

# Calculating green house gas emissions for buildings: analysis of the performance of several carbon counting tools in different climates

## *Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero en edificios: análisis del funcionamiento de varias herramientas en diferentes climas*

P. La Roche<sup>(\*)</sup>

### SUMMARY

The first step to reduce greenhouse gas emissions from buildings is to be able to count them. If this counting is integrated in the design process the impact of architectural design strategies can be evaluated more easily and a building with reduced emissions can be developed. Fifty greenhouse gas calculators and energy modeling software were compared in the main areas in which buildings are responsible for carbon emissions: operation, water, construction, waste and transportation to and from the building. These tools had to be free and easy to use so that they could be used by everybody in the initial phases of the architectural design process, while providing sufficient precision to provide useful input to the designer. The effect of modifying the envelope insulation, the quality of the windows, the efficiency of the heating and cooling systems, and integrating direct gain and night ventilation, on operation emissions was evaluated with two energy modeling tools: HEED and Design Builder. Results demonstrated that implementing appropriate design strategies significantly reduced emissions from operation in all climates. An easy to implement protocol that combines several tools for GHG counting in buildings is provided at the end.

113-89

**Keywords:** carbon calculating tools, low carbon architecture, sustainable architecture, green buildings, energy modeling.

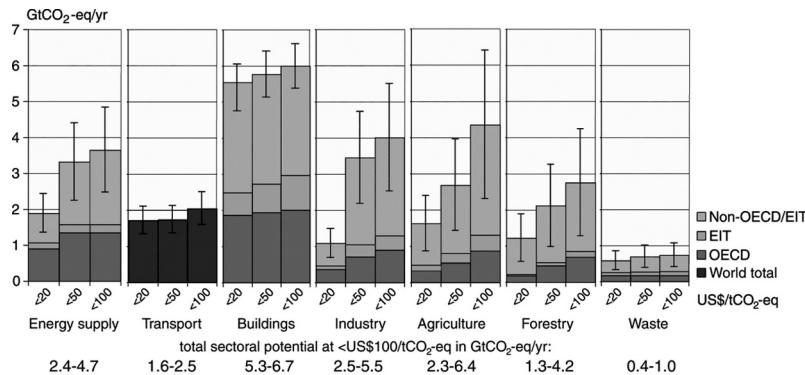
### RESUMEN

*El primer paso para reducir las emisiones de gases invernadero generadas por las edificaciones es el poder calcularlas adecuadamente. Si esta actividad se integra al proceso de diseño arquitectónico, entonces el impacto de las estrategias de diseño se puede evaluar más fácilmente, resultando un edificio con menores emisiones. Cincuenta herramientas de cálculo de emisiones y programas de modelaje se compararon en las áreas en las cuales los edificios son responsables de las emisiones de gases invernadero: operación, agua, construcción, basura, y transporte desde y hasta el edificio. Las herramientas comparadas debían ser fáciles de utilizar, pero con suficiente precisión para proveer información de utilidad al diseñador. El efecto en las emisiones, al modificar el aislante de las paredes y cubierta, cambiar la calidad de los vidrios, la eficiencia del sistema de calefacción y enfriamiento, y la integración de sistemas pasivos de ganancia solar directa o de enfriamiento pasivo por ventilación nocturna fueron evaluados con dos programas de modelaje energético: HEED y Design Builder. Los resultados de este análisis demuestran que la implementación apropiada de estrategias de diseño reducen significativamente las emisiones por operación en todos los climas. Al final del artículo se propone un protocolo que combina varias herramientas sencillas para calcular las emisiones de las diferentes fuentes.*

**Palabras clave:** herramientas medidoras de emisiones de gases invernadero, arquitectura de bajo carbono, arquitectura ecológica, modelaje energético.

<sup>(\*)</sup>Associate Professor (Ph. D.) Department of Architecture & Lyle Center for Regenerative Studies, California State Polytechnic University, Pomona USA

Persona de contacto/Corresponding author: pmlaroche@asupomona.edu (P. la Roche)



1. Estimated economic mitigation potential by sector in 2030 from bottom-up studies, compared to the respective baselines assumed in the sector assessments. The potentials do not include non-technical options such as lifestyle changes. Source IPCC: 2007.

## INTRODUCTION

Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice and rising global average sea level (1). This warming is caused by an increase in the concentration of green house gas emissions due to human activities and is the most pressing environmental challenge facing our civilization. Buildings are responsible for a large portion of the world's green house gas emissions, much of this from energy consumption. It is difficult to measure how much energy is used by the building sector because it is usually not considered as an independent sector and there is a lack of consistent data. Different sources estimate energy used by the building sector to be between 20 and 50% of total energy use, a value which is always higher than emissions from industry and transportation. According to Mazria (2) buildings are responsible for approximately half of all US greenhouse gas (GHG) emissions annually. Therefore, to have any real impact on climate change, it is essential to address emissions from the Building Sector.

Energy used to operate buildings is usually the single largest source of building related CO<sub>2</sub> emissions and includes heating, cooling, lighting and appliances. These emissions can originate from energy used directly at the site (such as natural gas) or at the power plant (electricity). Energy used to operate buildings accounts for 43% (3) of total CO<sub>2</sub> emissions and 76% (4) of electricity consumption in the United States.

According to the IPCC (5) buildings provide the most economic mitigation potential for reduction of CO<sub>2</sub> emissions (Fig. 1). Measures to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from buildings fall into one of three categories: reducing energy consumption and embodied energy in buildings, switching to low-carbon fuels including a higher share of renewable energy, or controlling the emissions of non-CO<sub>2</sub> GHG gases. A very large number of tech-

nologies that are commercially available and tested in practice can substantially reduce energy use while providing the same services and often substantial co-benefits.

## 1. CARBON CALCULATING TOOLS

### 1.1. Types of Carbon Counting Tools

The concept of carbon footprint has been defined in several ways and which usually involve an estimate of the carbon dioxide emissions that an individual is directly responsible for over a given period of time (6). Carbon footprint calculators are available online to determine *personal carbon emissions*. While not directly applicable in the architectural design process, these types of calculators can assist in getting a feel for the numeric relationship between lifestyle, consumption patterns and emissions (7).

Other definitions of carbon footprint take into effect life-cycle analysis. The Carbon trust describes it as "... a methodology to estimate the total emission of greenhouse gases (GHG) in carbon equivalents from a product across its life cycle from the production of raw material used in its manufacture, to disposal of the finished product (excluding in-use emissions) (8).

Some authors (9) see the carbon footprint as a part of the ecological footprint. However the ecological footprint indicates a demand for resources and is expressed in units of area, hectares or even planets. The ecological footprint (EF) developed by Rees and Wackernagel (10) measures how much biopродuctive area (whether land or water) a population would require to sustainably produce all the resources it consumes and to absorb the waste it generates, using prevailing technology. The carbon footprint is an emission –not a demand– and is measured in units of mass and not units of area.

Not only do carbon footprint calculators generate results in different units (planets versus kilograms), further complication arises from the fact that there are several greenhouse gases with different warming potential. To determine the impact of these gases in one single standard unit, emissions of greenhouse gases are converted into carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>e) based on their 100 year global warming potential. Emissions that involve several gases can be expressed in CO<sub>2</sub>e and include Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>), Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O), methane (CH<sub>4</sub>), and SF<sub>6</sub>, and some fluorinated gases

such as hydrofluorocarbons, perfluorocarbons, and sulfur hexafluoride. To normalize results CO<sub>2</sub>e is used throughout the paper, even when CO<sub>2</sub> is the only output. One unit of CO<sub>2</sub> e is equal to one unit of CO<sub>2</sub>.

