencial, su distribución espacial y sus proyecciones futuras es fundamental para entender los impactos ambientales en la salud, el entorno social y la calidad de vida de sus usuarios, así como en el diseño de políticas gubernamentales del país.

**Figura 1.2 Explicación gráfica del modelo WISDOM**



FUENTE: Ghilardi *et al.* (2007).

#### 1.4 Escenarios y modelación energética

Existen diversas metodologías para el análisis de sistemas energéticos. Cada modelo por sí solo refleja diferentes concepciones acerca del sector energético, sus relaciones con el resto de la economía y cómo se espera que las relaciones entre estos agentes evolucionen en el futuro.<sup>73, 74</sup> Entre los objetivos de interés que persigue el modelamiento energético, destacan la energía total consumida (demanda), los precios y cantidades de una cierta fuente de energía, hasta la mejor distribución del suministro de energía entre las demandas

de los diversos usos finales.<sup>75</sup> La justificación para el modelamiento a largo plazo (o construcción de escenarios) de un sistema energético es prever las implicaciones futuras de los patrones de uso de la energía,<sup>75</sup> o, como se señala en el INE:<sup>90</sup> “Los escenarios constituyen una herramienta estructurada de planificación de largo plazo, que permite organizar la información e identificar la multiplicidad de posibilidades de ocurrencia de hechos futuros, con base en el conocimiento y la información disponible”.

Es decir, el resultado derivado de un escenario solo provee proyecciones que dan un panorama de las implicaciones de los supuestos bajo los cuales se desarrolló, sin que esto signifique una reducción de la incertidumbre implícita *per se*. Kydes y colaboradores, así como Suganthi y Samuel,<sup>75, 76</sup> proporcionan una revisión extensa de los distintos modelos para analizar los sistemas energéticos a largo plazo. Kydes y colaboradores<sup>75</sup> refieren que los modelos se distinguen por su cobertura (equilibrio general o parcial) y su enfoque (simulación u optimización). En general, se tienen modelos de equilibrio general, optimización agregada y por sector energético. Suganthi y Samuel<sup>76</sup> categorizan los modelos de predicción de demanda energética, desde los basados en series históricas hasta los de enfoque “bottom-up”, que consideran la energía no como un fin en sí mismo, sino como una forma de cubrir las necesidades de la población y parten de sectores de consumo energético o de los usos finales si existe información disponible, pasando por los de regresión, econométricos y algoritmos genéticos, sólo por mencionar algunos. El común denominador entre estos modelos es el reto de combinar las bondades que ofrece el detalle de los modelos por sector energético, con las bondades que ofrece la descripción de las interacciones del sector energético con sectores no energéticos.

Los modelos de abajo hacia arriba se han adoptado de manera amplia precisamente porque desde su enfoque por sectores energéticos o usos finales se ajustan mejor cuando se

trata de implementar tecnologías eficientes para reemplazar a las tradicionales. Como respuesta al reto de combinar a los sectores energéticos y no energéticos, Sheinbaum y Masera<sup>77</sup> desarrollaron un modelo de simulación del sector energético para México, denominado “Mexican Energy-Emission Scenario Model (MEESM, por sus siglas en inglés).

El análisis del sector energético residencial mexicano también ha sido estudiado simultáneamente por un modelo de arriba hacia abajo, como de abajo hacia arriba.<sup>19</sup> Para el caso particular de la simulación del uso de bionergía en México, Islas y colaboradores<sup>78</sup> utilizaron el paquete de modelación LEAP, que igualmente se basa en un enfoque de abajo hacia arriba. A pesar de que los estudios ya mencionados utilizan las ventajas que ofrece un modelo de abajo hacia arriba para evaluar y comparar los potenciales de mitigación de uno o varios escenarios entre sí, la forma como se cuantifican las emisiones depende generalmente sólo del ahorro de energía que las tecnologías eficientes conllevan,<sup>77</sup> para así calcular las emisiones netas que se evitarían. Otra forma de estimar las emisiones evitadas es a partir de valores promedio de mitigación por dispositivo eficiente instalado.<sup>78</sup> Estas formas de proyectar las emisiones son confusas cuando se trata de modelar los impactos del uso de biomasa, ya que es muy probable que se sobrestimen.

Las emisiones derivadas del uso de biomasa dependen de si es extraída de manera sustentable o no; es decir, sólo existen emisiones netas de CO<sub>2</sub> cuando la biomasa es extraída de manera no renovable y, por ende, deja de considerarse neutra. Por lo que el conocimiento de los valores de no renovabilidad o del FNRB<sup>24</sup> de la biomasa son fundamentales (pero han sido poco estudiados) para la obtención de estimaciones más realistas de sus impactos, en términos de emisiones de los GEI. El presente estudio se basa en un modelo de abajo hacia arriba para generar escenarios futuros sobre el uso de leña, en combinación con gas LP para la cocción en el sector energético residencial mexicano, que

además incluye una primera aproximación nacional desagregada del FNRB a nivel municipal.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Escenario base

#### 2.1.1 Estimación del consumo de leña para el año base 2010

La estimación del consumo de leña se realizó mediante el uso del programa Matlab R2013a®, siguiendo la metodología que a continuación se describe. El consumo total anual de leña ( $CT$ ) se estimó como el producto del consumo per cápita ( $Cpc$ ); la saturación de usuarios de leña ( $S$ ), en porcentaje de usuarios, por la población total. De donde se consideraron dos tipos de usuarios de leña: exclusivos y mixtos (leña-gas LP). La unidad de análisis fue el municipio, con un total de 2,426 unidades. Este trabajo es una primera aproximación al estudio del consumo múltiple de combustible, mediante el uso y comparación de datos censales y de casos de estudio.

Matemáticamente el consumo total de leña por municipio se calcula como se indica:

$$CT_K = \sum_{k=1}^n C_{E_k} + C_{M_k}$$

donde  $CT_k$  es el consumo total de leña en toneladas de material seca por año (tMS/año),  $C_{E_k}$  es el consumo de leña atribuido a los usuarios exclusivos por municipio,  $C_{M_k}$  es el consumo de leña atribuido a los usuarios múltiples por municipio.

Como se dijo antes,  $C_E$  y  $C_M$  se obtienen como el producto del consumo per cápita, la saturación de usuarios de leña y la población; entonces, se tiene que:

$$C_{E_k} = Cpc_{E_k} * S_{E_k} * P_k$$

y

$$C_{M_k} = Cpc_{M_k} * S_{M_k} * P_k$$

De donde  $Cpc_{E_k}$  y  $Cpc_{M_k}$  son los consumos per cápita para usuarios exclusivos y múltiples por municipio, cada cual;  $SE_k$  y  $SM_k$  son las saturaciones de usuarios de leña exclusivos y múltiples, respectivamente, y  $P_k$  es la población total por municipio.

#### Estimación de la saturación de usuarios de leña

De acuerdo con Díaz,<sup>38</sup> entre un 90 y un cien por ciento del uso residencial de leña en México es para cocinar. Por lo tanto, se asume que las viviendas que emplean leña para cocinar son un buen indicador del uso de leña como combustible residencial.

La saturación para usuarios exclusivos de leña se obtuvo a través de los datos censales por municipio del INEGI y se definió como el ratio entre las viviendas que utilizan leña para cocinar y las viviendas totales del municipio. Los datos censales referentes a la población, número promedio de habitantes por vivienda y viviendas que emplean alguno de los siguientes combustibles para cocinar: leña, gas LP, carbón vegetal, electricidad o petróleo (para los años 1990 y 2000), fueron usados para la obtención de los usuarios exclusivos de leña. No se encontraron disponibles datos censales por municipio para el 2010, referentes al uso de leña, debido a que la pregunta sobre el combustible que más utilizan para cocinar fue hecha sólo a una muestra representativa.<sup>89</sup>

La saturación para usuarios múltiples de leña se calculó en función de la saturación de usuarios exclusivos de leña; debido a que la pregunta censal sobre el tipo combustible

más utilizado para cocinar sólo permite una opción como respuesta, enmascarando, así, la tendencia creciente del uso múltiple, particularmente en el sector rural. Ghilardi *et al.*,<sup>24</sup> basados en estudios de caso realizados por Díaz,<sup>38</sup> estimaron que las viviendas con un uso múltiple de combustibles representan en promedio un 25 por ciento a las viviendas con uso exclusivo de leña.

Por lo tanto, un 25 por ciento adicional de las viviendas exclusivas de leña por municipio son usuarias múltiples de leña. Para municipios donde existe una saturación de usuarios exclusivos de leña, igual o mayor al 75 por ciento (es decir, municipios muy rurales), la saturación de usuarios múltiples de leña se calcula como la diferencia entre las viviendas totales del municipio y las viviendas exclusivas de leña.

Para los municipios en los que la saturación es menor del 75 por ciento, la saturación de usuarios múltiples de leña representa un 25 por ciento adicional de los usuarios de leña exclusivos por municipio. La saturación de usuarios exclusivos de leña se calcula como se indica:

$$S_{Ek} = \frac{U_{Ek}}{D_K}$$

de donde  $S_{Ek}$  es la saturación por uso exclusivo de leña por municipio,  $U_{Ek}$  es el número de viviendas con uso exclusivo de leña y  $D_K$  es el total de viviendas del municipio.

### Estimación del consumo per cápita de leña por municipio

El consumo per cápita de leña por municipio fue estimado a partir de una revisión de literatura para México,<sup>38, 18, 79-81</sup> de donde se obtuvieron los valores de consumo per cápita

en materia seca para las cinco principales regiones macroecológicas del país. Además, se hizo un ajuste por temperaturas mínimas para cada municipio, con valores entre uno (para municipios localizados en regiones templadas) y 1.7 (para regiones frías).

El consumo per cápita por municipio por uso exclusivo se estima, entonces, como un promedio ponderado, de acuerdo a la proporción del área de cada región ecológica dentro de cada municipio, multiplicado por el factor de ajuste por temperaturas mínimas. Matemáticamente se tiene

$$Cpc_{Ek} = \left( \sum_{i=1}^5 Cpv_i * A_i * F_T \right)_k$$

de donde  $Cpc_{Ek}$  es el consumo ponderado per cápita, por uso exclusivo por municipio;  $Cpv_i$  es el consumo per cápita por región macroecológica  $i$  por municipio  $k$ ;  $A_i$  es la proporción del área de cada macrorregión ecológica por municipio  $k$ , y  $F_T$  es el factor de ajuste por temperaturas mínimas por municipio  $k$ .

El consumo per cápita por uso múltiple se asume como la mitad del consumo per cápita por uso exclusivo:

$$Cpc_{Mk} = 0.5Cpc_{Ek}$$

Construcción de la proyección del consumo de leña al año 2030

Para la proyección futura del consumo de leña anual se asumió que

- 1) Los valores de consumo per cápita permanecen constantes (debido a que no hay un cambio tecnológico significativo en los artefactos para cocinar).
- 2) La saturación de leña (tanto para uso exclusivo como para uso múltiple), así como la población total del municipio cambian sobre el tiempo  $t$ .

Matemáticamente se tiene que

$$CT_{tk} = ((Cpc_{Ek} * S_{tEk}) + (Cpc_{Mk} * S_{tMk})) * P_{tk}$$

de donde  $CT_{tk}$  el consumo total por municipio en el tiempo  $t$ ,  $Cpc_{Ek}$  y  $Cpc_{Mk}$  son los consumos per cápita por uso exclusivo y múltiple, cada cual;  $S_{tEk}$  y  $S_{tMk}$  son la saturación por uso exclusivo y múltiple, respectivamente, para el tiempo  $t$ ; y  $P_{tk}$  es la proyección de Conapo para la población por municipio en el tiempo  $t$ .

Proyección de la saturación por uso de leña para el año 2030

El cambio esperado en la saturación para uso exclusivo y múltiple por municipio  $k$  en el  $t$  se calculó asumiendo un comportamiento logístico:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{rS(K - S)}{K}$$

La solución a la ecuación anterior está dada por

$$S_k(t) = \frac{K \cdot S_{t0} \cdot e^{rt}}{K + (S_{t0} \cdot (e^{rt} - 1))}$$

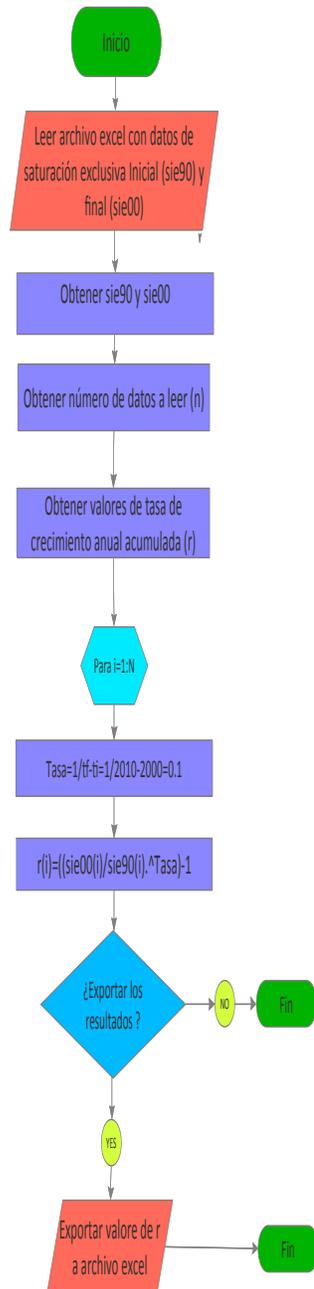
Donde  $K$  es la máxima saturación del uso de leña (es decir, 1) y  $r$  es la tasa de crecimiento anual para el periodo 1990-200 por municipio  $k$ , estimada por

$$r_k = \left( \frac{S_{2000k}}{S_{1990k}} \right)^{\frac{1}{t}} - 1$$

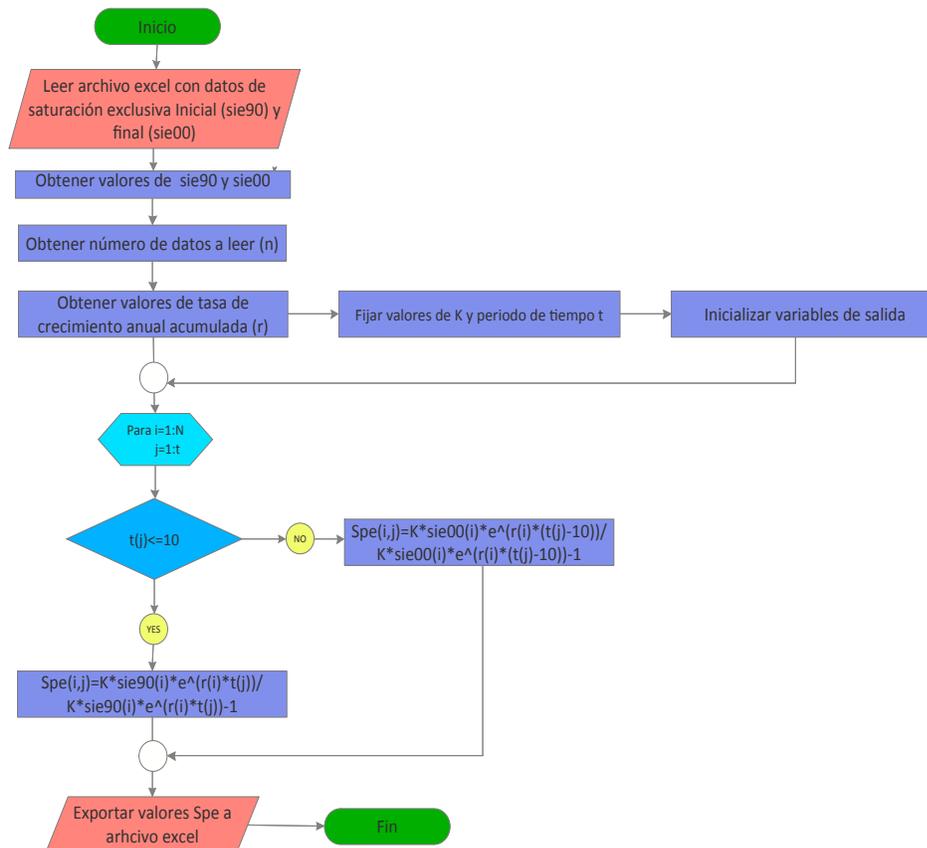
La tasa de crecimiento promedio anual de la saturación de usuarios de leña para el periodo 1990-2000 se utilizó como base para la proyección al año 2030, ya que sólo de estos dos años se dispone de información referente al uso de leña en el ámbito municipal.

Se usó el programa Matlab R2013a ® para estimar la tasa de crecimiento anual acumulada ( $r$ ) y posteriormente la saturación proyectada exclusiva ( $Spe$ ). Los diagramas de flujo se muestran en las figuras 2.1. y 2.2.

**Figura 2.1 Diagrama de flujo para estimar la tasa de crecimiento anual acumulada de la saturación de usuarios de leña**



**Figura 2.2 Diagrama de flujo para estimar la proyección de la saturación de usuarios exclusivos de leña**



Para reflejar el número creciente del uso múltiple en México,<sup>11</sup> se asumió que la saturación del 25 por ciento de usuarios múltiples para el año base creció linealmente un 1 por ciento al año, entre 2010 y 2030, para municipios en los que la saturación por uso exclusivo fue menor del 75 por ciento. Si la saturación por uso exclusivo es menor del 75 por ciento, entonces

$$SMKt = Sket (1 + (0.25 + 0.01 t))$$

Para municipios en los que la saturación es mayor o igual al 75 por ciento, la saturación se estima simplemente como la diferencia entre la saturación máxima (es decir, 1) y la saturación por uso exclusivo.

### Proyección de la población al año 2030

Se utilizó la proyección de población nacional por municipio 2010-2030 del Consejo Nacional de Población (Conapo).<sup>39</sup>

### Estimación del número de fogones en el sector residencial

El número de dispositivos relacionados con el sector doméstico residencial (fogones tradicionales y estufas eficientes), se determinó con base en el total de usuarios que emplean leña como combustible en México. De acuerdo con las estimaciones del uso de leña para la línea base, se estima que en México alrededor de 22.5 millones de personas (aproximadamente 5.5 millones de familias) usan leña. La estimación se hizo tanto para estimar fogones disponibles en las familias con uso exclusivo, como en las familias con uso mixto por municipio; garantiza con ello una estimación de consumos finales y sus respectivos impactos, acorde con el tipo de usuario al que se le asignó una estufa eficiente.

#### 2.1.2 Estimación de las emisiones de los GEI por uso de leña

Si se parte de la premisa de que la leña que se usa en el sector residencial se obtiene de manera renovable, entonces se considera que esta fuente de energía es neutra, en cuanto a

las emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Lo anterior debido a que durante la combustión se emite la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que absorbe el ambiente durante su desarrollo.<sup>82</sup> Pero aun cuando la leña se extraiga de manera renovable, su uso contribuye al calentamiento global, pero en un grado mucho menor que cuando se utiliza energía proveniente de fuentes fósiles. Esto es, existen emisiones de gases efecto invernadero, como el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), debidas a la combustión incompleta de la leña, cuyo potencial de calentamiento global es mayor al del CO<sub>2</sub>.<sup>55-63, 83</sup>

Se sabe muy poco acerca de la magnitud y características de las emisiones de los GEI por uso de leña, tanto en los fogones tradicionales como en sus alternativas (por ejemplo, las estufas eficientes de leña). Pero se ha estimado que el impacto de la combustión residencial de leña representaría hasta un 4 por ciento de las emisiones globales de CH<sub>4</sub> y otros gases con un potencial de calentamiento global más alto que el CO<sub>2</sub>.<sup>84</sup>

### Factores de emisión

Para calcular las emisiones netas de los GEI, se siguió la metodología descrita por Ghilardi *et al.*,<sup>24</sup> para obtener los municipios en donde la leña no se extrae de manera renovable (es decir, cuando la que se extrae y se quema excede las tasas de crecimiento de las fuentes de biomasa) y, así, estimar la fracción de leña no renovable o FNRB. En estos municipios se presentan emisiones netas de CO<sub>2</sub> que se suman a las emisiones de otros GEI, como el CH<sub>4</sub>, los cuales resultan de la combustión incompleta de este recurso.

Aunque existen diversos estudios en los que se han calculado los factores de emisión del CO<sub>2</sub> y del CH<sub>4</sub>, dichos valores se han obtenido a partir de pruebas estándar que no se corresponden con las actividades diarias para lo cual se utiliza la leña en México.<sup>72</sup> Por lo

que para este estudio se utilizaron los factores de emisión (cuadro 2.1) reportados por Johnson y colaboradores,<sup>63</sup> pues aquéllos se obtuvieron a partir de mediciones directas en laboratorio y campo, tanto de fogones tradicionales como de estufas eficientes.

**Cuadro 2.1. Factores de emisión de fogones tradicionales  
y estufas eficientes de leña en México**

|  | $CO_2(kg/kg_{leñaMS})$ | $CH_4(kg/kg_{leñaMS})$ |
|--|------------------------|------------------------|
| Fogón tradicional  | 1.533 <sup>1</sup>     | 0.0064 <sup>1</sup>    |
| Estufa eficiente   | 1.617 <sup>1</sup>     | 0.0012 <sup>1</sup>    |
| Potenciales de calentamiento global (100-year CO <sub>2</sub> e) | CO <sub>2</sub>        | CH <sub>4</sub>        |
|  | 1*                     | 25*                    |

<sup>1</sup> Johnson *et al.* (2008).

\* Valores reportados por IPCC (2001).

#### Estimación del factor de no renovabilidad (FNRB)

Este factor representa la fracción de la leña obtenida de manera no renovable, del total de la leña usada en cierta delimitación geográfica. En general, el uso no renovable de leña se tiene cuando la cantidad de leña extraída de las fuentes forestales (demanda) excede la tasa de crecimiento de tales fuentes (oferta). Entre más alto sea el valor del FNRB, mayor será el porcentaje de leña no sustentable y que, por consecuencia, deriva en emisiones netas de CO<sub>2</sub> por su uso. El FNRB se estimó con base en la metodología propuesta y usada por

Ghilardi y equipo,<sup>24</sup> en la que se realizó el cálculo de este valor para algunas localidades de la región purépecha de Michoacán.

Este factor varía de comunidad a comunidad usuaria de leña, por lo que, para su análisis, es pertinente que se ejecute a escala local. Por motivos técnicos y de tiempo, en este trabajo se presenta una primera estimación nacional de los FNRB a nivel municipal para el año base 2014. Este factor es muy importante al hacer la estimación de emisiones de los GEI en el último capítulo de esta investigación.

En el cálculo de la fracción no renovable de leña intervienen, de manera general, los siguientes factores: productividad de la biomasa aérea (de donde se deriva el porcentaje de la productividad disponible para leña, que a su vez es un insumo), junto con el área accesible de bosque, para estipular la cantidad de leña que se puede establecer de manera sustentable (FWS). Cuando se obtiene la cantidad de FWS, el FNRB se calcula como se indica enseguida:

$$FRNB = \frac{(FWS - Cons)}{Cons}$$

Donde:

FNRB = Factor de no renovabilidad de la Biomasa (factor de 0 a 1, en el cual el valor de 1 o superior es igual a No renovable).

FWS = Abasto de leña tMS año-1

Cons = Consumo de leña tMS año-1

La estimación del FNRB se compone de varios análisis previos, como describen Ghilardi y colaboradores,<sup>24</sup> así como Johnson y equipo,<sup>85</sup> pero uno de los que más requieren atención es el del cálculo del área de bosque accesible; éste, en la escala nacional, se realizó en este análisis y se detalla a continuación.

El área accesible de bosque para obtención de leña depende de varios factores geográficos que facilitan o impiden esta tarea, por lo que el enfoque espacial se desarrolla a partir de la utilización de sistemas de información geográfica (SIG).

Una modalidad para calcular la accesibilidad de un bosque, desde una localidad, es mediante la obtención de un mapa de fricción, el cual es una capa en la que cada pixel representa la dificultad o facilidad de cruzarlo, y se construyó a partir de las variables geográficas que interfieren con la capacidad de llegar al punto de obtención de la leña, que se describen aquí abajo:

- *Pendientes*: calculadas a partir de un MDE con resolución 250x250m del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) del año 2012. Pendientes bajas tienen poca fricción, pero, conforme aumentan, la fricción también lo hace. Se consideró que 30° representa la inclinación máxima de accesibilidad
- *Vías de comunicación*: representan líneas que disminuyen la fricción. Todas las vías presentan una baja fricción; sin embargo, dependiendo el tipo, se les asignó diferente valor. Para carreteras, la fricción es la menor; para terracerías, ligeramente mayor; la accesibilidad de brechas y veredas se calculó dependiendo de la pendiente.

- *Ríos*: reclasificados en perennes (alta fricción) e intermitentes (ligeramente menor que la anterior).

El mapa de fricción es, a su vez, el insumo principal para la obtención del mapa de costo-distancia. Este mapa se obtiene sobreponiendo el mapa de fricción a las localidades del país; su propósito es acumular las celdas de fricción a partir de las localidades. Dicho mapa expresa “qué tan fácil” es acceder a un área a partir de una ubicación dada (localidades). A diferencia de un mapa de distancia euclidiana, la accesibilidad en este caso no sólo está dada por la cercanía a la localidad, sino que depende de las variables consideradas en el mapa de fricción (por ejemplo, dos localidades muy cercanas, pero divididas por un río, se expresarían prácticamente inaccesibles entre sí). Otra diferencia respecto de un mapa de distancia euclidiana es que el mapa de distancia-costo no tiene unidades, pues la fricción está calculada a partir de valores arbitrarios.

El mapa de costo-distancia sirvió para estimar la superficie de vegetación accesible (área accesible) desde las localidades: zonas con vegetación y altos valores de distancia-costo se consideraron inaccesibles, y viceversa. Debido a que el mapa de distancia-costo carecía de unidades, había que establecer un umbral para definir qué era accesible y qué no; para ello se analizaron los valores de distancia-costo, en los que se presentaran zonas de cultivo. Este criterio expresa, en cierto modo, “hasta dónde los pobladores pueden llegar” dentro de las zonas con cobertura vegetal cuando su propósito no es el de extraer madera de manera masiva, sino para leña.

Debido a que se requería conocer los valores más altos de accesibilidad de estas zonas agrícolas, pero sin tomar los valores extremos, para permanecer en un rango conservador de zonas accesibles, se tomó el 3er cuartil como el valor de accesibilidad máxima de distancia-

costo. Con este valor, se extrajo la superficie nacional de vegetación que era accesible en los términos antes descritos.

Para asignar geográficamente los valores de PDL por localidad vegetal, se reclasificó la capa de datos vectoriales de Uso de suelo y Vegetación del INEGI (2000), con los datos de productividad disponible para leña (PDL).

El mapa de áreas accesibles (mapa de accesibilidad) se sobrepuso al de productividad disponible para leña. Con estos dos insumos, se calculó finalmente la cantidad disponible de leña sustentable disponible para leña por municipio FWS (en ton/año).

Los valores obtenidos de FWS son el insumo natural del FNRB que plantea cuánta leña puede ser sujeta de manejo en cada tipo de cobertura. El factor de no renovabilidad, entonces, requiere de la cantidad de leña demandada por municipio para establecer un valor para cada municipio usuario de leña, el cual permita identificar desde un modelo espacial el impacto que el uso de leña tiene sobre la oferta de biomasa.

Finalmente, se proyectaron los valores del factor de no renovabilidad hasta el año 2030 para el escenario base y para el escenario alternativo 1 (escenario de introducción de estufas eficientes, priorizando el FNRB), para observar la diferencia en los valores del FNRB entre el escenario base y el escenario alternativo 1. En esta proyección, se recalculó el valor del FNRB con el nuevo consumo que resultó de la introducción de las estufas eficientes de leña en el escenario alternativo 1 para el 2020 y el 2030, pero dejando el mismo valor de oferta de leña.

## **2.2 Escenarios alternativos**

### 2.2.1 Estimación de la penetración de estufas eficientes instaladas por programas gubernamentales

Para la construcción de los escenarios alternativos, se consideraron, en el escenario base, las estufas eficientes instaladas por los programas de distribución de estufas rurales de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol) y de la Comisión Nacional Forestal (Conafor). Se asumió que un 70 por ciento de estas estufas se adoptan y utilizan cotidianamente, de acuerdo a diversas experiencias de proyectos de implementación de estufas eficientes en comunidades rurales por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA, A.C.).

#### 2.2.2 Establecimiento de las metas de sustitución de tecnologías convencionales por tecnologías eficientes

En el caso de las estufas eficientes de leña, se asumió que en el año 2030, cien por ciento de las familias que utilizan leña contarán con una estufa eficiente (aproximadamente cinco millones). Se asume también que la penetración tecnológica de las estufas sigue una función logística y que, con la capacidad y la experiencia desarrollada hasta la fecha, se lograrán metas anuales de estufas eficientes introducidas para lograr el objetivo.

#### 2.2.3 Penetración de estufas eficientes a nivel municipal, del acuerdo al índice de prioridad de cada escenario

Se establecieron seis escenarios de introducción de estufas eficientes (es decir, estufas por municipio y en qué año se introdujeron). Para el reemplazo del total de los fogones de leña, éstos se desagregaron de acuerdo al tipo de familia usuaria de leña (con uso exclusivo de

leña o con uso mixto). Es decir, se estimó el número de fogones “exclusivos” y “mixtos” por municipio y por año. La introducción se hizo reemplazando, desagregadamente, los fogones exclusivos y mixtos por municipio y por año. Así, se obtuvo una mejor aproximación de los impactos (por ejemplo, emisiones de los GEI, disminución del consumo de leña, etc.) de la sustitución de fogones por estufas eficientes de leña. Para programar la introducción diferida de estufas en la matriz de municipios durante el periodo 2014-2030, también se utilizó el programa Matlab® R2013a.

Los seis escenarios de penetración de estufas eficientes a nivel municipal, se coalcularon asumiendo que las estufas se instalan de acuerdo a los siguientes índices de prioridad (los municipios con mayor prioridad se cubren primero, y así sucesivamente, hasta llegar al total de usuarios) en el año base (2014) por

- 1) La fracción de leña usada en cada municipio que no es renovable (FNRB): priorización de los municipios en donde el porcentaje de uso no renovable de leña era el más alto (es decir, cien por ciento).
- 2) El número de usuarios mixtos de leña (usuarios simultáneos de leña y gas LP): priorizaron los municipios con el mayor número de usuarios mixtos de leña (uso simultáneo de leña con gas LP) por municipio.
- 3) El número de usuarios totales (exclusivos y mixtos) de leña por municipio.
- 4) Balance de leña: priorización por mayor balance negativo entre la demanda y la oferta estimada del recurso leñoso.
- 5) Porcentaje de pobreza: de acuerdo con los porcentajes de pobreza por municipio reportados por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) en el informe “Medición de pobreza en los municipios de México,

2010".<sup>86</sup> El porcentaje de la población en situación de pobreza es uno de los indicadores presentados en este informe. Dicho indicador integra a la población pobre (moderada y extrema) por ingresos y a la población vulnerable por número de carencias sociales (educación, salud, seguridad social, vivienda, servicios básicos y alimentación).

- 6) Emisiones totales de los GEI en el año base: emisiones de los GEI por consumo de leña en fogones con uso exclusivo y mixto.

### **3 RESULTADOS**

#### **3.1 Escenario base**

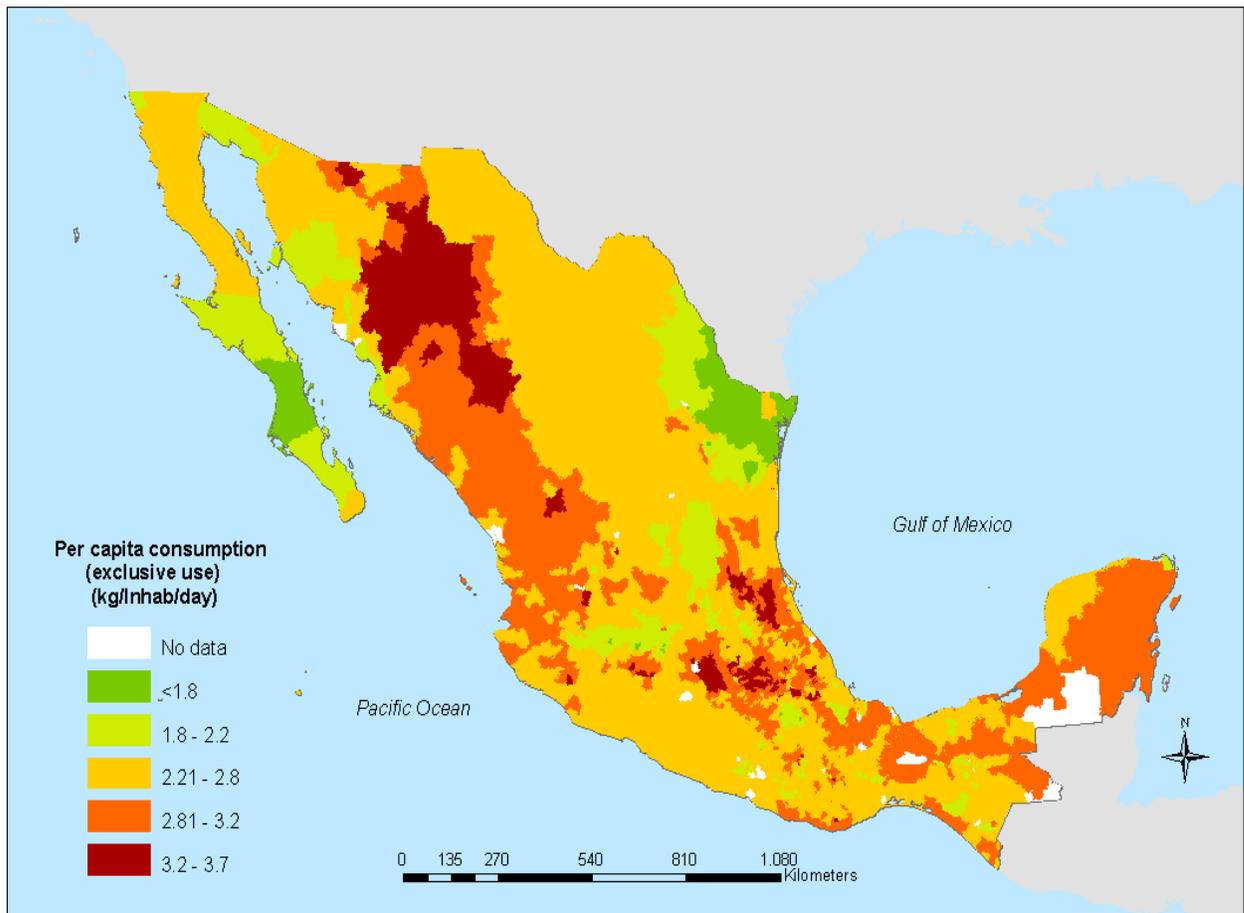
##### **3.1.1 Consumo de leña**

**C**omo resultado de la programación en Matlab (Matlab R2013a), los resultados se obtuvieron desglosados en forma de matrices. Se lograron las matrices de la saturación exclusiva, saturación mixta y anual de los 2,426 municipios para el periodo 1990-2000 y para su proyección 2010-2030.

