

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS

CÁLCULO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA
DEBIDO AL CAMBIO DE ALBEDO. APLICACIÓN PARA LA
CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE
“TECHOS VERDES”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE FÍSICA

P R E S E N T A

MELISSA DÍAZ HERRERA

DIRECTORA DE TESIS: ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ

AGOSTO 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Extractos de “La tierra no pertenece al hombre”: jefe piel roja, 1855

“El Gran Jefe en Washington manda decir que desea comprar nuestras tierras...vamos a considerar su oferta, pues sabemos que, de no hacerlo, el hombre blanco podrá venir con sus armas de fuego y tomarse nuestras tierras. ¿Cómo se puede comprar o vender el firmamento, ni aun el calor de la tierra? Dicha idea nos es desconocida. Si no somos dueños de la frescura del aire ni del fulgor de las aguas, ¿cómo podrán ustedes comprarlo? Deberán saber que cada parcela de esta tierra es sagrada para mi pueblo. Cada hoja resplandeciente, cada playa arenosa, cada neblina en el oscuro bosque, cada claro y cada insecto con su zumbido, son sagrados...somos parte de la tierra y asimismo ella es parte de nosotros...cuando el Gran Jefe en Washington nos envía el mensaje de que quiere comprar nuestras tierras, es mucho lo que pide... porque estas tierras son sagradas para nosotros...los ríos son nuestros hermanos y sacian nuestra sed; llevan nuestras canoas y alimentan a nuestros hijos...sabemos que el hombre blanco no comprende nuestro modo de vida. Él no sabe distinguir entre un pedazo de tierra y otro...la tierra no es su hermana, sino su enemiga...trata a su madre, la Tierra, y a su hermano, el firmamento, como objetos que se compran, se explotan y se venden como ovejas o cuentas de colores...su apetito devora la tierra, dejando atrás sólo un desierto...no sé, pero nuestro modo de vida es diferente al de ustedes. La sola vista de sus ciudades apena la vista del piel roja...no existe un lugar tranquilo en las ciudades del hombre blanco, ni hay sitio dónde escuchar cómo se abren las hojas de los árboles en primavera o cómo aletean los insectos...el ruido de la ciudad parece insultar nuestros oídos. Y ¿qué clase de vida es cuando el hombre no es capaz de escuchar el solitario grito de la garza o la discusión nocturna de las ranas al borde de un estanque? ...enseñen a sus hijos lo que nosotros hemos enseñado a los nuestros: que la tierra es nuestra madre. Todo lo que le ocurra a la tierra le ocurrirá a los hijos de la tierra. Cuando los hombres escupen al suelo se escupen a sí mismos. Esto sabemos: la tierra no pertenece al hombre, el hombre pertenece a la tierra. El hombre no tejió la trama de la vida; él es sólo un hilo. Lo que hace con la trama se lo hace a sí mismo. Ni siquiera el hombre blanco... queda exento del destino común... también los blancos se extinguirán, quizás antes que las demás tribus. Contaminan sus lechos y una noche morirán ahogados en sus propios desperdicios... ustedes caminarán hacia su destrucción, rodeados de gloria... ese destino es un misterio para nosotros, pues no entendemos por qué se exterminan los búfalos, se doman los caballos salvajes... ¿Dónde está el espeso bosque? Desapareció. ¿Dónde está el águila? Desapareció. Termina la vida y empieza la supervivencia”.

A mis papás Luciano e Isabel

A mis hermanitos
Massi, Oscar, Angie y Regie.

A ti Wolfgang Ehl, mi luz

Agradezco a la Dra. Cecilia Conde, primero que nada, por creer en este proyecto, por todo su apoyo, tiempo, ayuda y entusiasmo en él. Por abrirme todas las puertas posibles referentes al campo de cambio climático, con ello, hizo realidad uno de mis sueños.

Al M. en C. Oscar Sánchez por su gran ayuda en el entendimiento del modelo. Por toda la paciencia, tiempo, interés y dedicación muchas gracias.

Al Biólogo Jerónimo Reyes por enseñarme el aspecto biológico de los techos verdes, por las imágenes y por el paseo en el techo del jardín botánico. Fue muy inspirador.

A la Maestra Tanya Müller por explicarme parte de la historia de los techos verdes en la Ciudad de México.

A los sinodales: Carlos Gay García, Gerardo Carmona Ruíz, Gabriela del Valle Díaz-Muñoz, Oscar Sánchez Meneses y Cecilia Conde Álvarez, por sus valiosos consejos y comentarios.

A todos aquellos que colaboraron directa o indirectamente con sus consejos en el desarrollo de este trabajo.

Reconocimiento

A mis papás Luciano e Isabel, quienes siempre me han dado alas para volar y cumplir mis sueños. De quienes siempre he recibido todo el apoyo y la fuerza para enfrentar cualquier circunstancia, y de quienes aprendí que hay que tener pasión en todo. Mi gran ejemplo de amor y fortaleza.

A mis hermanos Massi, Oscarito, Angie y Regie, con quienes crecí, jugué, aprendí y a quienes quiero muchísimo. Siempre vamos a estar juntos festejando los cumpleaños.

A ti mi amor, Wolfgang Ehl, luz de mi vida, por eso, por traerle una nueva luz a mi vida, por todo el amor, comprensión, paciencia, apoyo y ternura que me das. Por todo lo que a diario me enseñas. Por nuestra nueva vida juntos. Ich liebe dich!!

A mis abuelitos (Yoya, Consuelito, Luciano y Luis). A mis tíos y primos. A cada uno de ustedes por su cariño (no los nombro porque son un chorro).

A mi maestra de ecología de la secundaria, Patricia Hernández Ruiz, quien sembró la semillita de la conciencia ambiental, la cual me inspiró a estudiar física.

A mis maestros, a todos.

A Daniel Däwes für die tolle Idee!

A Gudrun y Josef für die Ermutigung.

Y a todos mis amigos.

Índice

Resumen	1
1. Introducción	2
2. La naturación de azoteas como alternativa de mitigación del cambio climático en las ciudades	10
2.1.Techos verdes en Alemania y Estados Unidos	10
2.2.Techos verdes en la Ciudad de México	12
2.3.Posibles cambios en el albedo de las superficies urbanas	16
3. Aspectos generales del clima en las ciudades	18
3.1.Isla de calor	18
3.2.Emisiones de gases de efecto invernadero en la Ciudad de México	19
3.3.Evaporación y balance energético	21
4. Metodología	26
4.1.Ecuación de cambio de albedo global	26
4.2.Experimentos de calibración del programa Landuse	32
4.3.Cálculo de superficies de techos en la Ciudad de México	33

5. Resultados y Análisis	37
5.1.Cálculo de cambio de temperatura modificando el albedo	37
5.2.Cálculo de cambio de temperatura modificando el área	39
6. Discusión y Conclusiones	43
7. Bibliografía	46
8. Apéndice de Figuras	51
9. Apéndice I	53

Resumen

El objetivo de este trabajo es plantear la posibilidad de disminuir la temperatura urbana mediante la introducción de techos verdes. Se sabe que las plantas tienen un albedo mayor a los materiales que cubren las azoteas, y como existe una relación inversamente proporcional entre albedo y temperatura se tiene como hipótesis que con un cambio positivo de albedo se puede obtener un cambio negativo de temperatura.

Para tal finalidad usamos un modelo hecho por Carl Sagan (Sagan et al. 1979) y que parte del hecho de que la humanidad está alterando el albedo de la superficie del planeta con el cambio de uso de suelo y con ello modificando la cantidad de energía disponible para el sistema climático provocando también un cambio climático. El modelo cuenta con un programa disponible en el CD de trabajo del libro "Introducción a los modelos climáticos" de A. Henderson - Sellers y K. McGuffie (1990). Regionalizamos este modelo tomando en cuenta sólo la parte de cambio de uso de suelo de campo – ciudad y cambiando el porcentaje de área original por el que corresponde al área que ocupan los techos en la Ciudad de México.

Los resultados obtenidos muestran que si se cambiara la superficie de todos los techos de la ciudad (65% del total de superficie de la Ciudad de México) por techos verdes con un cambio de albedo de 0.05 entonces la temperatura atmosférica o del aire disminuiría en 0.845° C. También habría una disminución de temperatura si se deja el cambio de albedo fijo pero se aumenta el área afectada.

En conclusión, con la implantación de techos verdes en la Ciudad de México es posible bajar la temperatura atmosférica y con eso disminuir la isla de calor, disminuir el impacto de las ondas de calor y ahorrar energía en sistemas de acondicionamiento.

1. Introducción

La atmósfera está regida por la absorción de energía solar. En una escala larga de tiempo comparada con este fenómeno, el sistema tierra- atmósfera se encuentra en equilibrio térmico.

Por lo tanto la absorción de radiación solar, que en su mayoría es radiación visible y de onda corta, debe de estar balanceada por las emisiones al espacio de radiación que mayoritariamente se trata de radiación infrarroja y de onda larga.

Supongamos que la Tierra recibe un rayo de radiación de onda corta F_{so} en un área πa^2 , entonces va a haber una fracción de esta radiación que será reflejada de vuelta al espacio por componentes de la superficie y de la atmósfera.

A esta fracción se le conoce con el nombre de albedo (A) y se define propiamente como la relación expresada en porcentaje, de la radiación que cualquier superficie refleja comparada con la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superior a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo se expresa en términos de porcentaje.

El resto de este flujo de onda corta F_{so} es entonces: $(1 - A) F_{so} = F_s$, que es absorbido por el sistema tierra-atmósfera y distribuida a través del planeta. A F_s se le conoce como flujo solar penetrante.

El flujo solar incidente es $F_{so} = 1372 \text{ W m}^{-2}$ y el albedo medio de la Tierra es en promedio de 0.30.

En 1976 Ramanathan expresó el flujo solar penetrante F_s de la siguiente manera

$$F_s = \frac{1372}{4}(1 - A) = 240.1 \text{ W m}^{-2} \quad (1)$$

tomando en cuenta las condiciones geométricas del planeta.

Para mantener el equilibrio térmico, la Tierra debe de reemitir al espacio exactamente la misma cantidad de energía en radiación de onda larga que la que reciben. La ley de Stefan –Boltzmann describe la radiación de emisión:

$$\pi B = \sigma T^4 \quad (2)$$

donde πB representa el flujo de energía que emite un cuerpo negro a una temperatura T y donde σ es la constante de Stefan – Boltzmann con un valor de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$.

Entonces la ecuación para el caso de la Tierra sería la siguiente:

$$(1 - A)F_{s_o} \pi a^2 = 4\pi a^2 \sigma T_e^4 \quad (3)$$

donde T_e es la temperatura de la Tierra equivalente a un cuerpo negro. También se le define como temperatura efectiva. Entonces la siguiente ecuación nos da una estimación de la temperatura del planeta.

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{(1 - A)F_{s_o}}{4\sigma}} \quad (4)$$

Como se mencionó anteriormente el flujo solar incidente es $F_{s_o} = 1372 \text{ W m}^{-2}$ y el albedo medio de la tierra es en promedio de 0.30, esto deja a una temperatura de cuerpo negro para la Tierra de $T_e = 255 \text{ K}$. Esta temperatura es 33 K más fría que la temperatura superficial global $T_s = 288 \text{ K}$. Esta discrepancia en los valores T_e y T_s se debe a que la atmósfera es casi transparente a la radiación de onda corta ($\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$), mientras que es casi opaco a la radiación de onda larga ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) que es reemitida de vuelta al espacio.

El aumento de temperatura en la superficie se debe justamente a la diferente característica de transmisión entre radiación de onda larga y corta. Este efecto es conocido como efecto invernadero (Figura 1).

El efecto invernadero es controlado por los constituyentes atmosféricos que son opacos a la radiación infrarroja. Dichos constituyentes son principalmente el vapor de agua, las nubes bajas y el dióxido de carbono (CO_2). El ozono, el metano, el óxido nitroso, los aerosoles y clorofluorocarbonos CFCs, también son radiativamente opacos al tratarse de radiaciones de onda larga.



Fuente: UNEP -GRID-Arendal.

Figura 1. Efecto Invernadero. Se describen los balances de energía del sistema. si la radiación incidente es de 343 W m^{-2} , la penetrante es de 240 W m^{-2} ; por lo tanto la radiación reflejada sería de 103 W m^{-2} .

Fuente: UNEP-GRIF-Arendal.