This paper will compare tools to determine green house gas emissions by measuring a building's total emissions. A building is directly responsible for the generation of GHG by its operation, construction, water use, and waste generation (11) and is also indirectly responsible for emissions from transportation to and from the building. Most carbon counting tools offer the possibility to determine emissions from energy use in buildings or from transportation. Fewer of them can determine emissions due to water, waste, or construction. A handful of these also offer the possibility to calculate the carbon impact from the food eaten that we eat. Food was not considered because the architect has no real effect on food eaten.

## 1.2. Carbon Emissions from Buildings

Total emissions [Eq. 1] are the sum of indirect and direct emissions. For the effects of this paper, direct emissions are those for which the building is directly responsible [Eq. 2]. If the building is understood as subsystem of a larger system, then these emissions are the direct result of an interaction between the external system and the building system. It is usually linked with building fabric or the building's inputs and outputs (energy, water, waste, materials). Indirect emissions are affected by a building attribute but do not originate from a direct interaction between the building and the exterior. Transportation emissions are indirect because they are affected by building location but are not produced by the building itself or a building's input and output.

$$T_e = Td_e + Tid_e \quad [\text{Eq } 1]$$

$$Td_e = O_e + C_e + W_e + Wa_e \quad [\text{Eq } 2]$$

$$T_e = O_e + C_e + W_e + Wa_e + Tr_e \quad [\text{Eq } 2]$$

Where:

Total Emissions	T <sub>e</sub>
Total Direct Emissions	Td <sub>e</sub>
Total Indirect Emissions	Tid <sub>e</sub>
Operation Emissions:	O <sub>e</sub>
Construction Emissions	C <sub>e</sub>
Water Emissions	W <sub>e</sub>
Waste Emissions	Wa <sub>e</sub>
Transportation Emissions	Tr <sub>e</sub>

Energy used to operate the buildings (O<sub>e</sub>) is usually the single largest source of building

related GHG emissions. These emissions are usually defined as direct when they originate from energy used "directly" at the site (such as natural gas) or indirect when they originate at the power plant (electricity). To differentiate these from Td<sub>e</sub> and Tid<sub>e</sub> these are defined as direct operations emissions and indirect operations emissions. Emissions from operation include heating, cooling, lighting, domestic water heating and appliances and these can be direct or indirect. For example a furnace could be direct (gas powered), or indirect (electricity powered). These emissions can be determined from energy modeling tools in a proposed building or from the meter in an existing building.

GHG emissions from construction processes (C<sub>e</sub>) are usually generated during the fabrication of the materials used in the building; during the transportation of materials to the building; and during construction of the building.

Water consumption in the building also generates GHG emissions (W<sub>e</sub>). This is different than domestic water heating which is included in the operation of the building. The water used in the building must be pumped from the source and treated while the waste water from the building must also be treated to remove physical, chemical and biological contaminants.

Solid waste (not transported in water) coming from the building must also be moved from the building and treated, and generates emissions (Wa<sub>e</sub>). More waste requires more treatment and usually generates more greenhouse gases in the form of methane from the landfills.

People must move to and from the building, and the method by which they do this usually generates greenhouse gases in varying amounts (bus, train, automobile, walking, bicycle) (Tr<sub>e</sub>).

## 2. CARBON COUNTING TOOLS

One of the main criteria for selection of the tools that are compared in this paper is that they had to be free and easy to use so that they could be used by all architects in the initial phases of the architectural design process, while providing sufficient precision to provide some useful input to the designer. The full table with the forty tools is presented by the author in the Carbon Neutral Design Studio Project website (12). In addition to an image of a representative input and output screen, the table provides: a) the URL address; b) the areas for which the tool calculates carbon emissions and the sub areas in each of these;

2. Portion of the table from the Carbon Neutral Design Website.

c) the ease of use in a three point scale: easy, moderate, difficult ; d) the time to complete the information needed measured in a three level scale: less than 5 minutes, between 5 and 15 minutes and more than 15 minutes; e) the units used in the output ; and f) general comments (Fig. 2). Table 1 includes all of the tools compared for this paper. The first column lists the names of the tools while the rest of the columns list the different emission

sources: operation, transportation, waste, construction and water. Most of the tools calculate some type of operational energy and some mode of transportation (usually automobile or plane) but few of them calculate waste, construction or water. The gray shade indicates that the tool has at least some capacity for calculations in that area, while the black rectangle indicates more capacity to calculate.

<b>TerraPass</b>		<b>1) Web Address:</b> <a href="http://www.terrappass.com/">http://www.terrappass.com/</a>
		<b>2) Calculates:</b> <u>home</u> ( electricity, oil natural gas, propane,) and <u>transportation</u> (auto, air miles) <b>3) Ease of use:</b> easy <b>4) Time to complete:</b> less than 5 minutes <b>5) Output (units):</b> lbs of CO2 <b>6) Comments:</b> provides opportunity to purchase carbon offsets and energy saving products
<b>The Nature Conservancy's Carbon Footprint Calculator</b>		<b>1) Web Address:</b> <a href="http://www.nature.org/initiatives/climatechange/calculator/">http://www.nature.org/initiatives/climatechange/calculator/</a>
		<b>2) Calculates:</b> <u>home</u> , <u>transportation</u> (auto, air miles), <u>food &amp; diet</u> and <u>recycling &amp; waste</u> <b>3) Ease of use:</b> easy <b>4) Time to complete:</b> less than 5 minutes <b>5) Output (units):</b> tons of CO2 <b>6) Comments:</b> provides graph comparing results to U.S. average
<b>Yahoo Green Calculator</b>		<b>1) Web Address:</b> <a href="http://green.yahoo.com/calculator/">http://green.yahoo.com/calculator/</a>
		<b>2) Calculates:</b> <u>home</u> and <u>transportation</u> (auto, air miles) <b>3) Ease of use:</b> easy <b>4) Time to complete:</b> less than 5 minutes <b>5) Output (units):</b> tons of CO2 <b>6) Comments:</b> provides opportunity to purchase carbon offsets
<b>Water Conservation Calculator</b>		<b>1) Web Address:</b> <a href="http://www.csngnetwork.com/waterusagecalculator.html">http://www.csngnetwork.com/waterusagecalculator.html</a>
		<b>2) Calculates:</b> <u>water</u> <b>3) Ease of use:</b> easy <b>4) Time to complete:</b> less than 5 minutes <b>5) Output (units):</b> gallons of water used <b>6) Comments:</b> provides water usage per day, month and year