#### Consumos per cápita de leña espacialmente distribuidos

La figura 3.1.1 muestra la distribución espacial de los consumos per cápita de leña a nivel municipal para usuarios exclusivos de leña, de acuerdo con los supuestos sobre consumo por zona ecológica y el ajuste por temperaturas mínimas. Los consumos per cápita varían entre 1.8 y 3.7 kg/hab/día, según el municipio. Los consumos más elevados (3.2 a 3.7 kg/cáp/día) se obtienen en las zonas boscosas frías, como la Sierra Tarahumara, el Eje Neovolcánico Transversal y partes de la Huasteca alta.

**Figura 3.1.1 Distribución del consumo per cápita exclusivo de leña por municipio 2010**



### Consumo y usuarios totales de leña

El cuadro 3.1.1 muestra las estimaciones de consumo y de usuarios de leña (exclusivos y múltiples). Los primeros decrecen en un 9 por ciento entre 2010 y 2030. En cambio, el número de usuarios múltiples aumenta en un 15 por ciento para ese mismo periodo. La evolución del consumo de leña tiene un comportamiento similar. El consumo exclusivo de

leña decrece en un 9 por ciento para el periodo de estudio; en tanto que el consumo múltiple aumenta en un 15.2 por ciento.

La proyección del total de usuarios de leña al año 2030 es de casi veintidós millones. El consumo total, por su parte, alcanza unos 18.4 millones de toneladas equivalentes a cerca de 32.3 millones de m<sup>3</sup> o aproximadamente 291 PJ, que representa casi el 40 por ciento de la demanda total de energía en el sector residencial para 2010.

**Cuadro 3.1.1 Estimación del consumo y usuarios de leña 2010-2030**

| <i>Año</i> | <i>Usuarios exclusivos</i> | <i>Usuarios mixtos</i> | <i>Usuarios totales</i> | <i>Consumo exclusivo</i>  | <i>Consumo mixto</i> | <i>Consumo total</i> |
|------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
|            | <i>(Millones usuarios)</i> |                        |                         | <i>(Millones ton/año)</i> |                      |                      |
| 2010       | 16.8                       | 5.7                    | 22.5                    | 16.6                      | 2.8                  | 19.4                 |
| 2020       | 16.0                       | 6.3                    | 22.3                    | 15.8                      | 3.1                  | 18.9                 |
| 2030       | 15.3                       | 6.7                    | 21.9                    | 15.1                      | 3.3                  | 18.4                 |

Más allá de las estimaciones agregadas antes presentadas, existen notorias diferencias regionales entre los consumos y usuarios de leña en el país. Este patrón heterogéneo responde a la notable diferencia entre valores mínimos y máximos de saturación, crecimiento de usuarios y consumo per cápita de cada municipio (cuadro 3.1.2).

**Cuadro 3.1.2 Variabilidad de los valores en indicadores  
del uso de leña por municipio 2010-2030**

| <i>Año</i> | <i>Saturación total</i>             | <i>Saturación exclusiva</i> | <i>Saturación múltiple</i> | <i>Porcentaje de crecimiento de usuarios de leña<sup>a</sup></i> | <i>Cpc de leña<sup>b</sup> (Kg/hab/día)</i> | <i>Municipios Sat total &gt;75%</i> | <i>Municipios Sat total &gt;85%</i> |
|------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
|            | <i>(Valor mínimo, valor máximo)</i> |                             |                            |  |   |                                     |                                     |
| 2010       | (0.02%, 100%)                       | (0.01%, 99.5%)              | (0.01%, 30.9%)             | (-43.8%, 9.7%)   | (1.76-3.69)                                 | 43.7%                               | 39.1%                               |
| 2030       | (0.0%, 100%)                        | (0-0%, 99.9%)               | (0.0%, 39.4%)              |  |   | 43.6%                               | 40.5%                               |

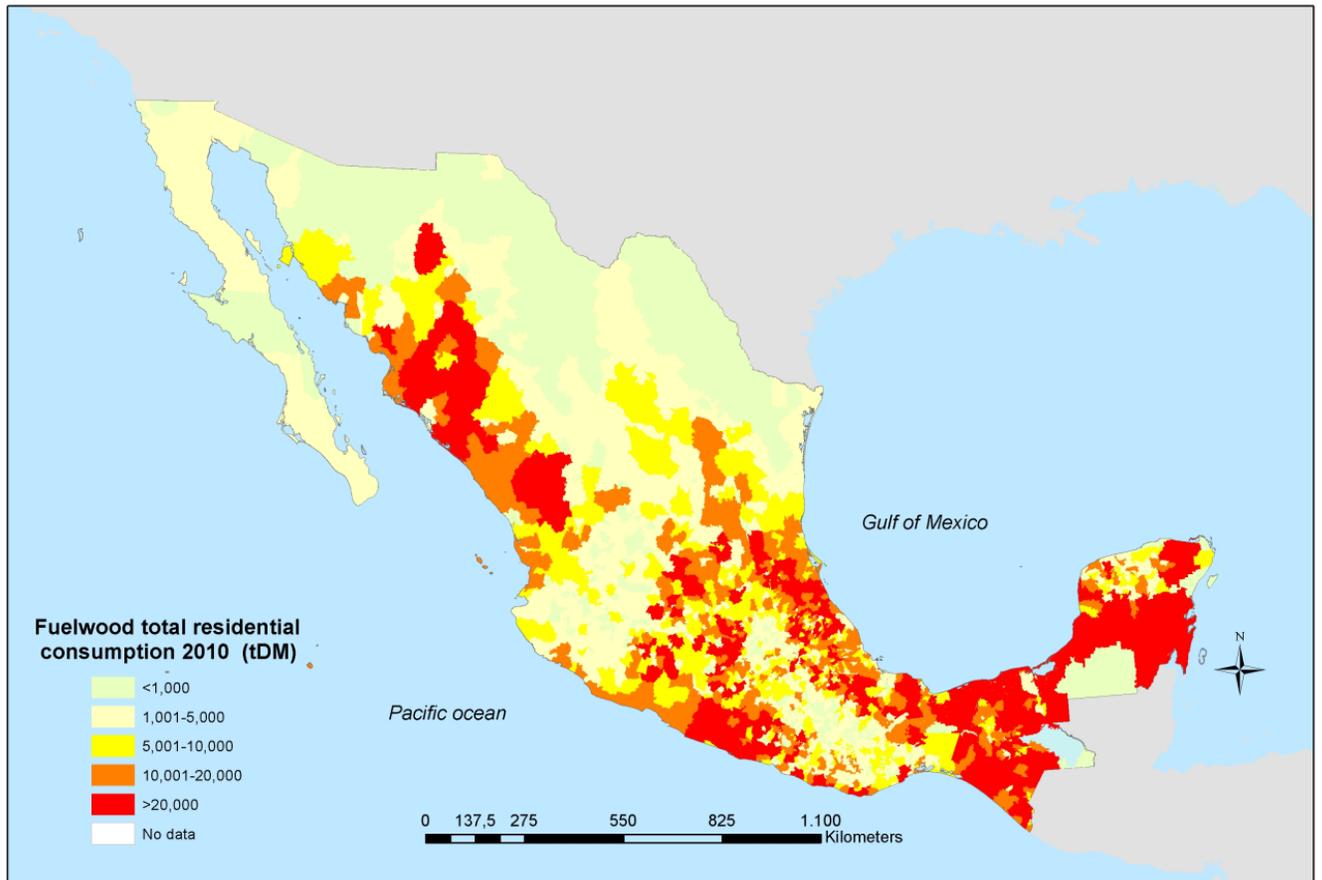
<sup>a</sup> Valores para todo el periodo 2010-2030.

<sup>b</sup> Valores ajustados por temperaturas mínimas de cada municipio. Valores para todo el periodo 2010-2030.

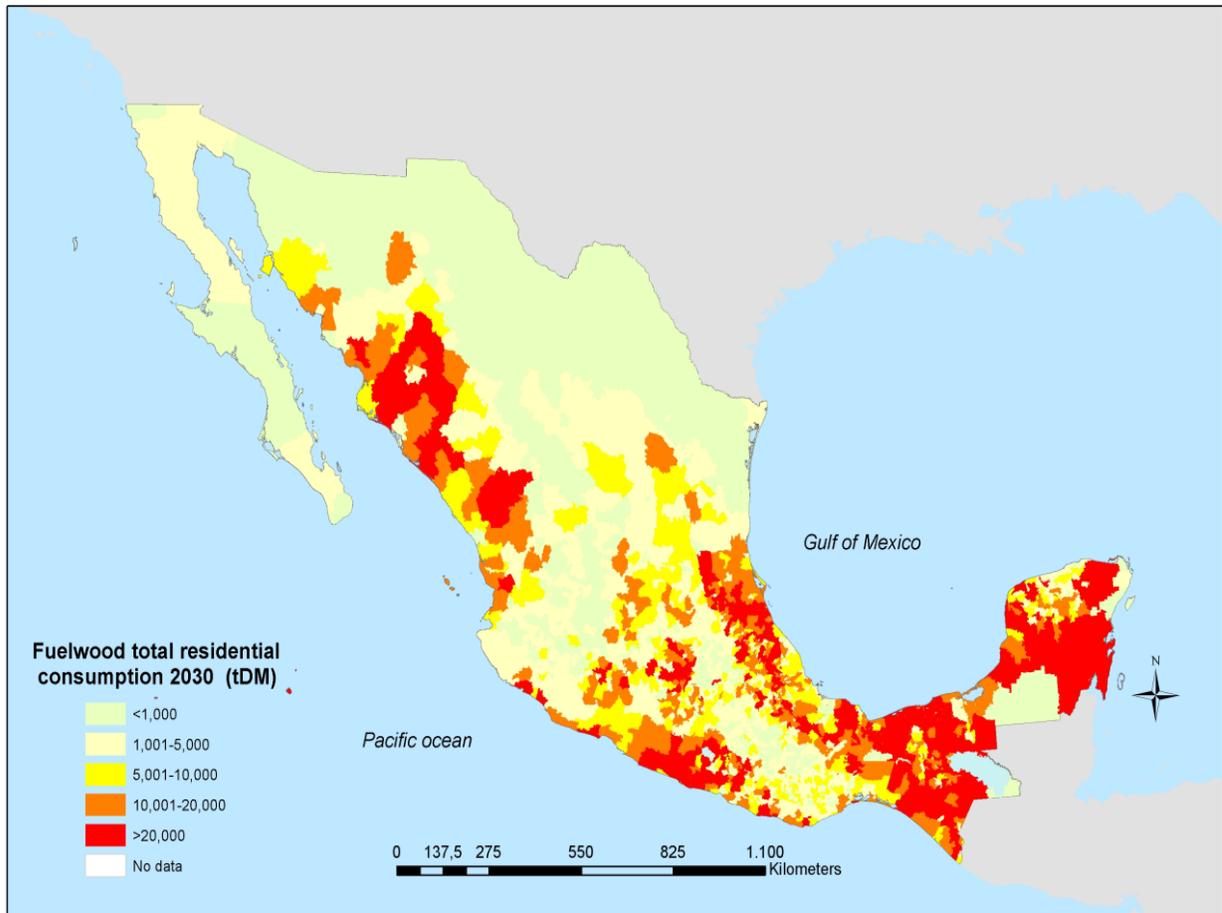
#### Consumo de leña espacialmente distribuido

La heterogeneidad de la distribución espacial de los consumos de leña en el país, tanto para el 2010 como para el 2030, se observa en las figuras 3.1.2 y 3.1.3, respectivamente. En las regiones noroeste, centro y sur, se advierte una alta dependencia de leña para cubrir las necesidades energéticas residenciales, durante todo el periodo de estudio. Si se comparan ambas ilustraciones, es posible observar también una evolución temporal dispar entre 2010 y 2030. Varios municipios en la península de Yucatán, así como de la región central de la costa del Pacífico, experimentan una tendencia de crecimiento contraria a la tendencia de decrecimiento en las otras regiones de México.

**Figura 3.1.2 Distribución espacial del consumo residencial de leña en México 2010**

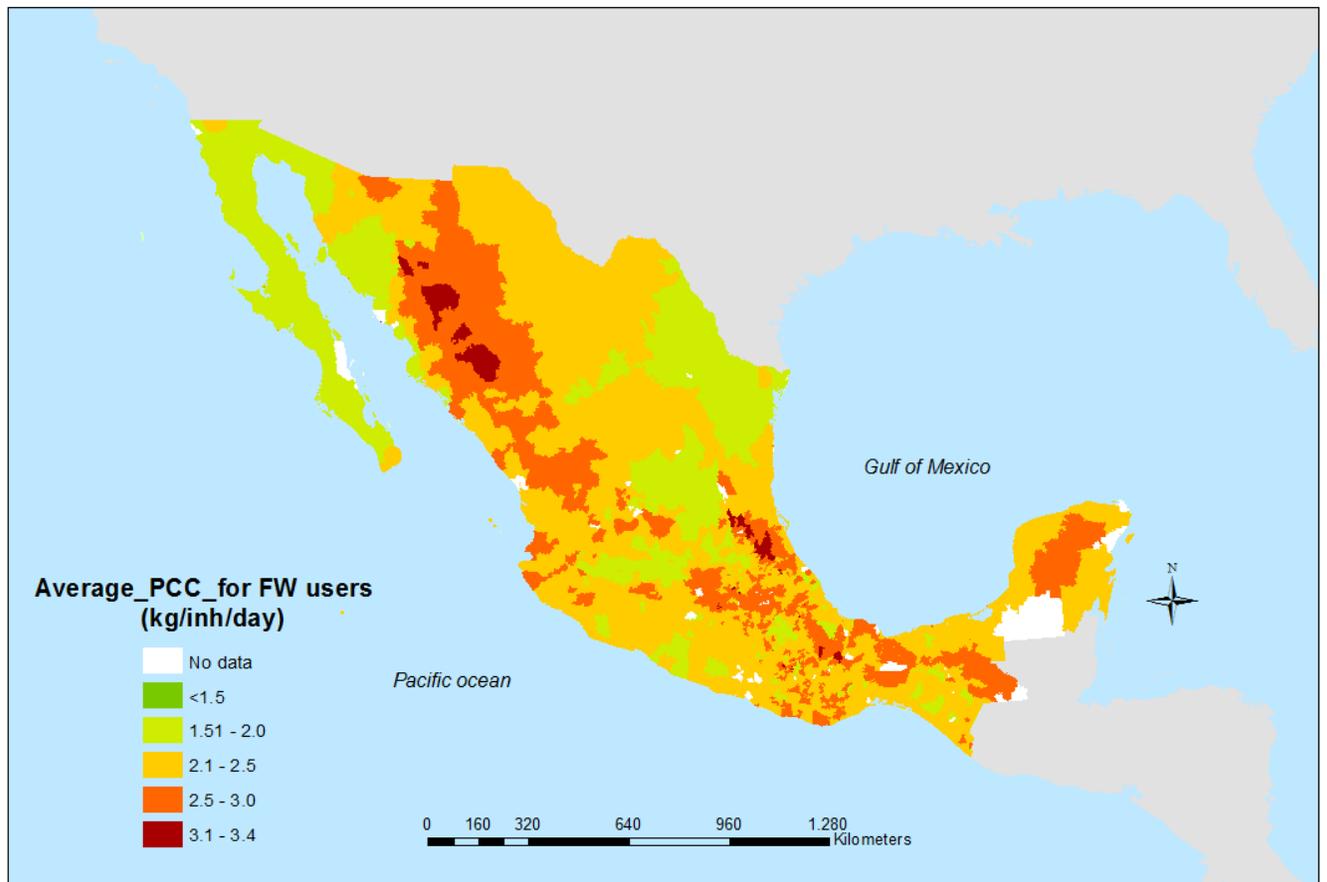


**Figura 3.1.3 Distribución espacial del consumo residencial de leña en México 2030**



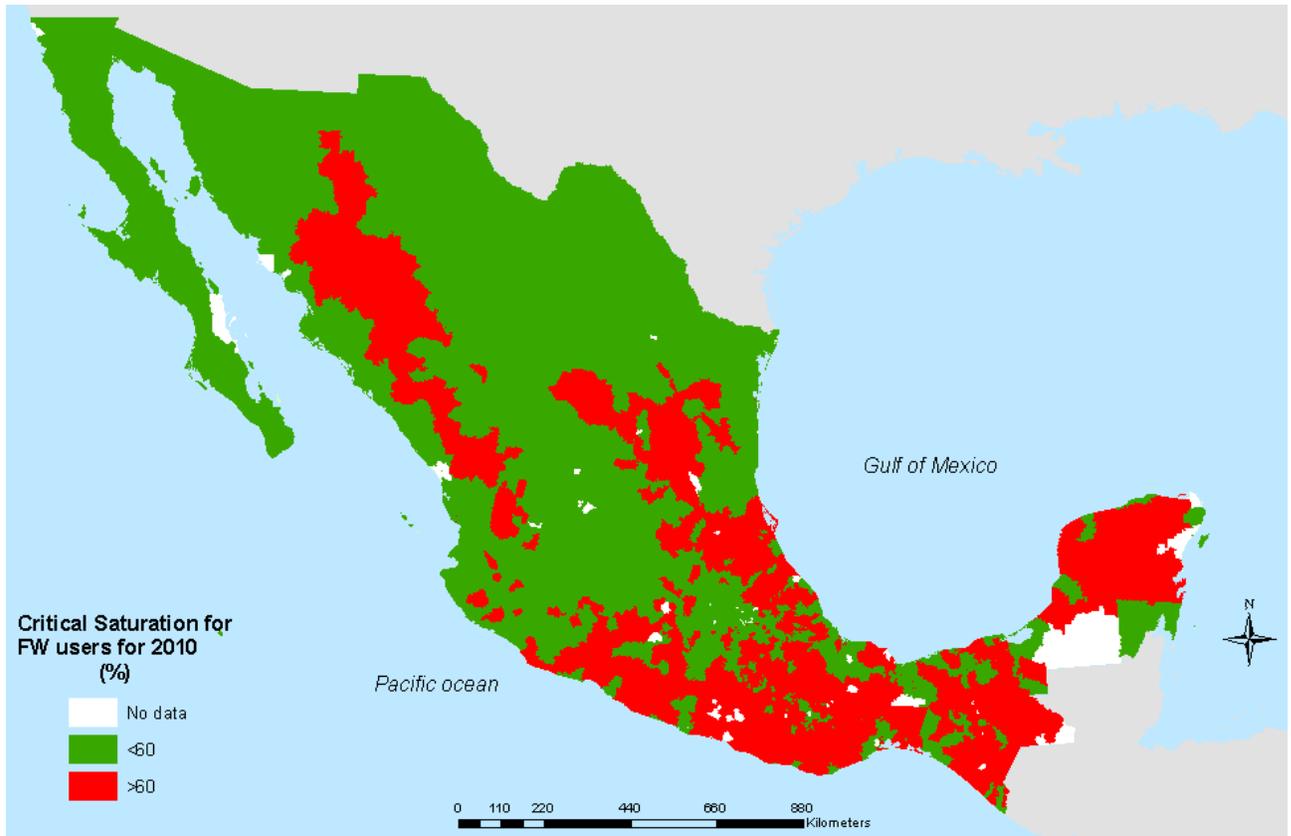
La obtención del consumo total y de los usuarios totales (exclusivos y múltiples) de leña permite calcular la evolución del consumo per cápita promedio para usuarios de leña, por unidad de análisis espacial para cada año del periodo de proyección. Se muestra la distribución del consumo per cápita promedio para usuarios de leña (exclusivos y mixtos) para el 2010 (figura 3.1.4).

**Figura 3.1.4 Distribución espacial del consumo per cápita promedio para usuarios totales de leña (exclusivos y mixtos) 2010**



Durante todo el periodo de estudio, casi la mitad de los municipios se mantuvieron como críticos, en términos de saturación de usuarios totales de leña (es decir, municipios en los que los usuarios de leña representan más del 60 por ciento del total de su población) (figura 3.1.5). En la prospección para 2030, el número de municipios críticos manifestó una ligera baja respecto del 2010, con un total de 1,195 unidades críticas.

**Figura 3.1.5 Distribución espacial de saturaciones críticas de usuarios de leña (exclusivos y mixtos) 2010**



### 3.1.2 Emisiones de gases efecto invernadero (GEI)

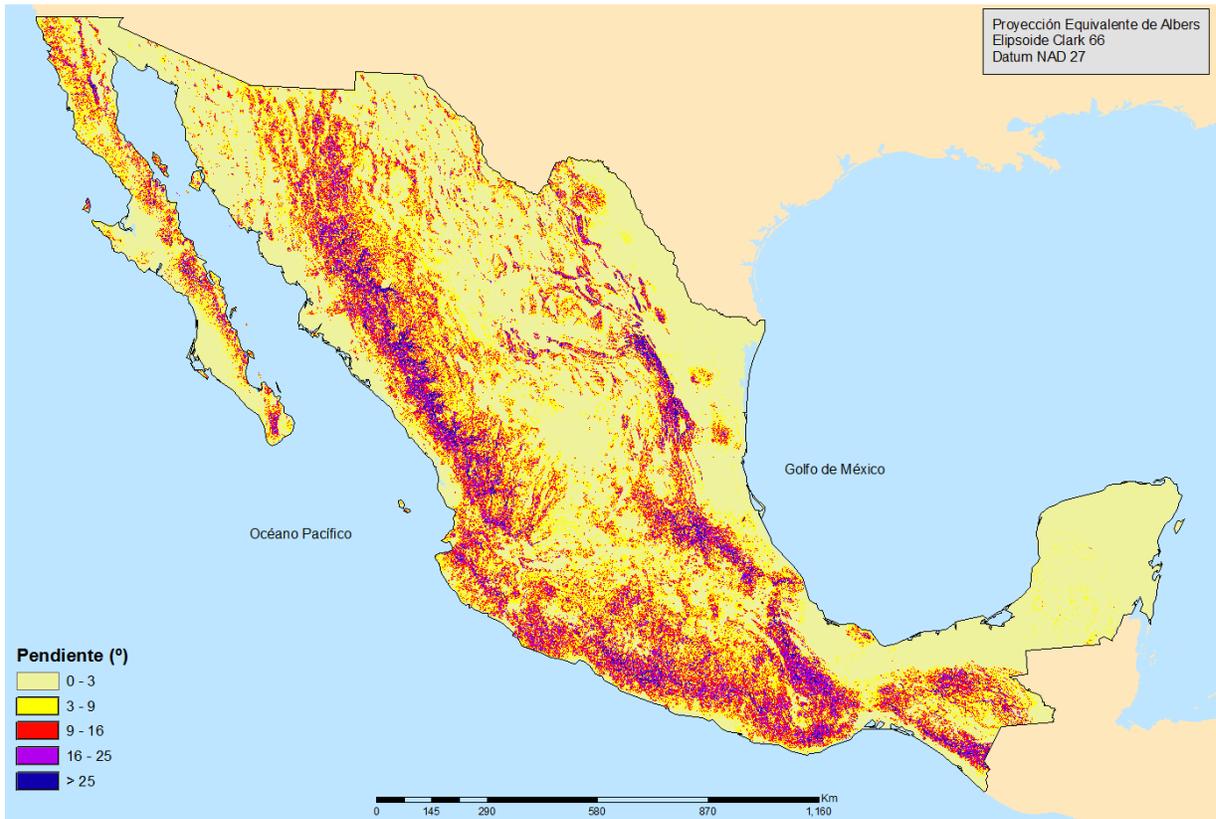
Obtención de la fracción no renovable del uso de leña

Área de bosque accesible de oferta de leña

En la figura 3.1.6 se muestra el mapa de pendientes que resultó de analizar el modelo digital de elevaciones (MDE) del SRTM. Como se consensó que a los 30° se presenta la

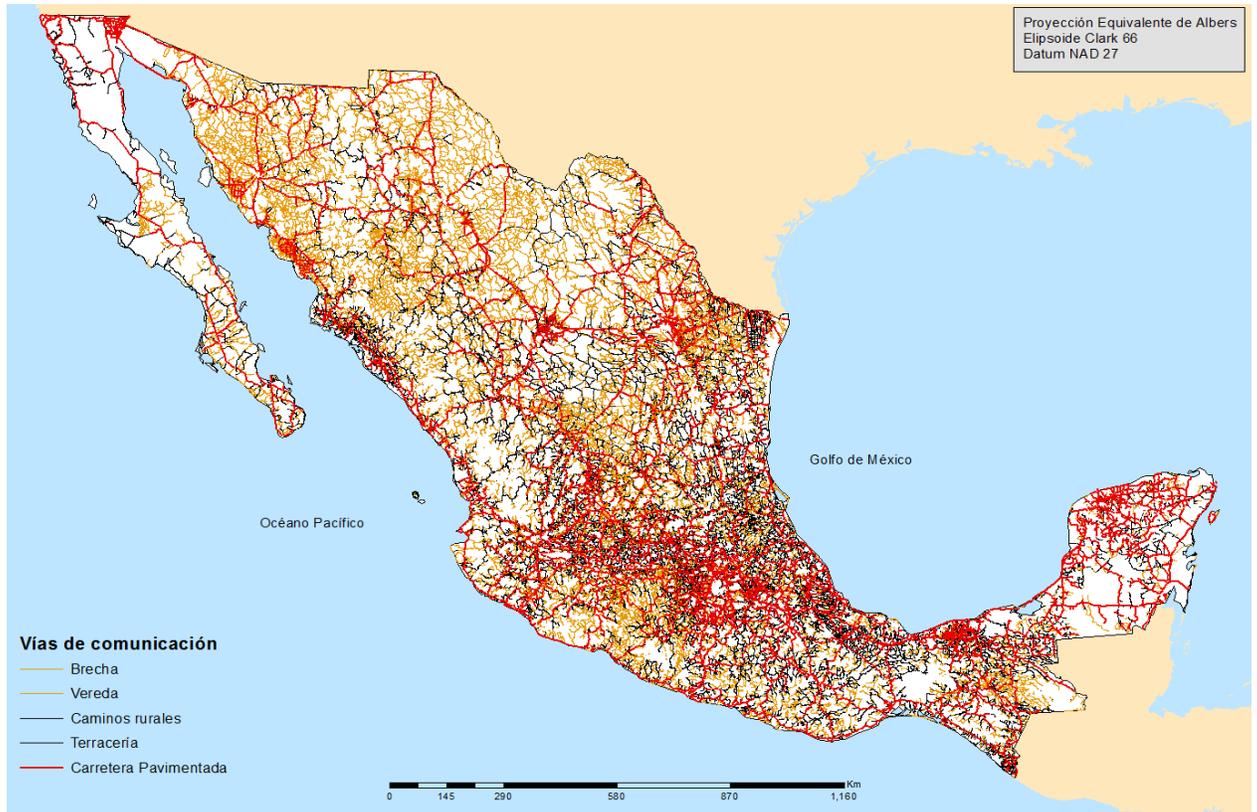
inclinación máxima de accesibilidad, las áreas en color azul se consideran inaccesibles para oferta de leña, aunque haya recursos forestales disponibles.

**Figura 3.1.6 Clasificación de pendientes del terreno**



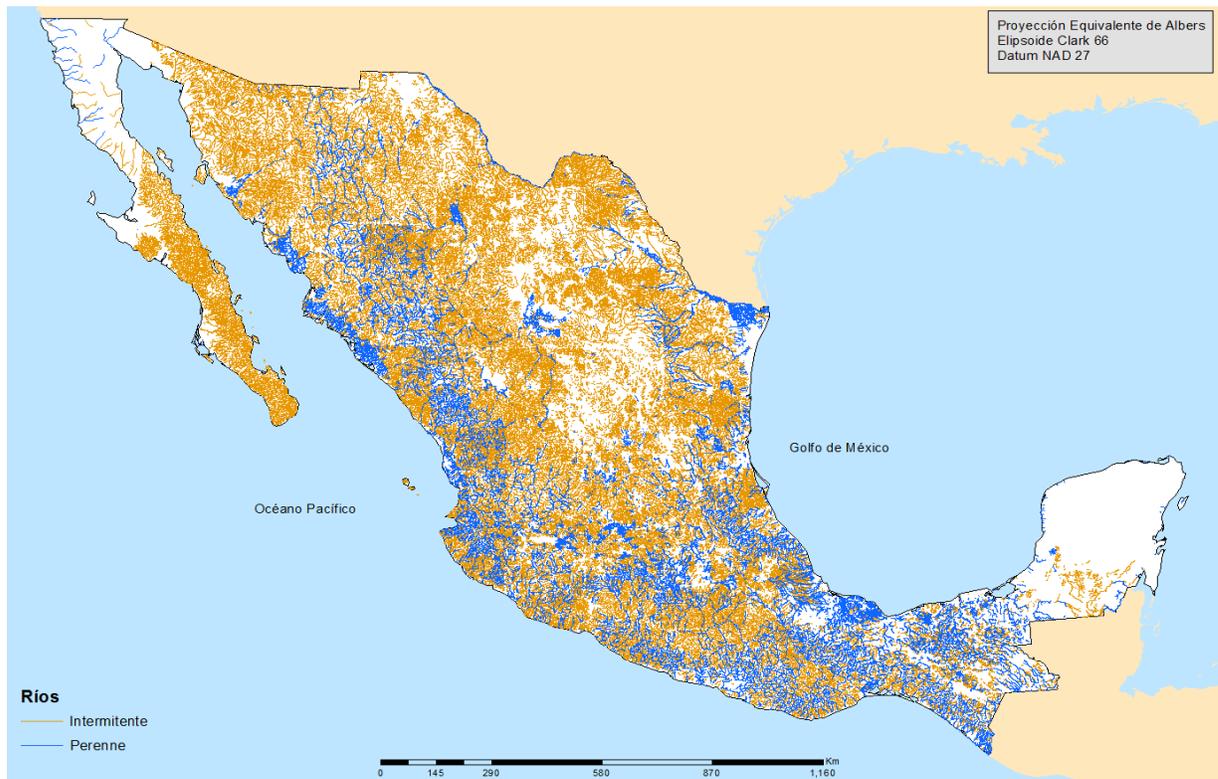
1) *Vías de comunicación*: éstas representan líneas que disminuyen la fricción. Todas las vías presentan una baja fricción, sin embargo, dependiendo el tipo, se les asignó diferente valor. Para carreteras, la fricción es la menor; para terracerías, ligeramente mayor; y la accesibilidad de brechas y veredas se calculó dependiendo de la pendiente (figura 3.1.7).

**Figura 3.1.7 Clasificación de las vías de comunicación  
de acuerdo con su facilidad de tránsito**



2) *Ríos*: reclasificados en perennes (alta fricción) e intermitentes (ligeramente menor que la anterior) (figura 3.1.8).

**Figura 3.1.8 Clasificación de ríos de acuerdo con el tipo de caudal**



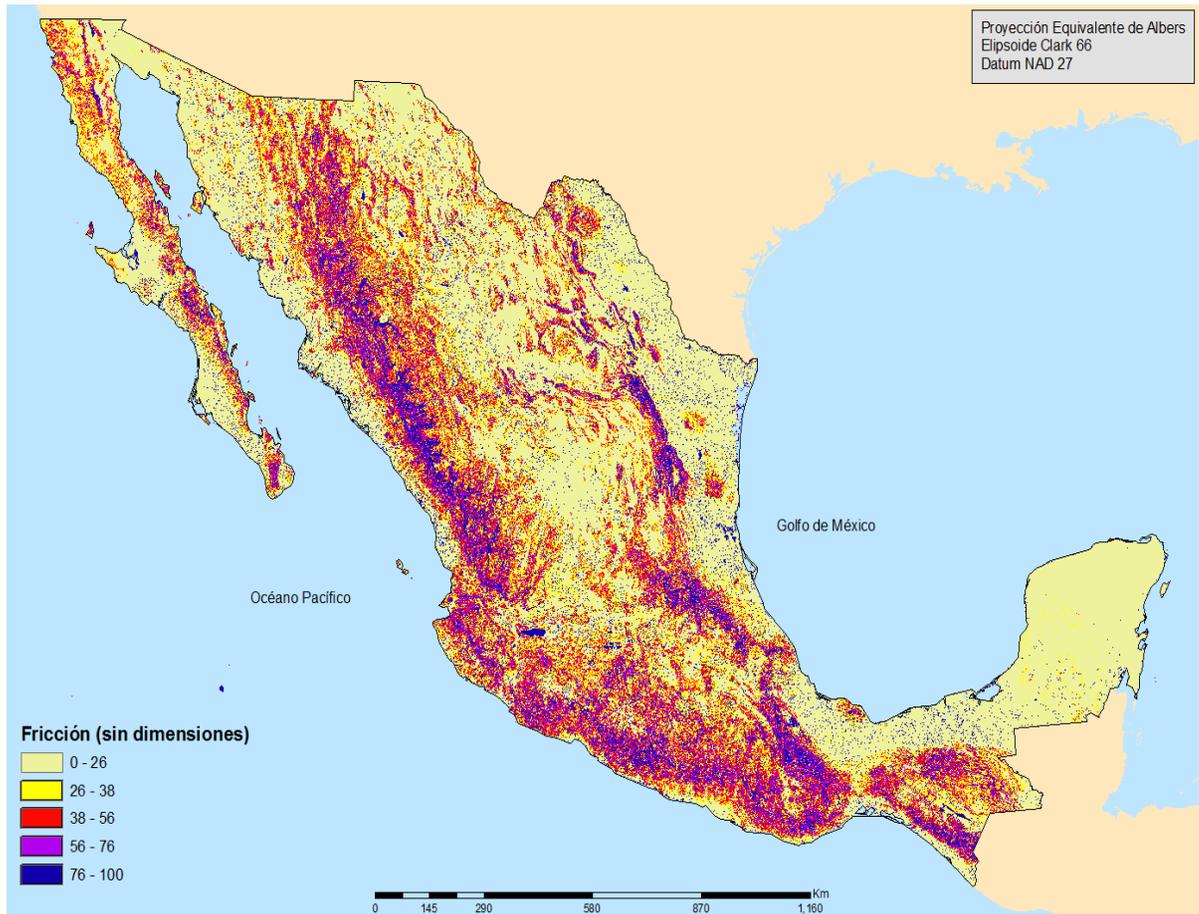
3) *Cuerpos de agua*: alta fricción (figura 3.1.9).

