



Fundación Príncipe Claus para la  
Cultura y el Desarrollo

INSTITUTO DE ARQUITECTURA TROPICAL

FUNDACION PRINCIPE CLAUS PARA LA CULTURA Y EL DESARROLLO

**SIMULATION OF URBAN MICROCLIMATES  
IN TROPICAL METROPOLIS'  
MARACANÁ/ RIO DE JANEIRO - A CASE STUDY**

**SIMULACION DE MICROCLIMAS URBANOS EN LA  
METROPOLI TROPICAL MARACANÁ/RIO DE JANEIRO-  
CASO DE ESTUDIO**

Jörg Spangenberg

Institut für Tropentechnologie ITT,  
University of Applied Sciences Cologne/  
ALEMANIA - GERMANY



## Abstract

In tropical latitudes, the impact of the urban climate is associated with harsher negative impacts on thermal comfort and the energy consumption of buildings than in the cities of the temperate climate zones. This is due to higher solar radiation income. The formation of the so-called "urban heat island" in tropical metropolis is also created mainly by the lack of vegetation and by the high solar radiation absorptance of urban surfaces. The addition of city noise, and as a result keeping windows shut and the increasing use of air-conditionings degrade the quality of the public open space additionally by anthropogenic waste heat. This case study examines an urban neighbourhood situated in hot and humid tropical climate in Rio de Janeiro/ Brazil. Its microclimate is being modeled with the numerical simulation tool ENVImet. Possibilities of adaptation of the model to local properties and climate are being studied.

Keywords: Bioclimate, microclimate, simulations, urban green, energy efficiency

## Introduction

The transformation of the original jungle into a (mostly) concrete urban jungle by man has caused an altered energy balance of the surfaces and thus a modified response of the near-surface climates particularly in tropical cities. This phenomenon is known as urban climate and is associated to many diverse, rather complex and interlinked effects like urban heat islands, thermal discomfort, air pollution, elevated energy consumption for cooling etc. To better understand such complex effects and to be able to analyse them recent simulation tools are gaining ground. In fact problems like the urban climate are far too complex to fully understand without the aid of such highly sophisticated programs or models respectively. Especially the dynamic, spacial and temporal variations of the microclimates are difficult to grasp and to visualize.

## Resumen

En la latitud tropical, el impacto del clima urbano es asociado con los impactos negativos y severos del confort térmico y el consumo de energía de los edificios en comparación con las ciudades en zonas de clima templado. Esto se debe al alto nivel de ingresos de energía solar. La formación del llamado "efecto invernadero" en una metrópolis tropical es también producto principalmente de la carencia de suficiente vegetación y por el alto grado de absorción de radiación solar de las superficies urbanas. En adición, los ruidos urbanos producen que las ventanas estén cerradas, lo cual ha incrementando el uso del aire acondicionado, degradando adicionalmente la calidad de espacios públicos abiertos además del calor antropogénico. Este caso de estudio, examina un barrio urbano situado en un clima tropical caliente y húmedo, de Río de Janeiro/Brasil. Su microclima está siendo modelado con un instrumento llamado ENVImet de simulación numérica. Las posibilidades de adaptación del modelo a las propiedades locales y clima están siendo estudiadas.

Palabras Claves: Bioclima, microclima, simulación, vegetación urbano, eficiencia energética

## Introducción

La transformación de la jungla original hacia una jungla urbana de concreto, realizada por el hombre, ha causado una alteración en el balance de energía de las superficies y entonces se modificó la respuesta de los climas cerca de la superficie, particularmente en ciudades tropicales. Este fenómeno es conocido como clima urbano y es asociado a efectos muy diversos, bastante complejos e interconectados, como el efecto invernadero, incomodidad térmica, contaminación del aire, un consumo de energía más alto para enfriamiento, etc. Para poder entender mejor sobre estos efectos complejos y poder analizarlos, los instrumentos de simulación reciente están ganando terreno. De hecho, problemas como el clima urbano son muy complejos para poder entenderlos sin

Simulations with numerical computer models allow such detailed investigations. Different scenarios can be modeled and simulated in order to indicate options which are climatically preferable.