**Table 1**  
Comparison of carbon calculating tools

APPLICATIONS	OPERATION													TRANSPORTATION		WASTE	CONSTRUCTION	WATER	
	ELECTRICITY	LIGHTS	FANS	A/C	APPLIANCES	NAT GAS	PROPANE	HEAT OIL	WOOD	COAL	LPG	KEROSENE	BUTANE	WATER HEATER	FURNACE	AUTO	AIRPLANE		
Act on CO2 calculator																			
American Forests																			
Athena EcoCalculator for Assemblies																			
Be Green Now																			
Berkeley Institute of the Environment																			
Best Foot Forward																			
Bonneville Environmental Foundation																			
Bp Calculator																			
Build Carbon Neutral Construction Calculator																			
California Carbon Calculator																			
Carbon Footprint																			
CarbonCounter.org																			
Carbon Fund																			
center for alternative technologies																			
Chuck Wright																			
City of Fair Oaks, CA Water Use Calculator																			
City of Tampa, Florida Water Use Calculator																			
Clear Water																			
Electric Power Pollution Calculator																			
Energy Star Home Energy Yardstick																			
Energy Star Target Finder																			
EPA Personal Emissions Calculator																			
EPA Waste Reduction Model WARM																			
GEIC calculator																			
HEED																			
Home Energy Saver Calculator																			
Inconvenient Truth																			
Live Neutral																			
Pacific Gas and Electric																			
Puretrust																			
Resurgence																			
Safecimate																			
TerraPass																			
The Conservation Fund																			
Calculator																			
Yahoo Green Calculator																			
Water Conservation Calculator																			
Zerofootprint: Earthhour																			
Zerofootprint: Unilever Go Blue																			

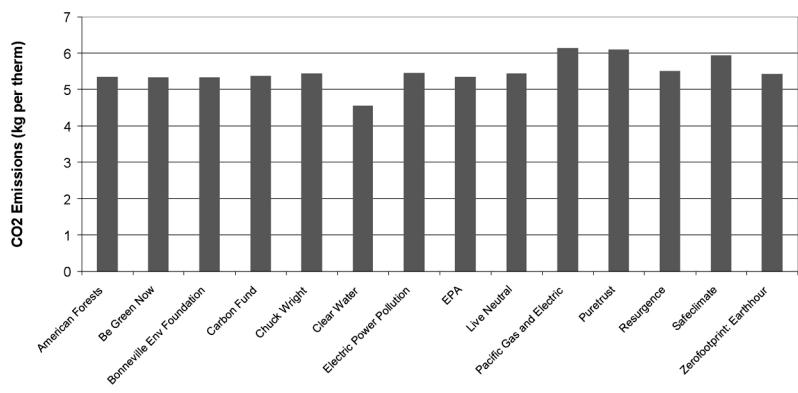
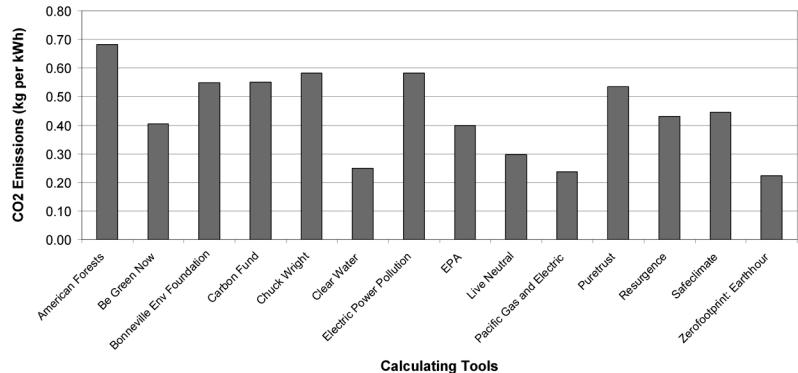
**Table 2**  
Inputs for the tools

Electricity	Average Annual Use: 12,000 kWh
Natural Gas	2610 m <sup>3</sup> (921.6 Therms/year)
Propane or heating oil	1136 L (300 gallons) (when asked)
Coal	300lbs or 0.1119 metric tons (when asked)
Vehicle Transportation	24140 km (15,000 miles) a year per household @ 9.3 km per liter (22 MPG) or a 2008 Honda Civic with 10.2 km per liter (24 mpg).
Air transportation	24140 km (15,000 miles) a year or R/T flight LAX/CDG

### 3. COMPARING CO<sub>2</sub> EMISSIONS IN CARBON COUNTING TOOLS FROM NATURAL GAS AND ELECTRICITY

Because many tools can calculate emissions from electricity and gas (Table 1), these were selected to establish a first point of comparison, by providing the same inputs and comparing the outputs. Not all of the tools could be compared, because they had different units of measurements (e.g. planets vs kilograms), so only those that had the option to provide a reasonable and comparable input and output were selected for comparison (Figs. 3 and 4). Table 2 shows the inputs provided to the tools for comparison.

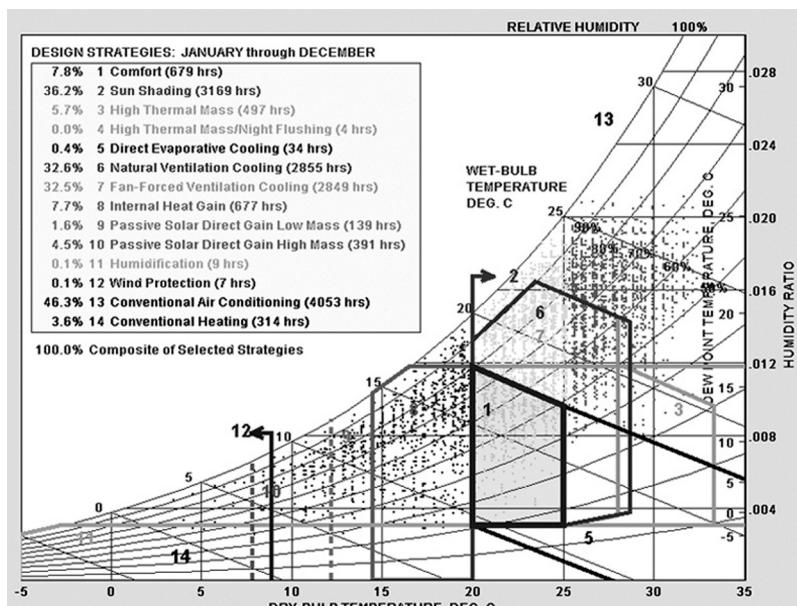
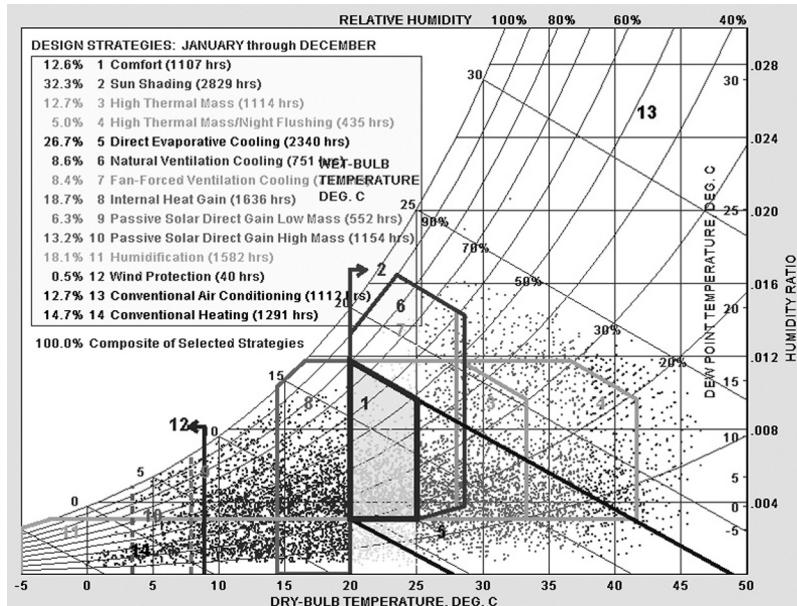
Fourteen calculators were compared, all of which generated different CO<sub>2</sub> emission values. For electricity, with an input of 12,000 kWh, the emissions ranged from 2,673 kg



to 8182 kg of CO<sub>2</sub> per year, the average was 5,286 kg per year, or 0.44 kg / kWh. Emissions range from 0.22 to 0.68 kg per kWh (Fig. 3). As a reference, the average emission factor for grid electricity in the USA is 0.62 kg / kWh (13) and in the UK it is 0.43 kg kWh (14).