**Figura 3.1.9 Identificación de cuerpos de agua**



El mapa de fricción resultante, que integra todas las variables antes descritas, se muestra en la figura 3.1.10.

**Figura 3.1.10 Mapa de fricción**

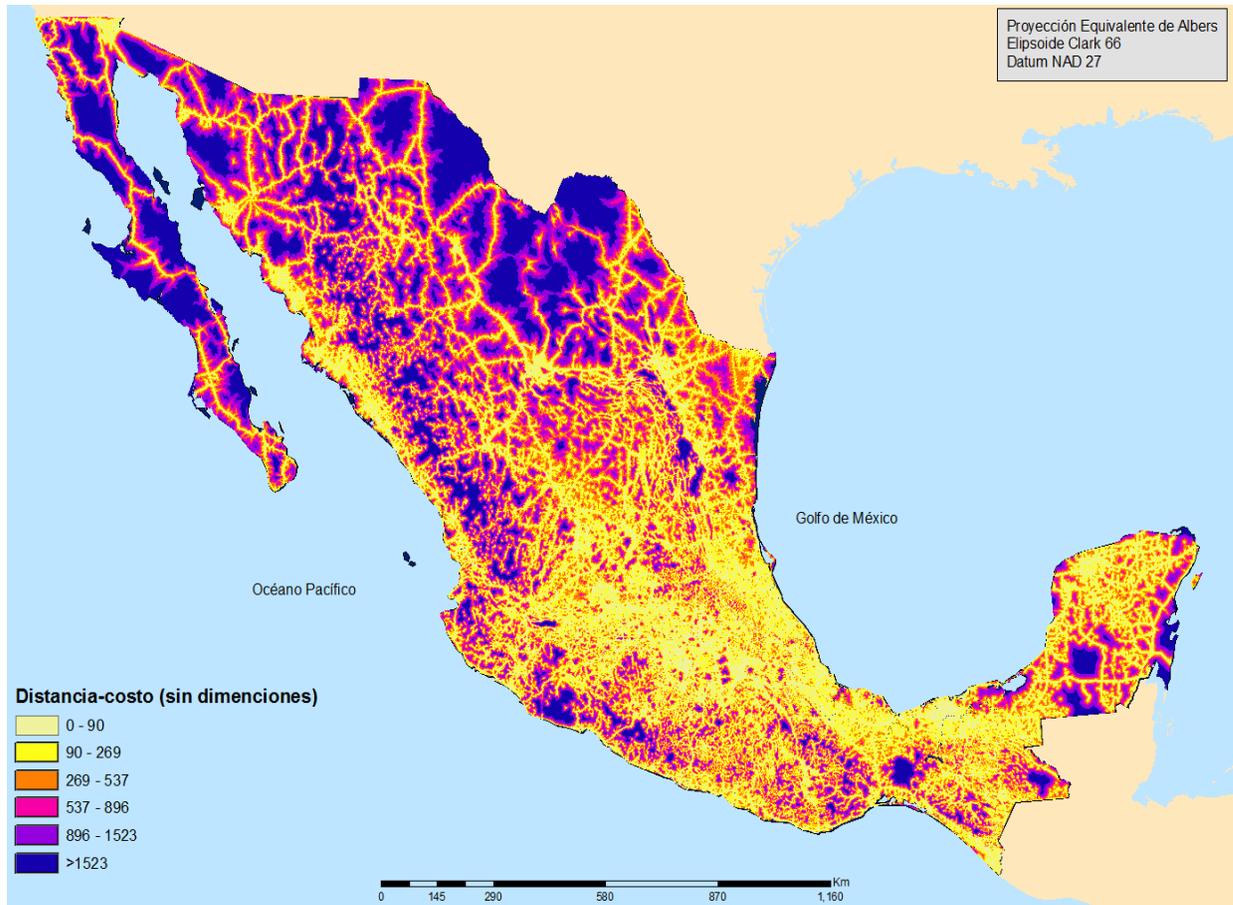


El mapa de fricción es, a su vez, el insumo principal para la obtención del mapa de costo-distancia, el cual se obtiene sobreponiendo el mapa de fricción a las localidades del país y su propósito es acumular las celdas de fricción a partir de las localidades. Este mapa expresa “qué tan fácil” es acceder a un área a partir de una ubicación dada (localidades).

A diferencia de un mapa de distancia euclidiana, la accesibilidad, en este caso, no sólo está dada por la cercanía a la localidad, sino que depende de las variables consideradas en el mapa de fricción (por ejemplo, dos localidades muy cercanas pero divididas por un río se expresarían prácticamente inaccesibles entre sí).

Otra diferencia respecto de un mapa de distancia euclidiana es que el de distancia-costo no tiene unidades, pues la fricción se calcula a partir de valores arbitrarios. El mapa de distancia-costo se muestra en la figura 3.1.11.

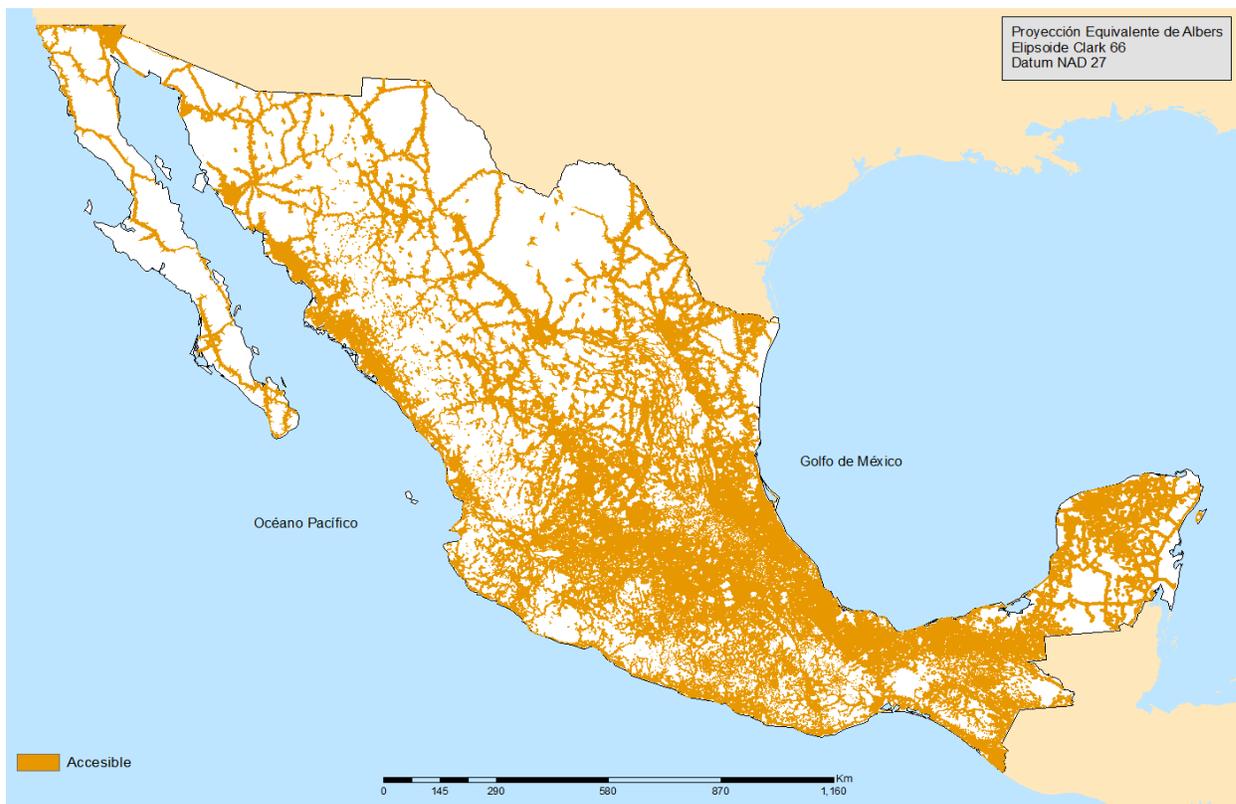
**Figura 3.1.11 Mapa de distancia-costo**



Este mapa (el 3.1.11) sirvió para estimar la superficie de vegetación (o área de ésta) accesible desde las localidades. Zonas con vegetación y altos valores de distancia-costo se consideraron inaccesibles y viceversa. Debido a que el mapa de distancia-costo carecía de unidades, había que establecer un umbral para definir qué era accesible y qué no. Para ello se analizaron los valores de distancia-costo en los que se presentaran zonas de cultivo.

Este criterio expresa, en cierto modo, “hasta dónde los pobladores pueden llegar” dentro de las zonas con cobertura vegetal, cuando su propósito no es extraer madera masivamente, sino sólo leña. Debido a que se requería conocer los valores más altos de accesibilidad de estas zonas agrícolas, pero sin considerar los valores extremos, para permanecer en un rango conservador de zonas accesibles, se tomó el tercer cuartil como el valor de accesibilidad máxima de distancia-costo. Con dicho valor, se extrajo la superficie nacional de vegetación que era accesible en los términos ya descritos (figura 3.1.12).

**Figura 3.1.12 Mapa de zonas accesibles para aprovechamiento de leña**



Para asignar geográficamente los valores de PDL por localidad vegetal, se reclasificó la capa de datos vectoriales de Uso de suelo y Vegetación del INEGI (2000), con los datos de

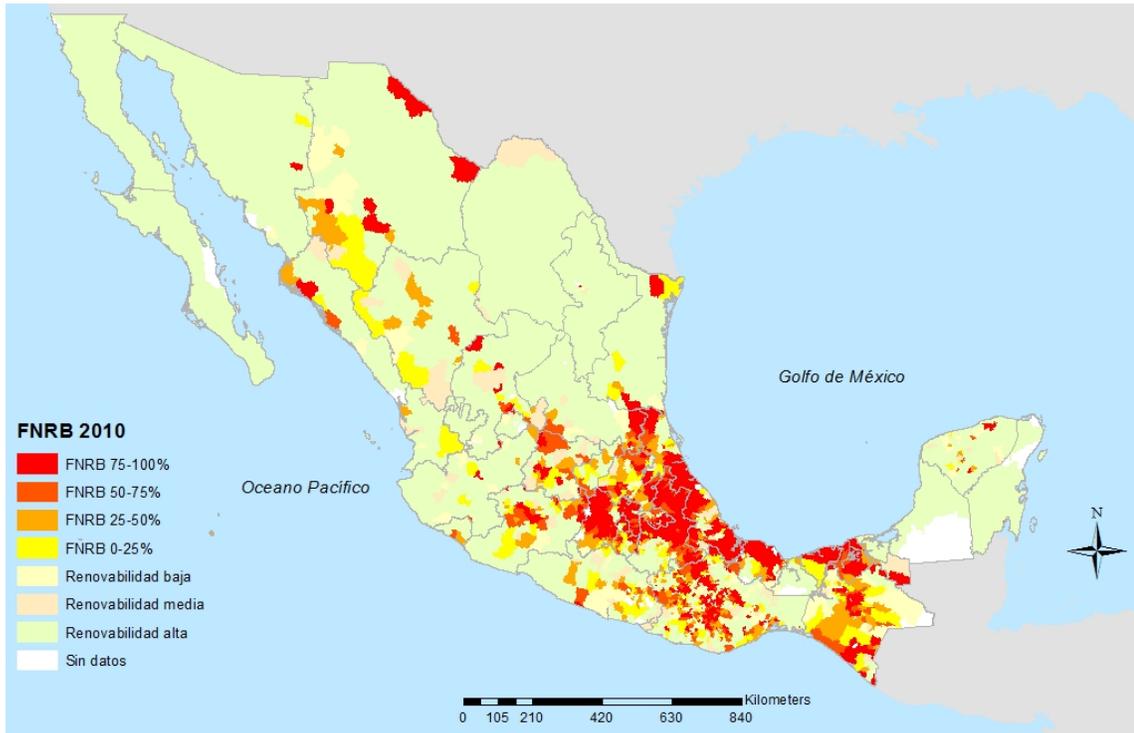
productividad disponible para leña (PDL). El mapa de áreas accesibles (mapa de accesibilidad), se sobrepuso al de productividad disponible para leña. Con estos dos insumos, se calculó finalmente la cantidad disponible de leña sustentable accesible para leña por municipio FWS (en ton/año).

Los valores obtenidos de FWS son el insumo natural del FNRB que plantea cuánta leña puede ser sujeta de manejo en cada tipo de cobertura. El factor de no renovabilidad, entonces, requiere de la cantidad de leña demandada por municipio para establecer un valor para cada municipio usuario de leña, el cual permita identificar, desde un modelo espacial, el impacto que el uso de leña tiene sobre la oferta de biomasa.

#### Distribución espacial del FNRB

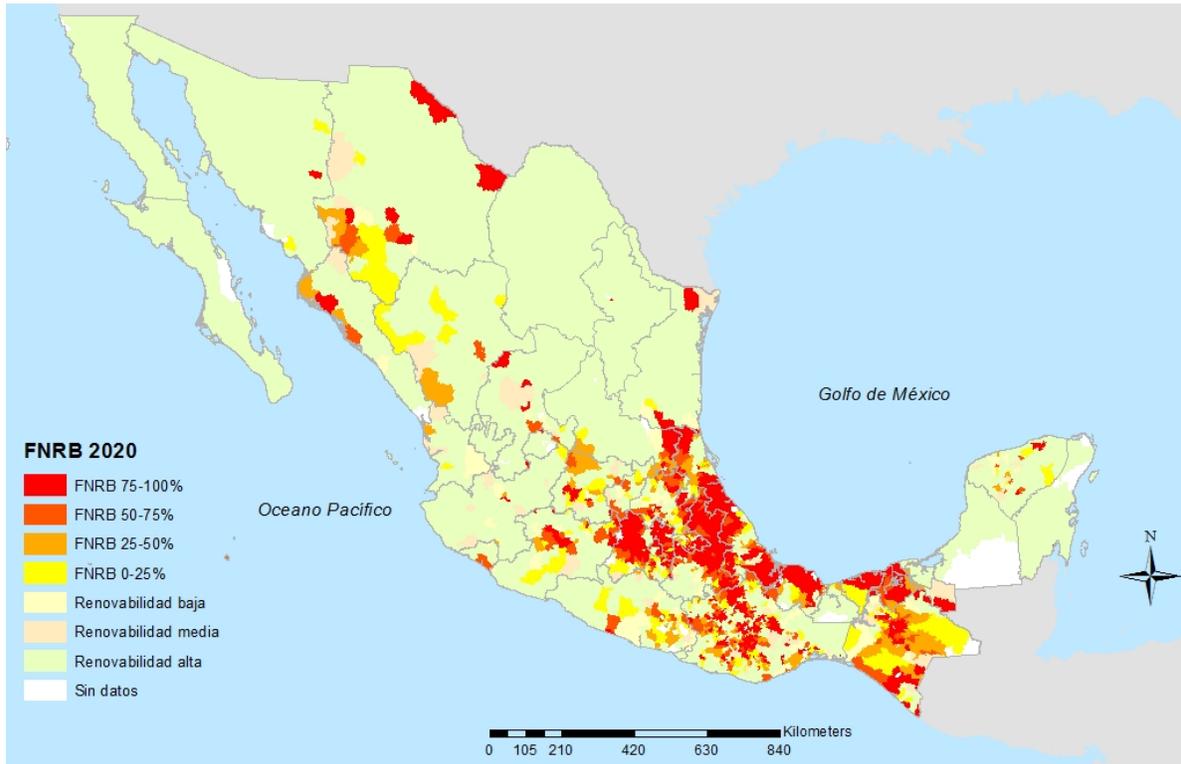
Los mapas de la variación de la distribución geográfica del FNRB a lo largo del territorio nacional se muestran en las figuras 3.1.13 a 3.1.15. La figura 3.1.13 muestra el cálculo de la distribución tanto de los valores del FNRB (cuando se presenta un uso no renovable del recurso leñoso), como del nivel de renovabilidad cuando aún no se presenta un uso no renovable de dicho recurso, por municipio para el 2010. Las zonas críticas, en tonos amarillos y rojos, se localizan principalmente en el centro y sur del país, pero existen municipios en Chihuahua, Durango y Tamaulipas con condiciones muy críticas de uso de leña no renovable para el sector doméstico.

**Figura 3.1.13 Valores del FNRB 2010**

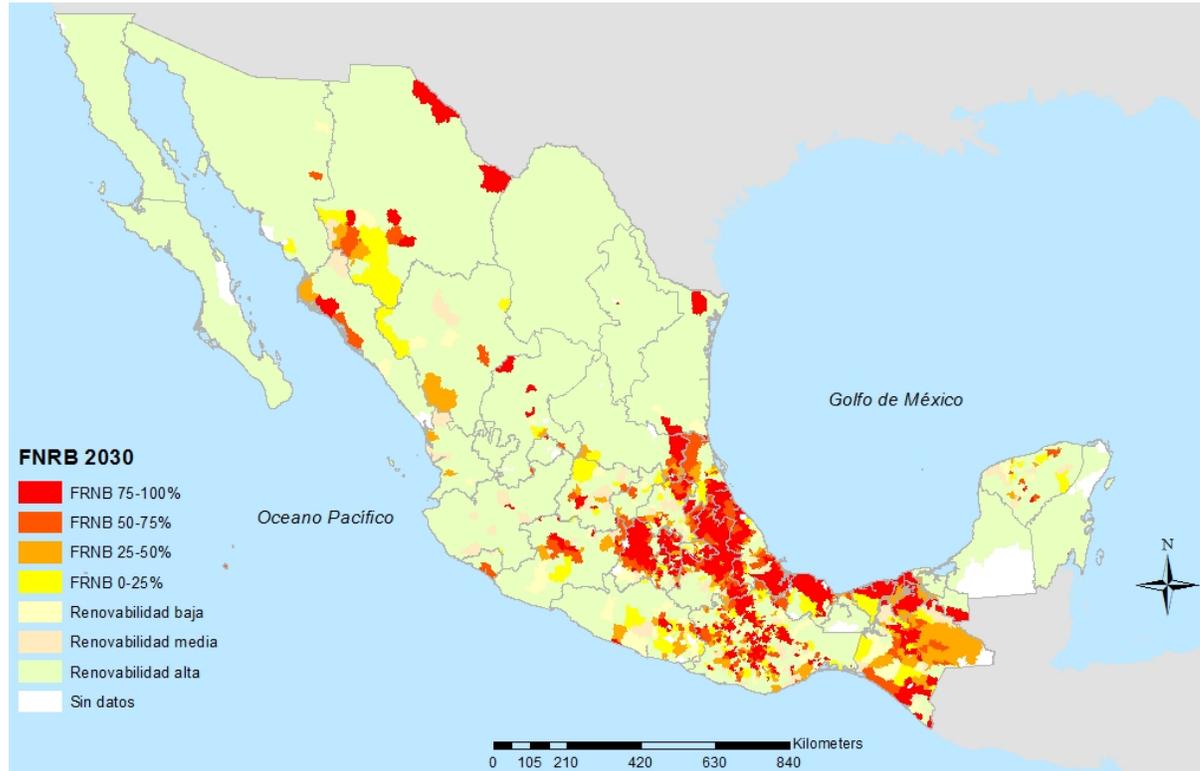


Las figuras 3.1.14 y 3.1.15 muestran el cambio del FNRB para el escenario base en 2020 y 2030, respectivamente. Se distingue que en algunos municipios de Tabasco y Sinaloa hubo una mejora del FNRB; pero en entidades como Chiapas y Yucatán ocurre lo contrario: incrementa el FNRB, ello a consecuencia de la variación de la proyección del consumo de leña en estos municipios.

**Figura 3.1.14 Proyección de valores del FNRB en 2020 para el escenario base**



**Figura 3.1.1 Proyecciones de los valores del FNRB en 2030 para el escenario base**



## Emisiones de gases efecto invernadero

Las emisiones de los GEI promedio para el escenario base son de 15.4 MtCO<sub>2e</sub> por año. Las emisiones totales acumuladas hasta 2030 para el periodo 2014-2030 de este escenario fueron de 263 MtCO<sub>2e</sub> y de 108 MtCO<sub>2e</sub> para el total acumulado intermedio al 2024.

## 3.2 Escenarios alternativos

### 3.2.1 Estufas eficientes instaladas por programas gubernamentales

En todos los escenarios alternativos, se supone la introducción de estufas eficientes de leña para cubrir la totalidad de las familias usuarias de leña en el año 2030 (calculadas en casi

cinco millones). Antes de iniciar con la formulación de los seis escenarios alternativos, se consideraron en la línea base las estufas eficientes entregadas en 2013 por el Programa Nacional de Estufas Rurales de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol), la Comisión Nacional Forestal (Conafor) y la ONG HELPS International. De acuerdo con las bases de datos proporcionadas por las organismos gubernamentales (OG) como por las no gubernamentales (ONG) ya señaladas, el total de estufas entregadas fue de aproximadamente 495,000, pero, con base en diversos estudios hechos por el GIRA (2015), se consideró que sólo se adoptó un 70 por ciento del total; es decir, el número de estufas consideradas antes del análisis para cada uno de los seis escenarios fue de casi 346,000 (cuadro 3.2.1).

**Cuadro 3.2.1 Estufas eficientes de leña, instaladas por OG y ONG hasta 2013**

| <i>Estufas instaladas<br/>Conafor y Sedesol</i> | <i>Estufas instaladas<br/>HELPS</i> | <i>Total de estufas instaladas</i> | <i>Estufas consideradas<br/>(70%)</i> |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 428,912   | 65,677                              | 494,589                            | 346,212                               |

En el cuadro 3.2.2 se advierte que en todos los estados del país se entregaron la mayoría de estas estufas eficientes de leña (por parte de los programas de Sedesol y Conafor). El detalle de su distribución espacial por municipio se observa en la figura 3.2.1. A pesar de saber en cuáles municipios se distribuyeron dichas estufas, no es posible identificar su criterio de distribución, ya que dentro de los municipios beneficiados se

encuentran los que tienen un alto consumo de leña, como en los que éste es prácticamente nulo.

**Cuadro 3.2.2 Número de usuarios de leña, fogones y estufas eficientes instaladas por Conafor y Sedesol hasta 2013**

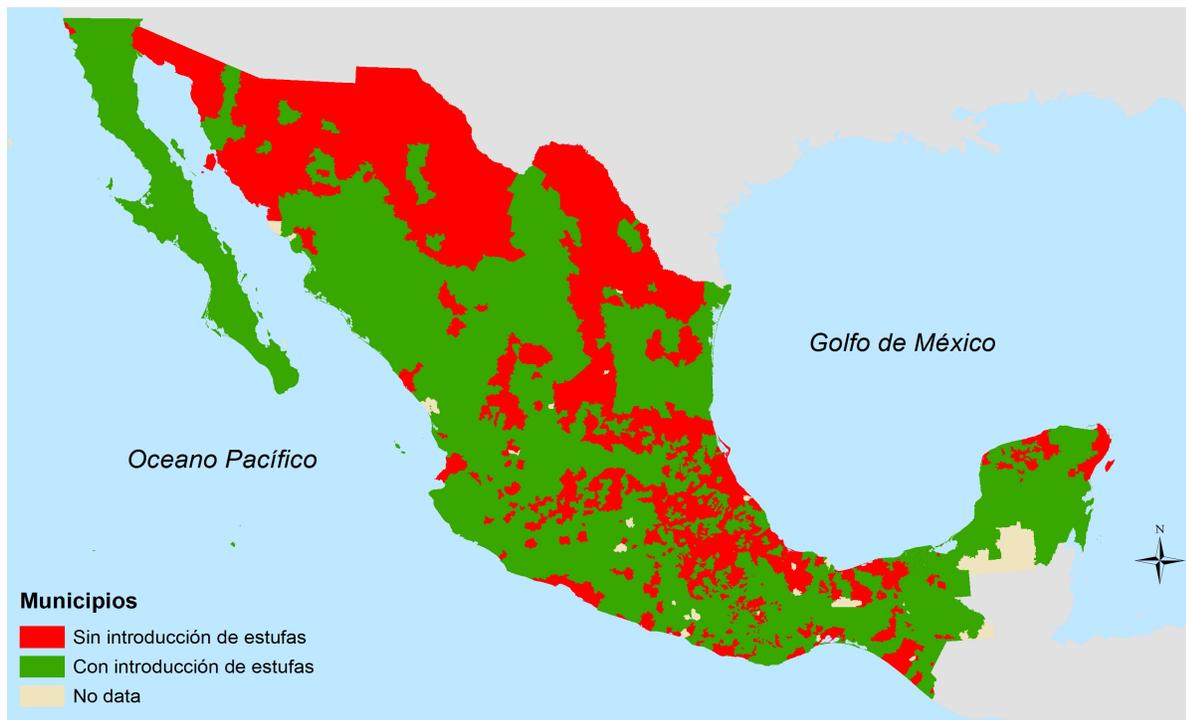
| <i>Estado</i>   | <i>Número de viviendas</i> | <i>Usuarios exclusivos (leña)</i> |     | <i>Usuarios mixtos (leña y gas LP)</i> |     | <i>Estufas instaladas</i> |     |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------------|-----|--|-----|---------------------------|-----|
|                 |                            |                                   |     |  |     |                           |     |
| Veracruz        | 1,774,364                  | 606,429                           | 74% | 217,277                                | 26% | 18,788                    | 2%  |
| Chiapas         | 982,083                    | 527,142                           | 79% | 144,090                                | 21% | 57,149                    | 9%  |
| Oaxaca          | 843,626                    | 470,293                           | 82% | 103,023                                | 18% | 48,112                    | 8%  |
| Puebla          | 1,380,797                  | 351,134                           | 75% | 118,047                                | 25% | 23,054                    | 5%  |
| Guerrero        | 723,995                    | 312,969                           | 76% | 99,044                                 | 24% | 21,961                    | 5%  |
| México          | 3,534,563                  | 234,900                           | 70% | 102,101                                | 30% | 28,601                    | 8%  |
| Michoacán       | 969,445                    | 183,803                           | 69% | 82,114                                 | 31% | 24,883                    | 9%  |
| Yucatán         | 504,771                    | 179,269                           | 75% | 60,557                                 | 25% | 20,630                    | 9%  |
| Tabasco         | 521,579                    | 163,968                           | 68% | 75,425                                 | 32% | 12,583                    | 5%  |
| Hidalgo         | 593,574                    | 157,928                           | 76% | 49,737                                 | 24% | 16,418                    | 8%  |
| San Luis Potosí | 589,009                    | 140,873                           | 74% | 50,293                                 | 26% | 15,933                    | 8%  |
| Guanajuato      | 1,228,350                  | 98,727                            | 69% | 44,773                                 | 31% | 12,156                    | 8%  |
| Jalisco         | 1,838,090                  | 65,896                            | 68% | 30,312                                 | 32% | 13,518                    | 14% |
| Sinaloa         | 646,735                    | 64,542                            | 68% | 29,689                                 | 32% | 7,986                     | 8%  |
| Chihuahua       | 1,024,824                  | 65,995                            | 78% | 18,817                                 | 22% | 21,681                    | 26% |
| Durango         | 389,523                    | 51,135                            | 75% | 17,119                                 | 25% | 14,883                    | 22% |

|                        |                   |                  |            |                  |            |                |           |
|------------------------|-------------------|------------------|------------|------------------|------------|----------------|-----------|
| Campeche               | 195,488           | 42,504           | 70%        | 18,426           | 30%        | 1,966          | 3%        |
| Querétaro              | 434,042           | 39,183           | 68%        | 18,024           | 32%        | 6,876          | 12%       |
| Quintana Roo           | 349,269           | 40,244           | 71%        | 16,816           | 29%        | 7,685          | 13%       |
| Morelos                | 445,179           | 38,405           | 68%        | 17,666           | 32%        | 2,562          | 5%        |
| Tamaulipas             | 891,034           | 36,450           | 69%        | 16,347           | 31%        | 7,856          | 15%       |
| Sonora                 | 694,398           | 31,684           | 68%        | 14,575           | 32%        | 5,651          | 12%       |
| Nayarit                | 260,874           | 31,031           | 68%        | 14,274           | 32%        | 6,101          | 13%       |
| Zacatecas              | 352,820           | 30,204           | 68%        | 13,894           | 32%        | 4,719          | 11%       |
| Tlaxcala               | 264,684           | 26,080           | 68%        | 11,997           | 32%        | 4,456          | 12%       |
| Nuevo León             | 1,141,246         | 21,194           | 69%        | 9,585            | 31%        | 8,283          | 27%       |
| Colima                 | 169,647           | 14,766           | 68%        | 6,792            | 32%        | 3,633          | 17%       |
| Coahuila               | 701,707           | 11,003           | 68%        | 5,061            | 32%        | 2,927          | 18%       |
| Baja<br>California     | 903,824           | 2,681            | 68%        | 1,233            | 32%        | 1,310          | 33%       |
| Aguascalientes         | 285,191           | 2,272            | 68%        | 1,045            | 32%        | 2,200          | 66%       |
| Distrito<br>Federal    | 2,547,946         | 1,970            | 68%        | 906              | 32%        | 2,668          | 93%       |
| Baja<br>California Sur | 163,043           | 1,916            | 68%        | 881              | 32%        | 1,682          | 60%       |
| <i>Totales</i>         | <i>27,345,717</i> | <i>4,046,591</i> | <i>74%</i> | <i>1,409,944</i> | <i>26%</i> | <i>428,912</i> | <i>8%</i> |

NOTA: el orden es de mayor a menor por usuario exclusivo de leña.

FUENTE: elaboración propia, con información de Sedesol y Conafor.

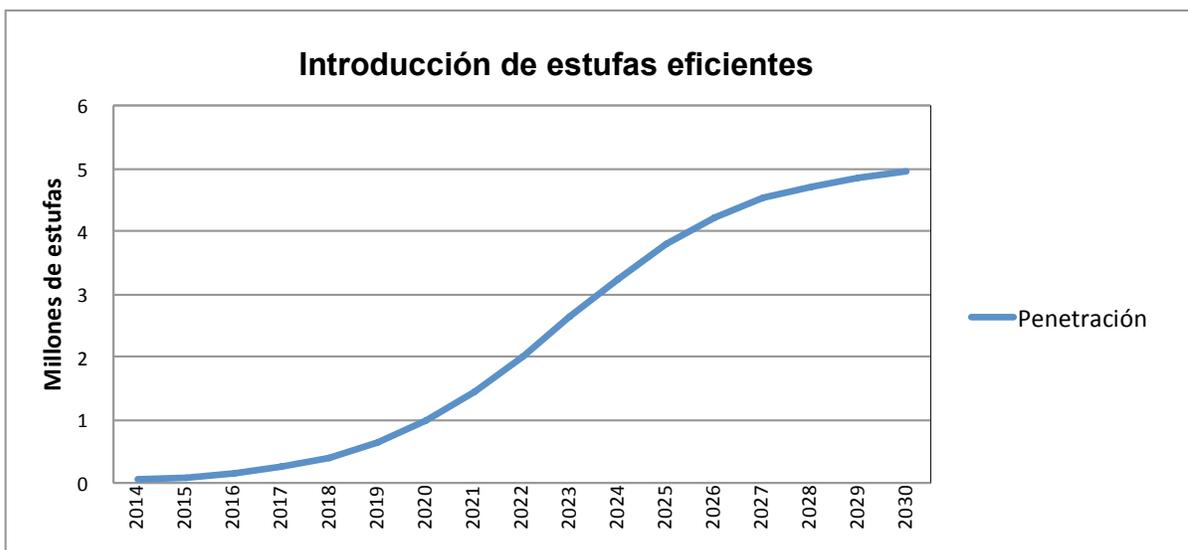
**Figura 3.2.1 Distribución de las estufas eficientes de leña instaladas por Sedesol y Conafor en 2013**



### 3.2.2 Sustitución de fogones por estufas eficientes de leña

En la figura 3.2.2, se muestra el número acumulado de estufas introducidas por año de acuerdo con una función logística. Se consideraron de aproximadamente cinco millones de estufas para cubrir la totalidad de las familias usuarias de leña estimadas.

**Figura 3.2.2 Número acumulado de estufas eficientes de leña introducidas al año 2030**



Para la introducción de las estufas eficientes de leña, de acuerdo con una penetración de tipo logística, también se utilizó el lenguaje de programación Matlab R2013a ®. Después de considerar las estufas instaladas por Conafor, Sedesol y HELPS, se obtuvieron las matrices separadas del periodo 2014-2030, por municipio, del saldo de fogones exclusivos y mixtos; el saldo de fogones totales, el consumo de leña por vivienda exclusiva y mixta; estufas introducidas exclusivas y mixtas. Estas matrices se utilizaron como base, para posteriormente hacer la introducción en cada uno de los seis escenarios.