A partir del último reporte del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático por sus siglas en inglés; 2007) se ha puesto especial atención en el cambio climático

en estas últimas fechas. Hoy en día pocos ponen en duda la influencia que tiene la humanidad en este fenómeno.

El incremento de los gases invernadero (dióxido de carbono (CO_2), metano, óxido nitroso principalmente) el cambio de uso de suelo para la agricultura, el ganado y la urbanización, son las principales causas del cambio climático global actual (Figura 2). Se calcula que de 1750 al 2005 (IPCC, 2007) los cambios en estos gases han sido del orden de 35 % para el CO_2 , de 148% para el CH_4 ; y de 18% para el N_2O .



Figura 2. Los gases de efecto invernadero se vieron aumentados a partir de la revolución industrial.

Fuente: Alejandra Torales.

Así, en su Cuarto Reporte de Evaluación el IPCC (IPCC, 2007; Pachauri y Jallow, 2007) establece que “el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como es evidente de las observaciones de las temperaturas globales promedio de la atmósfera y los océanos, del derretimiento de la nieve y hielo generalizado y del aumento global del nivel medio del mar”. Las temperaturas promedio del aire han aumentado 0.74°C

[0.56 a 0.92] entre 1906 y 2005, y las temperaturas oceánicas se han incrementado en profundidades hasta de 3000 m.

Es importante recalcar que sin la existencia de estos gases, la temperatura promedio de la Tierra sería aproximadamente de -18°C (la actual es de 15°C), pero desde la Revolución Industrial hasta la actualidad el incremento del CO_2 ha sido de un 30% (Figura 3). Esto trae un desequilibrio en el balance radiativo (Conde, 2006).

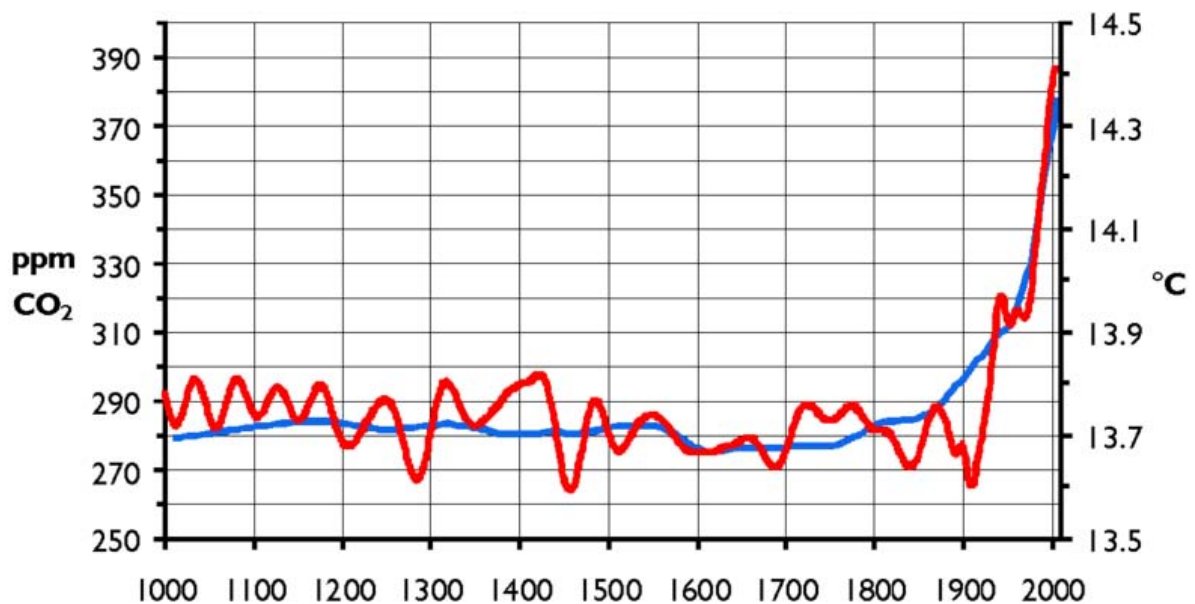


Figura 3. Concentración de CO_2 en la atmósfera (línea azul) y la temperatura media global (línea roja) durante un periodo de mil años.

Fuente: Hanno Sandvik.

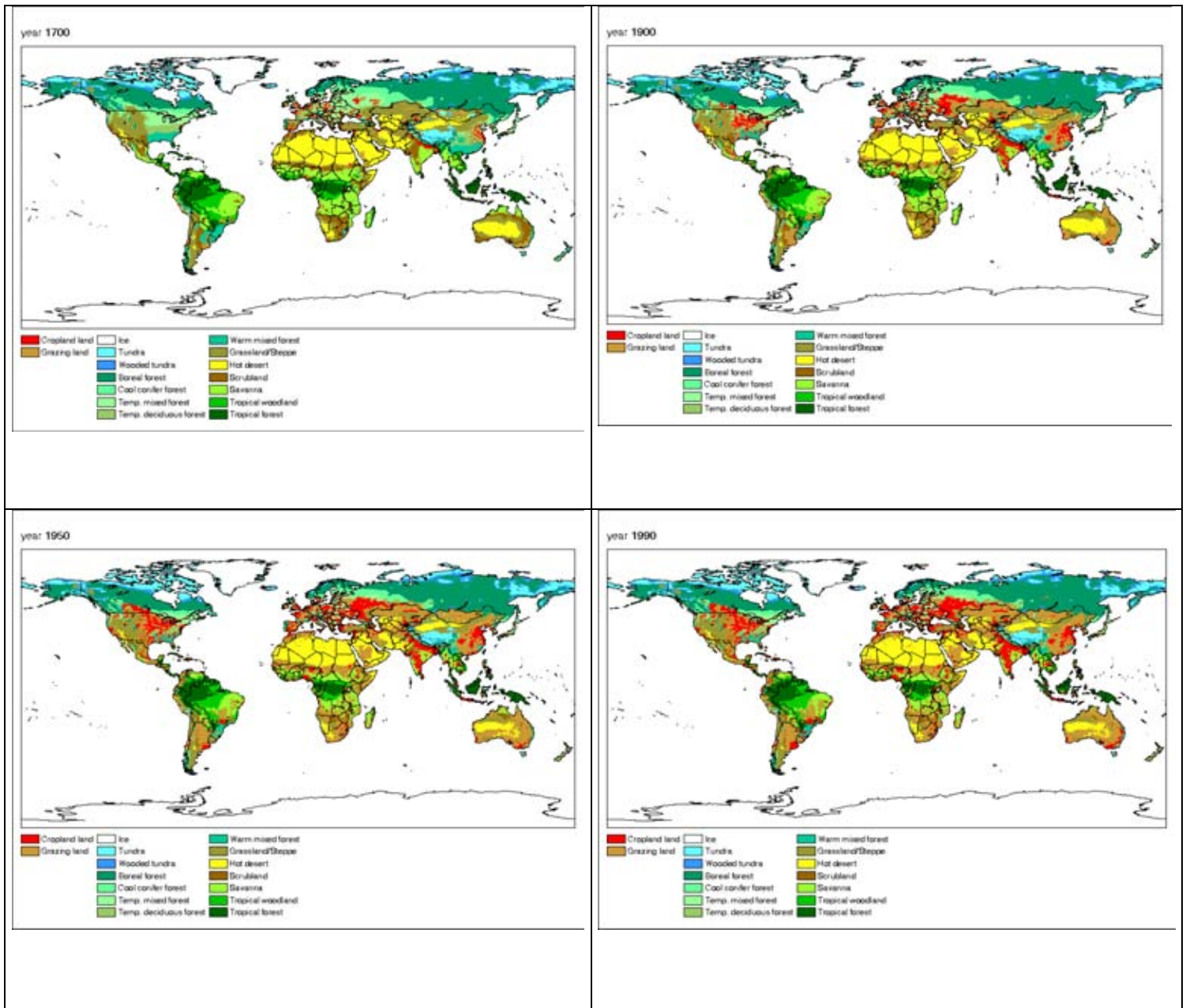
El cambio de uso de suelo afecta al clima ya que se modifica el albedo y esto trae consecuencias en el balance energético. Numerosas regiones del planeta han sido modificadas a través de la historia del hombre, lo que ha traído significativos cambios climáticos.

La desertificación, la salinización, la transformación de bosques en campos y la urbanización son algunos de los cambios de uso de suelo debidos a la presencia del hombre.

El cambio del uso del suelo está contemplado en los nuevos escenarios de cambio climático (IPCC, 2007) a través de los llamados escenarios de emisiones (Nakicenovic et al, 2000). En el escenario de uso intensivo de combustibles fósiles (A1FI), por ejemplo, las condiciones de vegetación y, en general, medio ambientales, se deteriorarían rápidamente, por lo que se proyecta que el cambio de uso de suelo sería más acelerado.

Otra forma de abordar el problema del cambio en el uso del suelo se realiza desde la modelación misma del clima (Dickinson, 1992). El autor citado señala que los cambios en las condiciones de la superficie pueden alterar de manera importante el balance de energía y los intercambios de agua y energía entre la tierra y la atmósfera. Las proyecciones de los cambios en la superficie están mas “ligados a las impredecibles decisiones económicas humanas y son menos establecidas” que los incrementos futuros en los gases de efecto invernadero. Por otra parte, el autor señala que los cambios en el uso del suelo tienen que ser lo suficientemente amplios en la escala espacial como para ser considerados en un balance global de energía. Esto es, se están dando cambios de uso de suelo de rural a urbano a niveles continentales, lo que puede representar cambios de más de 5 W m^{-2} en la energía absorbida o 10 W m^{-2} en las tasas de intercambio de energía.

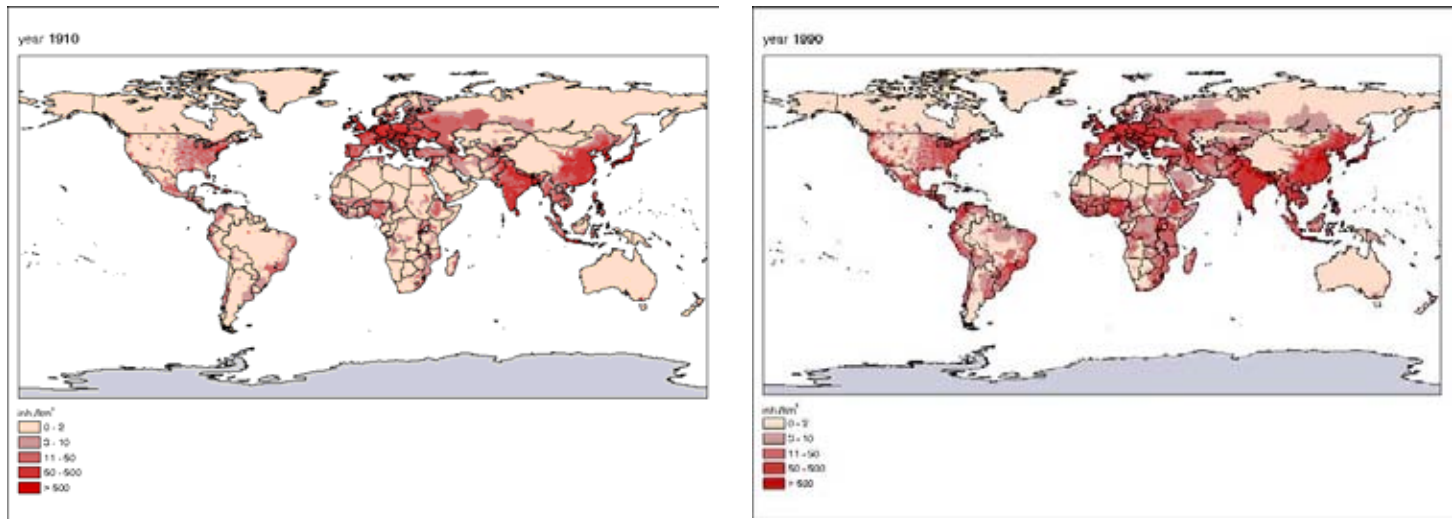
Históricamente, esos cambios sugeridos por Dickinson (por deforestación o desertificación) han ocurrido en escalas de tiempo de cientos de años, aunque en los últimos años estos procesos se observan en pasos de tiempo de décadas (Figuras 4).