### **Thermal Comfort**

Near-surface man-modified climates develop mainly in the street canyon air volume within urban structures at pedestrian height. Thus for microclimate analysis the investigation of the street canyon air volume is of strong interest for the concerns of human thermal comfort. The ground level (street canyons, courtyards, urban greens etc.) is the layer where urban gathering takes place, where recreation areas are located and where the majority of citizens circulate and linger in the public space. This so-called *Urban Canopy Layer* is endangered to receive very little natural ventilation in dense urban situations. Yet airflow is (together with shade) the most important improving factor for bioclimatic thermal comfort in the Tropics. Thermal comfort in the street canyons allow a vivid street life and is of special social importance in Brazil because in its cities exists a dangerous tendency towards (climatic and social) separation of whole blocks, introverting against the violence and the thermal discomfort of the public space. The climatic well-being of citizens is an important condition for the efficiency and the health of the urban population. Especially in the summer period (December to March in the Tropics of the Southern hemisphere) is of most interest for bioclimatic investigations in the Tropics: Thermal hot stress occurs regularly in the open urban spaces during the summer period, while cold stress develops very rarely in tropical regions. By definition (Köppen) the average air temperature of all months exceeds 18°C in tropical regions.

### **Energy Consumption**

The climatic (as well as acoustic and visual) conditions of the urban outdoor space have additionally important influences on the energy consumption (i.e. for cooling) of indoor spaces. They therefore play a substantial financial role. So in order to instantiate more energy-efficient urban structures again the urban climate must be affected positively. Under tropical conditions so far in summer a vicious cycle is created by dense urbanization: Constructions of the so-called,

la ayuda de programas o modelos altamente sofisticados. Especialmente la dinámica y variaciones espaciales y temporales de los microclimas, son muy difíciles de entender y de visualizar. Simulaciones con modelos hechos por computadora, numéricamente, permiten investigar en detalle. Diferentes escenarios pueden ser modelados y simulados, para poder indicar las opciones climáticamente preferibles.

### **Confort Térmico**

Cerca de las superficies, los climas modificados por el hombre, se desarrollan principalmente en la calle, en un cañón de aire entre las estructuras urbanas a la altura del peatón. Así es que el análisis del microclima sobre el volumen de aire en el cañón urbano es de gran interés para las inquietudes del confort térmico humano. A nivel de calle (cañones urbanos, patios internos, vegetación urbana, etc.) es el nivel de encuentro urbano, donde están ubicadas las áreas de recreación y donde la mayoría de los ciudadanos circulan y permanecen en el espacio público. El llamado Nivel de Copa Urbano está en peligro de extinción por recibir muy poca ventilación natural en situaciones urbanas densas. Aún la fluidez de aire (junto con la sombra) es el factor más importante para el mejoramiento del bienestar térmico en el trópico. El bienestar térmico en los cañones urbanos, permite una vida urbana vívida, y es de especial importancia social en Brasil, porque en sus ciudades existe una peligrosa tendencia hacia (climática y social) la separación, manzanas enteras, se encierran para evitar la violencia y la molestia térmica del espacio público. El bienestar de los ciudadanos es una condición importante para la eficiencia y salud de la población urbana. Especialmente el período de verano (diciembre a marzo en el trópico del hemisferio sur), es el de mayor interés en las investigaciones bioclimáticas en el trópico: el estrés cálido-térmico ocurre regularmente en los espacios urbanos abiertos durante el período de verano, mientras que el estrés frío se desarrolla raramente en las regiones tropicales. Por definición (Köppen), la temperatura del aire promedio de todos los meses excede 18°C en las regiones tropicales.

*International Style* (which was originally developed for temperate climate conditions) are strongly affected by the use of glass and concrete and widely applied in the Tropics although they must be considered climatically unadapted and thus unsustainable. The common materials climatic responses (glasshouse-effect in the interiors and heat retain/ storage of concrete and brick) decrease thermal indoor and outdoor comfort. Increased cooling loads result an increased (and usually inefficient) consumption of electric energy for air conditioning, which is associated to high costs in Brazil. The consuming devices of the electric energy contribute themselves again to anthropogenic waste heat thus heat islands and noise pollution.