3. CO<sub>2</sub> emissions from electricity normalized in kg of CO<sub>2</sub> per kWh used for the 14 calculators.

4. CO<sub>2</sub> emissions from natural gas normalized in kg of CO<sub>2</sub> per therm of gas used for the 14 calculators.



5. Hot and Dry Climate.

6. Hot and Humid Climate.

For 2,610 m<sup>3</sup> of natural gas the results ranged from 4182 kg to 5465 kg of CO<sub>2</sub> / year. The average was 5,043 kg of CO<sub>2</sub> for the 921.6 therms of gas, equal to 5.47 kg per therm or 0.187 kg per kWh (12.03 lbs of CO<sub>2</sub> per therm).

The emissions per therm range between 4.54 and 6.13 kg per therm (Fig. 4) and the average is relatively close to 5.43 kg of CO<sub>2</sub> / therm (0.19 per kWh), which is the fuel emission factor for natural gas proposed by DEFRA (14).

Unfortunately most of these calculators are not transparent and it is not easy to determine the calculation methods and conversion

factors. The variability in the results given by the calculators indicates that it is probably better to select a conversion factor and multiply this factor by the calculated or recorded energy used in the building.

#### 4. COMPARING CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM CARBON COUNTING TOOLS IN DIFFERENT CLIMATES

A single family dwelling was analyzed in four climates to determine the effect of climate on emissions. The house was two stories high and 48 by 24 ft, with 2300 sq ft gross building floor area, similar to the 2005 US average. The four climates are the classical types classified according to their effect on human thermal comfort.

Most of the climate files used are from California but they are just used to represent a general type of climate and not a specific California Climate. The four climates are: a) HOT AND DRY represented by California climate zone 15 (El Centro); b) HOT AND HUMID represented by Miami, Florida c) TEMPERATE represented by California climate zone 6 (Los Angeles); and d) COLD represented by California climate zone 16.

Climate files in Energy Plus Weather EPW format were used for the simulations and temperature and relative humidity from these files was plotted in the psychrometric charts in Figures 5, 6, 7 and 8.

Emissions from operation changed as the HVAC system used more or less energy to provide thermal comfort under different climates. To calculate these emissions in the different climates some assumptions were made for each of the areas in which buildings emit carbon (operational energy, construction, waste, water and transportation) and are explained in the following sections.

##### 4.1. Operational Energy

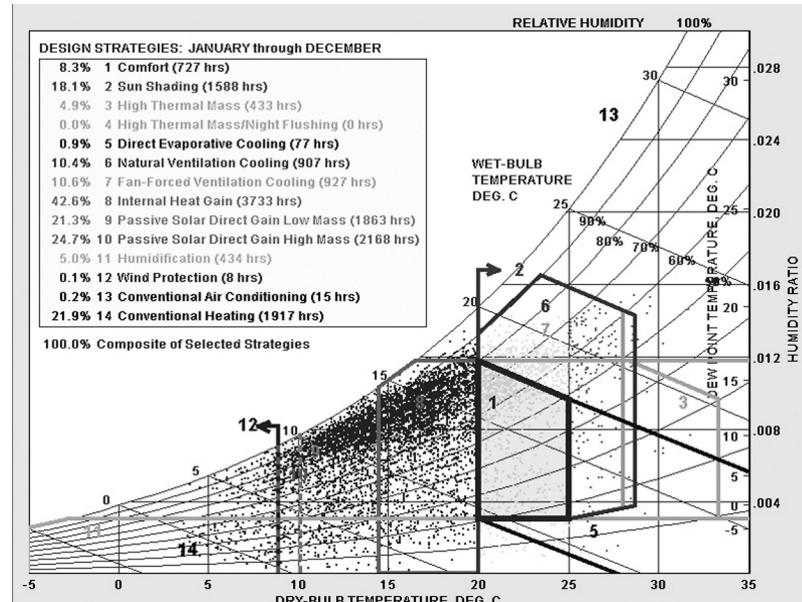
California's energy code, Title 24 (14) was used to design the building envelope for all climate zones and package D for homes with natural gas was used. A gas furnace with an AFUE of 80% was used. The same envelope was used in the hot and humid zone as in the hot and dry climate zone (Table 3).

Operational emissions includes all the emissions produced from the energy used to keep the buildings and everything inside it running. According to Bordass (15) the process to estimate CO<sub>2</sub> emissions from operation in buildings involves five steps:

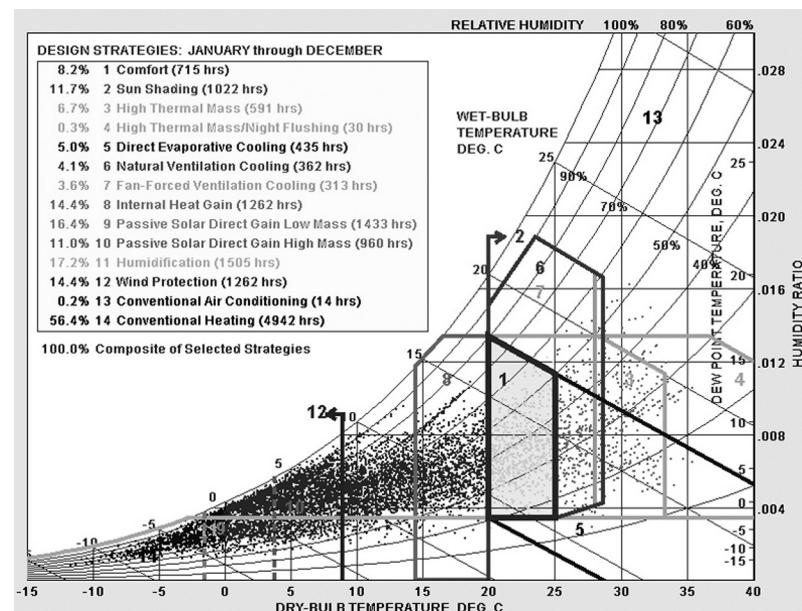
1. Define the boundary of the premises. Boundaries should be where they make practical sense in terms of where the energy can be counted (e.g. the area fed by the meters) and how the area is run (a tenancy, a building, a site; or even a district or a city). One may look at more than one boundary, e.g. for a university the campus, specific buildings, and individual departments; and for a rented building the whole building, and each tenancy.
2. Measure the flows of each energy supply across the defined boundary. Normally this will be annual totals by fuel, though details of load profiles could sometimes be included.
3. Define carbon dioxide factors for each energy supply.
4. Multiply each energy flow by the appropriate carbon dioxide conversion factor to get the emissions associated with each fuel.
5. Add them up to obtain the annual total of CO<sub>2</sub> emissions.