### 3.2.3 Penetración de estufas eficientes de leña por municipio, de acuerdo al índice de prioridad de escenario

Al tener las matrices base, en las que se consideran las estufas introducidas por Conafor, Sedesol y HELPS, se obtuvieron, a su vez, las nuevas matrices de saldo de fogones

exclusivos y mixtos, el saldo de fogones totales, así como las estufas introducidas exclusivas y mixtas para cada uno de los seis escenarios por municipio, durante el periodo de análisis. El cambio en la distribución espacial de los municipios meta, debido a las diferentes estrategias para la introducción de las estufas eficientes de leña, se observa en las figuras 3.2.3 a 3.2.8. Como ejemplo, para el año intermedio 2024, se aprecia la diferencia entre los municipios meta de cada escenario para la introducción de estufas eficientes.

Los municipios meta para la introducción de estufas eficientes en el escenario alternativo 1, en donde se priorizaron los municipios con mayor FNRB (figura 3.2.3), se encuentran distribuidos principalmente en los estados del centro del país, la Meseta Purépecha en Michoacán, la parte norte de la Sierra Madre Occidental, Veracruz, Oaxaca, Chiapas y la Península de Yucatán. Se cubrió un total de 1,214 municipios.

**Figura 3.2.3 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 1**



Para el escenario alternativo 2, en donde se priorizó por el mayor número de usuarios mixtos (figura 3.2.4), los municipios meta se encuentran distribuidos en Sinaloa, Durango, la costa de los estados de Jalisco, Michoacán y Guerrero; Chiapas, Tabasco y, de manera conspicua, en la península de Yucatán. En el año intermedio, se contabilizaron 457 municipios para este escenario.

**Figura 3.2.4 Distribución espacial de estufaseficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 2**



En el escenario alternativo 3 (figura 3.2.5), en donde se priorizaron los usuarios totales, los municipios meta mantienen una distribución espacial parecida a los del escenario alternativo 2, pero con mayor presencia en Guerrero, Chiapas, península de Yucatán y Sinaloa. Se cubrieron 390 municipios en este escenario.

**Figura 3.2.5 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 3**



En la figura 3.2.6, se muestran los municipios meta para el escenario alternativo 4 (priorización por balance de leña). Los 1,036 municipios prioritarios al año 2024 para este escenario se encuentran distribuidos en la zona centro del país, Veracruz, Tabasco y Chiapas, y Sinaloa en la región de la Sierra Madre Occidental.

**Figura 3.2.6 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 4**



Los 1,259 municipios meta, resultantes de priorizar por porcentaje de pobreza en el escenario alternativo 5 (figura 3.2.7), se distribuyen en la región de la sierra de Sinaloa, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Región Central y Golfo de México, zona del Pacífico sur y gran parte de la península de Yucatán.

**Figura 3.2.7 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 5**



Finalmente, los 570 municipios prioritarios por emisiones iniciales al año 2024, en el escenario alternativo 6, se distribuyen a lo largo de la sierra de Sinaloa, la costa de Guerrero, parte del centro del país, Veracruz, Tabasco, Chiapas, Quintana Roo y Campeche.

**Figura 3.2.8 Distribución espacial de estufas eficientes de leña durante 2024 en el escenario alternativo 6**



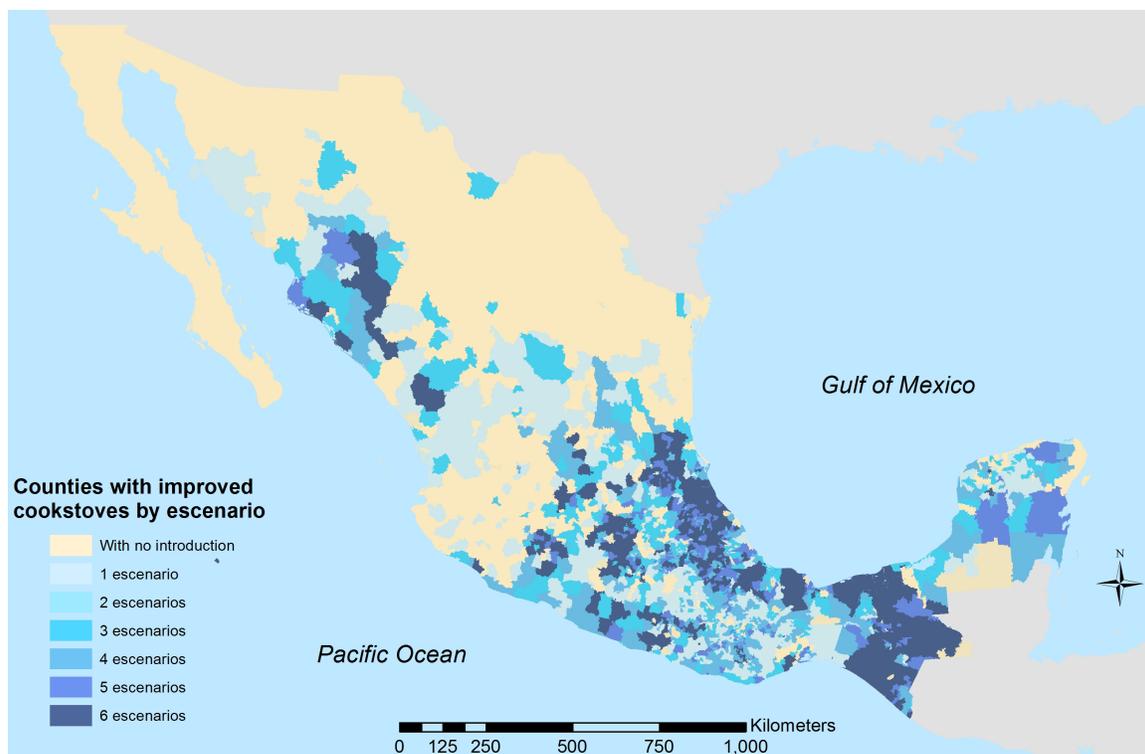
Es notable el cambio cuantitativo de los municipios meta entre los seis escenarios: se observa que en los escenarios 2 y 3, se cubren con menos municipios las metas de sustitución de estufas con fogones. Esto debido a que, precisamente, se dota de estufas eficientes en los municipios con mayor número de fogones disponibles. En contraparte, el número de municipios necesarios para satisfacer la meta de introducción de estufas en los escenarios alternativos 1, 4 y 5 (por FNRB, balance de leña y porcentaje de pobreza), es mayor porque no necesariamente en esos municipios se localiza la mayoría de los fogones que se reemplazarán.

Para el último escenario (por emisiones iniciales), el número de municipios meta disminuye respecto de los escenarios 1, 4 y 5, pero el valor se ubica entre estos valores y

los de los escenarios 2 y 3. Ello nos indica que la conformación del total de municipios en donde se presentan las mayores emisiones es una combinación entre algunos con el mayor número de usuarios (mixtos y totales) y otros con balance o FNRB altos.

En la figura 3.2.9 se observan los municipios en donde coincide la introducción de estufas eficientes, en uno o más escenarios hasta el año 2024. Se identificaron 135 municipios prioritarios para la introducción de estufas eficientes de leña para los seis escenarios (véase el apéndice 1), de los cuales 31, 28, 22, 12, 10 y 7 se localizan en Chiapas, Veracruz, Puebla, Estado de México, Guerrero y Michoacán, respectivamente. Los municipios prioritarios, de acuerdo con cada uno de los seis escenarios, se encuentran disponibles en archivos Excel en la Base de Datos del Laboratorio de Bioenergía del IIES.<sup>87</sup>.

**Figura 3.2.9 Municipios prioritarios para la introducción de estufas eficientes de leña**

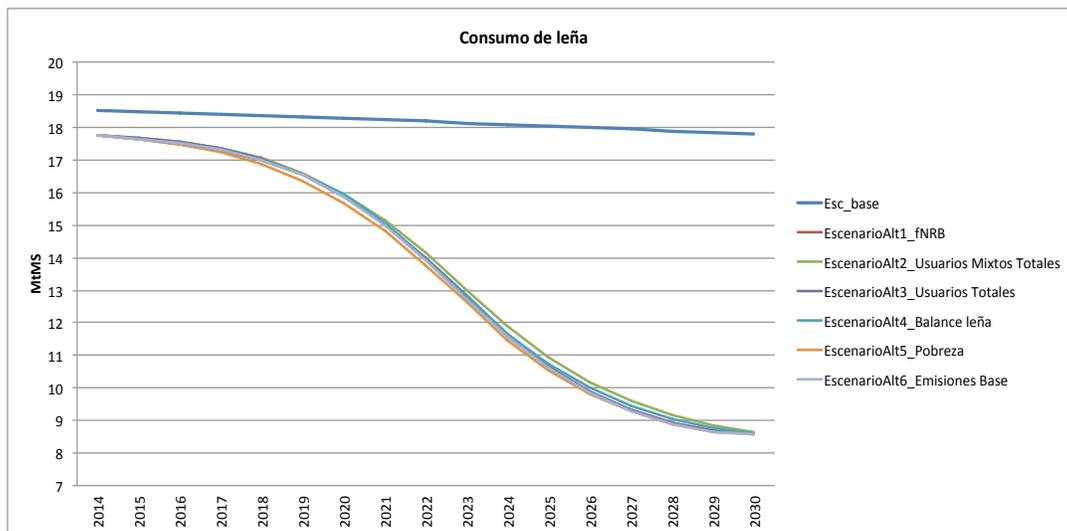


### 3.2.4 Consumos alternativos de leña por escenario

Como resultado de la sustitución de los fogones por estufas eficientes de leña, se obtuvieron nuevas proyecciones de los consumos de leña, de acuerdo con cada escenario propuesto. Como era de esperarse, el consumo de leña para el periodo de análisis no muestra variaciones significativas (figura 3.2.10).

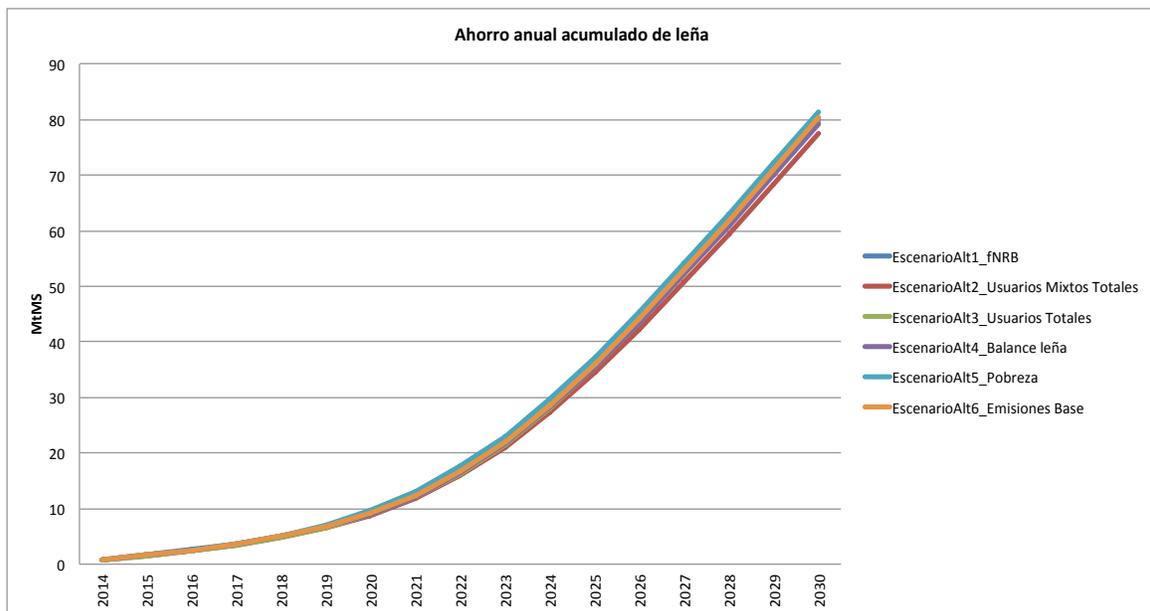
El consumo base anual de leña en 2014 se estimó en 18.5 millones de toneladas de materia seca (MtMS) y el consumo promedio de los seis escenarios alternativos se calculó en 17.8 MtMS. En 2030, el consumo base anual de leña se estimó en cerca de 17.8 MtMS y el consumo promedio de los seis escenarios en 8.6 MtMS. En resumen, el consumo base acumulado durante el periodo fue de 309 MtMS y el consumo promedio acumulado de los seis escenarios fue de 229.3 MtMS.

**Figura 3.2.10 Consumo anual de leña residencial para el escenario base y los seis escenarios alternativos 2030**



El ahorro acumulado promedio de leña de los seis escenarios es de 79.7 millones de toneladas de materia seca de leña (MtMS) (figura 3.2.11), lo que representa una disminución del 26 por ciento. Aunque los ahorros son muy similares en todos los escenarios, en el escenario alternativo 5 (EscenarioAlt5\_Pobreza) se presenta el mayor ahorro acumulado de leña con 81.5 MtMS, en tanto que en el escenario alternativo 2 (EscenarioAlt2\_Usuarios Mixtos Totales) se presenta el menor ahorro de leña con 77.5 MtMS.

**Figura 3.2.11 Ahorro anual acumulado de leña para el escenario base y los seis escenarios alternativos 2030**



### 3.2.5 Emisiones de gases efecto invernadero (GEI)

Comparación de los valores iniciales del FNRB de los municipios en donde se introdujeron estufas eficientes

Para identificar la diferencia entre el valor inicial del FNRB de los municipios objetivo, de acuerdo con cada escenario y para cada año del periodo de estudio, se obtuvo el promedio del valor del FNRB de los municipios en los que se introdujeron estufas eficientes. En el cuadro 3.2.3 se muestran los resultados para el escenario 1 y para el escenario alternativo 2 (más desfavorable en cuanto a la disminución de emisiones).

Se observa que, en efecto, el promedio del valor del FNRB de los municipios objetivo en 2014 del escenario alternativo 1 (priorización por FNRB) es del cien por ciento, en tanto que el promedio de los FNRB de los municipios objetivo del escenario alternativo 2 (priorización por número de usuarios mixtos) es de sólo el 8.6 por ciento.

Para el periodo comprendido entre 2021-2024, se advierte que, mientras el promedio de los FNRB para los municipios objetivo del escenario alternativo 1 era de 89.1, 76, 51 y 19 por ciento, respectivamente, para el escenario alternativo 2 resultaron promedios en el rango de renovabilidad del uso de leña.

**Cuadro 3.2.3 Diferencia entre los valores iniciales del FNRB, según los escenarios de penetración de estufas eficientes**

| <i>Año</i> | <i>Estufas introducidas</i> | <i>Escenario alternativo 1</i> | <i>Escenario alternativo 2</i> |
|------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|            |                             | <i>Promedio FNRB</i>           | <i>Promedio FNRB</i>           |
| 2014       | 65,017                      | -100.0%                        | -8.16%                         |
| 2015       | 43,189                      | -100.0%                        | Renovable                      |
| 2016       | 66,703                      | -100.0%                        | -94.93%                        |

|      |         |           |           |
|------|---------|-----------|-----------|
| 2017 | 103,456 | -100.0%   | -61.30%   |
| 2018 | 159,003 | -100.0%   | Renovable |
| 2019 | 238,529 | -99.2%    | Renovable |
| 2020 | 342,962 | -96.1%    | -26.98%   |
| 2021 | 462,440 | -89.1%    | Renovable |
| 2022 | 571,119 | -75.9%    | Renovable |
| 2023 | 632,826 | -51.1%    | Renovable |
| 2024 | 621,931 | -19.0%    | Renovable |
| 2025 | 543,219 | Renovable | Renovable |
| 2026 | 427,931 | Renovable | Renovable |
| 2027 | 310,847 | Renovable | Renovable |
| 2028 | 213,140 | Renovable | Renovable |
| 2029 | 140,859 | Renovable | Renovable |
| 2030 | 91,280  | Renovable | Renovable |

Proyección de la variación final de los valores del FNRB por introducción de estufas eficientes

La variación de los valores del FNRB del escenario alternativo 1, respecto de sus valores iniciales (base) en el año 2014, es evidente al pasar de 1,224 municipios con un uso no renovable de leña, a 854 municipios en 2024 y finalizar con 844 municipios en 2030. Es decir, hubo una disminución del 31 por ciento. También es notable que los valores del FNRB en los municipios restantes disminuyen considerablemente (cuadro 3.2.4).

**Cuadro 3.2.4 Municipios con algún valor del FNRB  
en 2014 (escenario base) y en 2030 (escenario alternativo 1)**

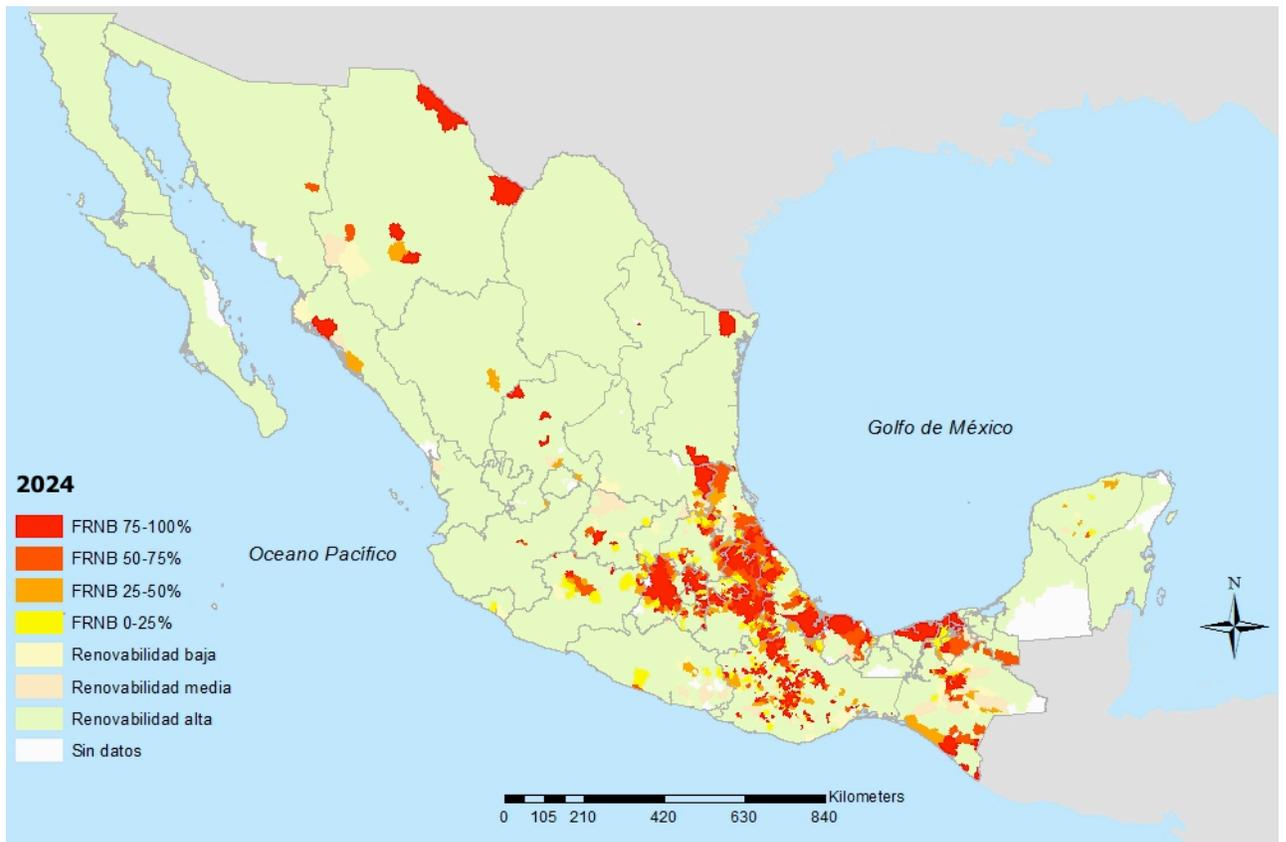
| <i>FNRB</i>  | <i>FNRB 2014 (escenario base)</i> |                   | <i>FNRB 2030 (escenario alternativo 1)</i> |                   |
|--------------|-----------------------------------|-------------------|--|-------------------|
|              | <i>Municipios</i>                 | <i>Porcentaje</i> | <i>Municipios</i>                          | <i>Porcentaje</i> |
| 100%         | 317                               | 13.1%             | 308  | 12.7%             |
| 90-99%       | 200                               | 8.2%              | 115  | 4.7%              |
| 80-89%       | 135                               | 5.6%              | 63   | 2.6%              |
| 70-79%       | 97                                | 4.0%              | 81   | 3.3%              |
| 60-69%       | 93                                | 3.8%              | 53   | 2.2%              |
| 50-59%       | 62                                | 2.6%              | 42   | 1.7%              |
| 40-49%       | 84                                | 3.5%              | 37   | 1.5%              |
| 30-39%       | 68                                | 2.8%              | 30   | 1.2%              |
| 20-29%       | 59                                | 2.4%              | 39   | 1.6%              |
| 10-19%       | 60                                | 2.5%              | 40   | 1.6%              |
| 0-9%         | 49                                | 2.0%              | 36   | 1.5%              |
| No renovable | 1,224                             | 50.5%             | 844  | 34.8%             |
| <i>Total</i> | <i>2,425</i>                      | <i>100.0%</i>     | <i>2,425</i>                               | <i>100.0%</i>     |

La proyección espacial de los valores del factor de no renovabilidad (FNRB) del escenario 1 (en este escenario el cambio es mayor) es muy importante para percibir no sólo los impactos cuantitativos, sino también los impactos espaciales. El mapa de la figura 3.2.12 muestra una mejora general significativa en el año 2024 de los valores del FNRB para el escenario alternativo 1. En cuanto al 2030, es notable esta mejoría a lo largo del territorio

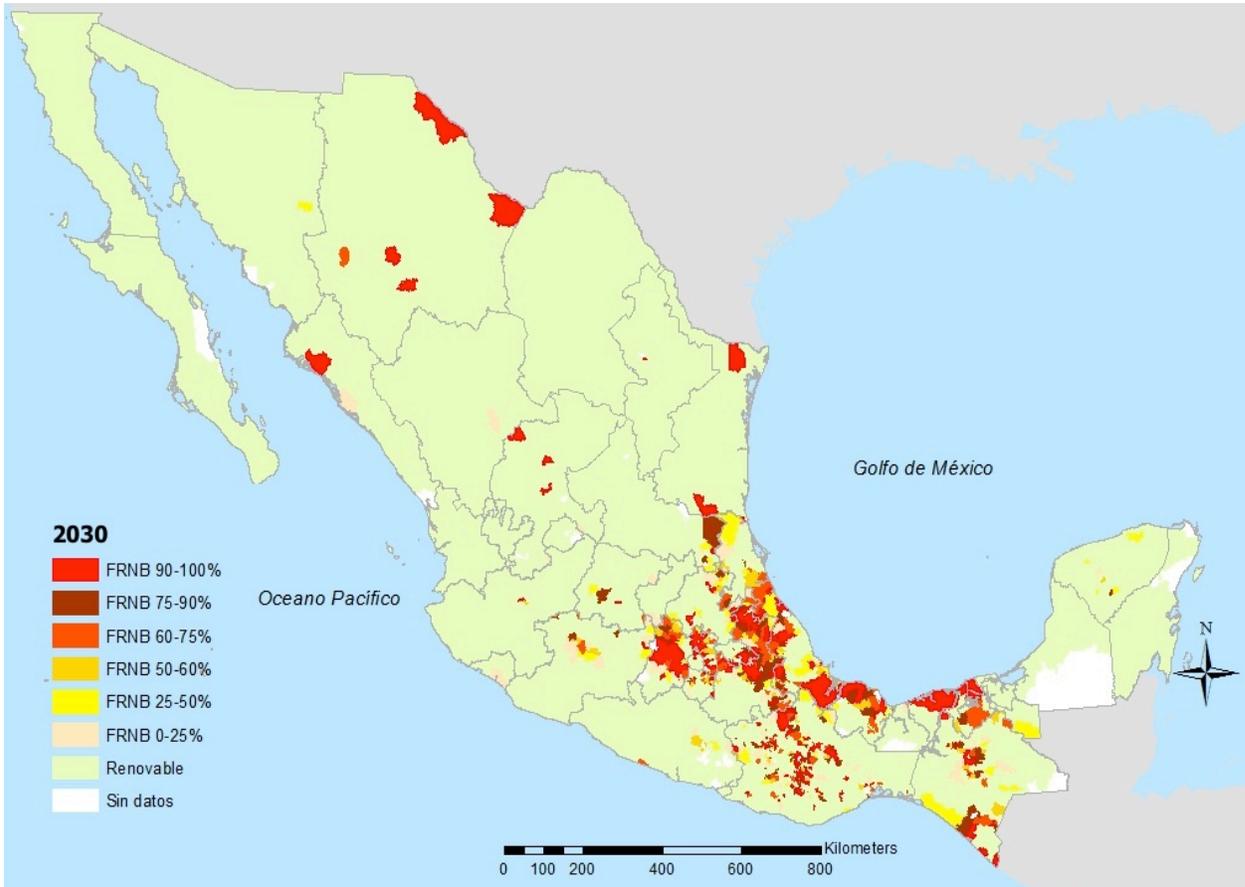
(figura 3.2.13), respecto de los valores del FNRB que se tendrían en el escenario base para dicho año (figura 3.1.15).

Como se indicó antes, los municipios donde se siguen teniendo FNRB críticos reflejan que el alto grado de consumo en estas regiones impide un uso sustentable del recurso leñoso y, con ello, son necesarias otras medidas por el lado de la oferta para lograr el uso sustentable del recurso.

**Figura 3.2.12 Proyección de los valores del FNRB durante 2024 para el escenario alternativo 1**



**Figura 3.2.13 Proyección de los valores del FNRB en 2030 para el escenario alternativo 1**

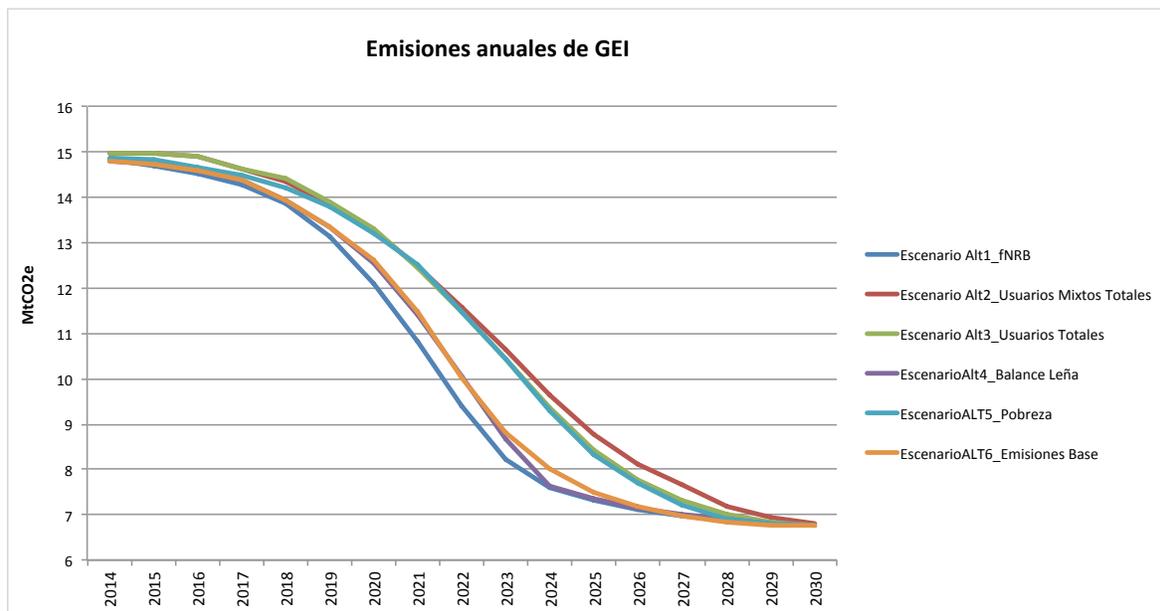


### Emisiones de los GEI

Las emisiones de los GEI para los seis escenarios alternativos tienen un comportamiento decreciente. Considerando los seis escenarios, se obtuvo una emisión promedio inicial de 15 MtCO<sub>2</sub>e anuales, que decrece hasta 6.8 MtCO<sub>2</sub>e en 2030. En la figura 3.2.14 se advierte que, a pesar de que al final en los seis escenarios se llega a casi la misma mitigación en el año 2030, las emisiones acumuladas durante el periodo 2014-2030 son diferentes.

El escenario donde existe el valor más bajo de emisiones acumuladas durante el periodo de estudio es el “Escenario Alt1\_fNRB”. En éste, las emisiones acumuladas fueron de 175.2 MtCO<sub>2e</sub>. El escenario en el cual se obtuvo el valor más alto de emisiones acumuladas fue el “Escenario Alt2\_Usuarios Mixtos Totales”, con 190.9 MtCO<sub>2e</sub>. La diferencia de las emisiones acumuladas entre ambos escenarios es de un 8.2 por ciento.

**Figura 3.2.14 Emisiones anuales de los GEI por uso de leña en el sector residencial para los seis escenarios alternativos**

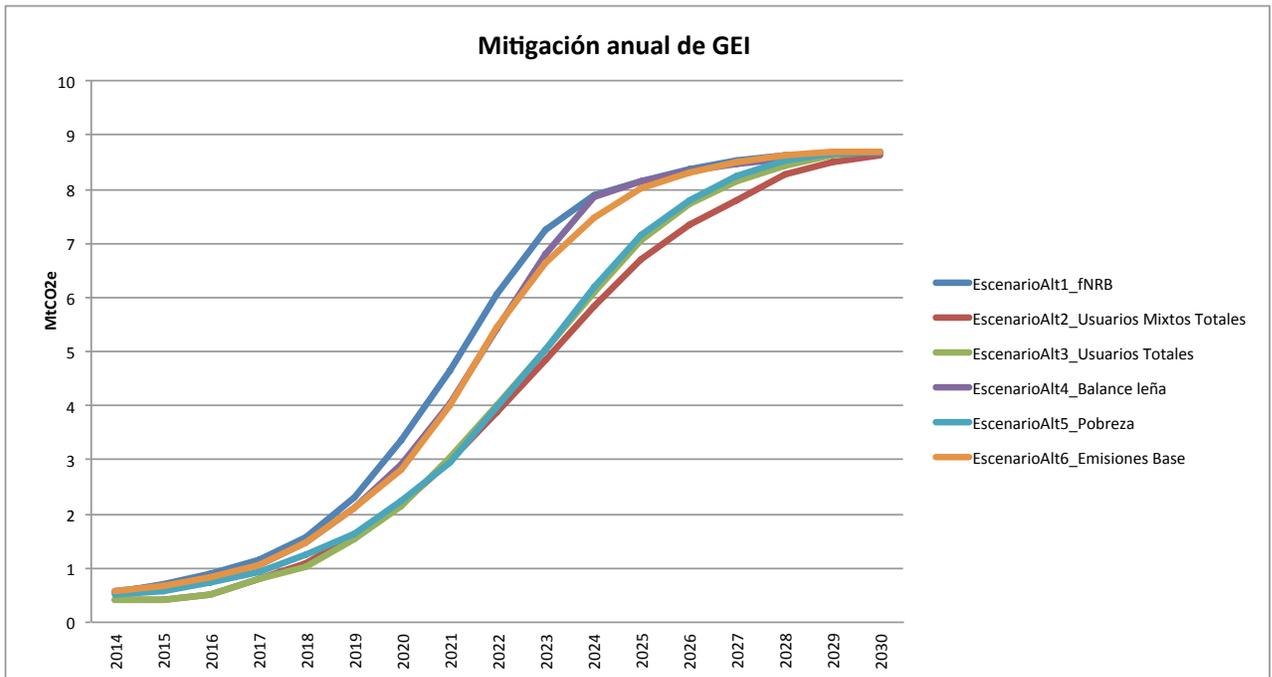


### 3.2.6 Proyección de la mitigación de los GEI de los escenarios alternativos

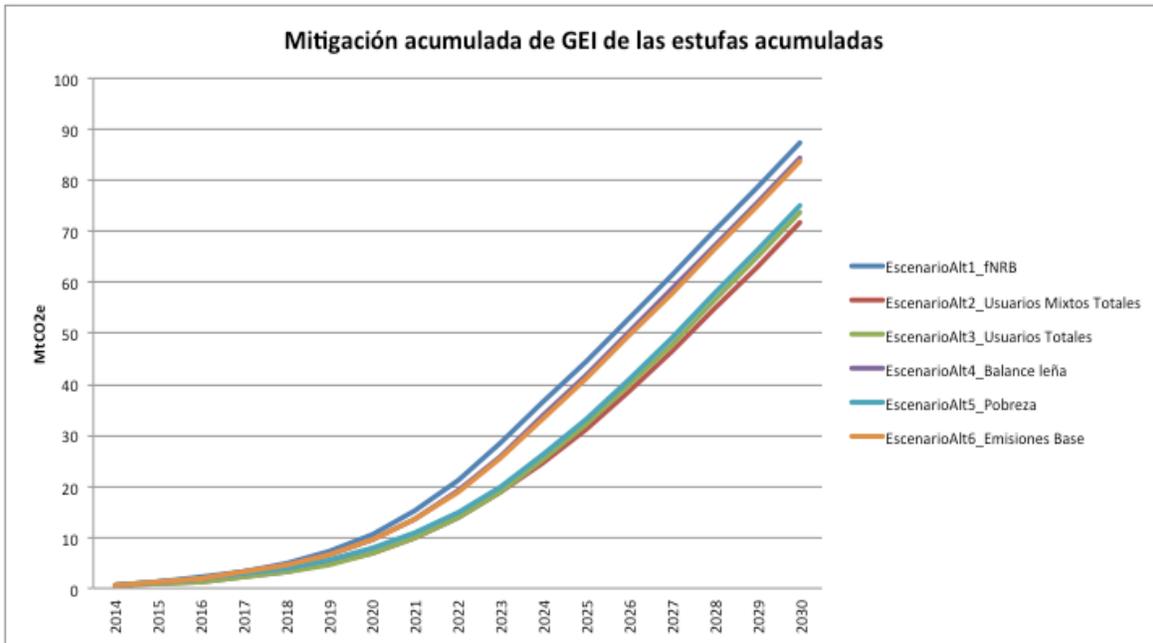
La mitigación de cada uno de los escenarios alternativos es proporcional a sus emisiones de los GEI. En la figura 3.2.15 se observa que, en los escenarios alternativos 1 y 2 es donde se presentan la mayor y menor mitigación de los GEI, correspondientemente. La mitigación máxima y mínima acumulada para el periodo de estudio fue de 87.4 y de 71.8 MtCO<sub>2e</sub>

millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> para el escenario alternativo 1 (EscenarioAlt1\_fNRB) y para el escenario alternativo 2 (EscenarioAlt2\_Usuarios Mixtos Totales), respectivamente (figura 3.2.16.). La diferencia entre ambos escenarios es de un 18 por ciento.