### **Simulation Tool**

ENVImet is a numerical, 4-dimensional (three spatial dimensions plus time dimension) microclimate model. ENVImet is an innovative, decision-making tool for urban and landscape planners, architects etc. especially in tropical threshold (and developing) countries, where such investigations can be carried out with relatively low costs. The software is being developed and provided cost-free on the Internet ([www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)) by Dr. Michael Bruse from the University of Bochum/ Germany. The program simulates the microclimates within urban structures through the solution of the physical basic equations for the wind current, the thermodynamics and the radiation balance of surfaces. The name (ENVImet) is derived from the term **Environmental Meteorology**.

ENVImet consists of the following sub-models:

- **the atmosphere model** (wind field, temperature, vapor, humidity, pollutants)
- **the soil model** (temperature and moisture inside the soil, water bodies etc.)
- **the surface model** (fluxes on horizontal and vertical surfaces, pavements, roofs and walls of buildings etc.)
- **the vegetation model** (foliage temperature, heat water and vapor exchange with in-canopy air etc.)

### **Consumo Energético**

Adicionalmente, las condiciones climáticas (así como las acústicas y visuales) del espacio urbano al aire libre, han tenido influencias importantes en el consumo energético (ejemplo para enfriamiento) en espacios interiores. Ellos entonces juegan un papel considerable en lo financiero. Así, para poder concretar más estructuras urbanas energéticamente eficientes, una vez más el clima urbano tiene que ser afectado positivamente. Bajo condiciones tropicales, en verano se crea un ciclo vicioso, causado por la urbanización densa: construcciones del llamado *Estilo Internacional* (desarrollado originalmente para climas templados), son fuertemente afectadas por el uso de vidrio y concreto aplicado extensamente en el trópico, aunque deberían ser considerados climáticamente inadaptados y por lo tanto insostenibles. Las respuestas climáticas de los materiales comunes (efecto invernadero en los interiores y retención de calor/almacenamiento de concreto y ladrillo) disminuyen el bienestar térmico interno y externo. El incremento de las cargas de enfriamiento resulta en el incremento (usualmente ineficiente) del consumo de la energía eléctrica para el aire acondicionado, lo cual está asociado con los altos costos en Brasil. Los aparatos de consumo de energía eléctrica contribuyen a su vez, a la liberación de calor antropogénico, así como el efecto invernadero y contaminación sonora.

### **Herramienta de Simulación**

ENVImet es un modelo de microclima numérico, de 4 dimensiones (tres dimensiones espaciales más la dimensión de tiempo). ENVImet es una innovadora herramienta para tomar decisiones para planificadores urbanos, paisajistas, arquitectos etc. Especialmente en los países (en desarrollo) con un umbral tropical, porque tales investigaciones se pueden llevar a cabo con costos relativamente bajos. El software está siendo desarrollado y proporcionado gratuitamente por Internet ([www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)) por Dr. Michael Bruse de la Universidad de Bochum/Alemania. El programa simula los microclimas dentro de las estructuras urbanas a través de la solución de las ecuaciones

It must be considered that the data implied in the (local) databases for these sub-models do contain properties of construction materials and plants common in Germany and not yet explicit properties of tropical plants and/ or construction materials in Brazil. This complicates the validation of the program for local tropical/ Brazilian conditions

Considering that such simulations are (almost) as complex as reality also a large CPU (Central Processing Unit) and long calculation periods (common are >24h) are required in order to carry out the simulations. A good understanding of the English language is also needed because the complete program language and that of all applications is through English. The input database of ENVImet demands relatively few parameters but some of them are highly sophisticated such as LAD (Leaf Area Density of plants), roughness length and soil moisture content. The input data availability usually proves to be the largest difficulty. This results that it is virtually not possible to work with 100% correct input parameters and that unknown parameters must be estimated. Due to this fact and due to inevitable simplifications of the program the results of the simulations must be also regarded as estimations. It has to be remarked that (especially for beginners) there is a huge danger of momentous errors concerning the results during the collection and estimation of data for the input stage.