To calculate the CO<sub>2</sub> factors for each energy supply we must determine the emission factors for each one. In the United States there are several methods to determine the conversion factor (16):

- The EPA Power Profiler – calculates CO<sub>2</sub> emission factors for historical yearly average emissions for every U.S. zip code.
- The EPA eGRID – a database that has hourly CO<sub>2</sub> emissions for every U.S. power plant. However, this data is also historical and it is a non-trivial task to estimate marginal generation from this database.
- The NREL Model – they developed direct and indirect impacts for typical building fuels and used CO<sub>2</sub> e (equivalent) which includes other important GHG besides CO<sub>2</sub> like methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). This model generated emission factors for all U.S. regions as well as the nation.



7



8

- The CEC/E3 Model – used the output of a production simulation dispatch model to forecast average and marginal CO<sub>2</sub> emission factors for California.

7. Temperate Climate.

8. Cold Climate.

**Table 3**  
Envelope characteristics

Reference City	Title 24 Package C				Title 24 Package D				
	Wood Ceiling	Frame Walls	Glazing U-Value	EGR (Glazin g Max Area)	Wood Ceiling	Frame Walls	Glazing U-Value	EGR (Glazin g Max Area)	
Calif CZ 16 Cold	Bishop	R49	R29	0.42	14%	R38	R21	0.55	20%
Calif CZ 15 Hot & Dry	El Centro	R49	R29	0.38	16%	R38	R21	0.55	20%
Miami Hot & Humid	Fresno	R49	R29	0.38	16%	R38	R19	0.57	20%
Calif CZ 6 Temperate	Los Angeles	R38	R21	0.42	14%	R30	R13	0.67	20%

Two programs, HEED and Design Builder, were used to predict energy use in the four locations. The results were averaged and are indicated in the following sections.

HEED, Home Energy Efficient Design (17), is an energy analysis tool that calculates the building's performance. When HEED is first launched it asks four questions about the project (building type, square footage, number of stories, and climate location) and with this information it creates Scheme 1, a building that meets the California Energy Code. It then designs a second Scheme that is usually about 30% better. Next it suggests other strategies that designers can test using the remaining seven schemes. HEED makes it very easy for users to change any aspect of the building's design and after each design change HEED shows how the building's performance compares with the initial schemes.

DesignBuilder is a user interface to the EnergyPlus dynamic thermal simulation engine. DesignBuilder features an OpenGL solid modeler, which allows building models to be assembled by positioning, stretching and cutting 'blocks' in 3-D space. 3-D elements provide visual feedback of actual element thickness and room areas and volumes. Data templates allow to load common building constructions, activities, HVAC & lighting systems into the design by selecting from drop-down lists. These templates can also be added. The user can switch between Model Edit View and Environmental performance data which is displayed without the need to run external modules and import data.

The yearly energy used by the building as determined with these programs is multiplied by a conversion factor to determine GHG emissions. Because different locations use different utilities at different times which would further muddle the numbers, the same conversion factors were used for electricity and gas in all the climates: 0.62 k of CO<sub>2</sub> per kWh for electricity, which is the average value for the United States (13) and 0.19 per kWh (5.43 k of CO<sub>2</sub> per therm) for natural gas which is the value proposed by DEFRA (14).

#### **4.2. Construction**

Even though most of a building's emissions originate from its operation, carbon neutrality is more than just the operation of the building and includes the building's life cycle, from fabrication to demolition. GHG emissions from construction processes are usually related to the embodied energy in the building and can be generated in three different distinct stages: a) during the fabrication of the materials used in the building, b) during transportation of materials to the building

and c) during construction of the building. Materials that need more energy to produce, such as steel, aluminum, and cement usually produce more emissions than materials like stone or wood. Local materials usually produce less emissions than materials that have to be transported from longer distances. The construction process also affects the embodied emissions, and an efficient, streamlined semi-prefabricated system will produce less emissions than an inefficient construction process.

There are two major issues that make emissions from building construction difficult to estimate. The first set of issues deals with the fabrication, transportation and construction, processes previously mentioned: there are too many variables that are interconnected and difficult to estimate. For example if we want to estimate the impact of cement bricks we would have to know the origin of the materials used in their fabrication, the distance traveled to the plant, the type of energy used in the plant, the distance traveled to the construction site and the mode of transportation. The second set of issues deals with the accounting of the materials used in the building, which must be multiplied by a conversion factor to determine the total emissions. The multiplication of two unknowns will create an even larger unknown. These quantities are usually only known at the end when the schedule of materials has been prepared, a process which will improve with BIM systems. As buildings become more energy-efficient, and the emissions from building operation decrease, construction emissions will become a more significant portion of the building's total life cycle emissions.

Emissions for construction were calculated using Buildcarbonneutral, (18) a very simple calculator that provides rough results. The following input was used in the calculator: floor area of 214 m<sup>2</sup> (2300 sq ft.), two stories high, structural wood system, mediterranean California ecoregion, previously developed existing vegetation, short grass installed, disturbed landscape of 604 m<sup>2</sup> (6500 sq ft) and 139 m<sup>2</sup> (1500 sq ft) installed. The total emissions from construction were 53 metric tons of CO<sub>2</sub> / year (116,812 lbs). A building lifespan of 50 years was used, which is equivalent to 1061 kg/yr of CO<sub>2</sub>e (2336.2 lbs/year) over the life of the building and the same number was used in all sites. If construction components could be recycled or the life of the building was extended then the impact would be lower. If the building required major renovations then construction related emissions would be higher. More precise data can be generated using Athena Ecocalculator for assemblies. However this

calculator does not provide results for all regions. Results from Buildcarboneutral are not precise, and even though the imprecision could be quite substantial, they can provide a preliminary idea of construction related emissions.

#### **4.3. Waste**

Waste generated from the building must also be treated. More waste requires more treatment and sometimes generates methane, which is a potent greenhouse gas produced in landfills. To calculate emissions from waste, the waste section of the carbon emissions calculator developed by the EPA was used (19). This calculator can estimate the effects of recycling on GHG emissions. Many cities and households recycle but since recycling is still not mandatory in most parts of the United States, for these calculations I did not assume that the household recycled. According to this calculator, emissions from waste for a family of four would be 1856 kg CO<sub>2</sub>e, and if recycling was implemented (plastic, aluminum, newspapers, glass, magazines, etc.) emissions would be reduced to 1044 kg CO<sub>2</sub>e. If more recycling and composting was introduced then emissions would be reduced even more.

#### **4.4. Water**

Water provided to the building and coming from the building must also be treated in a process which usually is also responsible for the generation of GHG emissions. The water that is used in the building must be pumped from the source, then treated to be made potable, and then pumped to the building for consumption. The waste water from the building must also be treated, which also generates carbon emissions, indirectly by using energy for these processes and directly by releasing methane.

A study on Water-Related Energy Use in California by the Assembly Committee on Water, Parks and Wildlife (20) calculated the embedded energy in water for southern and northern California. The study estimated the amount of energy needed for each sector of the water-use cycle in terms of the number of kilowatt-hours (kWh) needed to collect, extract, convey, treat, and distribute one million gallons (MG) of water, and the number of kWh needed to treat and dispose of the same quantity of wastewater. For Southern California the embedded energy per MG is 13,021 kWh. To provide 552670 liters (146,000 gallons) of water per year to a family of four in southern California requires 1901 kWh. If every kWh of electricity in California generates about 0.32 k (0.7 lbs) of

CO<sub>2</sub> (13) then a family of four generates about 605 k (1,331 lbs) of CO<sub>2</sub> / year equivalent to 0.0034 kg of CO<sub>2</sub> / l. This number was used for all sites even though the number for Southern California is probably higher than in the rest of the United States.