Figuras 4. Cambios históricos en el uso de suelo. Las mayores modificaciones han sido por conversión en tierras de cultivo (rojo) y/o pastoreo (café oscuro)

Fuente: RIVM, SAGE. 2000

Estos cambios importantes están asociados al crecimiento de la población, que conlleva también a conversión del uso de suelo por suelos urbanos (Figuras 5).



Figuras 5. Habitantes por Km2 en 1910 y 1990.

Fuente: (RIVM, SAGE. 2000).

Así, cada vez más personas en el mundo viven en áreas urbanas. “En 2008, el mundo alcanzará un hito invisible pero trascendental: por primera vez, más de la mitad de su población humana, 3.300 millones de personas, vivirá en zonas urbanas. Se prevé que para 2030, esa cantidad habrá llegado a casi 5.000 millones”...”Hacia 2030, las ciudades de los países en desarrollo albergarán al 80% de la población urbana del mundo.” (UNFPA, 2007).

El crecimiento poblacional en las ciudades a nivel mundial en las próximas décadas es un hecho, así que los efectos de la urbanización en el cambio climático son importantes de analizar.

Con todo este contexto la naturación de azoteas se vuelve una alternativa de mitigación de cambio climático en las ciudades del mundo.

2. La naturación de azoteas como alternativa de mitigación del cambio climático en las ciudades

2.1. Techos verdes en Alemania y Estados Unidos

La naturación de azoteas es una práctica que por muchos años se ha estado realizando en Alemania. Stuttgart, por ejemplo fue una de las primeras ciudades en otorgar incentivos fiscales para la implementación de techos verdes. Para 1988 Berlín adopta medidas similares y se vuelve obligatorio que construcciones que abarcaran demasiado espacio, estén acondicionadas para un techo verde, si no, no se les otorga la licencia de construcción. En el 2000 había 15 millones de m² de techos verdes. En el 2002, una de cada 10 azoteas estaba naturada (Figura 6). Hoy en día el 43% de las ciudades Alemanas ofrecen algún tipo de incentivo para la construcción de techos verdes (Müller, 2007).



Figura 6. Alemania fue pionera en instalación y normatividad de techos verdes.

Fuente: Jerónimo Reyes.

En Estados Unidos también ha habido proyectos de “techos verdes”, por ejemplo en Chicago se instaló un jardín en el ayuntamiento del Condado de Cook en el 2000. En el mismo edificio se encuentra el gobierno municipal de dicho condado, y justamente la parte correspondiente al gobierno se quedó asfaltada para poder hacer mediciones experimentales comparativas (Figura 7).

“El jardín del ayuntamiento de Chicago de unos 1800 metros cuadrados, tiene 150 variedades de plantas distribuidas en tres tipos de suelo. El del llamado sistema extensivo tienen 10 centímetros de tierra con hierbas bajas y enredaderas. El sistema semi intensivo (de 15 centímetros de profundidad) y el sistema intensivo (de 45 centímetros de profundidad) tienen hierbas nativas de la región, flores silvestres, arbustos leñosos y plantas perennes de ornato. En el jardín también hay dos clases de árbol: un tipo de espino llamado “espolón de gallo”, que alcanza una altura de entre 4.5 y 5.5 metros con copas de unos siete metros de ancho, y manzanos silvestres, de unos cuatro metros de altura por seis de ancho.” (Abrahams, I., 2008).

Se midió la temperatura, la energía ahorrada, la reducción de las aguas pluviales y el desarrollo de las plantas tanto nativas como foráneas. “Los datos recogidos en el verano de 2002 mostraron que en el jardín la temperatura del aire era 8.3° C menor que en la parte del techo correspondiente a la municipalidad de Cook. Un estudio realizado en 2003 mostró que en las horas más cálidas de julio las temperaturas en el jardín fueron entre 19 y 31% menores que en un techo convencional... Chicago tiene una precipitación promedio de 94 centímetros anuales. En el techo del gobierno de Cook la lluvia simplemente escurre y se pierde. En cambio, el techo del ayuntamiento puede almacenar 2.5 centímetros de lluvia y descargarlos lentamente en el sistema de alcantarillas. Esto ayuda a que no se inunden las calles y reduce la cantidad de contaminantes que llegan al lago Michigan, fuente del agua potable que se bebe en Chicago...Larry Merrit, secretario de prensa para el medio ambiente del ayuntamiento, dice que el jardín de azotea contribuye a un ahorro de energía de 20% en materia de

refrigeración (ayudado por un mismo sistema de aire acondicionado que se instaló al mismo tiempo) y calefacción.” (Abrahams, I., 2008).



Figura 7. Techo verde del edificio del ayuntamiento de Chicago.

Fuente: Revista ¿Cómo ves?

2.2. Techos verdes en la Ciudad de México

En México, el tema de naturación de azoteas es relativamente nuevo. La Universidad de Chapingo instaló en 1994 cuatro techos de 75 metros cuadrados cada uno para la selección de vegetación. “En 1999 la Secretaria de Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) autorizan una prueba piloto en escuelas públicas. Y de esta manera a partir de 2003 la delegación Xochimilco es la primera demarcación en incluir la naturación de azoteas en escuelas públicas de la zona urbana, como un programa de gobierno dentro de la Dirección General de Medio Ambiente”. (SMA 1, 2008). A partir de este momento, año con año se vieron acciones en este tema tanto privadas como públicas.

Una de los hechos relevantes fue la llamada “consulta verde” que se llevó a cabo en el Distrito Federal el 29 de julio de 2007, con el fin de llegar a un consenso de medidas ambientales. Consistió de 10 preguntas y una de ellas fue la siguiente: ¿Estás de acuerdo en aumentar los espacios verdes de la ciudad y establecer la obligatoriedad de arborizar las azoteas de toda nueva construcción en el Distrito Federal?¹ La mayoría contestó positivamente,² y es por esto que se le dio un nuevo impulso a este proyecto. El primer paso fue el proceso de normativización, mismo que concluyó exitosamente. El siguiente paso es dar incentivos para promover esta medida, uno de ellos es “reducir el costo de predial para aquellas personas que tengan este sistema”³

El gobierno del Distrito Federal planea impulsar “la instalación de 30,000 m² de áreas verdes por año en los inmuebles del gobierno, de acuerdo con Tanya Muller García, directora de Reforestación Urbana de Parques y Ciclovías de esta dependencia” en un artículo publicado por CNN expansión.⁴

Por otro lado Jerónimo Reyes Santiago, biólogo-taxónomo del Jardín Botánico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), junto a un equipo multidisciplinario de esta misma casa de estudios, han llevado a cabo muchos proyectos de naturación de azoteas en la ciudad (Figura 8). El primero fue el del mismo Jardín Botánico, que es en donde se realizan mediciones de emisión de dióxido de carbono, así como de variación de temperatura, entre otras.

¹ Revisado el 15.01.08 en <http://www.jornada.unam.mx/2007/07/29/index.php?section=politica&article=022a2pol>

² Revisado el 15.01.08 en http://www.lupaciudadana.com.mx/SACSCMS/XStatic/lupa/docs/espanol/respuesta_a_solicitud_de_informacion_011200000708.pdf.pdf

³ Revisado el 18.11.07 en <http://www.eluniversal.com.mx/finanzas/57351.html>

⁴ Revisado el 17.04.08 en http://www.sma.df.gob.mx/saladeprensa/noticias/descargas/2008/febrero/190208_azoteas_verdes_aumento_plusvalia.pdf



Figura 8. Jardín en un techo de la Ciudad de México dirigido por Jerónimo Reyes.

Fuente: Jerónimo Reyes.

En una entrevista realizada el 28 de agosto de 2008 a Jerónimo Reyes por la autora de esta tesis, el biólogo explicó que las plantas adecuadas para la naturación de las azoteas en la Ciudad de México son aquellas que se conocen como suculentas. Entre las familias que más se reconocen de las suculentas están las agaváceas, las cactáceas y las crasuláceas. Este tipo de plantas han desarrollado un sistema de captación de agua a través del engrosamiento de sus raíces, tallos y hojas; lo que les permite mantener reservas de líquido para poder sobrevivir temporadas de sequía (Figura 9).

Argumenta que durante el período de secas en la ciudad, sería “imperdonable” que se plantaran especies que necesitaran ser regadas constantemente, ya que el abastecimiento del agua en ciertas colonias es limitado. Por otro lado, durante la temporada de lluvias, las suculentas toman lo que necesitan y después cierran sus estomas. Además estas plantas son eficientes en la captura de CO₂.

Otro aspecto importante a considerar en la elección de especies es que sean originarias del lugar, ya que México cuenta con mucha diversidad y de esta manera se asegura su supervivencia.



Figura 9. Las plantas recomendadas para la naturación de azoteas en la Ciudad de México son las suculentas: agaváceas, cactáceas y suculentas. En la foto se muestran ejemplos de este tipo de familias.

Fuente: Jerónimo Reyes.

2.4. Posibles cambios en el albedo de las superficies urbanas

Este trabajo se enfoca en estudiar la posibilidad de alterar planificadamente el albedo de superficie en zonas urbanas, calculando el posible cambio en la temperatura al introducir los llamados “techos verdes”.

Una forma de aumentar el albedo de manera más fácil y más barata en primera instancia que con la naturación de las azoteas, sería cambiando la pintura del impermeabilizante de la tradicional roja o negra a una blanca altamente reflectante. Existen diversos estudios que registran los cambios de temperatura al cambiar la pintura del techo. Por ejemplo, Simpson y McPherson (1997) midieron los cambios de temperatura de techos pintados con pintura plateada y con blanca; cada uno con albedos de 0.49 y 0.75 respectivamente. El resultado fue que el techo blanco era de 20 a 30° C más frío que el plateado.

Taha (1997) compara la pintura blanca (con albedo de 0.72) con coberturas negras (con albedo de 0.08) en los techos, y encuentra que la blanca era 45° C más fría en una tarde clara de verano.

No obstante mantener esos niveles de albedo requiere de mantenimiento regular, ya que sin éste estas superficies rápidamente dejan de ser eficaces debido al medio ambiente. El declive de los albedos en las superficies blancas tiene una velocidad promedio de 0.15 cada año, en algunos cada par de meses (Solecki et al., 2005). En cambio, si se opta por techos naturados con plantas de la región, que en general crecen sin cuidado humano, como propone el biólogo Jerónimo Reyes, entonces el mantenimiento de los techos verdes es mínimo.

Pero además al comparar los techos verdes y los blancos, se tiene que tomar en cuenta el calor latente de evaporación en el balance energético.

El calor latente de evaporación es la energía necesaria para pasar de agua a vapor. En la presencia de plantas este calor latente se denomina evapotranspiración. Solecki et al (2005) utilizan un término nuevo para describir el albedo de las plantas en el que

incluyen al calor latente de evaporación y a la onda corta reflejada: 'albedo equivalente'.



Figura 10. Fotografía de una planta en el visible y en el infrarrojo.

Fuente: Luis Reyes.

En la Figura 10 se muestra una fotografía tomada por el físico Luis Reyes en la que sólo utilizó una cámara digital Canon 40 D y un lente Hoya Infrarrojo R72. La primera foto es simplemente la imagen en blanco y negro de una planta con el fondo blanco (se trataba de una pared blanca). La foto de la derecha es la misma imagen, pero esta vez la foto fue tomada utilizando el lente Infrarrojo.

Como resultado se ve que al utilizar el filtro infrarrojo la imagen queda invertida de color. Y esto sugiere que a pesar de que en el espectro visible el albedo de materiales blancos es más alto que el de las plantas (sean del color que sean, excepto blancas), en el infrarrojo el albedo de las plantas puede ser mayor que el de materiales blancos, y esto es debido justamente al calor latente de vaporización. Lo cual quiere decir que la temperatura de las plantas es menor que la de la pared.

En la sección 3.3 se presenta una tabla (Tabla 1) hecha por Tejeda y Jáuregui (2000) en donde se muestra con más detalle el papel del calor latente de evaporación en algunas zonas de la Ciudad de México y se prueba que es debido a este gasto de energía en el balance energético que la presencia de vegetación se vuelve un excelente regulador de temperatura.

3. Aspectos generales del clima en las ciudades

3.1. Isla de Calor

Debido a que los materiales en las ciudades absorben mayor cantidad de radiación solar de onda corta que las superficies de los alrededores rurales y suburbanos (Solecki W. y Rosenzweig C., 2005; Luyando, E., 2004), la disipación de la energía es muy lenta, dando lugar al efecto llamado “isla de calor urbana”.