### **Case Study Area**

The neighbourhood around CEFET (Centro Federal de Educação Tecnológica)/ Petrobras is located a 22° 55" S and 43° 14" W in the borough of Maracanã in Rio de Janeiro. The area under investigation has a size of 450m x 225m, which equals a total size of 10.12 ha or roughly 0.1 km<sup>2</sup>. A recent aerial picture (see Photo 1) of the area was used to digitise the model domain. In comparison to a scale drawing the expansion of the outlines of the canopy layer of the tree population are identifiable well. In addition detailed field investigations (vegetation, albedo, ground sealing etc.) were carried out on location. The urban situation was chosen because it suggests a potential of a variation of microclimates due to its vertical extension (low and high-rise buildings) and its ground sealing/ vegetation, which varies

físicas básicas para la corriente de aire, la termodinámica y balance de radiación de superficies. Su nombre (ENVImet) deriva del término Environmental Meteorology (Meteorología Ambiental).

ENVImet comprende los siguientes sub-modelos:

- modelo atmosférico (campo de viento, temperatura, vapor, humedad, contaminantes)
- modelo de tierra (temperatura y agua dentro de la tierra, cuerpos de agua, etc.)
- modelo de superficie (fluctuaciones en superficies horizontal y vertical, pavimento, techos, paredes, etc)
- modelo de vegetación ( temperatura de follaje, calor del agua e intercambio de vapor con el aire en la copa, etc)

Se debe considerar que el dato implicado en las bases de datos (local) para estos sub-modelos si contienen propiedades de materiales de construcción y plantas comunes en Alemania y no todavía con las propiedades explicitas de plantas tropicales y/o materiales de construcción en Brasil. Esto complica la validación del programa para las condiciones tropical locales/ brasileñas.

Considerando que tales simulaciones son (casi) tan complejas como la realidad, se requiere un CPU grande (Central Processing Unit) y períodos largos de cálculo (> 24h) para poder llevarlo a cabo. Se necesita también un buen entendimiento del inglés porque el lenguaje del programa y de todas las aplicaciones es inglés. La entrada de la base de datos de ENVImet demanda relativamente pocos parámetros pero algunos de ellos son altamente sofisticados tal como LAD (*Area de Densidad de Hoja de plantas*), longitud de aspereza y contenido de agua en la tierra. La disponibilidad de la entrada de datos usualmente demuestra ser la de mayor dificultad. Es virtualmente imposible trabajar con parámetros de entrada 100% correctos y los parámetros desconocidos tienen que ser estimados. Debido a este factor y a las simplificaciones inevitables del programa, los resultados de las simulaciones también tienen que ser considerados como estimaciones. Comento (especialmente para principiantes) que





Photo 1: Aerial view of the area under investigation (IPP 1996).

Foto 1: Vista aérea del área bajo investigación (IPP 1996).

from highly sealed (Avenida Maracanã) to garden and green courtyard surfaces.

existe un gran riesgo de errores relativos a los resultados, durante la colección y estimación de datos para la etapa de entrada.

Since local (microclimatic) data from the meteorological station of CEFET proved unfortunately to be useless, similar microclimatic data from the nearby meteorological measuring site of UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) was used to derive an average and an extreme summer day from a reliable series of 10 years using a method by Cataldi (2004).

**Caso de estudio**

El barrio alrededor de CEFET (Centro Federal de Educacao Tecnológica)/Petrobrás está ubicado a 22° 55' S y 43° 14' O en el Municipio de Maracanã en Río de Janeiro. El área bajo investigación, tiene un tamaño de 450m x 22m, lo cual equivale al tamaño total de 10.12

Fig. 1: Screenshot of the digitised area under investigation (Layer: buildings, vegetation).

Fig. 1: imagen de pantalla digitalizada del área en investigación (Capas: edificios, vegetación)