#### **4.5. Transportation**

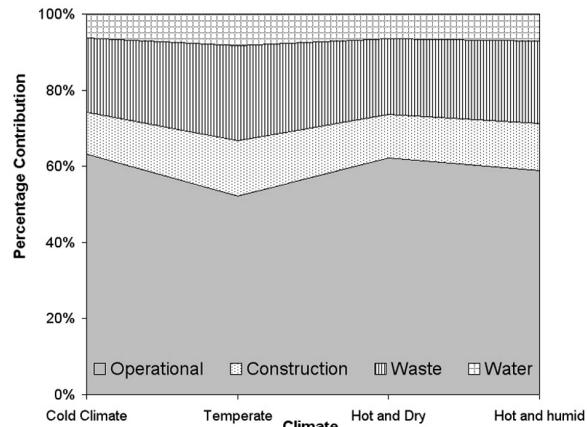
A building is also indirectly responsible for CO<sub>2</sub> emissions from transportation. By its location it affects how the building users move to and from the building. A location close to public transit lines or in urban areas with higher density and walkable neighborhoods usually reduces transportation related carbon emissions. I assumed that each household drove a total of 24140 km (15,000 miles) per year in cars with an efficiency of 9.36 km /l (22 MPG) efficiency. A factor of 2.32 kg of CO<sub>2</sub> per liter (19.4 lbs/Gal) (21) was used, generating a yearly value of 5984 kg of CO<sub>2</sub> per year (13,163 lbs). This value could be assigned to the home, work or divided between both. In this case it was assigned to the home. Emissions from air travel were not included because they are not affected by the location of the residence. Emissions with transportation or without transportation are included for comparison.

### **5. RESULTS: CARBON EMISSIONS IN FOUR CLIMATES**

In the cold climate, the average emissions from operational energy are 6050 kg of CO<sub>2</sub>e, which is 69% of the total emissions (Table 4). To determine the impact of the different sources of operational energy a more detailed analysis that included heating, cooling, fans & blowers, appliances, water heaters, and lighting was performed. This analysis indicates that in the cold climate, after averaging HEED and Design Builder, most of the emissions from operational energy are from heating, 36% plus an additional 6% for fans and blowers. Design Builder indicates a need for more cooling during many mid season days than HEED.

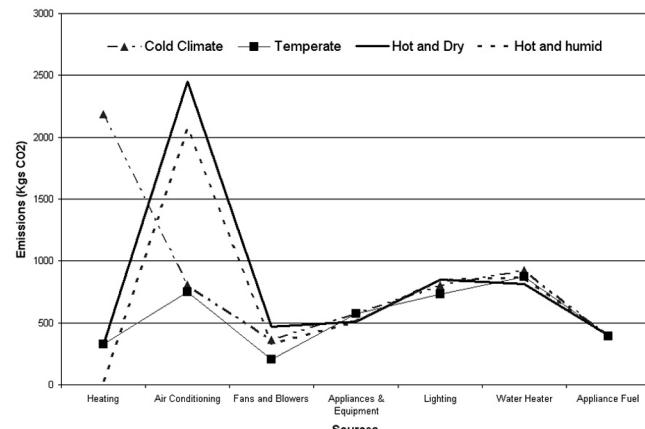
**Table 4**  
Source of CO<sub>2</sub> emissions in different climates  
(Construction, waste and water are constant)

Emissions (lbs CO <sub>2</sub> )	Climate			
	Cold Climate	Temperate	Hot and Dry	Hot and humid
Operational	69%	59%	68%	65%
Construction	12%	16%	12%	14%
Waste	12%	16%	12%	13%
Water	7%	9%	7%	8%
Total	100%	100%	100%	100%



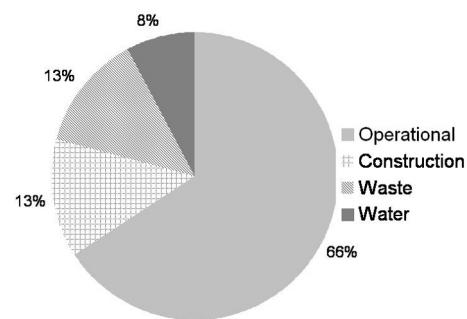
9

9. Source CO<sub>2</sub> emissions in different climates (Construction, waste and water are constant).



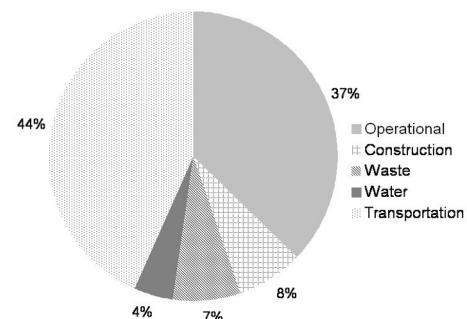
10

10. Source emissions from operational energy in different climates as averaged from HEED and Design Builder.



11

11. Origin of emissions averaged for the four climates (excluding transportation).



12

Emissions from operation are a smaller proportion of all emissions in the temperate climate, averaging 3857 kg of CO<sub>2</sub>e (59% of the total). Heating and cooling are a smaller portion of the total, and water heating and lighting become more important factors.

Operational energy in the hot and dry climate accounts for 5807 kg of CO<sub>2</sub>e, which is a large portion of total emissions (68%). Most of these emissions (41%) are from cooling plus 8% for fans and blowers.

Operational energy in the hot and humid climate accounts for 5052 kg of CO<sub>2</sub>e, or 65% of the total building emissions. Most of the emissions from operational energy in a hot and dry climate are from cooling (40%) plus 7% for fans and blowers which are also part of the HVAC system.

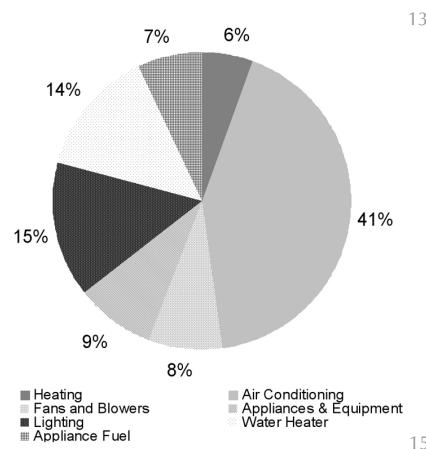
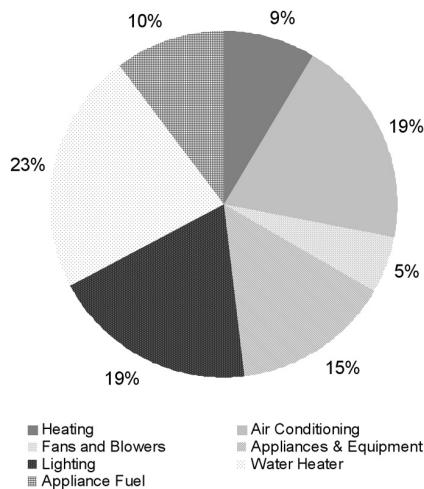
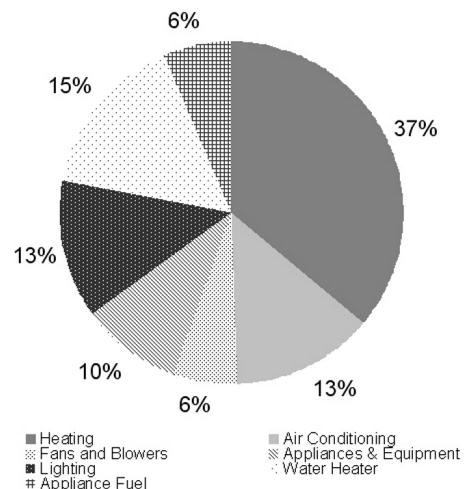
In this reference house, operation is the single largest source of emissions (Fig 9 and Table 4) and in the area of operation, heating and cooling varies by climate but is usually the most important contributor (Fig 10).