El término “isla de calor urbana” expresa el aumento de temperatura de la atmósfera y superficie de una ciudad en comparación con sus entornos no urbanizados.

La presencia de edificios y casas de diferentes alturas acentúan este efecto, ya que su presencia le da un aspecto rugoso a las ciudades y esto reduce la velocidad del viento y con ello la de la difusión del calor (Luyando, E. 2004).

En la ciudad de México este fenómeno se presenta principalmente en la temporada seca que va de noviembre a mayo, que es donde prevalecen los cielos sin nubes y calmados. En las latitudes medias estas condiciones se dan en verano.

Las islas de calor son más frecuentes y más intensas durante la noche y se han llegado a registrar islas de calor de hasta 9° C (Jáuregui, E., 1997), lo que reduce el confort térmico en la estación cálida-seca (Jáuregui 1986).

La isla de calor urbana conjuntamente con las ondas de calor pueden elevar la formación de smog ya que se incrementan las tasas de reacciones fotoquímicas (Cardelino y Charmeides, 1990; Sillman y Samson, 1995) y agravan el estrés por calor (*heat stress*). Si la frecuencia de las ondas de calor aumenta, también, el riesgo de muerte y la incidencia de enfermedades graves en grupos vulnerables como el de adultos mayores y pobres (Jáuregui, E., 2006).

“De acuerdo con los datos de la estación meteorológica de Tacubaya, en el Distrito Federal la temperatura media anual ha pasado de 14° C a 18° C en cien años, es decir se ha incrementado en casi 4° C” (SMA 2, 2008).

Por medio de experimentos numéricos se ha podido concluir que el cambio de clima de la Ciudad de México se debe esencialmente al proceso de urbanización (~3° C) y sólo una parte al cambio climático global (~1° C) (León, 2007).

La sociedad percibe el cambio de clima en la ciudad a través del prolongamiento de los periodos de lluvia o calor y de su intensidad (León, 2007).

Por otra parte, el consumo de energía en las ciudades es muy grande, principalmente en las épocas de mucho calor, debido a los sistemas de ventilación y de aire acondicionado, que a su vez aportan calor al medio volviéndose esto un círculo vicioso (Wypych, S., Bokwa A, 2004).

“Estudios llevados en la última década que correlacionan el consumo de energía con el efecto de isla de calor concluyen que para ciudades con más de 100 000 habitantes los consumos de energía en las horas pico incrementa de 1.5 a 2% por cada grado que se incrementan la temperatura” (Correa E., et al, 2003).

3.2. Emisiones de gases invernadero en la Ciudad de México

Las ciudades son una fuente importante de gases invernadero, ya que la mayoría de estos gases son producto de la quema de combustibles fósiles.

Se ha estimado que la Zona Metropolitana del Valle de México aporta el 9% de las emisiones nacionales de gases invernadero (GEI). En 2006 se emitieron 58.9 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente¹, de los cuales 36.2 millones de toneladas (61%) fueron emitidos por el Distrito Federal (SMA 2, 2008).

“De acuerdo con los inventario de emisiones de GEI del Distrito Federal el sector transporte es el principal emisor ya que contribuye con 43%, seguido del sector industrial con 22%, por el residencial con 13% y por los residuos sólidos con 11%” (SMA 2, 2008) (Figura 11).

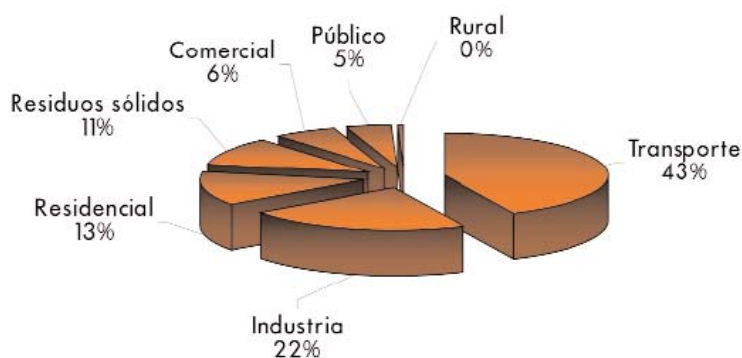


Figura 11. Emisiones de CO₂ equivalente por sectores en el Distrito Federal en el año 2000.

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA 2, 2008)

Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la ciudad de México se están aplicando acciones tales como la sustitución de combustibles por aquéllos con menor contenido de carbono; la promoción del uso de fuentes renovables de energía; medidas de eficiencia y conservación de energía fósil; la

¹ El dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) es la concentración de CO₂ que causarían el mismo nivel de forzamiento radiativo una concentración de gases invernadero dada.

reforestación; acciones que desalientan el cambio de uso de suelo hacia la agricultura y la ganadería, y las que impiden el crecimiento urbano (SMA, 2006).

3.3. Evaporación y Balance Energético

La urbanización implica una sustitución de la cubierta natural por otros materiales impermeables. “Un área natural que ha sido sustituida por materiales impermeables (pavimento) traerá como consecuencia una reducción de la evaporación, ya que el agua escurre rápidamente por los drenajes y, por lo tanto, la humedad en el ambiente es menor” (Luyando E., 2004).

Pero además de lo anterior, la ciudad al perder áreas verdes pierde también capacidad de aprovechar la energía solar en los procesos de fotosíntesis y evapotranspiración, los cuales contribuyen de diferentes maneras al enfriamiento del entorno en donde se llevan a cabo. Por un lado la fotosíntesis “intercambia” CO₂ (gas invernadero) por oxígeno, y por el otro la evapotranspiración trae humedad al ambiente y por lo tanto es un moderador muy efectivo en los climas superficiales y puede crear oasis de 2 a 8° C más fríos que en los alrededores (Taha, H. , 1997).

Para examinar con más detalle algunos de los fenómenos arriba descritos se presenta a continuación una ecuación de balance de energía en un medio urbanizado propuesta por Oke en 1988:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_S (W / m^2) \quad (5)$$

Donde:

Q^* Flujo de energía solar neta de todas las longitudes de onda incidente que llega a todas las superficies urbanas sin contar la reflejada (W/m²).

Q_F Flujo de calor antropogénico, es decir el generado por actividades humanas (vehículos, actividad industrial, consumo doméstico) (W/m^2).

Q_H Flujo de calor sensible que se gasta en calentar el aire urbano (W/m^2).

Q_E Calor latente de evaporación (W/m^2).

Q_S Flujo neto de energía almacenado en las superficies urbanas incluyendo la vegetación (W/m^2).

A continuación (Tabla 1) se muestra un resumen de las observaciones hechas por Tejeda y Jáuregui (2000) en la Ciudad de México:

(El término Q_F se incluye en el término Q_S por ser relativamente pequeño y difícil de evaluar).

Tabla 1. Observaciones de balance energético en un periodo diurno en la Ciudad de México.

β	8.5 Escuela de (1.50) Minería 1-7 Dic.	0.15 Texcoco (0.50) 24-31 Agosto	0.40 Reserva (1.00) Ecológica	3.89 Preparatoria (1.50) No.7 1-14
Q_H / Q^*	0.358 1993 (urbano)	0.13 1994 (rural)	0.27 UNAM, Jun 28- Jul 3, 1995	0.511 Diciembre 1998 (urbano)
Q_E / Q^*	0.042	0.81	0.70 (vegetado- urbano)	0.005
Q_S / Q^*	0.600	0.06		0.484
Q^*	267	392.6	169.8	161.9
Q_H	95.7	48.5	46.9	79.3
Q_E	11.1	320.3	118.8	20.8
Q_S	160.5	23.8	4.1	61.8

En la tabla anterior se puede apreciar que el porcentaje de energía requerido para la evaporación (Q_E / Q^*) es de 81% en Texcoco y de 70% en la Reserva ecológica de la UNAM, mientras que en la Escuela de Minería es de 4.2% y en la Preparatoria No. 7 es de 0.5%.

Por otro lado la energía disponible para calentar el suelo y el aire es mayor en las áreas no vegetadas.

La energía disponible para calentar el suelo (Q_S / Q^*) es de 22% en Texcoco y 3% en la Reserva ecológica de la UNAM, mientras que en la Escuela de Minería es de 60% y en la Preparatoria No. 7 es de 48.4%

La energía para calentar el aire (Q_H / Q^*) en Texcoco es de 13%, 27% en la Reserva ecológica de la UNAM. Mientras que en la Escuela de Minería es de 35.8%, y de 51.1% en la Preparatoria No. 7.

Por lo tanto en las áreas verdes la mayor parte de la energía se gasta en el proceso de evaporación y menos en calentar el suelo y el aire al contrario de las áreas no verdes.

Debido a que la Ciudad de México ha crecido mucho en los últimos 50 años, las áreas verdes salen frecuentemente de la planeación urbana, es más, muchas veces no hubo planeación urbana y las áreas verdes siguen desapareciendo o deteriorándose

(Figura 12).

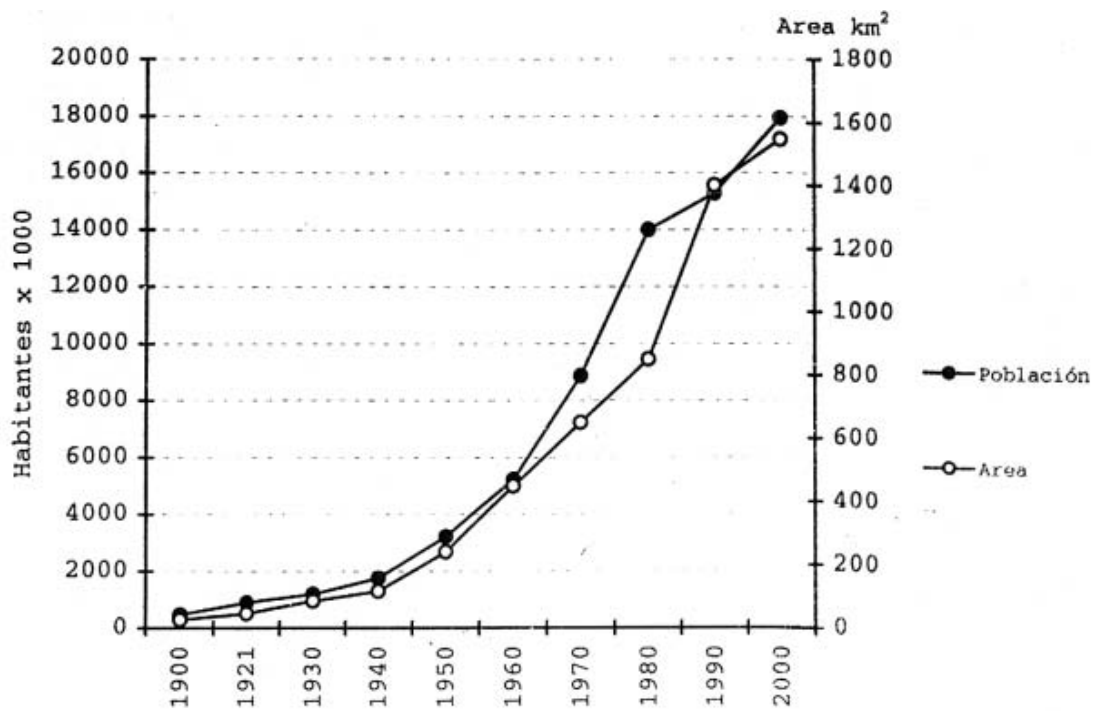


Figura 12. Crecimiento de la Población en la Ciudad de México y área de los asentamientos urbanos por décadas de 1900 a 2000.

Fuente: Jáuregui (2006)

La escasez de áreas verdes no es exclusiva de la Ciudad de México. El crecimiento acelerado, poco ordenado y planificado es típico en ciudades de países en vías de desarrollo debido a la migración de la población rural a la ciudad.

En 1997 el Distrito Federal contaba con 3.7 m² de área verde por habitante, cantidad muy por debajo de la norma de 16 m² recomendada por la ONU, o de los 9 m² recomendada por el Programa para el Medio Ambiente de la misma organización (Casasola 2006).

Hoy en día muchas áreas verdes que se consideran reservas ecológicas están amenazadas por la presión de la zona urbana.