**Figura 3.2.15 Mitigación anual acumulada de los GEI por uso de leña en el sector residencial para los seis escenarios alternativos**



**Figura 3.2.16 Mitigación acumulada de los GEI por uso de leña en el sector residencial para los seis escenarios alternativos**

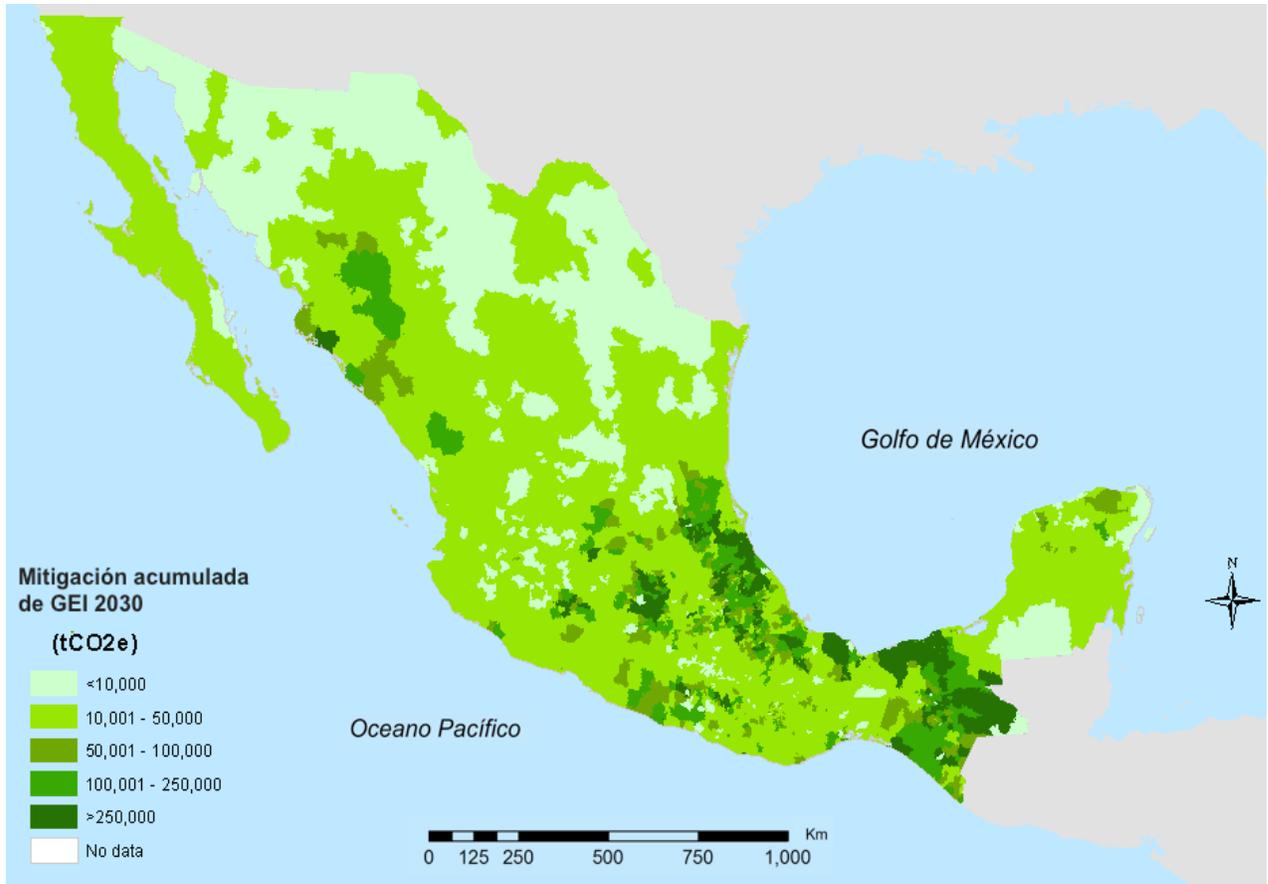


La figura 3.2.17 muestra la distribución espacial de la mitigación de emisiones de los GEI, debido a la introducción de estufas eficientes del escenario alternativo 1, respecto del escenario base. Las zonas en donde más mitigación se presenta se distribuyen principalmente en los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas.

También se observa una mitigación considerable en ciertos municipios del centro del país. La zona noroeste de igual manera presenta zonas con moderada mitigación. Cabe subrayar que en las zonas donde existe mayor consumo de leña, no necesariamente son las zonas donde habrá mayor mitigación; debido a que serían regiones que, aun cuando presentan consumos considerables, su oferta de leña es importante y entonces no existe una presión directa sobre el recurso forestal. De ahí que la introducción de estufas no impacte

directamente en la mitigación de los GEI per se, sino en otros aspectos (calidad del aire interior, ahorros de leña, etcétera).

**Figura 3.2.17 Distribución espacial de la mitigación acumulada de los GEI por municipio en el escenario alternativo 1 en 2030**



### 3.2.7 Impacto de la variación del valor del FNRB en la proyección de la mitigación de los GEI de los escenarios alternativos

Se realizó un análisis de sensibilidad para estimar el impacto de la variación del valor del FNRB, tanto en la proyección base como en los seis escenarios alternativos (cuadro 3.2.5).

La variación de este factor se llevó a cabo disminuyendo su valor, de manera homogénea para todos los municipios, en un 20, 40, 60, 80 y 95.50 por ciento.

Al modificar el valor del FNRB, el promedio de la mitigación de los seis escenarios descendió paulatinamente, hasta llegar al valor aproximado estimado por García-Bustamante *et al.*,<sup>88</sup> si se tomara en cuenta un FNRB promedio nacional de 4.6 por ciento. La diferencia entre la mitigación acumulada de los GEI tomando este último valor del FNRB y la estimada en este estudio sería del 71 por ciento.

**Cuadro 3.2.5 Análisis de sensibilidad del FNRB por uso de leña**

|                      | <i>FNRB</i> | <i>Emisiones</i>  |                               | <i>Mitigación</i>             | <i>Diferencia</i> |
|----------------------|-------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
|                      |             | <i>Línea base</i> | <i>Promedio de escenarios</i> | <i>Promedio de escenarios</i> |                   |
| <i>Disminución %</i> | Estimado    | 2,63E+08          | 1,83E+08                      | 7,94E+07                      | ---               |
|                      | -20%        | 2,20E+08          | 1,52E+08                      | 6,75E+07                      | 15%               |
|                      | -40%        | 1,77E+08          | 1,21E+08                      | 5,57E+07                      | 30%               |
|                      | -60%        | 1,34E+08          | 9,01E+07                      | 4,38E+07                      | 45%               |
|                      | -80%        | 9,10E+07          | 5,89E+07                      | 3,20E+07                      | 60%               |
|                      | -95.50%     | 5,77E+07          | 3,45E+07                      | 2,31E+07                      | 71%               |

## CONCLUSIONES

**E**n la presente investigación, se estimó la distribución espacial del consumo total de leña en México, su impacto en términos de emisión de gases de efecto invernadero, así como escenarios de mitigación de tales impactos, mediante la sustitución de fogones por estufas eficientes de leña. También se exploraron las implicaciones de la mitigación de los GEI a través de diferentes estrategias de difusión geográfica de dispositivos eficientes para el consumo de leña. A nivel global, pocos trabajos se han abocado conjuntamente a las dinámicas espacio-temporales de la relación de oferta y demanda tradicional de leña. Además, su escala de análisis es de tipo local y la modelación de la demanda se ha calculado de manera general. En este trabajo se buscó responder, en primer lugar, cuáles son las tendencias del consumo residencial de biomasa para cocción de alimentos, desagregadas espacialmente y que consideren el uso múltiple de leña-gas LP; en segundo lugar, qué tipo de intervenciones —y en qué sitios— tendrán más eficacia para mitigar los efectos del uso tradicional de biomasa residencial y, en tercer lugar, los posibles impactos ambientales futuros de estos escenarios en México.

En general, con este trabajo se revela que el uso de leña residencial en México seguirá siendo muy importante durante los próximos años. De hecho, aunque la tendencia nacional refleja una pequeña reducción en el consumo de leña, en muchos municipios del país se proyecta un incremento (como en municipios de la península de Yucatán) o un uso sostenido del consumo de esta materia. La tendencia en el consumo de leña por municipio es el resultado del efecto combinado de las tendencias históricas de dicho consumo, las demografía futura esperada y de la porción proyectada de usuarios mixtos de leña durante en el periodo de análisis. Con excepción del noreste de México, el resto del país depende,

en gran medida, del consumo de leña. Adicionalmente, muchos de los municipios con un alto consumo de ésta también se encuentran entre los más pobres de México.

Por otro lado, el tipo de intervenciones para mitigar los efectos del uso tradicional de biomasa residencial varía dependiendo de las características de la región y del tipo de impacto a mitigar (por ejemplo, la calidad del aire interior, social, etc.). Los impactos ambientales calculados en este estudio dependen, en gran medida, de los valores de la fracción del consumo de leña no renovable (FNRB). En general, se observa que en los casos más críticos las intervenciones se deben complementar con medidas de remediación desde el lado de la oferta (como las plantaciones con fines energéticos).

La distribución espacial de los impactos del uso de leña desenmascara la heterogeneidad de sus dinámicas locales, encubierta generalmente por cifras agregadas. En particular, el análisis revela que las regiones donde más mitigación se presenta se encuentran distribuidas principalmente en los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas. Asimismo se observa una mitigación considerable en ciertos municipios del centro del país. La zona noroeste de igual modo presenta zonas con moderada mitigación.

Las zonas en donde existe mayor consumo de leña no necesariamente son aquellas en las que habrá mayor mitigación; debido a que pueden ser regiones que, aunque presentan consumos considerables, su oferta de leña es relevante y no existe, pues, una presión directa sobre el recurso forestal.

En cuanto a la introducción de estufas, en estos casos no impacta directamente en la mitigación de los GEI per se, sino en otros aspectos: la calidad del aire interior, los ahorros de leña, entre otros. Otro aspecto *es que se identifican* más de una centena de municipios prioritarios —enclavados en Chiapas, Veracruz, Puebla, Estado de México, Guerrero y Michoacán— para introducción de estufas eficientes de leña, independientemente del

escenario elegido. Lo que reafirma que los impactos del uso de leña residencial responden a múltiples factores.

La propuesta de esta tesis es innovadora a nivel internacional porque

- 1) Presenta un modelo espacio-temporal nacional de demanda y oferta de leña.
- 2) se incluyen diferentes escenarios alternativos a través de la introducción de dispositivos eficientes.
- 3) Se modela al demanda de leña utilizando un esquema de uso múltiple de combustibles (“fuel stacking”).<sup>11, 12, 20, 70</sup>

Esto último contrasta con el esquema de modelado tradicional basado en la “escalera energética”.<sup>64-68</sup>

Finalmente, el modelo desarrollado en esta investigación aporta elementos importantes para el diseño de políticas públicas implementables en el plano nacional, ya que toman en cuenta el número de dispositivos eficientes, el momento propicio para la introducción de aquéllas y las regiones donde las intervenciones tendrán un mayor impacto.

De esta manera, se cierra el vacío existente entre los modelos globales<sup>21</sup> que, aunque proporcionan una primera aproximación de las regiones prioritarias en las que prima el uso de leña, no permiten diseñar intervenciones con un buen nivel de precisión, y los modelos locales,<sup>27-33</sup> que aunque aportan información más confiable, quizá no sea representativa para diseñar estrategias de intervenciones en el plano nacional.

El estudio de las dinámicas del uso de leña residencial es complejo, por lo que futuros estudios se beneficiarían al incorporar los siguientes aspectos:

- 1) Una mejor espacialización de la demanda de leña, a partir de estudios detallados sobre su consumo en distintas regiones de México.
- 2) Una comparación de los diferentes modelos de difusión, que incluya variaciones en el tipo de modelo de distribución (lineal, escalonado, logístico), así como de tecnologías eficientes.
- 3) Integración de las tasas de adopción de dispositivos eficientes.
- 4) Evaluación de las implicaciones y los beneficios (económicos, en el rubro de la salud y sociales) de los escenarios de introducción de estufas eficientes de leña.

## FUENTES

1. IPCC (2012). “Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”, Special Report IPCC.
2. FAO (2010). “Wood Energy”, en <http://www.fao.org/forestry/energy/en/>, consultada en octubre de 2010.
3. Masera, O., R. Bailis, R. Drigo, A. Ghilardi e I. Ruiz-Mercado (2015). “Environmental burden of traditional bioenergy use”, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, núm. 40: 15.1-15.50.
4. Legros, G. Havet, I. Bruce, N. Bonjour, S. (2009). *The Energy Access Situation in Developing Countries and Sub-Saharan Africa*. Nueva York, UNDP/WHO.
5. Smith, K.R. Bruce, N. Balakrishnan, K. Adair-Rohani, H. Balmes, J. *et al.* (2014). “Millions dead: how do we know and what does it mean? Methods used in the comparative risk assessment of household air pollution”, *Annu. Rev. Public Health*, 35: 185-206.
6. Chum, H. Faaij, A. Moreira, J. Berndes, G. Dhamija, P. Dong, H. *et al.* (2011). Bioenergy, en O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona (eds.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, Cambridge University Press. pp. 209-331.
7. Singh, P. y H. Gundimeda (2014). “Life cycle energy analysis (LCEA) of cooking fuel sources used in India households”, *Energy Environ. Eng.*, núm. 2: 20-30.
8. Smith, K. Uma, R. Kishore, V.V.N., Zhang, J. Joshi, V. Khalil, M.A.K. (2000). “Greenhouse implications of household stoves: an analysis from India”, *Annu. Rev. Energy Environ.*, núm. 25: 741-63.

9. Jetter, J. Zhao, Y. Smith, KR. Khan, B. Yelverton, T. *et al.* (2012). “Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards”, *Environ. Sci. Technol.*, núm. 46: 10827-10834.
10. Venn, J. (2005). “Rapid access to modern energy services using LP Gas”, *Energy & Environment*, vol. 16, núm. 5.
11. Masera, O., B. Saatkamp y D. Kammen (2000). “From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model”, *World Dev.*, 28: 2083-2103.
12. Ruiz-Mercado, I. y O. Masera (2015). “Patterns of stove use in the context of fuel-device stacking: rationale and implications”, *EcoHealth*, núm. 12: 42-56.
13. Simon, G.L., R. Bailis, J. Baumgartner, J. Hyman y A. Laurent (2014). “Current debates and future research needs in the clean cookstove sector”, *Energy Sustain. Dev.*, núm. 20: 49-57.
14. Anenberg, S.C., K. Balakrishnan, J. Jetter, O. Masera, S. Mehta *et al.* (2013). “Cleaner cooking solutions to achieve health, climate, and economic cobenefits”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47: 3944-3952.
15. Masera, O. (1990). “Sustainable energy scenarios for rural Mexico: An integrated evaluation framework for cooking stoves”. Berkeley, University of California, tesis de maestría, Energy & Resources Group.
16. Masera, O. (1993). *Sustainable fuel wood use in rural Mexico*, vol. 1, *Current Patterns of Resource Use*. Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, University of California.

17. Masera, O. (1995). *Socioeconomic and Environmental Implications of Fuel Wood Use Dynamics and Fuel Switching in Rural Mexico*. Berkeley, University of California.
18. Masera, O. (1997a). “Uso y conservación de la energía en el sector rural: el caso de la leña”, Pátzcuaro, Michoacán, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. (documento de trabajo, 21).
19. Sheinbaum, C., M. Martínez y L. Rodríguez (1996). “Trends and prospects in Mexican residential energy use”, *Energy*, vol. 21, núm. 6, pp. 493-504.
20. Masera, O. y J. Navia (1997b). “Fuel switching or multiple cooking fuels? Understanding inter-fuel substitution patterns in rural Mexican households”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 12, núm. 5, 347-361.
21. Bailis, R., R. Drigo, A. Ghilardi y O. Masera (2015). “The carbon footprint of traditional woodfuels”, *Nat. Clim. Change*, núm. 5: 266-272.
22. Bond, T.C. S.J. Doherty, D.W. Fahey, P.M. Forster, T. Berntsen *et al.* (2013). “Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, núm. 118: 5380-552.
23. Unger, N., T.C. Bond, J.S. Wang, D.M. Koch, S. Menon *et al.* (2010). “Attribution of climate forcing to economic sectors”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, núm. 107: 3382-87.
24. Ghilardi, A., G. Guerrero y O. Masera (2007). “Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach”, *Biomass and Bioenergy*, núm. 31, 475-491.
25. Ghilardi, A., G. Guerrero y O. Masera (2009). “A GIS-based methodology for highlighting fuelwood supply/demand imbalances at the local level: A case study for Central Mexico”, *Biomass and Bioenergy*, núm.33, 957-972.

26. Eckholm, E. (1975). *The Other Energy Crisis: Firewood*. Washington, D.C.: Worldwatch.
27. An, L., M. Linderman, J. Qi, A. Shortridge, J. Liu (2005). “Exploring complexity in a human-environment system: an agent-based spatial model for multidisciplinary and multiscale integration”, *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, núm. 95: 54-79.
28. An, L. G. He, Z. Liang y J. Liu (2006). “Impacts of demographic and socioeconomic factors on spatio-temporal dynamics of panda habitat”, en D Hawksworth y A. Bull (eds.), *Human Exploitation and Biodiversity Conservation*, Amsterdam, Springer, pp. 3-23.
29. An, L. y J. Liu (2010). “Long-term effects of family planning and other determinants of fertility on population and environment: agent-based modeling evidence from Wolong Nature Reserve, China”, *Popul. Environ.*, núm. 31: 427-459.
30. Chen, X., A. Viña, A. Shortridge, L. An y J. Liu (2014). “Assessing the effectiveness of payments for ecosystem services: an agent-based modeling approach”, *Ecol. Soc.*, núm. 19: 7.
31. Linderman, M.A., L. An, S. Bearer, G. He, Z. Ouyang y J. Liu (2006). “Interactive effects of natural and human disturbances on vegetation dynamics across landscapes”, *Ecol. Appl.*, núm. 16: 452-463.
32. Cantarello, E., A. Lovegrove, A. Orozumbekov, J. Birch, N. Brouwers y A.C. Newton (2014). “Human impacts on forest biodiversity in protected walnut-fruit forests in Kyrgyzstan”, *J. Sustain. For.*, núm. 33: 454-481.
33. Christensen, M., S. Rayamajhi y H. Meilby (2009). “Balancing fuelwood and biodiversity concerns in rural Nepal”, *Ecol. Model.*, núm. 220: 522-32.
34. Hughes, A., R. Matsika, G. Prasad y W. Twine (2009). “A model methodology

- representing woodfuel supply and demand dynamics”, Ciudad del Cabo, ponencia presentada en la 7<sup>th</sup> Conf. Domestic Use Energy.
35. Salerno, F., G. Viviano, S. Thakuri, B. Flury, R.K. Maskey *et al.* (2010). “Energy, forest, and indoor air pollution models for Sagarmatha National Park and Buffer Zone, Nepal: implementation of a participatory modeling framework”, *Mt. Res. Dev.*, núm. 30: 113-126.
  36. Ghilardi, A. y J.F. Mas (2011). “Spatial modeling of fuelwood extraction dynamics: a case study for Honduras”, Morelia, ponencia presentada en la XIX Reunión Nacional de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota y Sistemas de Información Espaciales (SELPER).
  37. Ghilardi, A., R. Bailis, J.F. Mas, M. Skutsch, J.A. Elvir *et al.* (2015). “Spatiotemporal modeling of fuelwood environmental impacts: towards an improved accounting of non-renewable biomass”, *Environ. Model. Softw. Rev* (en prensa).
  38. Díaz R. (2000). “Consumo de Leña en el sector residencial de México: evolución histórica y emisiones de CO<sub>2</sub>”, México, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, tesis de Maestría en Ingeniería.
  39. Consejo Nacional de Población (Conapo) (2011). “Dinámica demográfica 1990-2010 y proyecciones de población 2010-2030”, en [http://www.conapo.gob.mx/es/Conapo/Proyecciones\\_Analisis](http://www.conapo.gob.mx/es/Conapo/Proyecciones_Analisis), consultada en febrero de 2011.
  40. Masera, O., R. Drigo y M.A. Trossero (2003). “Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM): a methodological approach for assessing woodfuel sustainability and support wood energy planning”. Roma, Food

and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

41. Masera, O., A. Ghilardi, R. Drigo y M.A. Trossero (2006). “WISDOM: a GIS-based supply demand mapping tool for woodfuel management”, *Biomass Bioenergy*, vol. 30, núm. 7: 618-637.
42. Bruce, N., E. Rehfuess, S. Mehta, G. Hutton y K. Smith (2006). “Indoor air pollution”, en D.T. Jamison, J.G. Breman, A.R. Measham, G. Alleyne, M. Claeson, D.D. Evans *et al.* (eds.), *Disease Control Priorities in Developing Countries*, 2<sup>a</sup> ed., . Washington, D.C, The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, pp. 793-815.
43. Naeher, L.P., M. Brauer, M. Lipsett, J.T.. Zelikoff, C.D. Simpson, J.Q. Koenig *et al.* (2007). “Woodsmoke health effects: a review”, *Inhal Toxicol*, vol. 19, núm. 1: 67-106.
44. Pérez-Padilla, R., A. Schilman y H. Riojas-Rodríguez (2010). “Respiratory health effects of indoor air pollution”, *Int J Tuberc Lung Dis*, vol. 14, núm. 9: 1079-1086.
45. Torres-Duque, C., D. Maldonado, R. Pérez-Padilla, M. Ezzati y G. Viegli (2008). “Biomass fuels and respiratory diseases: a review of the evidence”, *Proc Am Thorac Soc*, vol. 5, núm. 5: 577-590.
46. Straif, K., R. Baan, Y. Grosse, B. Secretan, F. El Ghissassi y V. Coglianò (2006). “Carcinogenicity of household solid fuel combustion and of high-temperature frying”, *Lancet Oncol*, vol. 7, núm. 12: 977-978.
47. Bruce, Nigel, Rogelio Pérez-Padilla y Rachel Albalak (2000). “Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge”, *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 78, núm. 9, pp. 1078-1092, en

<[http://www.scielosp.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0042-](http://www.scielosp.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0042-)

9686200000900004&lng=en&tlng=en>, consultada el 11 de noviembre de 2015.

48. Smith, K.R., M.G.Apte, Y. Ma, W. Wathana y A. Kulkarni (1994). "Air pollution and the energy ladder in Asian cities", *Energy, Int. J.*, núm. 19, pp. 587-600.
49. McCracken, J.P. y K.R. Smith (1998). "Emissions and efficiency of improved woodburning cookstoves in Highland Guatemala", *Environ Int*, vol. 24, núm. 7: 739-747.
50. Albalak, R. N. Bruce, J.P. McCracken, K.R. Smith y T. de Gallardo (2001). "Indoor respirable particulate matter concentrations from an open fire, improved cookstove, and LPG/open fire combination in a rural Guatemalan community", *Environ Sci Technol*, vol. 35, núm. 13: 2650-2655.
51. Clark, M. M. Paulsen, K.R.. Smith, E. Canuz y C.D.. Simpson (2007). "Urinary methoxyphenol biomarkers and woodsmoke exposure: comparisons in rural Guatemala with personal CO and kitchen CO, levoglucosan, and PM2.5", *Environ Sci Technol*, vol. 41, núm. 10: 3481-3487.
52. Armendáriz-Arnez, C., R.D. Edwards, M. Johnson, M. Zuk, L. Rojas, R.D. Jiménez *et al.* (2008). "Reduction in personal exposures to particulate matter and carbon monoxide as a result of the installation of a Patsari improved cook stove in Michoacan Mexico", *Indoor Air*, vol. 18, núm. 2: 93-105.
53. Troncoso, K., A. Castillo, O. Masera y L. Merino (2007). "Social perceptions about a technological innovation for fuelwood cooking: case study in rural Mexico", *Energy Policy*, vol. 35, núm. 5: 2799-2810.
54. Skutsch, M. (2005). "Gender analysis for energy projects and programmes", *Energy for Sustainable Development*, vol. 9, núm. 1, pp. 37-52.

55. Schauer, J.J., M.J. Kleeman, G.R. Cass y B.R.T. Simoneit (2001). "Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C1-C29 Organic compounds from fireplace combustion of wood", *Environ. Sci. Technol.* Núm. 35: 1716-1728.
56. Shen, G., S. Wei, Y. Zhang, B. Wang, R. Wang *et al.* (2013). "Emission and size distribution of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from residential wood combustion in rural China", *Biomass Bioenergy*, núm. 55: 141-147.
57. Shen, G., S. Tao, S. Wei, Y. Chen, Y. Zhang *et al.* (2013). "Field measurement of emission factors of PM, EC, OC, parent, nitro-, and oxy- polycyclic aromatic hydrocarbons for residential briquette, coal cake, and wood in rural Shanxi, China", *Environ. Sci. Technol.*, núm. 47: 2998-3005.
58. Roden, C.A., T.C. Bond, S. Conway, A.B. Osorto Pinel, N. MacCarty y D. Still (2009). "Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves", *Atmos. Environ.*, núm. 43: 1170-81.
59. Johnson, M., R. Edwards y O. Masera (2010). "Improved stove programs need robust methods to estimate carbon offsets", *Climatic Change*, núm. 102: 641-649.
60. Preble, C.V., O.L. Hadley , A.J. Gadgil y T.W. Kirchstetter (2014). "Emissions and climate-relevant optical properties of pollutants emitted from a three-stone fire and the Berkeley-Darfur stove tested under laboratory conditions", *Environ. Sci. Technol.*, núm. 48: 6484-6491.
61. Shen, G., M. Xue, Y. Chen, C. Yang, W. Li *et al.* (2014). "Comparison of carbonaceous particulate matter emission factors among different solid fuels burned in residential stoves", *Atmos. Environ.*, núm. 89: 337-345.
62. Arora, P., S. Jain y K. Sachdeva (2013). "Physical characterization of particulate

- matter emitted from wood combustion in improved and traditional cookstoves”, *Energy Sustain. Dev.*, núm. 17: 497-503.
63. Johnson, M., R. Edwards, C. Alatorre Frenk y O. Masera (2008). “In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households”, *Atmos. Environ.*, núm. 42: 1206-1222.
  64. Baldwin, S. (1986). “Biomass stoves: engineering design, development, and dissemination”. VITA and PU/CEES Report no. 224, Arlington, NJ.
  65. Smith, K. (1987). “The biofuel transition”, *Pacific and Asian Journal of Energy*, vol. 1, núm. 1, pp.13-32.
  66. Hosier, R.H. y J. Dowd (1988). “Household fuel choice in Zimbabwe: an empirical test of the energy ladder hypothesis”, *Resources Energy*, núm. 9, 337-361.
  67. Leach, M. y R. Mearns (1988). “Beyond the woodfuel crisis: people, land and trees in Africa”, Londres Earthscan.
  68. Leach, G. (1992). “The energy transition”, *Energy Policy*, vol. 20, núm. 2, 116-123.
  69. Hiemstra-van der Horst, H. (2008). “Reassessing the ‘energy ladder’: household energy use in Maun, Botswana”, *Energy Policy*, núm. 36, 3333-3334.
  70. Saatkamp, B., O. Masera y D. Kammen (2000). “Energy for Sustainable Development”, vol. 4, núm. 2.
  71. Berrueta, V.M., M. Serrano-Medrano, C. García-Bustamante, M. Astier, M. y O. Masera (2015). “Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico’s Patsari improved cookstove project”, *Climatic Change*, publicado en línea el 12 de octubre de 2015.

72. Berrueta, V., R. Edwards y O. Masera (2008). "Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacán Mexico", *Renewable Energy*, vol 33, núm. 5, 859-870
73. Beaver, R.D. (1993). "Structural Comparison of the Models in EMF 12", *Energy Policy*, núm. 238 (marzo).
74. Beaver, R.D. y H.G. Huntington (1992). "A comparison of aggregate energy demand models for global policy analyses", *Energy Policy*, núm. 568 (junio).
75. Kydes, A.S., S.H. Shaw y D.F. McDonald (1995). "Beyond the horizon: Recent directions in long-term energy modeling", *Energy*, vol. 20, núm. 2, pp. 131-149.
76. Suganthi, L. y A.A. Samuel (2012). "Energy models for demand forecasting - A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, núm. 2 (febrero), , pp. 1223-1240.
77. Sheinbaum, C. y O. Masera (2000). "Greenhouse gas energy scenarios for Mexico in year 2020, and mitigation potential of renewable technologies", ponencia presentada en el Proceedings of the Millennium Solar Forum.
78. Islas, J., F. Manzini y O. Masera (2007). "A Prospective Study of Bioenergy Use in Mexico", *Energy*, núm. 32.
79. Puentes, V. (2002). "Impacto del consumo de leña en el bosque de Santa Fe de la Laguna-Michoacan. México, Facultad de Ciencias, UNAM, tesis de licenciatura.
80. Sánchez Gonzales, M.C. (1993). "Uso y manejo de la leña en X-uilub, Yucatán, México, Facultad de Ciencias, UNAM, tesis de maestría.
81. Tovar, M.R. (2004). "Uso de leña y su impacto en comunidades de la Region Purhepecha, Michoacán, México", Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), tesis de Maestría.

82. Charless, J. (1994). *Energía renovable. Guía de alternativas ecológicas*. México, Edamex.
83. Bhattacharya, SC., and Abdul Salam, P. 2002. Low Greenhouse Gas Biomass Options for Cooking in the Developing Countries. *Biomass and Bioenergy*, 22: 305-317.
84. Smith, K.R. (2002). “Indoor Air Pollution in Developing Countries: Recommendations for Research”, *Indoor Air*, núm. 12, 198-207 (Dinamarca).
85. Johnson, M., R. Edwards, A. Ghilardi, V. Berrueta, D. Guillén, C. Alatorre Frenk y O. Masera (2009). “Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects”, *Environ. Sci. Technol.*, núm. 43, 2456-2462.
86. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) (2010). *Medición de pobreza en los municipios de México*, en <http://www.coneval.gob.mx/Medicion/Paginas/Medici%C3%B3n/Medicion-de-la-pobreza-municipal-2010.aspx>, consultada en enero de 2014.
87. Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad-Laboratorio de Bioenergía, Universidad Nacional Autónoma de México (IIES) (2015), en <http://www.oikos.unam.mx/Bioenergia/>.
88. García, C.A., E. Riegelhaupt, A. Ghilardi, M. Skutsch, J. Islas, F. Manzini y O. Masera (2015). “Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 43: 545-552.
89. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010). “XIII Censo de Población y Vivienda, 2010”, Datos Tabulados Básicos e Integración Territorial por localidad (Iter)., México, en

<<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/default.aspx>>, consultada en octubre de 2010.

90. Instituto Nacional de Energía (INE) (2010). *Guía de metodologías y medidas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero para la elaboración de programas estatales de acción ante el cambio climático*. México, INE.
91. Toole, Rebecca (2015). “The Energy Ladder: A Valid Model for Household Fuel Transitions in Sub-Saharan Africa? Boston, Tufts University, agosto, tesis de Maestría en Science in Urban and Environmental Policy and Planning and Economics, en <<https://sites.tufts.edu/MaryDavis/files/2015/06/ThesisFinal.pdf>>, consultada en enero de 2016.
92. Kowsari, R. y H. Zerriffi (2011). “Three dimensional energy profile: A conceptual framework for assessing household energy use”, *Energy Policy*, núm. 39: 7505-7517.