## 6. DISCUSSION

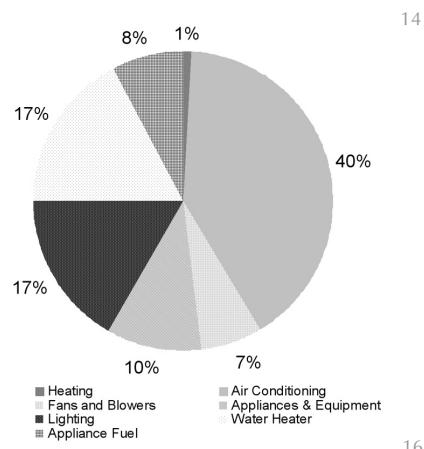
Figure 11 shows the emissions from all sources, averaged for the four climate zones. Operation is clearly the most important source, about 66%. This figure simply shows relative impact of the variables in each climate for this particular building, however, because it does not consider the number, type and size of buildings located in each climate, it is not an accurate representation of the total distribution of emissions in the four climates.

Figure 12 indicates distribution of emissions from all sources, including transportation, averaged for the four climate zones. This figure gives a very general idea of quantities that are directly related to buildings (construction, water, operation, waste) and indirectly related (transportation). The figure for transportation was determined from a distance of 19,312 km (12,000 miles) which is slightly more than the 11,400 miles per year that was the average travel of a vehicle in the United States but much less than 25,000 miles which was the average number of vehicle miles traveled in the United States by a family of four (22).

Energy used for heating and cooling is the biggest source of emissions in all climates. Strategies such as improving wall insulation, more efficient HVAC systems, better, tighter windows combined with passive solar design strategies can reduce these emissions. Diagrams should be created to determine the most pressing issues in each climate and the most effective design strategies. Simple pie charts (Figs. 11 and 12) are used to indicate the source of emissions but other diagrams



15



16

could be developed to help implement effective design strategies. The distribution of these emissions in these charts would help to determine priorities and provide guidance in the effectiveness of different design strategies that could be implemented to reduce these emissions. Operation is the largest source of emissions in all climates, and is most significant in the cold climate (69%) and least significant in the temperate climate (45%). The emissions from heating constitute the most significant factor in the cold climate (37% in Fig. 13) while cooling is the most significant in the hot and dry climate (41% in Fig. 15) and in the hot and humid (40% in Fig. 16). In the temperate climate cooling and lights (19%) are more significant than heating and cooling (Fig. 14). Appliances are also significant sources of emissions in the temperate climate. Heating is assumed as gas powered, if electricity was used for heating it would have a larger contribution. Also, the role of appliances might be underestimated, data can be modified in the simulations to include more energy use from appliances in our ever more wired homes.

## 6.2. Effects of Design Strategies

It is important to establish relationships between GHG emissions and design

strategies. Many types of design strategies affect emissions (e.g. installing overhangs, adding insulation to the walls, using better windows, using passive solar strategies, living close to work, working at home, recycling). To determine the effect of all of these strategies in a building's GHG emissions is out of the scope of this paper. However, the effect of several design strategies on emissions from operation is studied in the four climates. These strategies are the insulation level of the wall, the characteristics of the windows, and the efficiency of the air conditioning and heating systems. For each of these, three levels of quality are calculated (Tables 5, 6, 7). The effect of implementing two passive design strategies (direct gain in the cold climate and night ventilation in the hot and dry) is also calculated. The tightness of the

**Table 5**  
Envelope characteristics

Envelope components (W/m <sup>2</sup> K)	Wall	Roof	Floor
Low Insulation	1.46	1.53	0.53
Medium Insulation California Title 24 Energy Code	0.27	0.15	0.29
Super Insulated Passivhaus Standard	0.15	0.13	0.15

**Table 6**  
Window characteristics

	SHGC	Transmissivity to light	U Value (W/m <sup>2</sup> K)
Single Glazed	0.75	0.77	7.2
Double Glazed	0.55	0.55	3.12
Triple Glazed	0.5	0.51	.79

**Table 7**  
Mechanical systems

	Furnace (AFUE)	Air Conditioning (SEER)
Low Efficiency	72	8.9
Medium Efficiency	78	13
High Efficiency	97	18

**Table 8**  
GHG heating emissions (kg CO<sub>2</sub>e)

CLIMATE	COLD			TEMPERATE			HOT & DRY			HOT & HUMID		
	LOW	MEDIUM	HIGH	LOW	MEDIUM	HIGH	LOW	MEDIUM	HIGH	LOW	MEDIUM	HIGH
NO INSULATION & SINGLE GLAZED	13466	12429	9991	2596	2395	1928	358	358	358	261	239	190
CODE INSULATION & DOUBLE GLAZED	3817	3524	2829	407	369	299	358	358	358	38	33	27
SUPER INSULATED & TRIPLE GLAZED	1477	1363	1091	16	16	16	358	358	358	5	5	5

**Table 9**  
GHG emissions from cooling (kg CO<sub>2</sub>e)

CLIMATE	COLD			TEMPERATE			HOT & DRY	
	COOLING EFFICIENCY	LOW	MEDIUM	HIGH	LOW	MEDIUM	HIGH	LOW
NO INSULATION & SINGLE GLAZED	1893	1296	936	1784	1221	882	9523	6519
CODE INSULATION & DOUBLE GLAZED	1127	771	557	1238	848	612	5100	3491
SUPER INSULATED & TRIPLE GLAZED	1259	862	622	1605	1091	787	4032	2748

17. Emissions in Cold Climate with different strategies including Passive Strategies (Direct Solar Gain).

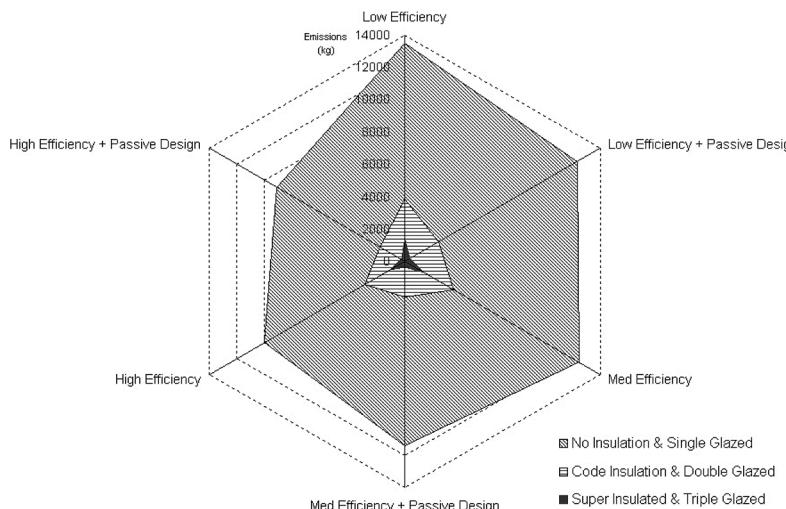
envelope is constant at a maximum of one air change per hour, which is not difficult to achieve. This value was not modified so as to not introduce another variable in the design, even though the more insulated buildings built with Structural Insulated Panels would probably be much tighter.