Es por eso que se plantea como solución el aprovechamiento del espacio libre en las azoteas para aumentar las áreas verdes, tomando en cuenta principalmente la diferencia de albedo entre las azoteas normales y las tapizadas de vegetación (Figura 13).



Figura 13. Azoteas de la Ciudad de México.

Fuente: Wolfgang Ehl.

Por lo anterior, en este trabajo se considera que la propuesta de “techos verdes” es viable, dado su efecto prolongado y los beneficios colaterales enunciados.

4. Metodología

En este trabajo se utiliza el programa Landuse (Apéndice) que viene incluido en el CD de trabajo del libro “Introducción a los modelos climáticos” de A. Henderson - Sellers y K. McGuffie (1990). El modelo de este programa fue hecho por Carl Sagan Owen B. Toon y James B. Pollack en 1979 en base a la hipótesis de que cambiando la superficie de la tierra, la humanidad está alterando el albedo de la superficie, y por lo tanto modificando la cantidad de energía disponible para el sistema climático provocando también un cambio climático (Henderson – Sellers, A., McGuffie, K., 1990, ver Apéndice I).

4.1. Ecuación de cambio de albedo global

Para conocer el cambio de temperatura que traería consigo el cambio de albedo superficial se contó con un programa realizado en 1979 por Sagan et. al. Estos autores afirman que el cambio de albedo global, a través del cambio de uso de suelo, a lo largo de la historia del hombre y particularmente en los últimos 30 años, ha hecho aportaciones substanciales en el cambio de clima global. Proponen el uso de una sencilla ecuación que establece que el cambio de albedo planetario de cada cambio en los usos de suelo, i , viene dado por

$$\Delta R_i = A_i I_i [F_i \Delta r_i + (1 - F_i) \Delta r_s] \quad (6)$$

Donde

ΔR_i es el cambio global de albedo.

A_i el área acumulada alterada.

I_i el factor de insolación.

F_i la fracción de cubrimiento por nubes.

Δr_s el cambio de albedo en la superficie.

Δr_t el cambio de albedo en presencia de nubes, que se obtiene considerando las reflexiones múltiples entre las nubes y el suelo, despreciando aerosoles y gases:

$$r_t = \frac{r_c + (1 - r_c)^2 r_s}{(1 - r_s r_c)} \quad (7)$$

$\Delta r_c = 0.48$ albedo que fue adoptado para obtener el valor de albedo global observado de 0.3 con un valor promedio para la superficie de 0.1.

El esquema de la Figura 14 nos muestra un esquema simplificado de la diferencia entre los albedos de superficie, de las nubes y de superficie considerando múltiples reflexiones de la ecuación 7.

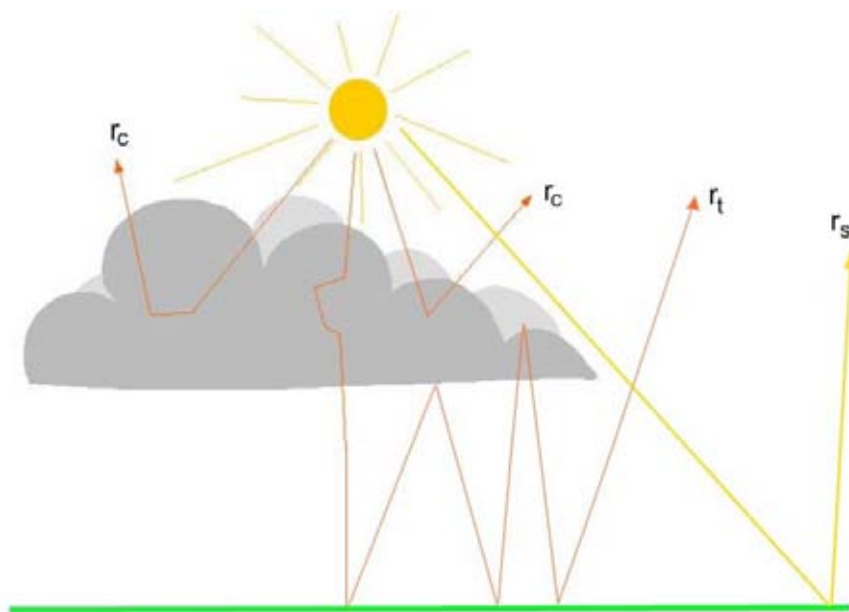


Figura 14. Esquema de los albedos de superficie (r_s), de las nubes r_c y de superficie considerando múltiples reflexiones (r_t).

Se consideran para el modelo siete motivos del cambio de uso de suelo (Tabla 2):

Tabla 2. Procesos de cambio de uso de suelo.

	Procesos de cambio de uso de suelo	Área alterada en relación a la superficie de la Tierra¹
1	Deforestación tropical	0.00647
2	Deforestación extratropical	Casi cero
3	Construcción de presas	0.0059
4	Salinización	0.000074
5	Irrigación de tierras áridas	0.00072
6	Urbanización	0.00059
7	Desertificación	0.00239

Estos valores son introducidos en A_i (área acumulada alterada) de la ecuación 1.

La fracción de nubes F_i se asume inicialmente para cada tipo de superficie con los siguientes valores (Tabla 3), pero se puede modificar de acuerdo a las necesidades. No se experimentará con esta variable, ya que no es el objetivo de este trabajo.

¹ La superficie de la Tierra es de 510.065.284,702 km². Calculado a partir de la fuente: Halliday, D., Resnick, R. 1991.

Tabla 3. Fracción de nubes para cada superficie

Numeración para cada tipo de superficie	Fracción de nubes
1	0.5
2	0.5
3	0.25
4	0.25
5	0.0
6	0.5
7	0.0

El albedo superficial r_s y el cambio de albedo superficial Δr_s propuesto para cada tipo de cambio en la superficie se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Cambio de uso de suelo y cambio de albedo superficial Δr_s

Numeración para cada tipo de superficie	Procesos de cambio de uso de suelo	Cambio de uso de suelo	Δr_s Cambio de albedo superficial
1	Deforestación tropical	Bosque \rightarrow Savana Pastizal	0.11 \rightarrow 0.20 0.20 - 0.11 = 0.9
2	Deforestación extratropical	Bosque \rightarrow Campo, pasto	0.13 \rightarrow 0.18 0.18 - 0.13 = 0.05
3	Construcción de presas	Campo \rightarrow Agua	0.18 \rightarrow 0.04 0.04 - 0.18 = -0.14
4	Salinización	Campo \rightarrow Salinas	0.18 \rightarrow 0.24 0.24 - 0.18 = 0.06
5	Irrigación de tierras áridas	Suelo desértico \rightarrow Campo	0.35 \rightarrow 0.18 0.18 - 0.35 = -0.17
6	Urbanización	Campo \rightarrow Ciudad Pasto	0.18 \rightarrow 0.13 0.13 - 0.18 = -0.05
7	Desertificación	Matorral \rightarrow Suelo desértico Arbustos	0.23 \rightarrow 0.35 0.35 - 0.23 = 0.12

El albedo inicial y los cambios en él se pueden insertar al correr el programa. Al hacerlo se tiene que tomar en cuenta el signo del cambio de albedo.

El área acumulada alterada A_i , está propuesta en función de la superficie global, por lo tanto las temperaturas que resultan son globales.

Finalmente, Sagan et al. (1979) suponen que existe una relación lineal entre el cambio en el albedo global y el cambio resultante en la temperatura. Se recurre entonces a otros dos estudios para arrojar dos diferentes temperaturas:

- 1) La primera será obtenida del texto de Manabe y Wetherald (1967), en donde se supone un decremento en la temperatura de 10 K debido a un incremento en el albedo de 0.1.
- 2) La segunda será obtenida del texto de Hansen et. al (1981), en donde se supone un decremento en la temperatura de 2.6 K debido a un incremento en el albedo de 0.1.

Las diferencias entre estas dos estimaciones se debe a que Manabe et al. (1966) están refiriéndose a la temperatura de la superficie: "... la sensibilidad de la temperatura en equilibrio de la superficie de la tierra al albedo superficial puede ser expresada aproximadamente por $\partial T_*^e / \partial(100 \alpha_*) = -1$, donde las unidades son cambios de grados centígrados por unidades de porcentaje de cambio de albedo superficial".

Mientras tanto Hansen et al. (1981) están refiriéndose al cambio de temperatura atmosférica: "Un cambio de albedo superficial global de 0.05 en tierra, afectaría la temperatura global en 1.3° C".

Si bien se trata de un modelo global muy simple, en este trabajo se considera que es posible utilizarlo a nivel regional ya que la relación de cambio de temperatura ambiental y cambio de albedo que proponen Hansen et al. (1981) para el caso global ha sido registrado en un estudio regional hecho por Taha et al. (1997).

Taha et al. (1997) hicieron experimentos midiendo el albedo y las temperaturas superficiales de una serie de superficies en zona rural. Los resultados obtenidos son de una simulación unidimensional meteorológica que prueba que las temperaturas del aire en días de verano pueden ser disminuidas tan sólo con cambiar el albedo superficial de 0.25 a 0.40. Con un simple cálculo de proporciones, esto significa que el cambio de temperatura sería de 2.6° C al

cambiar el albedo 0.1. El resultado es idéntico al propuesto por Hansen et al. (1981).

La aproximación de temperatura de Manabe et al. (1966) no se tomará en cuenta en este trabajo ya que la temperatura superficial que propone es integral. Esto quiere decir que toma en cuenta para el cálculo de temperatura no sólo a las superficies que cambiaron su uso de suelo sino también a las que no lo hicieron. Este tipo de resultado no se puede comparar con ninguna medición anterior de temperatura en la Ciudad de México, además de que no es el propósito de este trabajo.

El objetivo es el de saber la temperatura atmosférica debido a cambios en el albedo de la ciudad, entonces sólo se introdujeron cambios en la casilla 6 de la Tabla 4 referente a urbanización. Se comprobó que esta acción no alteraba ningún resultado.

4.2. Experimentos de calibración del programa Landuse

El cambio que nos interesa sería de 0.13 (albedo de ciudad) a 0.18 (albedo de campo - pasto). Esto nos da un cambio de albedo de 0.05. El resultado en temperatura según Hansen es negativo y se presenta a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Cambio de albedo de 0.05 y temperaturas

Cambio de albedo	Temperatura Hansen (K)
0.05	-0.001

Con el fin de ampliar el espectro de la relación Albedo – Temperatura (Tabla 6), se realizó una corrida de cambios de albedo con la misma cifra significativa (de centésimas de porcentaje). Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 6. Relación de cambio de albedo (del orden de centésimas de porcentaje) y cambio temperatura para una superficie relativa de 0.00059.

Cambio de albedo	Cambio de temperatura
0.01	0
0.02	0
0.03	0
0.04	-0.001
0.05	-0.001
0.06	-0.001
0.07	-0.001
0.08	-0.001
0.09	-0.001

Esto indica que probablemente se necesita un cambio mayor de albedo o de superficie de cambio de uso de suelo para poder ver mejor la relación lineal de cambio de albedo y temperatura. Sin embargo, sí podemos observar que para cambios de temperatura negativos se necesitan cambios de albedo positivos.

4.3. Cálculo de superficies de techos en la Ciudad de México

Para obtener un resultado para la Ciudad de México, se hizo una aproximación del área potencial para colocar techos verdes, es decir el área urbana menos las

avenidas, calles y parques, de la zona metropolitana. Para esto se utilizó el mapa mural Guía Roji 2006: Ciudad de México, área Metropolitana y alrededores cuya escala es de 1- 30 000.

El mapa cuenta con 3000 cuadrantes y cada uno tiene una superficie de 9 cm^2 , es decir, cada cuadrante representa una superficie real de $810\,000 \text{ m}^2$ ó 81 ha.

Así que el mapa completo representa a $243 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ ó 243 000 ha.

Para medir la superficie de las calles y avenidas de este mapa tomamos cuatro cuadrantes muestra:

1. Nezahualcoyotl 99, B2; donde las calles son de un diseño urbanístico simple, rectas, sin parques y carentes de avenidas grandes.
2. Iztapalapa 112, E3; donde casi no hay planeación urbana y casi no hay calles rectas y sin avenidas. Las manzanas son pequeñas.
3. Bosque de las Lomas 95, **B2**; donde principalmente las manzanas son más grandes que en el resto de las colonias, las calles son sinuosas y hay pocas avenidas grandes.
4. Colonia Militar Marte 95, B2; las calles son organizadas, hay pequeños parques, y hay avenidas grandes y principales.