## APÉNDICES

### 1. Municipios prioritarios con uso de leña en 6 y 5 de los escenarios de estudio

| <i>Clave INEGI</i> | <i>Nombre del municipio</i>      | <i>Coincidencias</i> |
|--------------------|----------------------------------|----------------------|
| 7002               | Acala (Chis)                     | 6                    |
| 7004               | Altamirano (Chis)                | 6                    |
| 7006               | Amatenango de la Frontera (Chis) | 6                    |
| 7008               | Ángel Albino Corzo (Chis)        | 6                    |
| 7013               | Bochil (Chis)                    | 6                    |
| 7016               | Catazaja (Chis)                  | 6                    |
| 7020               | Concordia, La (Chis)             | 6                    |
| 7027               | Chiapa de Corzo (Chis)           | 6                    |
| 7030               | Chicomuselo (Chis)               | 6                    |
| 7031               | Chilon (Chis)                    | 6                    |
| 7034               | Frontera Comalapa (Chis)         | 6                    |
| 7037               | Huehuetán (Chis)                 | 6                    |
| 7044               | Ixtapa (Chis)                    | 6                    |
| 7051               | Mapastepec (Chis)                | 6                    |
| 7052               | Margaritas, Las (Chis)           | 6                    |
| 7054               | Mazatán (Chis)                   | 6                    |
| 7059               | Ocosingo (Chis)                  | 6                    |
| 7069               | Pijjiapan (Chis)                 | 6                    |
| 7071               | Villa Comaltitlán (Chis)         | 6                    |

|       |                                   |   |
|-------|-----------------------------------|---|
| 7072  | Pueblo Nuevo Solistahuacán (Chis) | 6 |
| 7075  | Rosas, Las (Chis)                 | 6 |
| 7081  | Simojovel (Chis)                  | 6 |
| 7086  | Suchiapa (Chis)                   | 6 |
| 7094  | Teopisca (Chis)                   | 6 |
| 7096  | Tila (Chis)                       | 6 |
| 7097  | Tonalá (Chis)                     | 6 |
| 7106  | Venustiano Carranza (Chis)        | 6 |
| 7107  | Villa Corzo (Chis)                | 6 |
| 7108  | Villaflores (Chis)                | 6 |
| 7109  | Yajalón (Chis)                    | 6 |
| 10023 | Pueblo Nuevo (Dgo)                | 6 |
| 11001 | Abasolo (Gto)                     | 6 |
| 12003 | Ajuchitlán del Progreso (Gro)     | 6 |
| 12011 | Atoyac de Álvarez (Gro)           | 6 |
| 12012 | Ayutla de los Libres (Gro)        | 6 |
| 12028 | Chilapa de Álvarez (Gro)          | 6 |
| 12030 | Florencio Villarreal (Gro)        | 6 |
| 12032 | General Heliodoro Castillo (Gro)  | 6 |
| 12040 | Leonardo Bravo (Gro)              | 6 |
| 12052 | San Luis Acatlán (Gro)            | 6 |
| 12056 | Tecoanapa (Gro)                   | 6 |
| 12061 | Tixtla de Guerrero (Gro)          | 6 |

|       |  |   |
|-------|--|---|
| 13002 | Acaxochitlán (Hgo)                     | 6 |
| 13018 | Chapulhuacan (Hgo)                     | 6 |
| 13046 | San Felipe Orizatlán (Hgo)             | 6 |
| 13073 | Tlanchinol (Hgo)                       | 6 |
| 15001 | Acambay (Edo. de Méx.)                 | 6 |
| 15032 | Donato Guerra (Edo. de Méx.)           | 6 |
| 15042 | Ixtlahuaca (Edo. de Méx.)              | 6 |
| 15047 | Jiquipilco (Edo. de Méx.)              | 6 |
| 15056 | Morelos (Edo. de Méx.)                 | 6 |
| 15074 | San Felipe del Progreso (Edo. de Méx.) | 6 |
| 15080 | Sultepec (Edo. de Méx.)                | 6 |
| 15082 | Tejupilco (Edo. de Méx.)               | 6 |
| 15085 | Temascalcingo (Edo. de Méx.)           | 6 |
| 15086 | Temascaltepec (Edo. de Méx.)           | 6 |
| 15087 | Temoaya (Edo. de Méx.)                 | 6 |
| 15111 | Villa de Allende (Edo. de Méx.)        | 6 |
| 15114 | Villa Victoria (Edo. de Méx.)          | 6 |
| 16017 | Contepec (Mich)                        | 6 |
| 16025 | Chilchota (Mich)                       | 6 |
| 16035 | Huacana, La (Mich)                     | 6 |
| 16050 | Maravatío (Mich)                       | 6 |
| 16056 | Nahuatzen (Mich)                       | 6 |
| 16079 | Salvador Escalante (Mich)              | 6 |

|       |                                   |   |
|-------|-----------------------------------|---|
| 16083 | Tancítaro (Mich)                  | 6 |
| 17022 | Tetela del Volcán (Mor)           | 6 |
| 20002 | Acatlán de Pérez Figueroa (Oax)   | 6 |
| 20041 | Huautla de Jiménez (Oax)          | 6 |
| 20073 | Putla Villa de Guerrero (Oax)     | 6 |
| 20278 | Nuevo Soyaltepec (Oax)            | 6 |
| 20469 | Santiago Juxtlahuaca (Oax)        | 6 |
| 21001 | Acajete (Pue)                     | 6 |
| 21004 | Acatzingo (Pue)                   | 6 |
| 21010 | Ajalpan (Pue)                     | 6 |
| 21017 | Atempan (Pue)                     | 6 |
| 21043 | Cuetzalan del Progreso (Pue)      | 6 |
| 21053 | Chignahuapan (Pue)                | 6 |
| 21054 | Chignautla (Pue)                  | 6 |
| 21076 | Hueytamalco (Pue)                 | 6 |
| 21109 | Pahuatlán (Pue)                   | 6 |
| 21110 | Palmar de Bravo (Pue)             | 6 |
| 21115 | Quecholac (Pue)                   | 6 |
| 21154 | Tecamachalco (Pue)                | 6 |
| 21164 | Tepeaca (Pue)                     | 6 |
| 21172 | Tetela de Ocampo (Pue)            | 6 |
| 21177 | Tlacotepec de Benito Juárez (Pue) | 6 |
| 21179 | Tlachichuca (Pue)                 | 6 |

|       |                             |   |
|-------|-----------------------------|---|
| 21186 | Tlatlauquitepec (Pue)       | 6 |
| 21194 | Venustiano Carranza (Pue)   | 6 |
| 21197 | Xicotepec (Pue)             | 6 |
| 21199 | Xiutetelco (Pue)            | 6 |
| 21207 | Zacapoaxtla (Pue)           | 6 |
| 21208 | Zacatlán (Pue)              | 6 |
| 22001 | Amealco de Bonfil (Qro)     | 6 |
| 22002 | Pinal de Amoles (Qro)       | 6 |
| 22018 | Tolimán (Qro)               | 6 |
| 24012 | Tancanhuitz de Santos (SLP) | 6 |
| 24037 | Tamazunchale (SLP)          | 6 |
| 24053 | Axtla de Terrazas (SLP)     | 6 |
| 24054 | Xilitla (SLP)               | 6 |
| 27003 | Centla (Tab)                | 6 |
| 27008 | Huimanguillo (Tab)          | 6 |
| 27011 | Jonuta (Tab)                | 6 |
| 27015 | Tacotalpa (Tab)             | 6 |
| 27017 | Tenosique (Tab)             | 6 |
| 30003 | Acayucan (Ver)              | 6 |
| 30006 | Acultzingo (Ver)            | 6 |
| 30010 | Altotonga (Ver)             | 6 |
| 30023 | Atzalan (Ver)               | 6 |
| 30025 | Ayahualulco (Ver)           | 6 |

|       |                             |   |
|-------|-----------------------------|---|
| 30033 | Cazones de Herrera (Ver)    | 6 |
| 30047 | Coscomatepec (Ver)          | 6 |
| 30058 | Chicontepepec (Ver)         | 6 |
| 30066 | Espinal (Ver)               | 6 |
| 30072 | Huayacocotla (Ver)          | 6 |
| 30073 | Hueyapan de Ocampo (Ver)    | 6 |
| 30080 | Ixhuatlán del Café (Ver)    | 6 |
| 30086 | Jalacingo (Ver)             | 6 |
| 30092 | Xico (Ver)                  | 6 |
| 30094 | Juan Rodríguez Clara (Ver)  | 6 |
| 30109 | Misantla (Ver)              | 6 |
| 30127 | Perla, La (Ver)             | 6 |
| 30129 | Platón Sánchez (Ver)        | 6 |
| 30132 | Vigas de Ramírez, Las (Ver) | 6 |
| 30141 | San Andrés Tuxtla (Ver)     | 6 |
| 30142 | San Juan Evangelista (Ver)  | 6 |
| 30143 | Santiago Tuxtla (Ver)       | 6 |
| 30144 | Sayula de Alemán (Ver)      | 6 |
| 30155 | Tantoyuca (Ver)             | 6 |
| 30160 | Temapache (Ver)             | 6 |
| 30161 | Tempoal (Ver)               | 6 |
| 30175 | Tihuatlán (Ver)             | 6 |
| 30183 | Tlapacoyan (Ver)            | 6 |

|       |                                   |   |
|-------|-----------------------------------|---|
| 6009  | Tecomán (Col)                     | 5 |
| 7005  | Amatán (Chis)                     | 5 |
| 7019  | Comitán de Domínguez (Chis)       | 5 |
| 7023  | Chamula (Chis)                    | 5 |
| 7026  | Chenalhó (Chis)                   | 5 |
| 7038  | Huixtán (Chis)                    | 5 |
| 7039  | Huitiupan (Chis)                  | 5 |
| 7041  | Independencia, La (Chis)          | 5 |
| 7064  | Oxchuc (Chis)                     | 5 |
| 7066  | Pantelhó (Chis)                   | 5 |
| 7076  | Sabanilla (Chis)                  | 5 |
| 7078  | San Cristóbal de Las Casas (Chis) | 5 |
| 7080  | Siltepec (Chis)                   | 5 |
| 7093  | Tenejapa (Chis)                   | 5 |
| 7100  | Tumbala (Chis)                    | 5 |
| 7101  | Tuxtla Gutiérrez (Chis)           | 5 |
| 7111  | Zinacantán (Chis)                 | 5 |
| 7112  | San Juan Cancuc (Chis)            | 5 |
| 8027  | Guachochi (Chih)                  | 5 |
| 8029  | Guadalupe y Calvo (Chih)          | 5 |
| 10034 | Tamazula (Dgo)                    | 5 |
| 11003 | Allende (Gto)                     | 5 |
| 11009 | Comonfort (Gto)                   | 5 |

|       |                                   |   |
|-------|-----------------------------------|---|
| 11017 | Irapuato (Gto)                    | 5 |
| 11026 | Romita (Gto)                      | 5 |
| 11037 | Silao (Gto)                       | 5 |
| 12004 | Alcozauca de Guerrero (Gro)       | 5 |
| 12010 | Atlixnac (Gro)                    | 5 |
| 12020 | Copanatoyac (Gro)                 | 5 |
| 12041 | Malinaltepec (Gro)                | 5 |
| 12074 | Zitlala (Gro)                     | 5 |
| 13011 | Atlapexco (Hgo)                   | 5 |
| 13027 | Huehuetla (Hgo)                   | 5 |
| 13028 | Huejutla de Reyes (Hgo)           | 5 |
| 13062 | Tepehuacán de Guerrero (Hgo)      | 5 |
| 13080 | Yahualica (Hgo)                   | 5 |
| 15003 | Aculco (Edo. de Méx.)             | 5 |
| 15005 | Almoloza de Juárez (Edo. de Méx.) | 5 |
| 15007 | Amanalco (Edo. de Méx.)           | 5 |
| 15008 | Amatepec (Edo. de Méx.)           | 5 |
| 15014 | Atlacomulco (Edo. de Méx.)        | 5 |
| 15021 | Coatepec Harinas (Edo. de Méx.)   | 5 |
| 15025 | Chalco (Edo. de Méx.)             | 5 |
| 15045 | Jilotepec (Edo. de Méx.)          | 5 |
| 15063 | Ocuilan (Edo. de Méx.)            | 5 |
| 15064 | Oro, El (Edo. de Méx.)            | 5 |

|       |                                   |   |
|-------|-----------------------------------|---|
| 15067 | Otzolotepec (Edo. de Méx.)        | 5 |
| 15106 | Toluca (Edo. de Méx.)             | 5 |
| 15112 | Villa del Carbón (Edo. de Méx.)   | 5 |
| 15113 | Villa Guerrero (Edo. de Méx.)     | 5 |
| 15118 | Zinacantepec (Edo. de Méx.)       | 5 |
| 16034 | Ciudad Hidalgo (Mich)             | 5 |
| 16066 | Pátzcuaro (Mich)                  | 5 |
| 16082 | Tacámbaro (Mich)                  | 5 |
| 16093 | Tlalpujahuá (Mich)                | 5 |
| 16102 | Uruapan (Mich)                    | 5 |
| 16112 | Zitácuaro (Mich)                  | 5 |
| 17017 | Puente de Ixtla (Mor)             | 5 |
| 17018 | Temixco (Mor)                     | 5 |
| 20059 | Miahuatlán de Porfirio Díaz (Oax) | 5 |
| 20184 | San Juan Bautista Tuxtepec (Oax)  | 5 |
| 20397 | Heroica Ciudad de Tlaxiaco (Oax)  | 5 |
| 20406 | Santa María Chilchotla (Oax)      | 5 |
| 20515 | Santo Domingo Tehuantepec (Oax)   | 5 |
| 21019 | Atlixco (Pue)                     | 5 |
| 21050 | Chichiquila (Pue)                 | 5 |
| 21058 | Chilchotla (Pue)                  | 5 |
| 21064 | Francisco Z. Mena (Pue)           | 5 |
| 21071 | Huauhinango (Pue)                 | 5 |

|       |                            |   |
|-------|----------------------------|---|
| 21083 | Ixtacamaxtitlán (Pue)      | 5 |
| 21111 | Pantepec (Pue)             | 5 |
| 21114 | Puebla (Pue)               | 5 |
| 21116 | Quimixtlán (Pue)           | 5 |
| 21156 | Tehuacán (Pue)             | 5 |
| 21183 | Tlaola (Pue)               | 5 |
| 21212 | Zautla (Pue)               | 5 |
| 21217 | Zoquitlán (Pue)            | 5 |
| 24021 | Mexquitic de Carmona (SLP) | 5 |
| 24038 | Tampacán (SLP)             | 5 |
| 24040 | Tamuín (SLP)               | 5 |
| 24041 | Tanlajas (SLP)             | 5 |
| 24050 | Villa de Reyes (SLP)       | 5 |
| 25011 | Guasave (Sin)              | 5 |
| 25018 | Navolato (Sin)             | 5 |
| 27002 | Cárdenas (Tab)             | 5 |
| 27004 | Centro (Tab)               | 5 |
| 27005 | Comalcalco (Tab)           | 5 |
| 27006 | Cunduacán (Tab)            | 5 |
| 27009 | Jalapa (Tab)               | 5 |
| 27010 | Jalpa de Méndez (Tab)      | 5 |
| 27012 | Macuspana (Tab)            | 5 |
| 27013 | Nacajuca (Tab)             | 5 |

|       |                            |   |
|-------|----------------------------|---|
| 27014 | Paraíso (Tab)              | 5 |
| 27016 | Teapa (Tab)                | 5 |
| 29013 | Huamantla (Tlax)           | 5 |
| 30015 | Angel R. Cabada (Ver)      | 5 |
| 30029 | Calchualco (Ver)           | 5 |
| 30032 | Catemaco (Ver)             | 5 |
| 30040 | Coatzintla (Ver)           | 5 |
| 30044 | Córdoba (Ver)              | 5 |
| 30048 | Cosolecaque (Ver)          | 5 |
| 30050 | Coxquihui (Ver)            | 5 |
| 30051 | Coyutla (Ver)              | 5 |
| 30067 | Filomeno Mata (Ver)        | 5 |
| 30083 | Ixhuatlán de Madero (Ver)  | 5 |
| 30085 | Ixtaczoquitlán (Ver)       | 5 |
| 30102 | Martínez de la Torre (Ver) | 5 |
| 30115 | Nogales (Ver)              | 5 |
| 30123 | Pánuco (Ver)               | 5 |
| 30124 | Papantla (Ver)             | 5 |
| 30128 | Perote (Ver)               | 5 |
| 30147 | Soledad Atzompa (Ver)      | 5 |
| 30148 | Soledad de Doblado (Ver)   | 5 |
| 30149 | Sotapan (Ver)              | 5 |
| 30157 | Castillo de Teayo (Ver)    | 5 |

|       |                       |   |
|-------|-----------------------|---|
| 30159 | Tehuipango (Ver)      | 5 |
| 30174 | Tierra Blanca (Ver)   | 5 |
| 30181 | Tlalixcoyan (Ver)     | 5 |
| 30182 | Tlalnelhuayocan (Ver) | 5 |
| 30189 | Tuxpam (Ver)          | 5 |
| 31041 | Kanasin (Yuc)         | 5 |
| 31089 | Ticul (Yuc)           | 5 |

## 2. “Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico”\*

Energy for Sustainable Development 19 (2014) 39–46



Contents lists available at ScienceDirect

Energy for Sustainable Development



### Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico



Montserrat Serrano-Medrano<sup>a,b,\*</sup>, Teresita Arias-Chalico<sup>c</sup>, Adrian Ghilardi<sup>d</sup>, Omar Masera<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México

<sup>b</sup> Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO), Universidad Nacional Autónoma de México, antigua carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia, Michoacán 58190, México

<sup>c</sup> Naturaleza y Desarrollo AC, Querétaro, México

<sup>d</sup> Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México, antigua carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia, Michoacán 58190, México

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 6 February 2013

Revised 10 October 2013

Accepted 25 November 2013

Available online 11 January 2014

##### Keywords:

Fuelwood

Charcoal

Spatiotemporal projections

Fuel stacking

Mexico

#### ABSTRACT

Fuelwood and charcoal are fundamental fuel sources for the residential sector in Mexico. A Business-As-Usual (BAU) projection by means of a spatially-explicit approach was developed to assess national fuelwood and charcoal consumption for the period 2010 to 2030. The model was calibrated for 1990–2000 and 2010 projections were validated against official census data for the same year. For 2010, we estimated that fuelwood and charcoal accounted for 48% of total residential energy demand. The projection of fuelwood consumption declined slightly from 19.4 Mt (dry matter) or 310 PJ in 2010 to 18.4 Mt or 294 PJ by 2030. An important future growth of mixed fuelwood–LPG users is expected pointing out that fuel stacking rather than fuel switching out of fuelwood would prevail. Charcoal consumption increased from 3.8 Mt (dried wood equivalent) or 61 PJ to 4.7 Mt or 75 PJ during the same period. A relevant outcome of the spatial assessment was the uncovering of large variations in fuelwood and charcoal use trends among spatial units (municipalities), hidden by the national aggregated trends. This opens up the opportunity to analyze regional variability to identify priority areas regarding fuelwood and charcoal use.

© 2013 International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

#### Introduction

Biomass energy provided about 10.2% (50.3 EJ) of the world total primary energy supply in 2008 (Chum et al., 2011). Of these 50.3 EJ, traditional use of fuelwood along with other biomass residues mainly for cooking and heating in the poorer developing countries, contributed 30.7 EJ (Chum et al., 2011). If the informal economy sectors are included, solids biofuels, particularly fuelwood and charcoal, may contribute almost 14% of total primary energy supply globally and as much as one-third in developing countries (FAO, 2011). Furthermore, some 2.7 billion people – about 40% of the world's population – depend on biomass as their main source of energy supply. If current trends continue, the number of people relying on biomass to meet part of their energy needs, will reach 2.8 billion in 2030 (IEA, 2010). Socioeconomic scenarios indicate that reliance on fuelwood to meet energy needs is expected to continue for several decades (IEA, 2010).

Globally, there is a lack of detailed statistics on fuelwood and charcoal consumption, their spatial distribution and future projections. This is due to several factors such as the fact that a) a large proportion of fuelwood is harvested and used in rural areas without entering the formal markets and statistics, and, b) the commercial production of fuelwood and charcoal in many countries is done illegally, making the

acquisition of reliable statistics difficult (UNEP/FAO, 2012a). Some case studies have shown an underestimation of fuelwood consumption at national levels (Drigo, 2004, 2009; Drigo et al., 2007; Ghilardi et al., 2007). Detailed knowledge of fuelwood and charcoal use-patterns is challenging due to their dispersed nature (Arnold et al., 2003). Using aggregated data usually hides the inherent variability associated to fuelwood and charcoal spatial patterns (Arnold et al., 2003, 2006; Foley, 1987; Leach and Mearns, 1988; Lele, 1993; Mahapatra and Mitchell, 1999; Masera, 1994; RWEDP, 1997, 2000). A reliable, spatially explicit biomass fuels database is therefore a fundamental component for policy-making effectiveness (UNEP/FAO, 2012b; Ghilardi et al., 2009).

In Mexico, despite sustained government efforts to encourage the use of “modern” fuels in the residential sector, for example by subsidizing LPG, fuelwood still supplied 34% of the country's residential energy use in 2009 according to official statistics (SENER, 2009) and charcoal is still important as a complementary residential fuel. In Mexico, fuelwood is mostly used for cooking in traditional devices such as open fires and such use is concentrated in rural and semi-urban areas (Díaz, 2000). Fuel stacking is also very common (Masera et al., 2000). On the contrary, charcoal consumption is mostly located in urban localities. However, little is known about the country patterns of fuelwood and charcoal use and their future trends.

Deriving spatial estimates and future trends of fuelwood use is relevant given its social, economic and environmental impacts. For instance, indoor air pollution caused by the use of open fires in Mexican villages is several times higher than the level recommended by the World Health Organization and causes severe health problems,

\* Corresponding author. Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO), Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia, Michoacán 58190, México.

\* Véase <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082613001026>>.

**Table 1**  
Fuelwood per capita consumption for exclusive users per macro-ecological region.

| Ecological macro-region | Fuelwood consumption (tDM/cap/yr) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Tropical forest         | 0.73                              |
| Deciduous forest        | 0.91                              |
| Temperate               | 1.10                              |
| Semi-arid               | 0.55                              |
| Wetland                 | 0.91                              |
| Others                  | 0.55                              |

Source: Adapted from Ghilardi et al. (2007).

particularly in women and children (Amendáriz et al., 2008; Romieu et al., 2009).

A first approach to explore the spatial patterns of fuelwood use, the Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM) methodology was developed by Masera et al. (2003, 2006). WISDOM is defined as a "spatial-explicit method for highlighting and determining priority areas of intervention and supporting wood energy/bioenergy planning and policy formulation". WISDOM integrates available data on fuelwood and charcoal demand and supply into indicators that are used to identify priority areas in terms of fuelwood demand trends, and available resources. This method was conceived as a partnership between the Wood Energy program of the FAO products forest service (FOIP) and the Ecosystems Research Centre (CIECO) of the National University of Mexico (UNAM). Currently more than 23 case studies covering sub-national studies, countries and regions in Europe, Latin America, Asia and Africa have been conducted (Drigo, 2009).

The aim of this study is to assess fuelwood and charcoal consumption patterns in Mexico from 2010 to 2030 at the county (municipality) level in a BAU scenario and based on the WISDOM approach in order to: 1) obtain more realistic estimates of the current total use of fuelwood and charcoal in the country and project trends until 2030; and 2) examine regional differences, highlighting priority action areas regarding fuelwood and charcoal consumption.

## Methods

### Estimation of fuelwood consumption

Total fuelwood annual consumption (CT) was estimated as the product of per capita consumption (Cpc) and saturation (S) (percentage of users) times total population, considering two types of users: exclusive fuelwood users and mixed fuelwood-LPG users. The analysis was done at the county (municipality) level, with a total of approximately 2500 units of analysis. Mathematically total fuelwood consumption per county was calculated according to Eq. (1)

$$CT_k = \sum (C_{E_k} + C_{M_k}) \quad (1)$$

Where  $CT_k$  is total fuelwood consumption in tonnes of dry matter per year (tDM/year),  $C_{E_k}$  is fuelwood consumption per county attributable to exclusive users and  $C_{M_k}$  is the fuelwood consumption per county attributable to mixed fuel users.

As stated,  $C_{E_k}$  and  $C_{M_k}$  are calculated as follows:

$$C_{E_k} = C_{PC_{E_k}} \times S_{E_k} \times P_k \quad (2)$$

and

$$C_{M_k} = C_{PC_{M_k}} \times S_{M_k} \times P_k \quad (3)$$

where  $C_{PC_{E_k}}$  and  $C_{PC_{M_k}}$  are fuelwood annual consumption per capita for exclusive and mixed use per county "k" respectively;  $S_{E_k}$  and  $S_{M_k}$  are fuelwood saturation for exclusive and mixed use per county respectively and  $P_k$  is total population per county.

### Estimation of fuelwood use saturation

Fuelwood saturation for exclusive users was defined as the rate between dwellings using fuelwood to cook over total dwellings per county and it was obtained based on the National Bureau of Statistics (INEGI) county census data. Data regarding population; average inhabitants per dwelling; and dwellings using one of the following fuels for cooking: fuelwood, LPG, charcoal, electricity or oil for the years 1990 and 2000 were used to obtain number of exclusive fuelwood users. Since Díaz (2000) found that between 90 and 100% of fuelwood residential use in México is for cooking, it is assumed that dwellings using fuelwood for cooking is a good estimation of families using this fuel as a residential fuel.

Fuelwood saturation for mixed users (i.e. users of both fuelwood and LPG) was estimated as a function of fuelwood saturation for exclusive users per county. Based on case studies, Ghilardi et al. (2007) estimated that mixed fuel users accounted on average for 25% of exclusive users. Hence, we assumed that in addition to exclusive users, 25% of households in the county are mixed users. For counties where fuelwood saturation for exclusive users was above or equal 75%, fuelwood saturation for mixed users was estimated subtracting exclusive fuelwood users to the total number of users in the county. For counties where fuelwood saturation of exclusive users was less than 75%, fuelwood saturation for mixed users represented an additional 25%.

Saturation for exclusive users is calculated as follows,

$$S_{E_k} = \frac{U_{E_k}}{D_k} \quad (4)$$

where  $S_{E_k}$  is the saturation of exclusive users per county,  $U_{E_k}$  is the number of exclusive fuelwood users, and  $D_k$  is the total population in the county.

### Estimation of fuelwood consumption per capita

Per capita fuelwood consumption, defined as the tonnes of dry matter (tDM) of fuelwood consumed per capita per year, was obtained for different regions by means of an exhaustive literature review for Mexico (Díaz, 2000; Masera et al., 1997; Puentes, 2002; Sánchez Gonzales, 1993; Tovar, 2004). Following the approach outlined by Ghilardi et al. (2007) average per capita consumption values for exclusive fuelwood users were obtained for each of the 5 main ecological areas in Mexico (Table 1) and then adjusted by minimum annual average temperatures with values ranging between 1 (for mild cold regions) and 1.7 (for cold regions).

To estimate per capita fuelwood consumption for exclusive users per county per year a weighted average value according to the proportion of each main ecological area within each county was used. Hence, per capita fuelwood consumption for exclusive users was estimated according to Eq. (5).

$$C_{PC_{E_k}} = \left( \sum_{i=1}^5 C_{Pv_i} \times A_i \times F_T \right)_k \quad (5)$$

where  $C_{PC_{E_k}}$  is the weighted annual per capita consumption for exclusive users per county,  $C_{Pv_i}$  is the annual per capita consumption per main ecological region  $i$  per county  $k$ ,  $A_i$  is the proportion of the main ecological area  $i$  in a county  $k$ , and  $F_T$  is the adjustment factor per minimum temperature per county  $k$ .

**Table 2**  
Evolution of fuelwood users and consumption 2010–2030.

| Year | Users           |             |             | Consumption   |           |           |
|------|-----------------|-------------|-------------|---------------|-----------|-----------|
|      | Exclusive users | Mixed users | Total users | Exclusive use | Mixed use | Total use |
|      | (Million users) |             |             | (MtDM/year)   |           |           |
| 2010 | 16.8            | 5.7         | 22.5        | 16.6          | 2.8       | 19.4      |
| 2020 | 16.0            | 6.3         | 22.3        | 15.8          | 3.1       | 18.9      |
| 2030 | 15.3            | 6.7         | 21.9        | 15.1          | 3.3       | 18.4      |

**Table 3**  
Variability in selected fuelwood use indicators by county for 2010–2030.

| Year | Totalsaturation<br>(Min, Max) | Saturation exclusive users<br>(0.01%, 99.5%) | Saturation mixed users<br>(0.01%, 30.9%) | Fuelwood users % growth <sup>a</sup><br>(–43.8%, 9.7%) | Fuelwood Cpc <sup>b</sup><br>(tDM/cap/yr)<br>(0.64, 1.35) | Countries Tot_Sat > 75% | Countries Tot_Sat > 85% |
|------|-------------------------------|--|--|--|---|-------------------------|-------------------------|
| 2010 | (0.02%, 100%)                 | (0.01%, 99.5%)                               | (0.01%, 30.9%)                           | (–43.8%, 9.7%)   | (0.64, 1.35)  | 43.7%                   | 39.1%                   |
| 2030 | (0.0%, 100%)                  | (0.0%, 99.9%)                                | (0.0%, 39.4%)                            |  |   | 43.6%                   | 40.5%                   |

<sup>a</sup> Values for the period 2010–2030.

<sup>b</sup> Values adjusted per minimum temperatures per county. Values for the period 2010–2030.

Fuelwood use per capita consumption for mixed users is assumed to be half of exclusive users (Ghilardi et al., 2009), as shown in Eq. (6).

$$Cpc_{M_k} = 0.5 \times Cpc_{E_k} \quad (6)$$

*Construction of fuelwood projection to 2030.* In order to project the future annual fuelwood consumption under a business as usual scenario, it was assumed that 1) per capita consumption values remain fixed (i.e. we assumed that there will be no significant

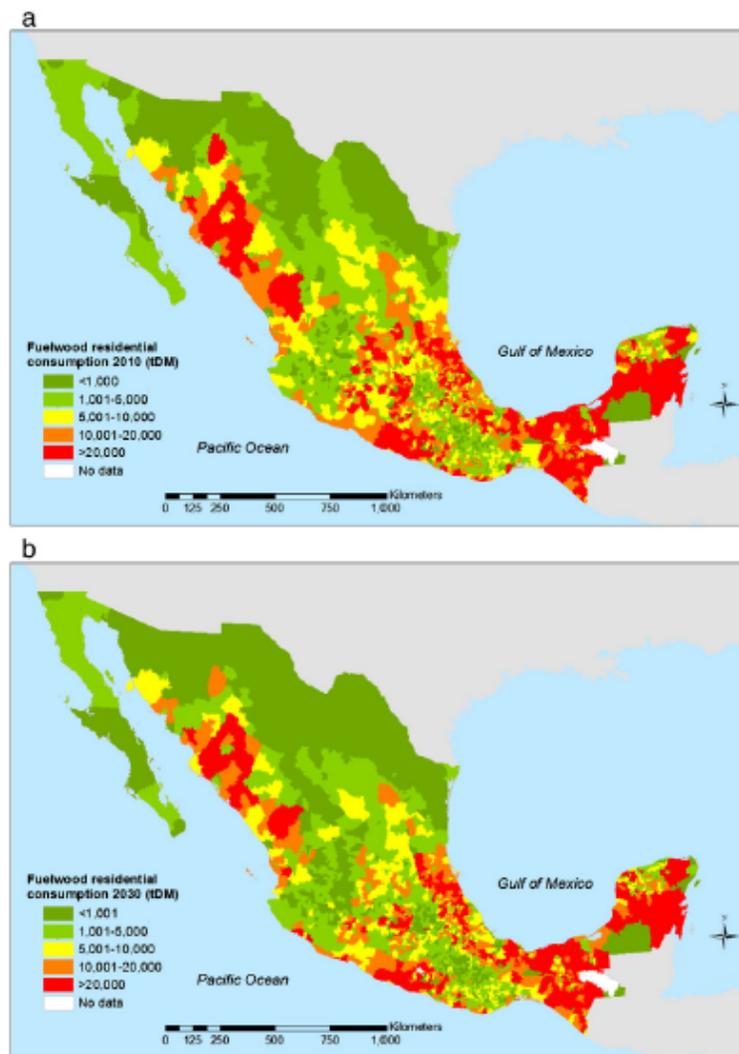


Fig. 1. Spatial distribution of residential fuelwood use. (a) For the year 2010, (b) for the year 2030.

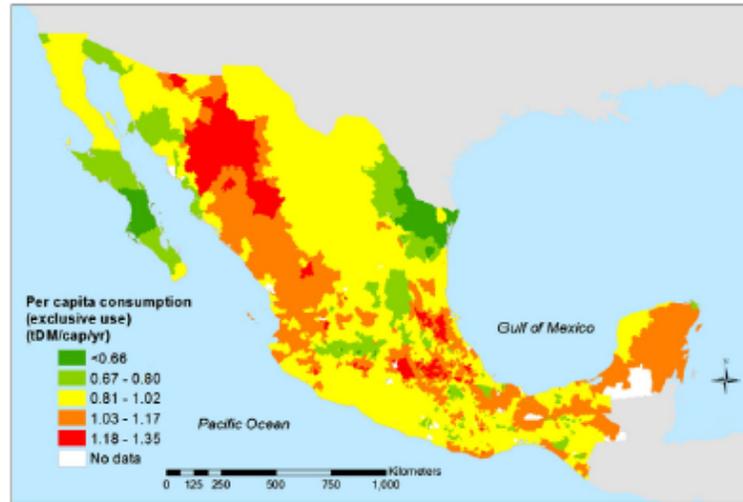


Fig. 2. Distribution of county per capita fuelwood consumption for exclusive users in Mexico 2010.

technological change in traditional devices for cooking); and 2) fuelwood saturation (for both exclusive and mixed users) change over time  $t$ , modulated by the total future population in the county  $k$ . Mathematically,

$$CT_{kt} = \left[ (C_{pc_{Ek}} \times S_{Ek}) + (C_{pc_{Mk}} \times S_{Mk}) \right] \times P_{kt} \tag{7}$$

where  $CT_{kt}$  is the total county population at time " $t$ ";  $C_{pc_{Ek}}$  and  $C_{pc_{Mk}}$  are per capita consumption for exclusive and mixed users, respectively;  $S_{Ek}$  and  $S_{Mk}$  are saturation for exclusive and mixed users at time " $t$ ", respectively; and  $P_{kt}$  is the National Population Bureau (CONAPO), projected population per county at time " $t$ " (CONAPO, 2012).