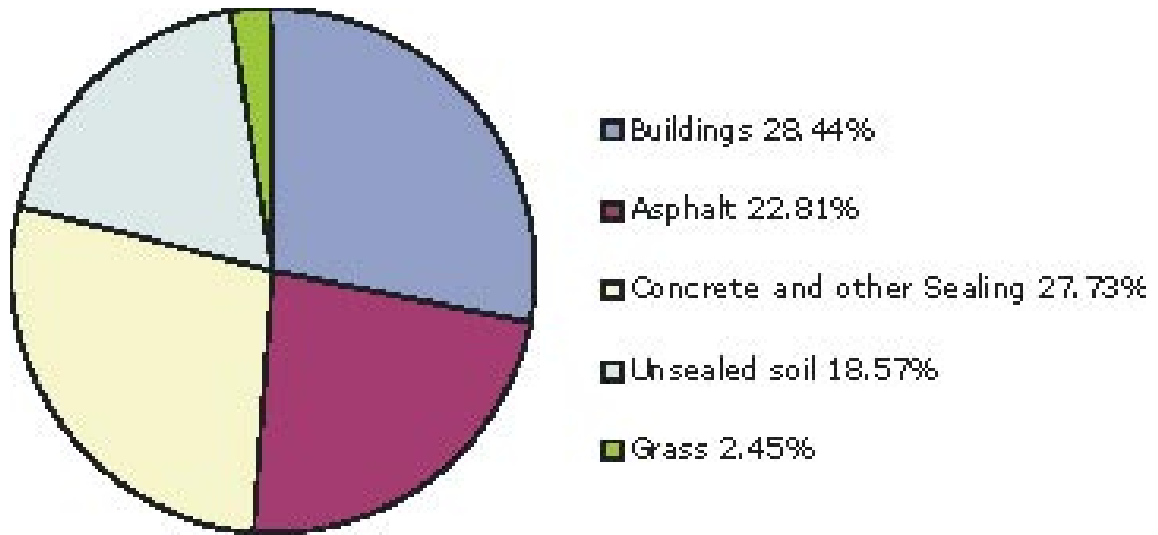


Fig. 2: Model statistics pie graph: Ground use and leaf area ratio of the area under investigation (Compiled by the author).

Fig 2. **Gráfico por porciones:** Uso de tierra y proporción de área de hoja de la zona bajo investigación. (Recopilada por el autor).

Subsequently (aside from the simulation of the actual situation) nine different scenarios were simulated in order to investigate improvements or degradations of the thermal comfort at pedestrian height. These scenarios concerned as well simple implementations as the synergetic effects of more complex scenarios. Among the numerous possible scenarios, reasonable ones were chosen during the research process. The following scenarios were simulated:

1. **Actual Situation**
2. Actual Situation with application of **High-Albedo Roofs**
3. Actual Situation with application of **High-Albedo Walls**
4. Actual Situation with application of **High-Albedo Streets**
5. Actual Situation with application of **High-Albedo Street Canyon & Roofs**
6. Actual Situation with complete **Loss of Vegetation**
7. Actual Situation with application of **Green Roofs**
8. Actual Situation with application of **50% More Trees**
9. Actual Situation with application of **Green Roofs & 50% More Trees**
10. **Original Situation before urbanization** (circa year 1800)

há o aprox. 0.1 km<sup>2</sup>. Una foto aérea reciente (ver foto1) del área, fue usada para digitalizar el dominio del modelo. En comparación con los dibujos a escala, la expansión de los contornos de la capa de las copas de la población arbolada también es bien identificable. Además investigaciones detalladas de campo (vegetación, albedo, sello de suelo) fueron llevados fuera de ubicación. La situación urbana fue escogida porque surgiere un gran potencial de la variación de microclimas debido a su extensión vertical (edificios bajos y torres) y su sello de suelo/vegetación, el cual varía desde altamente sellada (Avenida Maracanã) a jardín y superficies verdes de patio interior.

Debido a que el dato (micro climático) local de la estación meteorológica de CEFET, desafortunadamente demostró ser inservible, datos similares micro climáticos de un sitio de medición meteorológico cercano de la UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) fue usado para obtener un promedio y un extremo de un día soleado de una serie fiable de 10 años usando el método de Cartaldi (2004).

Posteriormente (aparte de la simulación de la situación actual) nueve escenarios diferentes fueron simulados para poder investigar mejoramientos o degradaciones del bienestar térmico a la altura de los peatones. Estos



## Results

The simulations visualize that one of the few possibilities to improve thermal comfort in the outside spaces of tropical cities is represented by the diverse positive effects of plants. The scenario No. 9 proved to be climatically the best and close to the original situation. In contrast, highly reflective (high albedo) surfaces (such as mirror glass or white surfaces) tend to elevate mean radiant temperatures in street canyons, lead to glare and ultimately to the decline of the well being of humans in the outside space.

escenarios incluyen simple implementación, así como prácticas de efectos sinérgicos de escenarios más complejos. Entre las numerosas posibilidades, los que son razonables fueron escogidos durante su proceso de investigación.