Medimos la superficie de las calles de cada cuadro usando escalímetro. Las medidas son las siguientes:

1. Nezahualcoyotl : $351\,000 \text{ m}^2$ ó 35.1 ha aproximadamente.
2. Iztapalapa : $295\,200 \text{ m}^2$ ó 29.52 ha aproximadamente.
3. Bosque de las Lomas : $198\,450 \text{ m}^2$ ó 19.84 ha aproximadamente.
4. Militar Marte : $320\,400 \text{ m}^2$ ó 32.04 ha aproximadamente.

Se contaron los cuadrantes de cada prototipo para saber el área de cada uno, y también para saber la superficie de calles y avenidas en total (Tabla 7).

Tabla 7. Número de prototipo de cuadrantes. Superficie de cada uno de ellos. Superficie de calles y avenidas.

	Lugar prototipo	No. de cuadrantes	Superficie del prototipo (ha)	Porcentaje que representa cada prototipo en el total de superficie de la ciudad (243 000 ha)	Superficie que ocupan las calles y avenidas en las zonas prototipo	Porcentaje que representan las calles y avenidas en relación a la superficie del prototipo
1	Nezahualcoyotl	160	12960	5.3	160 x 35.1 ha = 5616 ha	43
2	Iztapalapa	232	18792	7.7	232 x 29.52 ha = 6848.64 ha	36.4
3	Bosque de las Lomas	22	1782	0.7	22 x 19.84 ha = 436.59 ha	24.5
4	Colonia Militar Marte	1630	132099.6 6	54.36	1630 x 32.04 ha = 52252.2 ha	39.5
					Total: 65 153.43 ha	

El total de superficie aproximada de calles y avenidas en el Área Metropolitana de la Ciudad de México es de **65153.43 ha**.

Por otro lado se contabilizaron las áreas que se consideran protegidas en el Distrito Federal que aparecían en el mapa Guía Roji: **14 594.44 ha**

Y el área que ocupa el Aeropuerto Int. Benito Juárez: **648 ha**

Casasola (2006) hizo un recuento de las áreas verdes del Distrito Federal no protegidas: parques, bosques, entre otros. La superficie total de estas áreas es de **3,489.8 ha**

Por lo tanto la cuenta para obtener la superficie potencial para las azoteas verdes sería la siguiente:

Tabla 8.

S_1	243 000 ha	Superficie total de la Ciudad de México
S_2	65 153.43 ha	Superficie aproximada de calles y avenidas
$S_1 - S_2 = S_3$	177 846.57 ha	
S_4	14 594.44 ha	Áreas protegidas
$S_3 - S_4 = S_5$	163 252.13 ha	
S_6	648 ha	Área del aeropuerto
$S_5 - S_6 = S_7$	162 604.13 ha	
S_8	3 489.8 ha	Áreas verdes
$S_7 - S_8 = S_9$	159 114.33 ha	Superficie aproximada de techos en la Ciudad de México

Esta superficie es el 65% de 243 000 ha aproximadamente. Este dato debe de ser introducido en el programa antes de ejecutarlo.

5. Resultados y Análisis

Una vez que se tiene definida el área de cambio de uso de suelo y estudiado el modelo podemos calcular el cambio de temperatura en la Ciudad de México.

5.1. Cálculo de cambio de temperatura modificando el albedo

En la sección 2.3 se obtuvo una superficie de techos en la ciudad de 159 14.33 ha, lo que representa el 65% de un total de 243 000 ha¹. Este dato debe de ser introducido en el programa antes de ser ejecutado (en su forma decimal: 0.65) y después guardarlo como un archivo nuevo, para poder hacer diferentes corridas con la misma área.

Una vez hecho lo anterior, se ejecuta el programa y se introduce el cambio de albedo en la casilla adecuada. Posteriormente, se obtiene la temperatura ambiental (Hansen et al., 1981) y se vuelve a ejecutar.

De esta forma se prosiguió con una serie de albedos del orden de centésimas (o unidades de porcentaje) y los cambios de temperatura atmosférica resultantes se muestran en la Tabla 8:

¹ Superficie total del Mapa mural de la Ciudad de México. Guía Roji 2006.

Tabla 8. Relación de cambio de albedo (del orden de centésimas de porcentaje) y cambio temperatura para una superficie de 0.65.

Cambio de albedo	Cambio de temperatura
0.01	-0.169
0.02	-0.338
0.03	-0.507
0.04	-0.676
0.05	-0.845
0.06	-1.014
0.07	-1.183
0.08	-1.352
0.09	-1.521

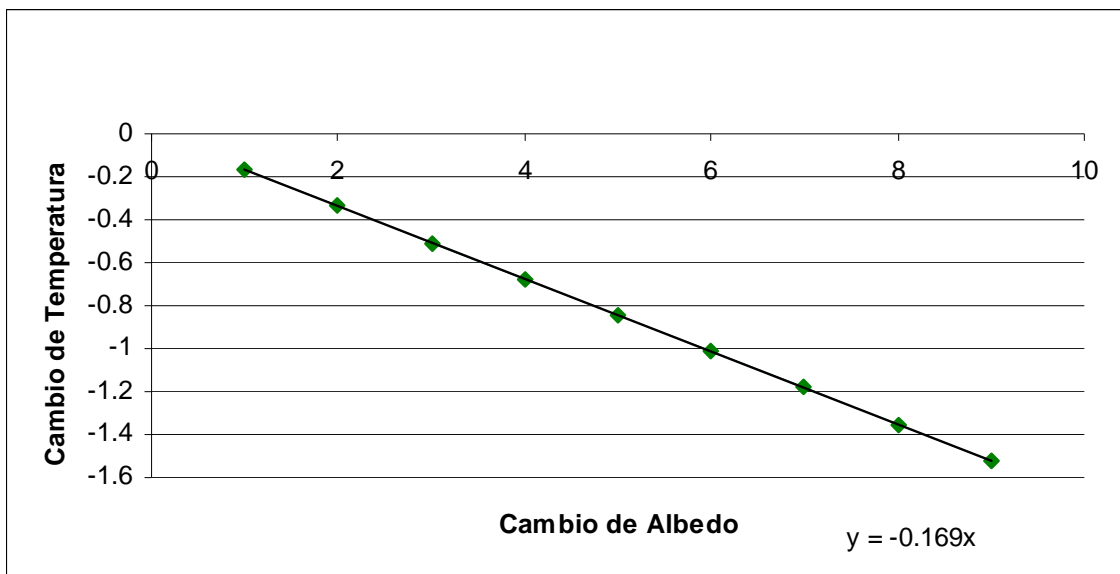
En la Tabla 8 se señala el cambio de albedo de 0.05 porque, como se vio en la sección 2.1, este es el cambio de uso de suelo correspondiente a campo – ciudad. Si se cambiara la superficie de todos los techos de la ciudad (65% del total de superficie de la Ciudad de México) por techos verdes² con un cambio de albedo de 0.05 entonces la temperatura atmosférica o del aire disminuiría en 0.845° C.

Aparentemente este cambio en temperatura es pequeño, pero se debe considerar que se encuentra en el orden de magnitud de los cambios registrados en la ciudad y que este modelo no considera los efectos de la evapotranspiración así como situaciones climático – geográficas.

² Para simplificar el análisis se está hablando de pasto. Sin embargo existe la posibilidad de poner otro tipo de vegetación dependiendo del tipo de techo y del presupuesto como se menciona en la sección 1.2.

La tendencia de cambio de temperatura con respecto al cambio de albedo según el modelo empleado es lineal y con pendiente negativa como se muestra en la Gráfica 1 a continuación:

Gráfica 1. Cambio de albedo (del orden de centésimas de porcentaje) y cambio de temperatura con área de 0.65.



5.2. Cálculo de cambio de temperatura modificando el área

Al comparar la Tabla 6 y 8, queda claro que dejando el cambio de albedo fijo (0.05) pero aumentando el área modificada, la disminución de la temperatura también es mayor (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación de cambios de temperatura atmosférica para áreas de 0.00059 y 0.65 con un albedo fijo de 0.05

Área modificada (relativa)	Cambio de albedo	Cambio de temperatura
0.00059	0.05	-0.001
0.65	0.05	-0.845

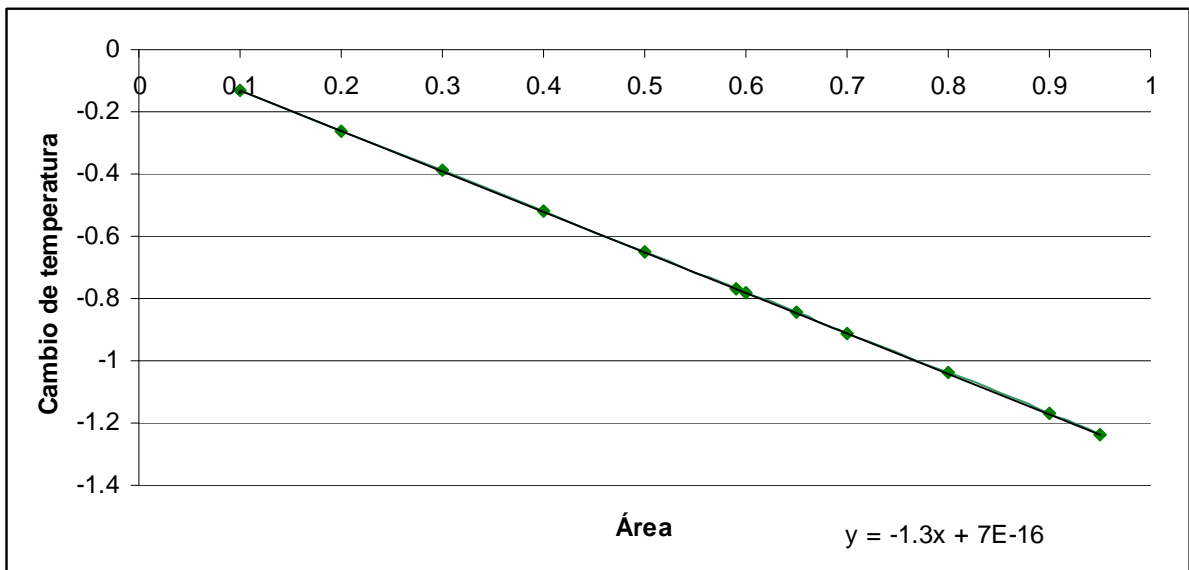
Para poder observar de forma más detallada lo anterior, se hicieron cambios más pequeños de área afectada dejando al albedo fijo en 0.005 (Tabla 10). Después se graficaron los resultados donde se observa también una pendiente negativa, y una relación lineal entre la temperatura y el área modificada (Gráfica 2).

Tabla 10. Cambio de temperatura en función del área de cambio de uso de suelo. El albedo considerado es de 0.05 para todos los casos

Área modificada relativa al área de la Ciudad de México ³	Área modificada (hectárea)	Temperatura
0.1	24 300	-0.13
0.2	48 600	-0.26
0.3	72 900	-0.39
0.4	97 200	-0.52
0.5	121 500	-0.65
0.6	145 800	-0.78
0.65	(aprox.) 159 114.33	-0.845
0.7	170 100	-0.91
0.8	194 400	-1.04
0.9	218 700	-1.17

³ 243 000 ha que es la superficie total del Mapa mural de la Ciudad de México. Guía Roji 2006.

Gráfica 2. Cambio de temperatura en función del área modificada



Disminuir el 90% de superficies urbanas significaría tener 24 300 ha ó 243 km² de éstas. En la Figura 12 se puede ver que ésta área corresponde aproximadamente al tamaño de la ciudad en 1950. En este año la temperatura media anual (SMN) fue de 15 ° C. Para el 2007 la temperatura media anual fue de 16.7° C. Es decir en 57 años dicha temperatura subió 1.7 ° C.

Se ha podido concluir que en 100 años la temperatura de la ciudad ha aumentado 4° C, de los cuáles cerca de 3° C han sido debido a la urbanización y el resto al cambio climático global (León, 2007). Así que el cálculo que hace el modelo se encuentra dentro de un rango aceptable de unidades significativas.

6. Discusión y Conclusiones

La modelación del clima urbano es muy compleja, ya que en estas zonas se generan cambios microclimáticos producto del cambio en el uso de suelo por superficies de concreto, pavimento y superficies reflejantes; por la diferencia en alturas de las construcciones y otros factores.