*Fuelwood saturation projection 2010–2030.* The expected change in saturation for exclusive and mixed users per county " $k$ " at time " $t$ " was estimated assuming a logistic behavior as follows,

$$\frac{dS}{dt} = \frac{rS(K-S)}{K} \tag{8}$$

The solution to Eq. (8) is therefore,

$$S_k(t) = \frac{K \times S_{t_0} \times e^{rt}}{K + (S_{t_0} \times (e^{rt} - 1))} \tag{9}$$

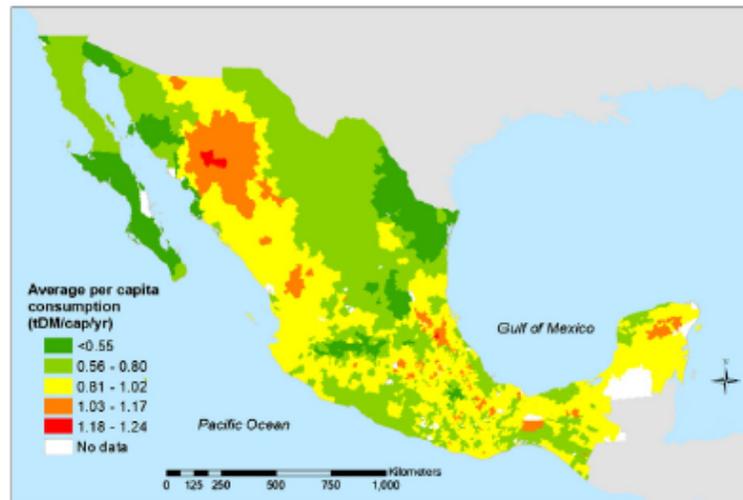


Fig. 3. Distribution of average county per capita fuelwood consumption for both exclusive and mixed users in Mexico 2010.

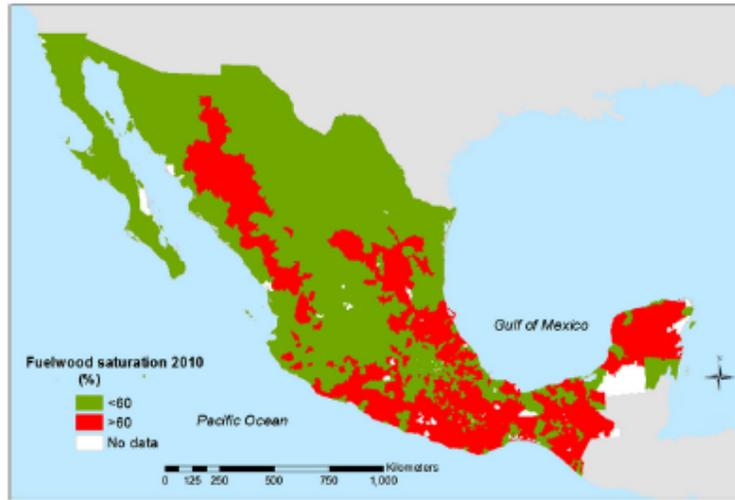


Fig. 4. Spatial distribution of counties where saturation of fuelwood users was over 60% in 2010.

Where  $K$  is the maximum saturation of fuelwood users (i.e. 1) and  $r$ , the fuelwood saturation annual growth rate for the 1990–2000 period per county “ $k$ ” estimated by Eq. (10).

$$r_k = \left( \frac{S_{2000k}}{S_{1990k}} \right)^{1/t} - 1 \tag{10}$$

Saturation of users between 1990 and 2000 was used as the basis for the projection as these were the only two periods for which actual data on exclusive fuelwood users per county were available for Mexico. Data regarding residential exclusive fuelwood use per county were not included in the 2010 Census.

To reflect the increasing number of mixed fuelwood users in Mexico (Maserá et al., 2000), it was assumed that the saturation of mixed users in the base year increases linearly by 1% between 2010 and the year 2030 for counties where fuelwood saturation for exclusive use was below 75%.

If fuelwood saturation < 75% then,

$$S_{Mkt} = S_{Ek} (1 + (0.25 + 0.01t)) \tag{11}$$

For counties where saturation reaches more than 75%, the saturation of mixed users was simply estimated as the difference between fuelwood users and total population in the county at time “ $t$ ”, as stated in the Estimation of fuelwood use saturation section.

**Model calibration and validation.** The model was calibrated for 1990–2000 and 2010 projections were validated against official data obtained from the significant sample derived from the 2010 national census (INEGI, 2010).

### Charcoal

#### Estimation of charcoal consumption

Annual charcoal consumption, residential and commercial (restaurants), was estimated by county, based on a detailed analysis of the specific consumption per dwelling and restaurant, and saturation of charcoal consumers per locality size in the following cities: Monterrey, Ciudad Victoria, Reynosa and Gonzalez, in the North, and San Luis Potosí, Querétaro and Villahermosa, in the Center-South of Mexico. These studies were conducted between 2005 and 2006 and were used as the base to estimate charcoal users by locality size and region in the country (see Supporting information for more details regarding the location of the case-studies examined). Only localities with more than 10,000 inhabitants were included because charcoal is mainly consumed in the urban sector.

#### Residential charcoal consumption estimation per locality stratum

Residential charcoal consumption was estimated as follows:

$$CR_t = D_t \times CSR_t \times SR_t \tag{12}$$

Where  $CR_t$  is residential charcoal consumption,  $D_t$ ,  $CSR_t$  and  $SR_t$  are the number of dwellings per locality, dwelling specific charcoal consumption, and charcoal saturation per locality of the “ $I$ ” stratum, respectively.

#### Commercial charcoal consumption estimation per locality stratum

Commercial charcoal consumption per locality ( $CC_t$ ) was estimated for both, formal and informal (street) restaurants. An average (specific) consumption per dwelling ( $CSC_t$ ) was obtained and then multiplied by

**Table 4**  
Estimation of charcoal consumption (for both residential and commercial use) 2010–2030.

| Year | Residential charcoal consumption |                            | Commercial charcoal consumption |                            | Total charcoal consumption |                            |
|------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|      | (Mt)                             | (Mt-dried wood equivalent) | (Mt)                            | (Mt-dried wood equivalent) | (Mt)                       | (Mt-dried wood equivalent) |
| 2010 | 0.47                             | 2.60                       | 0.22                            | 1.22                       | 0.69                       | 3.83                       |
| 2020 | 0.52                             | 2.90                       | 0.25                            | 1.38                       | 0.76                       | 4.24                       |
| 2030 | 0.57                             | 3.16                       | 0.27                            | 1.50                       | 0.84                       | 4.66                       |

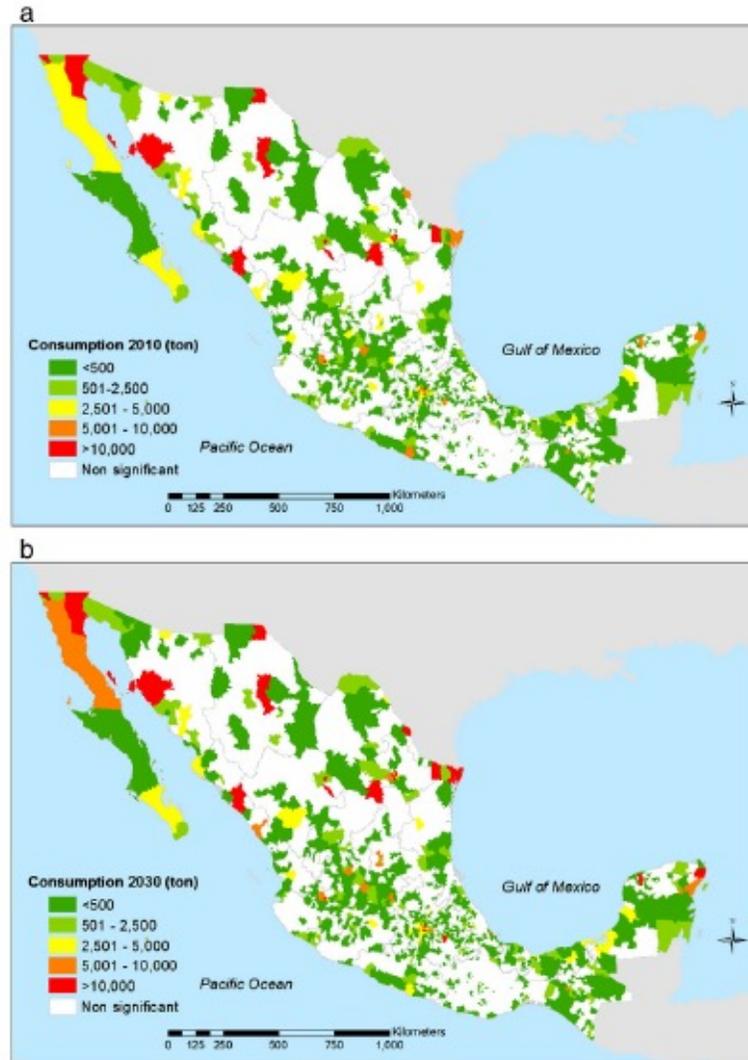


Fig. 5. Projection of charcoal consumption per county in Mexico. (a) For the year 2010, (b) for the year 2030.

the total number of dwellings in the locality, using 6 different strata as in the residential sector. Mathematically,

$$CC_l = D_l \times CSC_l \quad (13)$$

where,  $CC_l$  is commercial charcoal consumption,  $D_l$  is the total number of dwellings per locality, and  $CSC_l$  is average specific consumption per dwelling.

Finally, total charcoal consumption per county "k" was estimated as the sum of residential and commercial use per locality, according to Eq. (14).

$$CT_k = \sum_{l=1}^n D_l((CSR_l \times SR_l) + CSC_l) \quad (14)$$

#### Charcoal projection to 2030

The use of charcoal was projected to 2030 assuming that the specific consumption per dwelling and the saturation of charcoal users per

locality will remain fixed, and then multiplied by the official population projection (CONAPO, 2012) per locality.

## Results and discussion

### Fuelwood

Table 2 shows the expected evolution of fuelwood users and consumption for both exclusive and mixed users in the period 2010–2030. The number of exclusive users and their associated consumption is expected to decrease by about 9% between 2010 and 2030. In contrast, mixed users' number and their associated fuelwood use are expected to increase by 15% during the same period. Total projected fuelwood users and consumption are expected to reach levels of nearly 22 million people and 18.4 million tonnes, respectively, for 2030. Fuelwood consumption in 2010 is equivalent to 32.3 million  $m^3$ , representing almost five times the volume of commercial timber for non-energy uses

(CONAFOR, 2012), and 41% of total residential energy demand in 2010 (SENER, 2009).

Fuelwood use showed a heterogeneous spatial pattern responding to large differences in expected trends in saturation, growth of fuelwood users and per capita consumption between counties (Table 3 and Fig. 1). With the exception of Northeastern Mexico the rest of the country is highly dependent on fuelwood (Fig. 1). The specific change in consumption per county – i.e., decrease or increase – depends on the combined effect of their 1990–2000 trends on fuel use, the expected future population demographics, and on the expected future share of mixed fuelwood users.

Fig. 2 shows the regional variability of per capita fuelwood consumption for exclusive users. As expected, higher values are found in the municipalities with colder and more forested areas of Mexico, with a range from 0.66 to 1.35 tDM/cap/yr. Fig. 3 shows the average per capita fuelwood use per county – now including both exclusive and mixed users – for the year 2010. Consumption ranges between 0.55 tDM/cap/yr and 1.24 tDM/cap/yr, depending on the municipality. The map still shows that higher per capita use is concentrated in those counties with colder and humid or semi-humid conditions, for example in the Tarahumara Region of Northern Mexico, but the variability of per capita consumption is modulated by the extent of mixed fuelwood–LPG users in each county.

A total of 1219 counties (almost half of total) had more than 60% of fuelwood users in 2010 (Fig. 4). This number decreased very slightly for 2030 (1195 counties).

The projected fuelwood use figures for 2010 were validated against its corresponding census data values and they differed only by 2.6%.

#### Charcoal

Table 4 shows charcoal consumption for residential and commercial use. Charcoal consumption is expected to increase almost 20% from 2010 to 2030. For 2010 total charcoal consumption accounted for about 688,000 tonnes (3.8 Mt (dried wood equivalent)) and is expected to reach about 840,000 tonnes (4.7 Mt (dried wood equivalent)) in 2030. Residential charcoal consumption is expected to continue to be the main contributor to total charcoal demand in the country during the 2010–2030 period with 70% of total use.

Fig. 5 depicts charcoal consumption for counties with localities of more than 10,000 inhabitants in the country for 2010 and 2030. It can be seen that counties in the Northern part of the country are expected to have a significant growth in consumption compared with counties in the Central and Southern regions.

The combined consumption of fuelwood and charcoal would account for 23.2 MtDM (371 PJ) in 2030, with a growth in charcoal use and a slight decrease in fuelwood use. As a result of this combined use several counties in the Yucatan Peninsula, the Southern region of the Gulf of Mexico and the Northern Pacific coast, for instance, showed a growth in consumption (from 1% to 158%) while in many other regions consumption decreased (Fig. 6).

#### Conclusions

To check the consistency of our model, we compared our estimates for the total number of exclusive fuelwood users in Mexico in 2010 with the Mexican Population Census (in this last Census a sample was used to get estimates of the number of exclusive fuelwood users at country level, but it was not possible to obtain values for each county). Our estimates differed by only 2.6% with the 2010 census figures, which provides confidence about the model outcome for the base year. Unfortunately, there are no comparable official estimates on the use of charcoal, as government statistics report only the charcoal that is “legally” produced in Mexico and this accounts for a small amount of the total country production.

The regional and temporal breakdown of fuelwood consumption helps to better understand fuelwood use dynamics throughout the country: although aggregated projections show little change in fuelwood use and a linear increase in charcoal use between 2010 and 2030, maps uncover a heterogeneous spatial panorama. In the case of fuelwood, regardless the slight decline at national level by 2030, many counties are expected to increase (e.g. the Yucatan peninsula) or maintain current fuelwood use levels. As a result almost half of Mexican counties are expected to remain with more than 60% fuelwood users by 2030. Also, many of the counties that showed high levels of fuelwood consumption are among the poorest in Mexico. Poor families earning minimum salaries could spend up to 25% of their monthly income on fuelwood considering an average price of US\$0.12 per kg (García-Frapolli et al., 2010) in local markets.

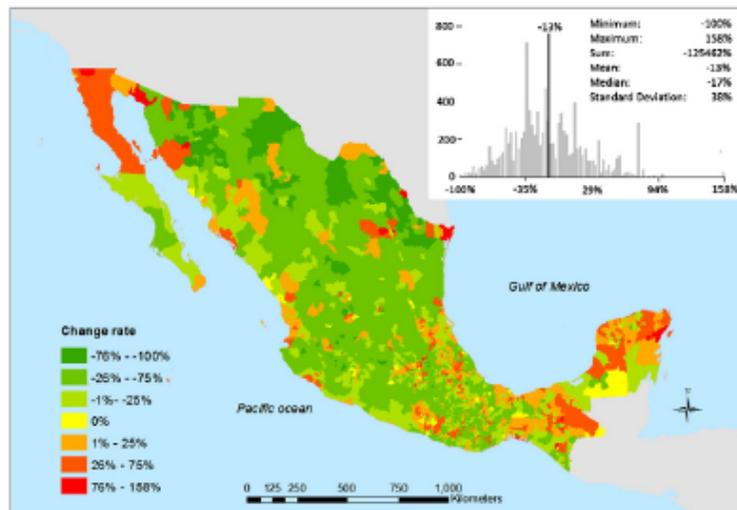


Fig. 6. Spatial variations in fuelwood and charcoal consumption trends between 2010 and 2030.

Understanding charcoal use dynamics and its spatial patterns is also very important, as charcoal consumption was estimated to grow nearly 20% from 2010 to 2030. This significant growth has important environmental implications, because wood extraction to obtain charcoal is more intensive than fuelwood extraction for domestic use. Critical areas in terms of charcoal consumption are expected to be located in the Central and Northern regions of Mexico.

Based on the stated projections on fuelwood and charcoal demand in Mexico by 2030, alternative options to constrain negative impacts should be encouraged with particular attention to areas showing a trend of increasing biomass consumption. For example, support for projects aiming at disseminating improved woodburning cookstoves and efficient charcoal kilns would be essential to reduce demand (Berrueta et al., 2008; Masera et al., 2012), improve indoor air quality (Amendáriz et al., 2008; Masera et al., 2007), and mitigate GHG's emissions (Johnson et al., 2009, 2010).

### Acknowledgments

The first author acknowledges financial support from the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) in Mexico to pursue her doctoral studies at the National Autonomous University of Mexico under the supervision of the fourth author. This study was also supported through a grant from the Research and Technology Innovation Support Program (PAPIIT) (No. IT101512), of the National Autonomous University of Mexico.

### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>.

### References

Armendáriz Arnez C, Edwards RD, Johnson MJ, Zuk M, Rojas-Bracho L, Serrano P, et al. Reductions in personal exposures and indoor concentrations of PM and CO in rural Mexico as a result of the installation of a Patsari Improved Cook Stove. *Indoor Air* 2008;18(2):93–105.

Arnold M, Kohlin G, Persson R, Shepherd G. Fuelwood revisited: what has changed in the last decade? Occasional Paper 39. Bogor Barat, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR); 2003.

Arnold M, Kohlin G, Persson R. Woodfuels, livelihoods, and policy interventions: changing perspectives. *World Dev* 2006;34(3):596–611.

Berrueta V, Edwards R, Masera OR. Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacán, Mexico. *Renew Energy* 2008;33(5):859–70.

Chum H, Faaij A, Moreira J, Berndes G, Dhamija P, Dong H, et al. *Bioenergy*. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, Swickel T, Eickemeier P, Hansen G, Schlömer S, Von Stechow C, editors. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2011. p. 209–331.

CONAFOR. Competitividad Forestal. Comisión Nacional Forestal. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php?tema=forestales/competitividad>, 2012. [Retrieved October, 2012].

CONAPO. Proyecciones de la Población 2005–2050. Consejo Nacional de Población. [http://www.portal.conapo.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=36&Itemid=294](http://www.portal.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=294), 2012. [Retrieved October, 2012].

Díaz R. Consumo de Leña en el Sector Residencial de México: Evolución Histórica y Emisiones de CO<sub>2</sub>. (Master Thesis in Engineering) México, DF, Mexico: División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM; 2000.

Drigo R. Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM) Slovenia: spatial woodfuel production and consumption analysis. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations (UN); 2004 [http://www.wisdomprojects.net/global/csdetail.asp?id=8]. Retrieved January, 2013].

Drigo R. Woodfuel Integrated supply/demand overview mapping (WISDOM) study cases. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.wisdomprojects.net/global/cs.asp>, 2008. [Retrieved January, 2013].

Drigo R, Chirici G, Lasserre B, Marchetti M. Analisi su base geografica della domanda e dell'offerta di combustibili legnosi in Italia. *L'Italia forestale e Montana* 2007;62(5/6):303–24. [http://www.wisdomprojects.net/global/csdetail.asp?id=12#]. Retrieved January, 2013].

FAO. Forestry. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/forestry/energy/en/>, 2011. [Retrieved January, 2012].

Foley G. Exaggerating the Sahelian woodfuel problem? *Ambio* 1987;16(6):367–71.

García-Frapolli E, Schilmann A, Berrueta V, Rojas-Rodríguez H, Edwards R, Johnson M, et al. Beyond fuelwood savings: valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purépecha region of Mexico. *Ecol Econ* 2010;69(12):2598–605.

Ghilardi A, Guerrero G, Masera OR. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach. *Biomass Bioenergy* 2007;31(7):475–91.

Ghilardi A, Guerrero G, Masera OR. A GIS-based methodology for highlighting fuelwood supply/demand imbalances at the local level: A case study for Central Mexico. *Biomass and Bioenergy* 2009;33(6–7):957–72.

IEA. World energy outlook 2010-poverty. International Energy Agency. [http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/weo2010\\_poverty.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/weo2010_poverty.pdf), 2010. [Retrieved October, 2012].

INEGI. Microdatos de la Muestra del Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/microdatos2/default2010.aspx>, 2010. [Retrieved August, 2010].

Johnson M, Edwards R, Ghilardi A, Berrueta V, Gillen D, Frenk CA, et al. Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects. *Environ Sci Tech* 2009;43(7):2456–62.

Johnson M, Edwards R, Masera O. Improved stove programs need robust methods to estimate carbon offsets. *Clim Change* 2010;102(3–4):641–9.

Leach M, Mearns R. Beyond the woodfuel crisis: people, land and trees in Africa. London: Earthscan Publications; 1988.

Ilele S. Degradation, sustainability, or transformation? A case study of villager's use of forestland in the Malnad Region of Uttara Kannada District, India. (PhD thesis) Berkeley: University of California; 1993.

Mahapatra AK, Mitchell CP. Biofuel consumption, deforestation, and farm level tree growing in rural India. *Biomass Bioenergy* 1999;17(4):291–303.

Masera O. Socioeconomic and environmental implications of fuel-wood use dynamics and fuel switching in rural Mexico. (PhD thesis). Berkeley: University of California; 1994.

Masera O, Navia J, Arias T, Riegelhaupt E. Patrones de consumo de leña en tres microrregiones de México: Síntesis de Resultados. Proyecto FAO/MEXCO/ICP 4553 (A). Patzcuaro Mexico: GIRA AC; 1997.

Masera O, Saatkamp B, Kammen D. From linear fuel switching to multiple cooling strategies: A critique and alternative to the energy ladder model. *World Dev* 2000;28(12):2083–103.

Masera O, Drigo R, Trossero MA. Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM): a methodological approach for assessing woodfuel sustainability and support wood energy planning. Rome Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); 2003.

Masera O, Ghilardi A, Drigo R, Trossero MA. WISDOM: a GIS-based supply demand mapping tool for woodfuel management. *Biomass Bioenergy* 2006;30(7):618–37.

Masera O, Edwards R, Armendáriz Arnez C, Berrueta V, Johnson M, Rojas Bracho L, et al. Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy Sustain Dev* 2007;11(2):45–56.

Masera O, Berrueta V, García CA, Serrano-Medrano M, Martínez-Bravo R. Escenarios de mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos. Proyecto GEF-PIMS4371 CC Quinta Comunicación Nacional de México a la CMNUCC. Morelia, México: GIRA AC; 2012.

Puentes V. Impacto del consumo de leña en el bosque de Santa Fe de la laguna-Michoacán. (Tesis de licenciatura) México DF: Facultad de Ciencias, UNAM; 2002.

Romieu I, Rojas-Rodríguez H, Marrón-Mares AT, Schilmann A, Pérez-Padilla R, Masera OR. Improved biomass stove intervention in rural Mexico: impact on the respiratory health of women. *Am J Respir Crit Care Med* 2009;180(7):649–56.

RWEDP. Regional study on wood energy: today and tomorrow in Asia—field document no. 50. Bangkok Thailand: Regional Wood Energy Development Program in Asia, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); 1997.

RWEDP. Basics of wood energy planning: a manual—report no. 64. Bangkok Thailand: Regional Wood Energy Development Program in Asia, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); 2000.

Sánchez Gonzales MC. Uso y manejo de la leña en Xucilub, Yucatán. (Tesis de Maestría) México DF: Facultad de Ciencias, UNAM; 1993.

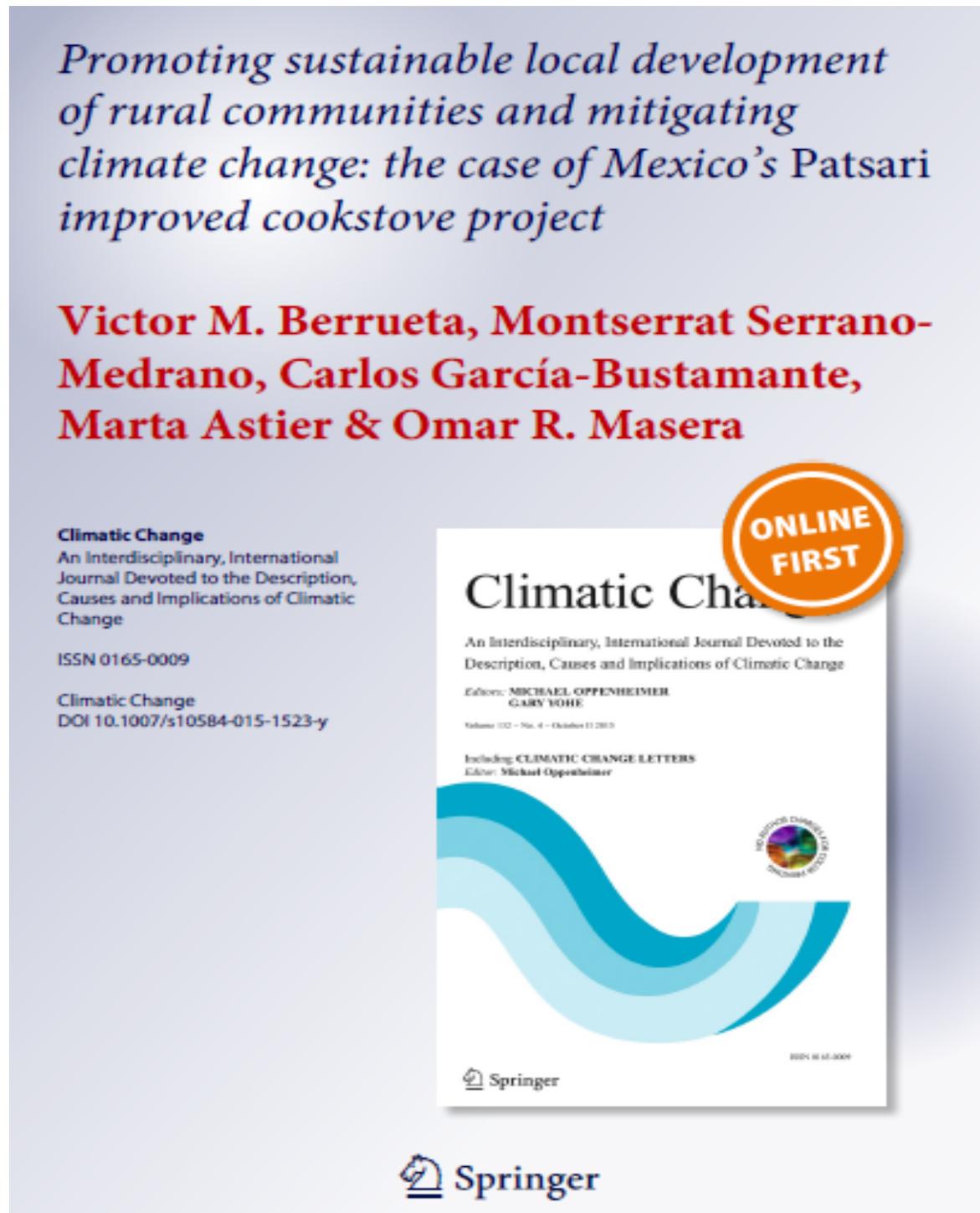
SENER. Estadísticas de energía. Secretaría de Energía. <http://www.sener.gob.mx/portal/Default.aspx?id=1791#Energia>, 2009. [Retrieved October, 2012].

Tovar MR. Uso de leña y su impacto en comunidades de la Región Purépecha, Michoacán, México. (Tesis de Maestría) Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE); 2004.

UNECE/FAO. Introduction to energy statistics: they role in policy and decision making—international perspective. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)/Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Joint Wood Energy Enquiry; 2012a [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/meetings/garnier.pdf]. Retrieved December, 2012].

UNECE/FAO. Joint Wood Energy Enquiry-workshop. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)/Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Joint Wood Energy Enquiry; 2012b [http://www.unece.org/forests/jwee-workshop-2012.html]. Retrieved December, 2012].

3. “Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico’s *Patsari* improved cookstove project”\*\*



\*\* Véase <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-015-1523-y/fulltext.html>>.

## Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico's *Patsari* improved cookstove project

Victor M. Berrueta<sup>1</sup> · Montserrat Serrano-Medrano<sup>2</sup> ·  
Carlos García-Bustamante<sup>3</sup> · Marta Astier<sup>4</sup> ·  
Omar R. Masera<sup>2</sup>

Received: 16 September 2013 / Accepted: 1 October 2015  
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2015

**Abstract** Improved cookstoves have been identified in Mexico as a key opportunity to advance sustainable local development priorities in disadvantaged regions while mitigating climate change. This paper reviews the Patsari Cookstove Project initiated in 2003 by an NGO, Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA). The project applied an interdisciplinary and participative user-centered approach to disseminate improved cookstoves in rural Mexico, with a special focus on indigenous and poor rural communities. To date, GIRA and the Patsari Network have disseminated thousands of stoves using a “training to trainers” model. Benefits from the project include tangible improvements in users’ health, as well as savings in time and money expended on fuelwood procurement and use. The project has also documented substantive environmental benefits from significant mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions associated with traditional open fires. To sustain scaling up efforts

---

“Climate Change Mitigation and Adaptation with Local Communities and Indigenous Peoples” edited by Kirsty Galloway McLean, Ameyali Ramos Castillo, Edwin Castellanos, and Agqaluk Lyngé.

**Electronic supplementary material** The online version of this article (doi:10.1007/s10584-015-1523-y) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Victor M. Berrueta  
vberrueta@gira.org.mx

- <sup>1</sup> Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA), Patzcuaro 61613 Michoacan, Mexico
- <sup>2</sup> Institute for Ecosystem and Sustainability Research, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Morelia 58190 Michoacan, Mexico
- <sup>3</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Morelia 58190 Michoacan, Mexico
- <sup>4</sup> Environmental Geography Research Center, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Morelia 58190 Michoacan, Mexico

Published online: 12 October 2015

 Springer

over the long-term, two networks have been created: The Patsari Network, which includes several organizations promoting Patsari stoves for household users, and the Tsiri Network, which supports local food security and the empowerment of indigenous women through the promotion of institutional cookstoves. Through appropriately designed and implemented local interventions, the project demonstrates that the goals of advancing sustainable local development in rural areas and climate change mitigation may not be contradictory, and may in fact reinforce one another.

## 1 Introduction

Bioenergy plays a significant role in the satisfaction of human energy needs, constituting almost 10.2 % (50.3 EJ) of the total global energy supply in 2008. Of this total amount, the traditional use of fuelwood and charcoal for food preparation—mainly by the 3 billion most impoverished families in developing countries—represented around 30.7 EJ (Chum et al. 2011). Fuelwood is typically used in three-stone open cooking fires (TSFs) or in U-shaped open fires (Fig. 1) characterized by low efficiency and large emissions of health-damaging and greenhouse gases pollutants. The global burden of traditional bioenergy use reaches 55 % of total woodfuels harvest and 2 % of global GHG emissions (Bailis et al. 2015).

Efficient technologies such as improved cookstoves (ICS) could help reduce biofuel consumption as well as emissions derived from biomass use. Carbon offsets from ICS programs could represent an economically viable option for advancing local development priorities while reducing global carbon emissions given: wide-scale reliance on biomass fuels as a primary energy source; and health co-benefits from the reduction of indoor air pollution.

In Mexico, ICS have been identified as an important option to mitigate greenhouse emissions and are included within the National Climate Change Action Plan (INDC-México 2015). In fact, a study by the World Bank (Johnson et al. 2009a, b) identified ICS as the largest mitigation option within the Mexican residential sector in the period between the years 2009 and 2024.

This paper reviews the Patsari Project, an ICS project that began in 2003 and continues to the present. Through collaboration between Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA, a non-profit NGO) and the National Autonomous University of Mexico

**Fig. 1** Traditional open fire in the Purépecha region of Michoacán state in Mexico



(UNAM), the project incorporates technological innovation, technical evaluation, implementation, and monitoring.

The Patsari project has had very encouraging results regarding social impacts (improved quality of life and decreased health risks), environmental benefits (decrease of pollutants and emissions of greenhouse gases) and economic improvements (saving fuel and time). It has consequently expanded throughout Mexico, adopted by dozens of institutions and organizations that build the Patsari stove. The project has successfully strengthened several of these organizations through its Patsari Network. Moreover, its Tsiri Network, which is composed of small craft workshops that manually produce corn *tortillas* using the Patsari stove, has significantly impacted on food security. Several challenges, discussed below, remain to more effectively scale up the project and make it sustainable in the long-term.

## 2 Domestic fuelwood users and rural communities in Mexico

In Mexico, fuelwood represented about 41 % of the total residential energy consumption in 2010. The almost 23 million users of fuelwood represented about 25 % of the country's total population (Serrano-Medrano et al. 2014; Masera et al. 2005a). Approximately 15 million are indigenous, which represent about 13 % of the total population (<http://www.cdi.gob.mx/>).

Fuelwood plays an important role in meeting residential energy needs in rural areas, which often coincide with indigenous regions<sup>1</sup> (CDI 2006). It is a renewable energy source that is used on a daily basis for food preparation, and requires the dedication of a great part of the day for its procurement. It is a preferred fuel type in rural areas, because it can almost always be acquired or collected locally.

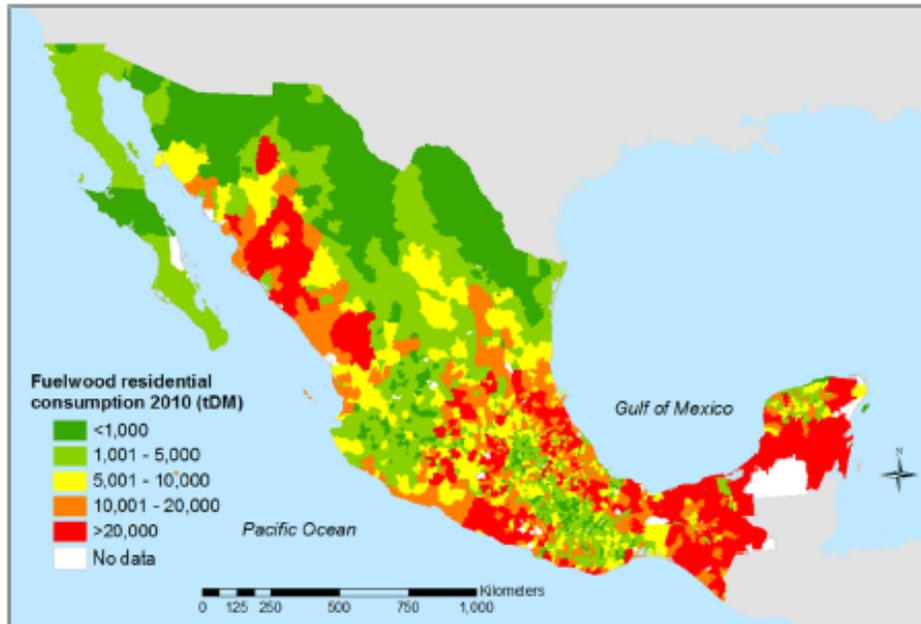
Fuelwood use and its association with fire has been an activity intimately linked to human life, not just for survival, but also as part of religious and cultural expression. Fuelwood gathering, usually from village surroundings, is an especially important activity for women and children of rural communities. However, men gather fuelwood when it has to be brought from more distant places; when larger quantities are needed; or when safety is an issue. (Magallanes 2006).