Los escenarios siguientes fueron simulados:

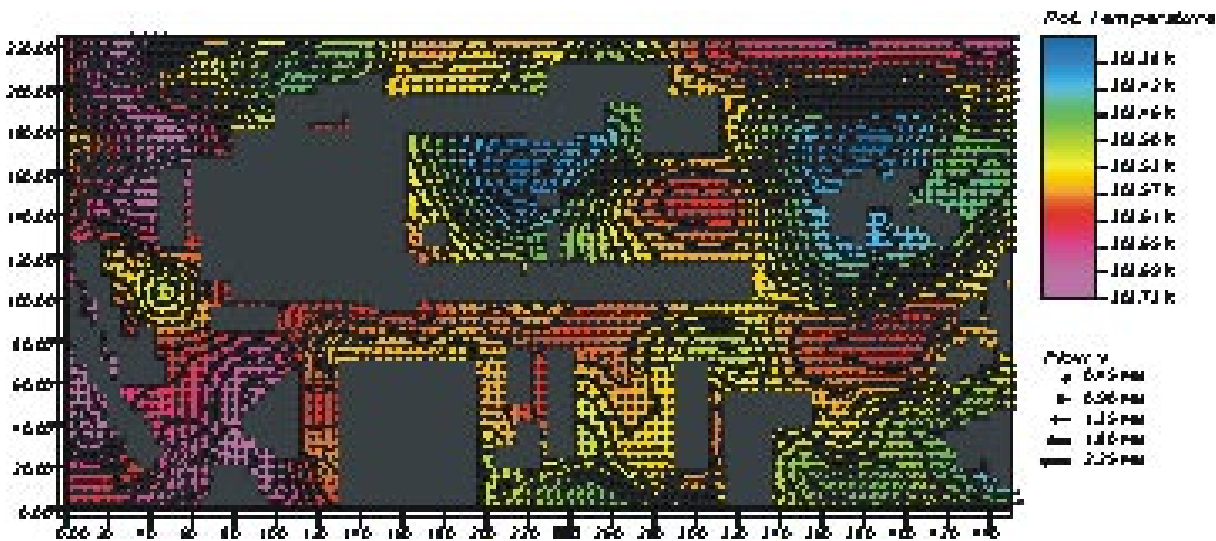


Fig. 3: Thermal Field of the Area under Investigation (ENVI-met Simulation) Distribution of Temperature on the 06.03.92 (Average Summer Day) at 21:00.

Fig. 3: Campo térmico del área bajo investigación (ENVI-met Simulation). La distribución de la temperatura el 06.03.92 (Día Promedio en Verano) a las 21:00.

During the work process with ENVI-met, some imperfections of the program i.e. various problems in calculating the flow have occurred. It was also shown that the cooling of the simulated atmosphere is delayed more than the real values measured at a height of 1.50 meters indicated for the real atmosphere. (But this may also be due to the wind, which affected measurements *in situ* during the late afternoon). It was also found that the ranges of  $\Delta T$  and  $\Delta H$  (local differences/ distribution of temperatures and humidity) in the model domain could not be modeled in the stronger differentiated way they occur in reality in tropical environment. The air temperatures i.e. of the computed domain range usually between 0.3K and 0.6K, while values measured during the field monitoring range between 1K and 3K. As a reference Miranda *et al.* (1993) i.e. have measured maximum differences in temperature outside and inside the layers

### Situación Actual:

- Situación Actual con la aplicación de Techos Alto *Reflexividad* (albedo)
- Situación Actual con la aplicación de Paredes Alta Reflexividad
- Situación Actual con la aplicación de Calles Alta Reflexividad
- Situación Actual con la aplicación de Calle de Cañón y Techos de Alta Reflexividad
- Situación Actual con la Pérdida de Vegetación
- Situación Actual con la Aplicación de Techos Verdes
- Situación Actual con la Aplicación de 50% Mas Árboles
- Situación Actual con la Aplicación de Techos Verdes y 50% más Árboles
- Situación Original Antes de Urbanización (1800)

of cacao plantation in tropical, hot and humid climate around  $2 \pm 0.5K$ . It is most probable that the extremes of the results are diluted because of simplifications and parameterizations of the program. It is highly desirable that future versions of ENVImet continue to improve and that it will be possible to erase these and other slight problems in order to widely apply this highly innovative tool for the future planning (and urban redevelopment) of more climate conscious sustainable tropical cities. In addition, research and the collection of local data are required to advance the adaption and valorization of ENVImet for tropical means.