Sin embargo, en este trabajo se utiliza un modelo muy simple global, que al regionalizarlo plantea la posibilidad de reducir el aumento en temperatura urbana mediante la introducción de techos verdes. Estos techos pueden alterar el albedo tal que disminuya dicha temperatura.

Los resultados obtenidos muestran que si se cambiara la superficie de todos los techos de la ciudad (65% del total de superficie de la Ciudad de México) por techos verdes con un cambio de albedo de 0.05 entonces la temperatura atmosférica o del aire disminuiría en 0.845°C .

Si el cambio de albedo fuera mayor a 0.05, el cambio negativo de temperatura sería mayor a 0.845°C .

Aparentemente este cambio en temperatura es pequeño, pero se debe considerar que se encuentra en el orden de magnitud de los cambios registrados en la ciudad y que este modelo no considera los efectos de la evapotranspiración así como situaciones climático – geográficas.

Por otra parte, dejando el cambio de albedo fijo pero aumentando el área afectada, la disminución de la temperatura también sería mayor. Por ejemplo, al modelar con un área modificada de 90%, se disminuirían 1.17°C en el aire, lo cual está dentro de un rango aceptable, desde el punto de vista de orden de magnitud, al calculado por León en 2007 de $\sim 3^{\circ}\text{C}$ menos hace 100 años.

Claro que modificar un área de 90% en la ciudad es prácticamente imposible, pero si se podría recurrir entonces a utilizar plantas que tengan gran albedo y naturar un área menor.

Los aspectos positivos del empleo del modelo (Sagan et al. 1979) y por consiguiente del programa Landuse (Henderson – Sellers, A., McGuffie, K., 1990) son:

- Brinda una tendencia al impacto del clima urbano producido por un cambio de albedo, de manera sencilla y rápida.
- Las aproximaciones resultantes no son muy lejanas a los valores calculados de cambio de temperatura en la Ciudad de México.

Si se utilizaran además plantas suculentas (según el biólogo Jerónimo Reyes) se propiciaría el secuestro de CO² atmosférico, lo que abriría la oportunidad de obtener apoyos internacionales orientados a este objetivo. Si bien este no es un objetivo de la presente tesis, si es posible considerarlo para investigaciones futuras.

Las limitantes del empleo del modelo son:

- Al regionalizarse no puede tomar en cuenta situaciones climático – geográficas fundamentales.
- La relación entre albedo y temperatura es lineal, cuestión que tendría que estudiarse con más detalle, tomando en cuenta situaciones climático – geográficas nuevamente.
- Que no se considera el efecto de la evapotranspiración de las plantas.
- El cálculo del cambio de temperatura debido al cambio de albedo producido por plantas no incluye la disminución de temperatura por disminución de CO₂.

Se podría mejorar los resultados aquí obtenidos si:

- Se toman en cuenta situaciones climático – geográficas.
- Se considera a la evapotranspiración en el modelo.
- Se puede modelar la disminución de CO₂ y por lo tanto su aportación en la disminución de temperatura.

En conclusión, con la implantación de techos verdes en la Ciudad de México es posible bajar la temperatura atmosférica y con eso:

- Disminuir la isla de calor.
- Disminuir el impacto de las ondas de calor.
- Ahorro de energía en sistemas de acondicionamiento.

Además de los efectos colaterales de

- Disminución de gases de efecto invernadero.
- Aumento de áreas de esparcimiento.
- Disminución de ruido en los inmuebles que los tengan,
- así como disminución de la temperatura dentro de ellos.
- Disminución del recargo en el drenaje y por lo tanto de las inundaciones.

Bibliografía

Abrams, I., 2008: "Jardines elevados en Chicago". *¿Cómo ves?*, Publicaciones UNAM, 10 (115): 22-25.

Cardelino C., Charmeides W., 1990: "Natural hydrocarbons, urbanization and urban ozone". *Journal of Geophysical Research*, 95 (13): 971- 979. / Ref. en Voogt, J., 2004.

Casasola, M., 2006: "Influencia del Bosque de Chapultepec en el clima urbano de la Ciudad de México". Tesis de licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Conde, C., 2006: "México y el Cambio Climático", Dirección General de la Divulgación de la Ciencia, UNAM, Reimpresión por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Mayo 2007. Revisado el 14.06.2008 en:

http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/mexico_cambio_climatico/Mexico_y_el_cambio_climatico_global.pdf

Correa, E., Flores S., Lesino G., 2003: "Isla de Calor Urbana: Efecto de los pavimentos. Informe de Avance". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7 (2). Revisado el 12.06.2008 en

<ftp://ftp.cricyt.edu.ar/pub/lahv/asades/2003/art117.pdf>

Gaffin, S., Rosenzweig C., Parshall L., Beattie D., Berghage R., O'Keeffe G., Braman D., 2005: "Energy balance modeling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency", Center for Climate Systems Research, Universidad de Columbia y la NASA Goddard Institute for Space Studies. Revisado el 15.10.2007 en:

http://ccsr.columbia.edu/cig/greenroofs/Green_Roof_Energy.pdf

Gershenson, A., 29 de Julio de 2007: "Consulta Verde". Periódico La Jornada. Revisado el 22.08.2008 en

<http://www.jornada.unam.mx/2007/07/29/index.php?section=politica&article=022a2pol>

Halliday, R., Resnick, R., 1991: "Física, parte 2", 11^o edición, Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., México.

Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., Russel, G., 1981: "Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide", *Science*, Agosto, 213 (4511): 957-966.

Henderson-Sellers, A., McGuffie, K., 1990: "Introducción a los modelos climáticos", ediciones Omega S.A., Barcelona.

IPCC-WGI 2007 (Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I). Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: "The Physical Science Basis. Summary for Policymakers", pág. 23.

Jáuregui, E., 1986: "Desarrollo de la isla urbana de calor en grandes ciudades de México", *Revista de Geografía*, INEGI, 45-50, A,R. / Ref. en Tejeda A. y J. Cervantes, 2001.

Jáuregui, E., 1997: "Heat island development in Mexico City", *Atmospheric Environment*, 31(22): 3821- 3831.

Jáuregui, E., 2000: "El clima de la Ciudad de México". *Temas selectos de Geografía*. Instituto de Geografía, UNAM, Plaza y Valdés editores. / Ref. en Casasola 2006.

Jáuregui, E., 2006: "Are heat waves increasing their frequency in Mexico City?" Suecia, Sixth International Conference on Urban Climate.

León, C., (2007): "Análisis de vulnerabilidad y desarrollo de medidas de adaptación para el Plan de Cambio Climático de la Ciudad de México". Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. / Ref. en SMA 2, 2008.

Luyando, E., 2004: "Influencia del uso de suelo en las mediciones de balance energético atmosférico en Barcelona, España, y Ciudad de México". Tesis de maestría en geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Manabe, S., y Wetherald, R. T., 1966: "Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24 (3): 241-259.

Mapa mural Guía Roji 2006: Ciudad de México, área Metropolitana y alrededores.

Müller, T., 2007: Presentación: "Barrancas en la Ciudad de México y Naturación de azoteas". Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA). Revisado el 25.08.2008 en http://www.sma.df.gob.mx/cclimatico/descargas/plan_accion_climatico/25_tania_muller_barrancas.pdf

Oke, T.R., 1988: "The urban energy balance". *Physics Geography*, 12 (4): 471-508. / Ref. por Casasola, M., 2006.

Ramanathan, V., 1976: "Radiative Transfer Within the Earth's Troposphere and Stratosphere: A Simplified Radiative-Convective Model". *Journal Atmospheric Sciences*, 33 (7):1330-1346.

Sagan, C., Toon, B.O., Pollack, J. B., 1979: "Anthropogenic albedo changes and the Earth´s climate", *Science*, 206 (4425): 1363 – 1368.

Salby, M., 1996: "Fundamentals of Atmospheric Physics", Academic Press, Nueva York, EUA.

Shashua-Bar L., M.E., Hoffman, 2000: "Vegetation as climatic component in the design of an urban street . An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees". *Environmental and Buildings*, 31, 267-235.

Sillman, S., Samson, P.J., 1995: "The impact of temperature on oxidant formation in urban, polluted rural and remote environments", *Journal of Geophysical Research* 100: 11497-11508.

Simpson J.R, McPherson E.G., 1997: "The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona", *Energy and Buildings* 25: 127 – 137.

Solecki, W., Rosenzweig C, Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., Wiencke, M., 2005: "Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey", *Environmental Hazards* 6: 39- 49.

SMA 1 (Secretaría del Medio Ambiente, Distrito Federal) Blog, 2008: "Azoteas Verdes", pág. 32, Revisado el 26.08.2008 en <http://www.sma.df.gob.mx/intranet/privados/smablog/index.php?entry=entry080415-142337>

SMA 2 (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal), 2008 : “Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008 – 2012” , pp. 31- 35. Revisado el 12. 08.2008 en

http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/pacc_documento.pdf

SMA (Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal), 2006: “Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México 2006”, pág. 32 Revisado el 12.08.2008 en

<http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=399>

SMN (Sistema Metereológico Nacional).

Taha, H., 1997: “Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat”, *Energy and Buildings* 25: 99-103.

Tejeda, A., Cervantes, J., 2001: “Una (re)visión bibliográfica de la climatología del valle de México; 1941-1997”. Serie Varia, Nueva Época, Número 2, Instituto de Geografía, UNAM, México.

UNFPA (Fondo de Población de las Naciones Unidas) 2007: “Estado de la población mundial 2007. Liberar el potencial del crecimiento urbano”. Revisado el 07.08.2008 en <http://www.unfpa.org/swp/2007/spanish/introduction.html>

Voogt, James A., 2004: “Urban Heat Islands: Hotter Cities”. Revisado el 17.11.2007. en

<http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>

Wypych, S., Bokwa A., 2004: “El clima en las ciudades: ¿Qué lo controla?”, Universidad Jagiellonian, Cracovia/Polonia. Revisado el 05.03.2008 en http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2_Clima_Urbano/-_Qu_lo_controla_3x3.html

Apéndice de figuras

Figura 1. Environmental Knowledge for Change, GRID Arendal: Gráficas y Mapas.

Revisado 02.07.2007 en

<http://maps.grida.no/theme>

Figura 2. Foto tomada por Alejandra Torales. Revisado el 28.08.2008 en

<http://www.flickr.com/photos/paleloka/2807362936/>

Figura 3. Gráfica dibujada por Hanno Sandvik

<http://www.bio.ntnu.no/users/hannos/engelsk.htm>). Revisado el 09.08.2008 en

<http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:CO2-Temp.png>

Figuras 4 y 5. RIVM, SAGE., 2000: "Historical Land Use Changes over the past 300 years: New Global Data Sets". CD-ROM de National Institute for Public Health and Environment (RIVM) y Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE).

Figura 6. Reyes, J.: Presentación: "Establecimiento de azoteas verdes y naturación". Obtenida directamente con él.

Figura 7. Abrams, I., 2008: "Jardines elevados en Chicago". *¿Cómo ves?*, Año 10, No. 115, Publicaciones UNAM, pág. 23.

Figura 8 y 9. Reyes, J.: Presentación: "Establecimiento de azoteas verdes y naturación". Obtenida directamente con él.

Figura 10. Foto tomada por Luis Reyes. Revisado el 23.08.08 en

<http://www.flickr.com/photos/gazapoferal/2791564916/>

Figura 11. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA) : Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008 – 2012, pp. 31. Revisado el 12. 08.2008 en http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/pacc_documento.pdf

Figura 12. Jáuregui, E., año desconocido: Carta 4 Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM. /Ref. en Casasola, M., 2006.

Figura 13. Foto tomada por Wolfgang Ehl. Revisado el 27.08.07 en <http://www.flickr.com/photos/loborroso/373497810/>

Figura 14. Realizada por la autora de la tesis.