Figure 2 shows the spatial distribution of fuelwood consumption in Mexico. It can be seen that, with the exception of the Northeastern Region, the rest country is still highly dependent on fuelwood.

## 3 Resilience of fuelwood use

In Mexico, LP gas (LPG) is the main cooking fuel in urban areas. In the rural and some peri-urban areas, LPG is increasingly used but it has not fully replaced fuelwood. In general, a "fuel stacking" system predominates (Masera et al. 2000) among fuelwood users in Mexico. Accordingly, people use LP gas for specific tasks such as reheating food, while

<sup>1</sup> According to the classification used by CDI, a municipality is considered indigenous when its indigenous population represents more than 40 % of its total population. It is estimated that 60 % of the indigenous population (approximately 6 million people) live in indigenous municipalities and the rest live in predominantly "mestizo" municipalities (CDI 2006).



**Fig. 2** Spatial distribution of fuelwood consumption in tons of dry matter in Mexico (2010). (Extracted from Serrano-Medrano et al. 2014)

fuelwood is still used for activities with strong cultural roots such as making *tortillas*, *tamales* or cooking beans.

Access to LP gas is also difficult in remote rural communities, and it is a very expensive source of fuel for poor families (Masera et al. 2005a). For this reason, the use of fuelwood in Mexico is expected to remain almost steady over the next two decades. Serrano-Medrano et al. (2014) have projected a decrease by only 9 % of the number of exclusive fuelwood users and their associated fuelwood consumption between 2010 and 2030. They anticipate that the total fuelwood consumption will reach 18.4 million tons by 2030 from 19.4 million tons at present. It should be noted that fuelwood use represents 80 % of total wood harvesting in Mexico, including industrial uses of wood such as timber and pulp and paper.

#### 4 Impact of traditional fuelwood use in open fires

Traditional open fires lack chimneys and are characterized by incomplete and uncontrolled combustion, with a large amount of fuel used as well as particulate matter and many polluting gases being emitted.

Despite the fact that fuelwood is generally gathered or bought at low prices, many of the poorest families in the country still struggle to afford it. Households can spend 15 to 20 % of their income to purchase it, or the equivalent in the time required to acquire fuelwood. Berrueta et al. (2008) reported that the average per capita fuelwood consumption in Mexico's rural communities was 3.4 kg/cap/day for exclusive fuelwood users. This means that a family uses approximately 6.8 tons of fuelwood in a year.

The traditional use of fuelwood also has several negative implications. For instance, adverse impacts on users' health, indoor air quality, and on local and global environments have been widely reported. Indoor air pollution caused by open fires is so serious that the World Development Report (2005) classified this as one of four critical health problems worldwide, and as one of the main causes of mortality for children under the age of 5 years in rural areas (Bates et al. 2005; Smith 2003). The latest global estimate of the health impacts of household indoor air pollution from solids fuels ranks fuelwood as third among different health risks, with an estimated 3.5 million deaths and an average of 4.3 % of global DALYs (Disability Adjusted Life Years) in 2010 (Lim et al. 2013).

Women typically spend up to 8 h a day cooking on open fires. During this time, they are exposed to high levels of smoke and pollutants. While these women are clearly a vulnerable group, the highest health risk is for children under the age of 5 years old because of the amount of time that they spend with their mothers at home. Respiratory illnesses, triggered by traditional fuelwood use are regarded as the main cause of morbidity and mortality among these groups (Riojas et al. 2006).

When burned in open fires, biomass fuels emit a complex gas mixture containing numerous chemicals including: particles of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, carbon monoxide, methane, polycyclic aromatic hydrocarbons, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. According to Bruce et al. (2000), these pollutants have multiple potential health impacts such as exacerbated colds and asthma; respiratory infections; chronic bronchitis and chronic obstructive pulmonary disease; low birth weight; among many others. The use of traditional open fires also entails the risk of burns. Finally, traditional fires emit several compounds that contribute to global warming such as CO<sub>2</sub>, CO, methane and black carbon (Roden et al. 2009; Ramanathan and Carmichael 2008; Anenberg et al. 2012; Bailis et al. 2015).

## 5 Fuelwood use and food security: the case of *Tortilleras*

Com *tortillas* are one of the oldest culinary elements of Mexican culture. More than 90 % of Mexicans consume *tortillas* on a daily basis in combination with other traditional dishes. In rural México, maize has multiple uses and has been linked to the economic and cultural lives of communities since prehispanic times<sup>2</sup>.

In rural communities, fuelwood is used for two of the main cooking tasks: making *nixtamal* and *tortillas* (Masera et al. 2005b). *Tortillas* are cooked on a round flat utensil called a *comal* (ceramic or metal) placed over an open fire (Fig. 3).

Cooking *tortillas* is a labor-intensive task. Women have to first make the *nixtamal* before taking it to the mill. The resulting dough is brought home and ground to a finer consistency with the *metate* and then made into *tortillas* by hand. Women, called *Tortilleras*<sup>3</sup>, spend several hours a day making *tortillas*, one by one, leaning over the *comal* on the polluting open fire and

<sup>2</sup> According to data gathered by FAO (Food and Agriculture Organization), 45 % of Mexico's caloric consumption comes from com-based food. Mexico is the top tortilla consumer worldwide, with an annual consumption volume close to 22 million tons of tortillas, of which 6.9 million tons are produced using traditional methods. *Tortillas* provide energy due to their high carbohydrate content, and are also rich in calcium, potassium, and phosphorus. Moreover, they provide fiber, protein, and some vitamins, mainly A, thiamine, riboflavin, and niacin. The economic importance of com and *tortillas* is undeniable.

<sup>3</sup> These are not the same as *tortillerias*; commercial establishments that produce *tortillas* using industrial machines.

**Fig. 3** Traditional tortilla-making on open fires



using more than 25 kg of fuelwood daily (Astier 2004). The strong cultural preference for homemade tortillas has largely gone unchallenged in the majority of Mexico's rural communities. Making tortillas is a matter of particular pride for women, contributing to their identity as food providers for their families (Pilcher 1998; Preibisch et al. 2002).

"Handmade" tortillas are highly appreciated in towns and cities. A large market for them has traditionally existed in the country, providing a livelihood for *tortilleras* (women who make tortillas for sale). *Tortilleras* are common in many rural and semi-urban regions of México, and especially within indigenous communities, where there are many handmade tortilla workshops (HTWs).

Indigenous women take special interest in continuing this activity because of their limited access to other income-generating activities (Preibisch et al. 2002). HTWs provide women with "currency" on a daily basis (Astier 2004). These workshops are an important source of income for poor and marginal rural families. In most cases, women who are single mothers or widows manage these workshops.

As commercial *tortillerias* do not buy native maize and regional corn buyers pay low prices, local maize is frequently sold informally in small amounts along the year within the villages (Lerner et al. 2013; Orozco-Ramírez et al. 2010). In fact, in many regions of Mexico farmers complain for not having reliable marketing channels (Lazos 2014; Orozco-Ramírez et al. 2010). HTWs buy maize at much better prices and, therefore, representing an important avenue for supporting the production of local maize by small-scale farmers who otherwise would not find a market in these regions (Astier and Barrera 2009). There are thousands of these workshops nationwide.

## 6 The Patsari cookstove project: initial stage

In Mexico, there have been several efforts to disseminate improved cookstoves (ICS). ICS make more efficient use of fuelwood through better heat transfer and improved firewood combustion than traditional cooking devices. In general, ICS in Mexico have a chimney to direct gases outside of the kitchen.

Within rural areas, a relevant example of ICS dissemination is the Patsari Cookstove Project led by GIRA and UNAM. The project was started in 2003 in the Purépecha region located in

the highlands of Michoacan state in Central-Western Mexico. GIRA has worked in this region since 1985, and through the Patsari project has installed around 3000 stoves. However, GIRA has also trained dozens of organizations in more than 20 states in México through a “training to trainers” model, resulting in the dissemination of more than 150,000 thousand stoves throughout the country. The Patsari project aims to improve the quality of life for rural families, promotes community development and tries to reduce health risks among users by preventing the inhalation of smoke from burning fuelwood (Masera et al. 2005b; Pine et al. 2011).

The meaning of the name “Patsari” in the Purépecha language refers to the ancient practice of covering embers from the fire with dirt to keep them alive for generating a fire the next day (Berrueta and Magallanes 2012). The use of this name refers to stove’s ability to retain heat, protect health, and preserve the forest (Fig. 4).

Patsari stoves were initially distributed in communities located in indigenous regions characterized by severe poverty, very high or high migration rates (CDI 2006) and high fuelwood use. The Patsari project started with four main components: stove innovation; users’ training; development of small local businesses; and project monitoring and evaluation. It worked with fuelwood users, small-scale businesses, family-based industries dedicated to tortilla-making, NGOs, and local authorities to facilitate the dissemination and adoption of clean and efficient fuelwood stoves; reduce negative health and environmental impacts; and train local builders in the promotion, dissemination, construction, use, and maintenance of efficient fuelwood stoves.

**Fig. 4** Patsari stove in an indigenous community in Michoacán, México



## 7 The Patsari stove

The Patsari stove is the product of a participatory process of technological innovation. Built on site, the stove combines local and commercial materials, and has a high level of acceptance among users. A *technological innovation cycle* was followed in the development of Patsari stoves. The cycle started with acquiring an understanding of traditional cooking devices and culinary practices of the region. This involved the participation of researchers from UNAM and GIRA, community promoters, stove builders, and women from communities around Lake Patzcuaro and in the Purhépecha Region. Together they developed, tested, and approved several of the adjustments that culminated in the Patsari stove (Masera et al. 2005b).

The design of the Patsari stove's combustion chamber and tunnels is optimized, and its parts, including a metal chimney support and metal *comals* (pans to place the pots) are custom-designed for durability. The stove is constructed using a metallic mold to ensure that critical dimensions are maintained. The exterior structure is made of brick, and the internal body is made of a mixture of mud, sand, and cement. All of these materials are locally available, and the custom-made stove parts are also manufactured by small local industries.

Since the beginning of the project it was clear that to assure proper stove adoption and use, interventions should go beyond stove installation. Therefore, monitoring and evaluation (M&E) were recognized as integral elements within the dynamic process of the stove's innovation and development, and as a critical component of its dissemination process. Five key areas of monitoring and evaluation were conceived within the Project to document major impacts of the Patsari stove and to obtain information on its innovation–dissemination chain. The five M&E focus areas were: health impacts (Riojas et al. 2006), stove performance (Bernueta et al. 2008; Bailis et al. 2007), social perceptions (Magallanes 2006; Troncoso et al. 2007), fuelwood renewability (Ghilardi et al. 2009) and studies on GHG emissions (Johnson et al. 2008, 2009a).

To monitor the adoption process within communities, GIRA initiated an electronic database to record the installation of all Patsari stoves as well as relevant data on stove construction (Masera et al. 2007), actual use of the stove, patterns of fuel use, and stove maintenance. Also, GIRA's M&E approach sustains a continuous process of stove innovation–adaptation–dissemination. The improvement of stove models represents a positive and valuable outcome of this project approach, demonstrating the technology's evolution through design feedback (Masera et al. 2007).

## 8 Impacts achieved (fuel savings and health)

Fuelwood savings impact the household economy in two ways: reducing fuel expenses and reducing the time spent gathering fuelwood. Total fuelwood savings resulting from the introduction of Patsari stoves in the Purhépecha region were estimated to be 3.2 tons/hh/year (Bernueta et al. 2008; Garcia-Frapolli et al. 2010).

Other important impacts achieved by the Patsari project are health-related. Compared with open fires, the Patsari stove reduces median PM<sub>2.5</sub> concentrations next to the stove and in the rest of the kitchen by 71 and 58 %, respectively (Zuk et al. 2007). It also reduces greenhouse gas emissions by 74 % (Johnson et al. 2008). Moreover, the Patsari stove has been shown to significantly decrease symptoms associated with reduced lung function (Romieu et al. 2009) and to considerably reduce personal exposure to particle material and carbon monoxide (Armendariz et al. 2008).

The analysis by Garcia-Frapolli et al. (2010), that included benefits from fuel and time savings, as well as health improvements, and local and global environmental benefits, showed that the replacement of traditional stoves by Patsari resulted in USD\$ 732 per cookstove/year economic benefits for households. The benefits from fuel cost savings and improved health represent the most extensive benefits in monetary terms accounting for 53 % (USD\$ 401) and 28 % (USD\$ 209) of the overall benefit, respectively. These benefits compare well with the local average household incomes that reach about USD\$4000 per year. Patsari cookstoves thus represent a viable economic option for improving the living conditions of the poorest inhabitants of rural Mexico, with benefit/cost ratios estimated to be between 11.4:1 and 9:1. Tables with more details of total economic benefits from using Patsari cookstoves are shown in the Supporting Information Annex.

## 9 Impacts related to global climate change

In Mexico, most rural communities are expected to be negatively impacted by climate change. Yet, their contribution to current global environmental problems has been minimal. Therefore it is critical to promote actions that, in the one hand help those communities to better adapt to the expected adverse effects of climate change and at the same time promote synergies with mitigation options that could advance local development priorities without involving extra costs for local inhabitants.

Patsari stoves, are a good example of such options. First, regarding adaptation, by reducing fuelwood use more than 50 %, Patsari stoves are helping to reduce the pressure on local forests, contributing to the reduction of soil erosion and to forest conservation. By making fuel lasting longer, the stoves also help improve food security and provide a better buffer against fuel shortages induced by climate change-related events such as droughts, floods or hurricanes.

At the same time, by substituting traditional fires with Patsari stoves, local communities contribute to the reduction of GHG emissions. Johnson et al. (2009a) have estimated that the mitigation of GHG gases associated to Patsari stoves, could reach between 3 and 9 tCO<sub>2</sub>e/hh/year depending on the renewability of fuelwood extraction. For the Purepecha region, estimates of mean annual household CO<sub>2</sub>e savings for CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, and non-methane hydrocarbons were 3.9 tCO<sub>2</sub>e/hh/year and for Kyoto gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) they were 3.1 tCO<sub>2</sub>e/hh/year. Assuming a 10 % discount rate, the cost of mitigating carbon emissions using Patsari cookstoves would be \$10/tCO<sub>2</sub>e abated, and net costs (including all benefits listed by Garcia-Frapolli et al. 2010) would be minus \$104/tCO<sub>2</sub>e abated. And more importantly, this substitution of open fires would not only help to provide environmental benefits, but will bring tangible benefits to local users by improving their living conditions.<sup>4</sup>

## 10 Project scaling up

GIRA initiated the Patsari project in 2003. By 2007, about 1500 stoves had been built in Michoacan State and the next phase of training a number of NGOs to build stoves

<sup>4</sup> The factors that directly impact the mitigation potential of improved cookstoves are: annual household fuelwood consumption; GHG emission factors; the degree of renewability of fuelwood use; and continuous daily use of the stove that ultimately determines whether its impacts are sustained in the long run.

elsewhere in Mexico was implemented. In subsequent years, GIRA has trained more than 100 organizations throughout Mexico. Referring to databases and reports, we estimate that the collective effort of these organizations has resulted in the installation of over 150,000 Patsari stoves up to 2013. These stoves are part of the Federal Government's National Stove Program, which has installed in total more than 600,000 stoves.

The Patsari project has developed three strategies to ensure that its impacts spread to more communities in Mexico: the Patsari Network, the Tsiri Network and a Social Certification Program. They are described in the following paragraphs:

#### 1. The Patsari Network and the Carbon Market

The Patsari Network is a partnership of several NGOs in Mexico that seek to strengthen the work of organizations committed to participatory local development through the implementation of Patsari stove programs, with emphasis on indigenous regions. To date, the Patsari Network has distributed over 35,000 Patsari stoves in several Mexican regions.

Among other actions, the network has worked to strengthen the long-term financing of the organizations through the selling of carbon offsets in the voluntary carbon market. Its goal is to acquire monetary resources to sustain the implementation and monitoring of Patsari stoves programs. In 2012, the Patsari Network was integrated within the *Utsil Naj* program launched by Microsol, a social company that supports Latin American organizations in accessing carbon markets to develop sustainable projects for the dissemination of appropriate technologies. GIRA and its associates ensure that claims of mitigated emissions are genuine through the following measures: compliance with strict methodologies defined by the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC); meeting quality standards determined by the Gold Standard; and periodic project verification by accredited international authorities.

#### 2. The Tsiri Network

GIRA and UNAM have also responded to the technological challenges faced by *tortilleras* by designing and developing the Patsari-t, a stove that is specifically adapted for them. This model has been successfully promoted among *tortilleras* since 2008. By 2012, more than 30 % of the HTWs (handmade tortilla workshops) in the Patzcuaro region owned Patsari-t stoves.

Patsari has substantially changed the quality of life of indigenous women in the tortilla business. Fuelwood consumption has been reduced by 60 %, which has led to reduced production costs. As tortillas produced are made from native organic maize, using efficient Patsari-t stoves, GIRA has further contributed to the development of an alternative market niche for these "ecological" and traditionally made tortillas. This cooperative movement brings traditional tortillas (and other maize products) to urban consumers. According to the view expressed by indigenous women participating in "Red Tsiri" in the Patzcuaro region, they have substantially improved their quality of life by investing less time in selling products and simultaneously by being able to increase their weekly income and improved health also (Masera-Astier and Astier 2014).

### 3. Social Certification and monitoring Program

Since 2011, GIRA has designed and implemented a certification program targeting organizations implementing the Patsari model. This ensures that their implementation techniques are efficient and bring satisfaction to rural families. This program is expected to help guarantee successful dissemination processes and to establish quality standards for technical as well as social aspects. The process consists of four stages: training; planning and starting the project; monitoring project impacts; and follow-up work.

The training stage is led by GIRA in collaboration with other organizations from the Patsari Network. It includes training in the technical aspects of construction and maintenance of Patsari stoves, as well as social participatory tools for implementation. The planning and project-starting stages include support for planning the dissemination process, acquisition of supplies, recruitment of local builders, and quality control supervision of the materials used. The monitoring of project impacts includes inspection of a sample of installed stoves to correct any construction errors. Finally the follow up work includes a house-by-house inspection, this is carried out to document impacts related to fuel consumption, health, and stove use. This continuous monitoring is expected to ensure proper use of the stoves by correcting any problem during the early stages of usage. At the end of the process a certificate is issued that documents the organization's ability to carry out a Patsari stove implementation project. The certificate is valid for 2 years and should be renovated with subsequent inspections.

## 11 Discussion: challenges for cookstove programs

### 11.1 Contribution of ICS to national mitigation and adaptation strategies

The introduction of Patsari stoves represents a viable economic option for improving life quality in rural Mexican communities. This is achieved through tangible economic and other benefits associated with a reduction in health problems and savings in fuelwood use, as well as by contributing to mitigation of GHG emissions. Besides GHG mitigation and environmental benefits, Patsari stoves have proved to be a catalyst agent in social processes supporting local identities. Among Mexico's rural and indigenous communities, the kitchen is the "heart of the home" where the family gathers to socialize and make important daily life decisions. Patsari stoves have been seen to transform the kitchen into a clean and safe place, which is an important aspect of effectively improving the quality of life of indigenous families. Also, as discussed before, by reducing fuelwood use, and thus pressure on local forests, cookstoves are an option that can be integrated into more general adaptation strategies for climate change.

At the country level, improved cookstoves have been shown to represent a sizable mitigation option, Islas et al. (2007) and a comprehensive study by the World Bank (Johnson et al. 2009b) have estimated that the total mitigation potential of GHG emissions through the introduction of efficient wood stoves in Mexico could reach 19.4 MtCO<sub>2</sub>e/year, the highest for the Mexican residential sector. Additionally, it has been reported that the introduction of efficient cookstoves represents a good cost-efficient option to reduce GHG emissions at a net cost of -2.3 USD/tCO<sub>2</sub>e when time savings are included, and -18.90 USD/tCO<sub>2</sub>e when both time and health benefits are included (Johnson et al. 2009b).

The government of Mexico considers adaptation to climate change as a priority to reduce the country's vulnerability (INDC-México 2015). There are opportunities to foster mitigation

measures and actions that also increase the adaptive capacity of the population. This is captured in the General Law on Climate Change, the National Strategy on Climate Change and the Special Program on Climate Change 2014–2018, which describes specific actions, like implementation of cookstove projects with a potential contribution of 2.05 MtCO<sub>2</sub>e/yr to 2018 (2.5 % of total goal of mitigation for all country).

Nevertheless, as discussed below, there are still many challenges and constraints that may preclude sustaining the benefits of stove implementation in Mexico's rural areas in the long-term.

### 11.2 Methodological issues

Current methodologies applied in the Voluntary and CDM carbon markets do not adequately account for all of the GHG gases mitigated by cookstoves, and thus, they restrict the benefits that can be obtained from mitigation of GHG emissions. Also there are factors such as the fraction of non-renewable biomass that are difficult to quantify at the local level, which require spatially explicit analysis (Maser et al. 2004). Mitigation of black carbon emissions is another important aspect that needs to be studied and eventually incorporated into the methodologies, because it could represent a more effective way to reduce global warming in the short-term. Proposals to cope with these three problems have been recently advanced (see for example Bailis et al. 2015 on the fraction of non renewable biomass and work from the Gold Standard to examine the inclusion of black carbon within voluntary certification methodologies (Gold Standard 2014) and hopefully they will help overcome the stated barriers.

### 11.3 Financial issues

The current price of carbon credits barely covers the project's cost and does not make justice to the multiple co-benefits that improve cookstoves bring. Also there is a high uncertainty of what will be the fate of the current CDM market after the Conference of the Parties in Paris at the end of 2015. Besides CDM and the voluntary market as funding sources, carbon offset projects require other financing mechanisms that can account for the totality of their benefits. New results-based protocols documenting the multiple benefits of stove programs are critical for attracting more financial sources and ensuring their continuity in the long-term.

### 11.4 Technical and implementation issues

It is important to work toward establishing certification programs for cookstoves built in-situ, as well as developing protocols for social certification that integrate users during the process of implementing and validating the technology. A continuous process of innovation based on a dialogue with local users and with feedback from local knowledge is also essential. Furthermore, it is important to improve cookstove programs to better adapt to the high diversity of social and cultural contexts of peasant and rural families.

### 11.5 Institutional issues

In many cases, improved cookstoves are not considered to be genuine alternatives for local social and economic improvement by government and financing agencies. Thus, there is a strong need to promote awareness within the government about the importance of these

programs in terms of health, environmental and other benefits for local users, particularly women. Finally, massive awareness campaigns are necessary for users to understand the importance of reducing the health impacts caused by fuelwood smoke and the benefits of this technological innovation.

### 11.6 Improved cookstoves and food security

Food security means the enduring right to safe and culturally acceptable food. As explained above, the traditional tortilla is mainly cooked using fuelwood in the rural sector. Traditional tortillas therefore bring together two key local natural resources: fuelwood and native maize (Orozco-Ramírez et al. 2010). Currently there is a growing demand for traditional and handmade tortillas in the peri-urban and urban sectors (Lerner and Appendini 2011). Accordingly HTW that rely on Patsari or other improved cookstoves, could promote more sustainable maize production and cooking (Astier and Barrera 2009). Farmers could also find a secure market for the native maize they produce. Consequently, indigenous landraces are preserved, while traditional tortillas can still be consumed, preserving indigenous gastronomy and securing local food.

## 12 Conclusions

The dissemination of Patsari stoves shows that when properly implemented and monitored ICS programs result in a set of tangible environmental, health, and economic benefits for rural communities. Specifically, we have shown that Patsari stoves help both to adapt to climate change and to mitigate greenhouse gas emissions, decrease exposure to fuelwood smoke, reduce respiratory illnesses, and improve the health of women and children among others. Moreover, these stoves save fuelwood, and thereby help to reduce forest degradation resulting from intensive fuelwood use, as well as the time spent gathering and transporting fuelwood (especially for women and children).

At a global level, improved stove programs represent an attractive and cost-effective option for the reduction of carbon emissions, when we consider that almost 3 billion people cook with solid fuels. Rather than focusing narrowly on mitigation, cookstove programs need to consider the reduction of GHG emissions as a by-product of more general sustainable development goals attained by these programs, such as health benefits resulting from the reduction of indoor air pollution, as well as economic and environmental benefits from the decrease in fuel consumption. For the programs to be effective, it is also critical that they are based on an understanding of local cooking practices and that they foster local people participation at the different program stages, from stove design to monitoring. Finally, it is also critical that the programs go beyond the installation or selling of cookstoves, by taking actions to ensure the sustained use of stoves in the long-term, as well as to provide solutions for the non-cooking uses of the traditional fires (e.g., space heating, water heating, roof protection, etc.).

**Acknowledgments** Our gratitude to the families from the Meseta Purépecha who opened their homes to us. Funding was provided by SEDESOL-CONACYT under the project 2009-119143, FOMIX-CONACYT under the project FMSLP-2013-C03-221387 and by UNAM-PAPIIT under the project IT101512.

## References

- Anenberg SC, Schwartz J, Shindell AM, Faluvegi G, Klimont Z, Janssens-Maenhout G, Pozzoli L, Van Dingenen R, Vignati E, Emberson L, Muller NZ, West JJ, Williams M, Demkine V, Hicks WK, Kuylenstierna J, Raes F, Ramanathan V (2012) Global air quality and health co-benefits of mitigating near-term climate change through methane and black carbon emission controls. *Environ Health Perspect* 120(6):831–839
- Armedariz C, Edwards R, Johnson M, Zuk M, Rojas L, Diaz-Jimenez R, Riojas H, Masera O (2008) Reduction in personal exposures to particulate matter and carbon monoxide as a result of the installation of a Patsari improved cook stove in Michoacan Mexico. *Indoor Air* 18:2
- Astier M (2004) Estudio sistémico de la elaboración de tortilla tradicional: su impacto en el uso de los recursos naturales en la Región de Pátzcuaro-Zirahuén. GIRA, A.C., Michoacan
- Astier M, Barrera N (2009) Small tortilla enterprises a key issue for maize diversity conservation. American Association of Geographers Annual Meeting. Paper Session: Geographic Contributions to Agrobiodiversity Conservation III. 3/24/09
- Bailis R, Bernueta V, Chengappa C, Dutta K, Edwards R, Masera O, Stoll D, Smith K (2007) Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household Energy and Health Project. *Energy Sustain Dev* 11(2):57–70
- Bailis R, Drigo R, Ghilardi A, Masera O (2015) The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nat Clim Chang*. doi:10.1038/NCLIMATE2491
- Bates L, Bruce N, Theuri D, Owalla H, Amatya P, Malla MB, Hood A (2005) What should we be doing about kitchen smoke? *Energy Sustain Dev* 9(1):7–15
- Berrueta V, Magallanes AB (2012) Leña para uso doméstico en comunidades Purhépechas de Michoacán: acceso, utilización e implicaciones sociales. En: Argueta A, Gómez Salazar M, Navia J (Coords) Conocimiento tradicional, innovación y reapropiación social. Editorial Siglo XXI, Mexico
- Berrueta V, Edwards R, Masera O (2008) Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacán Mexico. *Renew Energy* 33:5
- Bruce N, Perez-Padilla R, Albalak R (2000) Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge. *Bull World Health Organ* 78:1078–1092
- CDI, Comisión Nacional para el desarrollo de los pueblos indígenas (2006) Regiones indígenas de México, [http://www.cdi.gob.mx/regiones/regiones\\_indigenas\\_cdi.pdf](http://www.cdi.gob.mx/regiones/regiones_indigenas_cdi.pdf)
- Chum H, Faaij A, Moreira J, Berndes G, Dhamija P, Dong H, Gabrielle B, Eng AG, Lucht W, Mapako M, Masera O, McIntyre T, Minowa T, Pingoud K (2011) Bioenergy, in IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, Zwickel T, Eickemeier P, Hansen G, Schlömer S, von Stechow C (eds) Cambridge University Press, Cambridge
- García-Frapolli E, Schilman A, Bernueta V, Riojas H, Edwards R, Johnson M, Guevara-Sanginés A, Armendariz C, Masera O (2010) Beyond fuelwood savings: valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purhépecha region of Mexico. *Ecol Econ* 69:12
- Ghilardi A, Guerrero G, Masera O (2009) A GIS-based methodology for high lighting fuelwood supply-demand balances at the local level: a case study for central Mexico. *Biomass Bioenergy* 33:957–972
- Gold Standard (2014) Public call for stakeholder comments: the gold standard foundation's proposed expansion of scope to certify emission reductions from black carbon. Gold Standard, UK
- INDC-México, Intended Nationally Determined Contribution Mexico (2015) México, Gobierno de la Republica, marzo 2015 <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Mexico/1/MEXICO%20INDC%2003.30.2015.pdf>
- Islas J, Manzini F, Masera O (2007) A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 32:2306–2330
- Johnson M, Edwards R, Alatorre-Frenk C, Masera O (2008) In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmos Environ* 42(6):1206–1222
- Johnson M, Edwards R, Ghilardi A, Bernueta V, Gillen D, Alatorre-Frenk C, Masera O (2009a) Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects. *Environ Sci Technol* 43(7):2456–2462
- Johnson T, Alatorre C, Romo Z, Liu F (2009b) Low-carbon development for Mexico. World Bank, Washington
- Lazos E (2014) Consideraciones socioeconómicas y culturales en la controvertida introducción del maíz transgénico: el caso de Tlaxcala. *Sociológica* 29(83):1–20
- Lerner AM, Appendini K (2011) Dimensions of Peri-Urban Maize production in the Toluca-Atacomulco valley, Mexico. *J Lat Am Geogr* 10(2):87–106
- Lerner AM, Eakin H, Sweeney S (2013) Understanding peri-urban maize production through an examination of household livelihoods in the Toluca Metropolitan area. *Mex J Rural Stud* 30:50–63

- Lim S et al (2013) A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet* 380(9859):2224–2260
- Magallanes A (2006) Estudio de Percepciones sobre el Cambio de Vida a Partir del Uso de Estufas Mejoradas, internal report. GIRA, A.C., Michoacan
- Masera O, Saatkamp BD, Kammen D (2000) From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model. *World Dev* 28(12):2083–2103
- Masera O, Guerrero G, Ghilardi A, Velázquez A, Mas J, Ordóñez M, Drigo R, Trossero MA (2004) Fuelwood “Hot Spots” in México: a case study using WISDOM – Woodfuel Integrated Supply-Demand Overview Mapping. Wood Energy Programme – FAO, Rome
- Masera O, Ghilardi A, Guerrero G, Velázquez A, Mas J, Ordóñez M, Drigo R, Trossero M (2005a) Fuelwood “hot spots” in Mexico: A case study using WISDOM. FAO Reports, Wood Energy Program, Forest Products Division, FAO, Rome
- Masera O, Díaz-Jiménez R, Bernueta V (2005b) From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy Sustain Dev* 9(1):25–36
- Masera O, Edwards R, Armendáriz C, Bernueta V, Johnson M, Rojas L, Riojas H (2007) Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacan, Mexico. *Energy Sustain Dev* 11:45–56
- Masera-Astier OX, Astier M (2014) La Red Tsiri: una experiencia de sistemas alimentarios sustentables. *LEISA Rev Agroecología* 30(1):22–23
- Orozco-Ramírez, Q, Barrera, N, Astier, M, Masera O (2010) El sistema maíz-tortilla en el estado de Michoacán. En: Seefó Luján JJ, Keilbach NM (Editores) Ciencia y paciencia campesina. El maíz en Michoacán. COLMICH, Gobierno del Estado de Michoacán. pp.119–136 y 287
- Pikcher J (1998) Que Vivan Los Tamales! Food and the making of the Mexican identity. University of New Mexico, Albuquerque
- Pine K, Edwards R, Masera O, Schilman A, Riojas-Rodríguez R (2011) Adoption and use of improved biomass stoves in rural Mexico. *Energy Sustain Dev* 15:176–183
- Preibisch KL, Rivera Herrerón G, Wiggins SL (2002) Defending food security in a free-market economy: the gendered dimensions of restructuring in rural Mexico. *Human Organ* 61:68–79
- Ramanathan V, Carmichael G (2008) Global and regional climate changes due to black carbon. *Nat Geosci* 1: 221–227
- Riojas H, Romieu I, Marron-Mares T, Rodríguez-Dozal S, Masera O (2006) Health impact assessment due the introduction of improved stoves in Michoacan, Mexico, International Conference, Paris, September 2–6, Conference Abstracts Supplement, *Epidemiology*, 17(6) Supplement, pp. S226-S227
- Roden CA, Bond T, Conway S, Osorio A, MacCarty N, Still D (2009) Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves. *Atmos Environ* 43(6):1170–1181
- Romieu I, Riojas-Rodríguez H, Marron-Mares AT, Schilman A, Perez-Padilla R, Masera O (2009) Improved biomass stove intervention in rural Mexico: impact on the respiratory health of women. *Am J Respir Crit Care Med* 180(7):649–656
- Serrano-Medrano M, Arias-Chalico T, Ghilardi A, Masera O (2014) Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy Sustain Dev* 19:39–46
- Smith K (2003) Indoor air pollution and acute respiratory infections. *Indian Pediatric* 40(9):815–819
- Troncoso K, Castillo A, Masera O, Merino L (2007) Social perceptions about a technological innovation for fuelwood cooking: case study in rural Mexico. *Energy Policy* 35(5):2799–2810
- World Development Report (2005) A better investment climate for everyone. The World Bank and Oxford University Press, New York, NY
- Zuk M, Rojas L, Blanco S, Serrano P, Cruz J, Angeles F, Tzintzun G, Armendariz C, Edwards RD, Johnson M (2007) The impact of improved wood-burning stoves on fine particulate matter concentrations in rural Mexican homes. *Expo Sci Environ Epidemiol* 17:224–232