## References

Akabari H., Pomerantz M., Taha, H. (2001): Cool Surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas (Solar Energy Vol, 70, No.3 pp. 295-310 2001)

Brandão, A., Soares de Farias, H. (2003): Melhoria da Eficiência Climatática Urbana na Cidade do Rio de Janeiro, Estudo de Caso no Bairro Maracanã (*Improvement of urban climatic efficiency in the city of Rio de Janeiro, Case Study of the Maracanã borough*) (UFRJ).

[http://www.cibergeo.org/agbnacional/VICBG-2004/Eixo1/E1\\_195.htm](http://www.cibergeo.org/agbnacional/VICBG-2004/Eixo1/E1_195.htm)

Bruse, M. (1998): Simulating Surface-Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model (Environmental Software and Modeling, 13: 1-12.).

Cataldi, M (2004): Metodologia para o cálculo de um dia médio (*Methodology for the calculation of an Average Meteorology Day*) (PhD, UFRJ).

Grimme, F.-W., Laar, M., Moore C. (2003a): Ventilation dependent comfort under tropical conditions (AiF-Report; Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e. V.).

Lamberts, R., Dutra, L., Pereira, F. (1997): Eficiência Energética na Arquitetura (*Energy Efficiency in Architecture*) PW Editores, São Paulo.

Miranda, R., Milde L., Bichara, A., Cornell S. (1993): Daily Characterization of Air Temperature and Relative Humidity Profiles an a Cacao Plantation.

Oke, T.R. (1978): Boundary Layer Climates (Menhuen, London, New York).

## Resultados

Las simulaciones visualizan que una de las pocas posibilidades para mejorar el bienestar térmico en los espacios externos en las ciudades tropicales, es por los diversos efectos positivos de las plantas. El escenario No. 9 probó ser la situación climáticamente mejor y cercana a la situación original. En contraste, las superficies (como el vidrio espejo o superficies blancas) altamente reflexivos (alto albedo) tienden a elevar la media de temperatura radiante en el cañón urbano, conduce a brillo/deslumbramiento/luminosidad y así al descenso del bienestar humano dentro del espacio exterior.

Durante el proceso de trabajo con ENVImet, algunas imperfecciones en el programa han ocurrido en lo que es el cálculo de flujos. También fue demostrado que el enfriamiento simulado en la atmósfera tarda más que los valores reales medidos a una altura de 1.50 m indicados para la atmósfera verdadera. (Esto también puede ser debido al viento, el cual afectó las mediciones en sitio una tarde). También fue encontrado que los rangos de  $\Delta T$  y  $\Delta H$  (diferencias locales/distribución de temperatura y humedad) en el dominio del modelo, no podía ser modelado en la manera fuertemente diferenciada en que ellos ocurren en la realidad en un ambiente tropical. Las temperaturas de aire, ejemplo del rango de dominio computarizado usualmente entre 0.3 K y 0.6K, mientras que los valores medidos durante el rango del monitoreo en campo es entre 1K y 3K. Como ejemplo de referencia Miranda et al. (1993) ha medido las diferencias máximas en temperatura fuera y dentro de las capas de la plantación de cacao en clima tropical caliente húmedo en alrededor de  $2 \pm 0.5K$ . Es más probable que los extremos de los resultados son diluídos por las simplificaciones, y los parámetros del programa. Es deseable que versiones futuras de ENVImet mejoren y que sea posible evitar éstos y otros problemas menores para aplicar este instrumento altamente innovador en la planificación futura (y re-desarrollo urbano) de ciudades tropicales sostenibles con más conciencia sobre el clima. Además, se requiere la investigación y recolección de datos locales para avanzar en la adaptación y valorización de ENVImet para medios tropicales.