Apéndice I

10 REM MANS IMPACT ON CLIMATE

20 E\$ = CHR\$(27)

26 DATA 0.11,0.13,0.18,0.18,0.35,0.18,0.23: FOR I = 1 TO 7: READ ORS(I): NEXT I

27 DATA 0.5,0.5,0.25,0.25,0.0,0.5,0.0: FOR I = 1 TO 7: READ FI(I): NEXT I

30 CLS

35 COLOR 3, 0

40 PRINT " >>>> A CLIMATE MODELLING PACKAGE <<<<< "

50 COLOR 5, 0

60 PRINT

***"

70 COLOR 2, 0

80 PRINT " Man's Impact on Climate : an introductory experiment"

90 COLOR 5, 0

100 PRINT

***"

110 COLOR 2, 0

120 E\$ = CHR\$(27)

130 PRINT

140 PRINT " This program helps you calculate the globally averaged"

150 PRINT " temperature change caused by anthropogenerated surface "

160 PRINT " albedo change."

170 PRINT

180 PRINT " It draws directly on two papers"

190 PRINT " 1. C. Sagan, O.B. Toon and J.B. Pollack"

200 PRINT " Anthropogenic albedo changes and the "

210 PRINT " Earth's Climate."

220 PRINT " SCIENCE v206 p1363-1368."

230 PRINT " and"

240 PRINT " 2. J.E. Hansen and others"

250 PRINT " Climate impact of increasing carbon"

260 PRINT " dioxide."

270 PRINT " SCIENCE v213 p957-966."

280 PRINT : PRINT : PRINT

290 GOSUB 2250

300 CLS

310 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT : PRINT

320 COLOR 2, 0

321 TYPE\$(1) = "Tropical deforestation": TYPE\$(2) = "Temperate deforestation": TYPE\$(3) =

"Dam construction": TYPE\$(4) = "Salinization": TYPE\$(5) = "Irrigation of Arid land":

TYPE\$(6) = "Urbanization": TYPE\$(7) = "Desertification"

325 COLOR 5, 0

```

326 PRINT
*****
*"
327 COLOR 2, 0
330 PRINT "   There are seven types of Land surface change"
340 PRINT "   which will be considered in this program"
350 PRINT "           "
360 PRINT "       1. Tropical deforestation  "
370 PRINT "       2. Extratropical deforestation"
380 PRINT "       3. Dam construction"
390 PRINT "       4. Salinization  "
400 PRINT "       5. Irrigation of arid land"
410 PRINT "       6. Urbanization  "
420 PRINT "       7. Desertification  "
430 GOSUB 2250
440 CLS : COLOR 2, 0
450 PRINT "   These processes are believed to have affected"
460 PRINT "   the following fractions of the Earth's surface"
470 PRINT "   over a period of thirty years between 1950 and 1980"
480 PRINT
490 PRINT "   The following values are for Ai in the equation"
500 PRINT
510 COLOR 4, 0
520 PRINT "    $DR_i = A_i \times I_i \times \{(D_{ri} \times F_i) + (1 - F_i) \times D_{rs}\}$ "
530 PRINT " "
540 COLOR 2, 0
550 PRINT "   Tropical deforestation    0.00647  "
560 PRINT "   Temperate deforestation   Almost zero "
570 PRINT "   Dam construction         0.00059  "
580 PRINT "   Salinization             0.000074 "
590 PRINT "   Irrigation                0.00072  "
600 PRINT "   Urbanization             0.00059  "
610 PRINT "   Desertification          0.00239  "
620 PRINT " "
630 PRINT " The above values are the average of the values in the two"
640 PRINT " cases in Henderson-Sellers & Gornitz (1983)"
650 GOSUB 2250
660 COLOR 2, 0
670 CLS
680 PRINT "   The following cloud fractions are  "
690 PRINT "   assumed initially for each land surface type  "
700 PRINT "   They form the values for Fi in the equation given above"
705 PRINT
710 COLOR 4, 0
715 PRINT "   -----"
720 PRINT "   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |"
730 COLOR 2, 0

```

```

740 PRINT " | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.25| 0.0 | 0.5 | 0.0 |"
745 PRINT " -----"
746 PRINT
750 PRINT
760 PRINT " --- You can change these later if you wish."
780 PRINT " --- You are now to input the albedo changes you "
790 PRINT " think each of these processes could have caused"
800 PRINT
810 PRINT " --- For example a change from tropical forest to"
820 PRINT " grass and scrub might involve a change from"
830 PRINT " 0.11 to 0.18 so you input a change of 0.07 "
840 PRINT
850 PRINT " --- If you decide on a negative change you "
860 PRINT " must remember the negative sign "
870 PRINT " (Dam building might result in a negative change)"
880 GOSUB 2250
890 E$ = CHR$(27)
900 CLS
905 COLOR 2, 0
910 PRINT : PRINT
915 COLOR 5, 0
916 PRINT
*****
*"
917 COLOR 2, 0
920 CLS : PRINT " The initial values are given below "
925 PRINT " Enter a new value or type <Return> to keep them the same"
930 PRINT " "
940 PRINT USING " ### , ### , ### , ### , ### , ### , ### . "; ORS(1); ORS(2);
ORS(3); ORS(4); ORS(5); ORS(6); ORS(7)
980 FOR I = 1 TO 7
990 COLOR 2, 0: LOCATE 10 + I, 5: PRINT "Value for "; TYPE$(I); " is "; : LOCATE 10 + I,
43: PRINT USING ".##"; ORS(I); : COLOR 7, 0: LOCATE 10 + I, 55: INPUT ">>>", DELA
992 IF DELA = 0 GOTO 1000
993 IF DELS <> 0 THEN ORS(I) = DELA
1000 NEXT I
1010 E$ = CHR$(27)
1020 CLS
1025 COLOR 2, 0
1030 PRINT " Type in the albedo changes for the seven land surfaces"
1040 PRINT " Pressing <Return> leaves them at zero "
1050 PRINT " "
1060 PRINT ""
1070 FOR I = 1 TO 7
1075 COLOR 2, 0
1080 LOCATE 10 + I, 5: PRINT "Change for "; TYPE$(I); : COLOR 7, 0: LOCATE 10 + I,
47: INPUT ">>>", DRS(I)

```

```

1100 NEXT I
1110 PRINT ""
1120 PRINT ""
1130 FOR I = 1 TO 7
1140 LET DRT(I) = .48 + ((1 - .48) ^ 2 * ORS(I) / (1 - .48 * ORS(I)))
1150 NEXT I
1160 PRINT ""
1170 E$ = CHR$(27)
1180 CLS
1190 FOR I = 1 TO 7
1200 LET NRS(I) = DRS(I) + ORS(I)
1210 NEXT I
1220 PRINT ""
1230 PRINT ""
1240 FOR I = 1 TO 7
1250 LET NRT(I) = .48 + (((1! - .48) ^ 2 * NRS(I)) / (1 - .48 * NRS(I)))
1260 NEXT I
1270 E$ = CHR$(27)
1280 CLS
1290 FOR I = 1 TO 7
1300 LET ORT(I) = .48 + ((1! - .48) ^ 2 * ORS(I) / (1! - .48 * ORS(I)))
1310 NEXT I
1320 FOR I = 1 TO 7
1330 LET DRT(I) = NRT(I) - ORT(I)
1340 NEXT I
1380 CLS
1390 PRINT ""
1400 PRINT ""
1410 RESTORE 1450
1420 FOR I = 1 TO 7
1430 READ AI(I)
1440 NEXT I
1450 DATA 0.00647 ,.000001 ,0.00059 ,0.000074 ,0.00072 ,0.00059 ,0.00239
1455 COLOR 5, 0
1456 PRINT
"*****
*"
1457 COLOR 2, 0
1460 PRINT "  Input your cloud cover fraction for each land surface type"
1465 PRINT "  The default for each type is 0.5"
1470 PRINT ""
1480 FOR I = 1 TO 7
1485 COLOR 2, 0
1490 LOCATE 10 + I, 2: PRINT "Cloud cover fraction for areas of "; TYPE$(I); : LOCATE 10
+ I, 60: COLOR 7, 0: PRINT USING "|Current=#.##"; FI(I); : INPUT ">>>", temp
1505 IF temp > 1 OR temp < 0 THEN GOTO 1490
1506 IF temp = 0 GOTO 1510

```



```

1507 FI(I) = temp
1510 NEXT I
1530 CLS
1560 FOR I = 1 TO 7
1570 LET DRI(I) = AI(I) * (FI(I) * DRT(I) + (1 - FI(I)) * DRS(I))
1580 NEXT I
1610 E$ = CHR$(27)
1620 CLS
1630 FOR I = 1 TO 7
1640 LET DELTAR = DELTAR + DRI(I)
1650 NEXT I
1700 FOR I = 1 TO 7
1710 LET DAIB(I) = AI(I) * DRS(I)
1720 NEXT I
1750 CLS
1760 FOR I = 1 TO 7
1770 LET DELAIB = DELAIB + DAIB(I)
1780 NEXT I
1800 CLS
1805 COLOR 2, 0
1810 PRINT "      Results from climate models must be used "
1820 PRINT ""
1830 PRINT "      Using first the results from      "
1840 PRINT ""
1850 PRINT "      1) Manabe and Wetherald (1967) "
1860 PRINT "      and "
1870 PRINT "      2) Hansen et al. (1981)"
1880 PRINT " "
1890 PRINT "      Which state that"
1900 PRINT "      1) A planetary albedo increase of 0.1 "
1910 PRINT "      causes a temperature decrease of 10 deg C"
1915 PRINT
1920 PRINT "      and "
1925 PRINT
1930 PRINT "      2) A surface albedo increase of 0.1 "
1940 PRINT "      causes a temperature decrease of 2.6 deg C"
1950 GOSUB 2250
1960 E$ = CHR$(27)
1970 CLS
1980 TMW = (-100) * DELTAR
1990 THAN = (-26) * DELAIB
1999 COLOR 3, 0
2000 PRINT "      The surface temperature change induced      "
2010 PRINT "      by 30 years of anthropogenic modification "
2020 PRINT "      of land surfaces is either      "
2030 PRINT ""
2035 COLOR 5, 0

```

```

2036 PRINT " ----- "
2039 COLOR 3, 0
2040 PRINT USING "    ##.### according to Manabe & Wetherald"; TMW
2045 COLOR 5, 0
2050 PRINT " ----- "
2055 COLOR 3, 0
2060 PRINT USING "    ##.### according to Hansen et al."; THAN
2065 COLOR 5, 0
2070 PRINT " ----- "
2079 COLOR 3, 0
2080 PRINT "          If these are different , can you explain why "
2090 GOSUB 2250
2100 E$ = CHR$(27)
2110 CLS
2115 COLOR 2, 0
2120 PRINT "      Would you like to alter any of your inputs?"
2130 PRINT ""
2135 COLOR 6, 0
2160 PRINT "          1) Try again with different inputs "
2170 PRINT "          2) Go back to the program menu"
2171 PRINT "          3) Reset the defaults and try again"
2172 PRINT "          4) Get a printout of these results"
2175 COLOR 7, 0: PRINT : PRINT : PRINT "          Your choice >>> "
2176 ICH$ = INKEY$
2177 IF ICH$ = "2" THEN CHAIN "menu"
2178 IF ICH$ = "1" THEN GOTO 920
2179 IF ICH$ = "3" THEN CHAIN "landuse1"
2180 IF ICH$ = "4" THEN CLS : GOSUB 3000: GOTO 2110
2185 GOTO 2176
2190 STOP
2200 IF C > 0 GOTO 920
2210 IF C < 0 GOTO 1480
2220 IF C = 0 GOTO 2240
2230 END
2240 END
2250 COLOR 7, 0: LOCATE 23, 7: PRINT " --- Press space bar to continue";
2251 LOCATE 24, 7: PRINT "    - Press <Escape> to abort ";
2255 K$ = INKEY$
2260 IF K$ = " " THEN RETURN
2261 IF K$ = CHR$(27) THEN CHAIN "menu"
2262 GOTO 2255
2270 RETURN
3000 COLOR 2, 0: PRINT : PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "          P R I N T I N G . . . . ."
3005 LPRINT "-----"
3006 LPRINT " Man's impact on climate          A Climate Modelling Package"
3007 LPRINT "-----"
3010 LPRINT " Land type          Albedo Cloud Fraction Albedo Change"

```

```

3020 FOR I = 1 TO 7
3030 LPRINT USING "\          \ ###      ###      ###"; TYPE$(I); ORS(I);
FI(I); DRS(I)
3040 NEXT I
3050 LPRINT USING " The temperature change using Manabe and Wetherald results is ###.###
Kelvin"; TMW
3060 LPRINT USING " The temperature change using Hansen et al's results is ###.### Kelvin";
THAN
3070 LPRINT "-----"
3080 LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT
3090 RETURN

```