GHG emissions from heating (Table 8) clearly demonstrate the effect of a better envelope on performance. In the cold climate the emissions with the low performance furnace (72% AFUE), poorly insulated house with single glazed windows is 13,466 kg CO<sub>2</sub>e. When the furnace is updated to 97% AFUE and the house is super insulated, the emissions are reduced to 1091 kgs of CO<sub>2</sub>e which is only 8.1% of the previous amount. If the windows are relocated to the south side,

reduced on the east, west, and north sides, an overhang is added on the south side and the floors are changed to concrete slabs, the emissions are further reduced to 291 kg of CO<sub>2</sub>e (Fig. 17) which is only 2.2% of the original emissions.

By simply adding these three additional “passive solar” changes (windows to the south, overhangs and concrete slabs) reduces the emissions by about 9% in the low quality envelope, 37% in the code quality envelope and 73% in the high quality envelope.

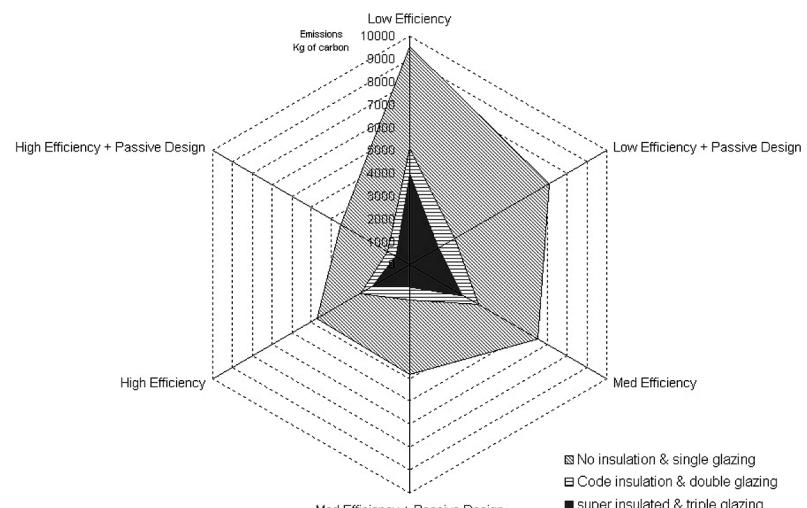
GHG emissions from cooling are also affected by the quality of the envelope and the efficiency of the HVAC system. In the hot and dry climate the emissions with the low performance air conditioning system (8.9 SEER), in the poorly insulated house with single glazed windows is 9,523 kg CO<sub>2</sub>e. When the air conditioning is updated to 97 AFUE and the house is super insulated (see Table 9), the emissions are reduced to 1994 kg of CO<sub>2</sub>e which is only 20.9% of the previous amount. If night ventilation was added to the best envelope with the highest efficiency air conditioning system the emissions would be further reduced to 732 kg of CO<sub>2</sub>e which is only 7.7% of the original value (Fig. 18).



emissions from 13,466 kg CO<sub>2</sub>e to 291 kg CO<sub>2</sub>e in the cold climate and from 9523 kg CO<sub>2</sub>e to 732 kg CO<sub>2</sub>e in the hot and dry climate, clearly demonstrating the power of energy efficient and climate responsive design.

## 7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

There are many carbon counting tools available, most of these online, but there is no single tool that can be used to calculate all building related emissions. Table 10 lists a series of free tools that can be used to determine emissions for residential buildings. The input of these tools can be totalled in a spreadsheet to determine the final number.



18

**Table 10**  
Recommended carbon counting tools for residential buildings

GHG EMISSIONS	TOOL
<b>OPERATIONAL ENERGY</b>	HEED: Home Energy Efficient Design Provides separate results for operation sources: heating, cooling, lights, appliances, fans and water heater. HEED can calculate CO <sub>2</sub> emissions from operation. Energy results in the BEPS screen can also be multiplied by a conversion factor to obtain CO <sub>2</sub> e. <a href="http://www2.aud.ucla.edu/energy-design-tools/">http://www2.aud.ucla.edu/energy-design-tools/</a>
<b>CONSTRUCTION</b>	Build Carbon Neutral Provides a very rough estimate. The total must be divided by the estimated life of the building to obtain CO <sub>2</sub> e per year. <a href="http://buildcarbonneutral.org/">http://buildcarbonneutral.org/</a>
<b>WATER</b>	The amount of energy embedded per unit of volume of water must be multiplied by the CO <sub>2</sub> e conversion factors and the yearly water use in the building to obtain CO <sub>2</sub> e. A CO <sub>2</sub> e factor per Million Gallons is used: 1,331 lbs of CO <sub>2</sub> / MG (0.0034 kg of CO <sub>2</sub> / L )This is the Southern California Factor.
<b>WASTE</b>	EPA Personal Emissions Calculator (waste section) for simple analysis permits to model the effects of reducing home waste and recycling some of the home waste. <a href="http://www.epa.gov/climatechange/ermissions/ind_calculator.html">http://www.epa.gov/climatechange/ermissions/ind_calculator.html</a>
<b>TRANSPORTATION</b>	To obtain emissions from automobiles the number of miles travelled per family is multiplied by the fuel efficiency of the automobile(s) and the emissions factor per litre of fuel. To obtain emissions from public transportation the number of miles travelled per family is multiplied by the CO <sub>2</sub> e factor per mile for that mode of transportation (train, bus). Only automobile was considered in this paper. 2.32 kg of CO <sub>2</sub> per liter with a fuel efficiency of 9.36 km/L (19.56 lbs of CO <sub>2</sub> per gallon of gas and 22 MPG) and a number of miles travelled per year per home of 19,312 Km (12,000 miles) were used.

18. Emissions in Hot and Dry Climates including Passive Strategies (Night Ventilation).

## ACKNOWLEDGMENTS

Some of this research was partially supported by the Society of Building Science Educators' Carbon Neutral Design Project and Energy Design Resources, which is funded by California utility customers and administered by Pacific Gas and Electric

Company, Sacramento Municipal Utility District, San Diego Gas & Electric, Southern California Edison, and Southern California Gas under the auspices of the California Public Utilities Commission. I am also very grateful to Charles Campanella for his invaluable help with many of the energy simulations.

## REFERENCES

- (1) Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Plenary XXVII (Valencia, Spain, 12-17 November 2007), Fourth Assessment Report.
- (2) Meeting the 2030 Challenge Through Building Codes. Edward Mazria, Executive Director, Kristina Kershner, Director 2030, Inc. / Architecture 2030, June 20, 2008 at [http://www.architecture2030.org/pdfs/2030Challenge\\_Codes\\_WP.pdf](http://www.architecture2030.org/pdfs/2030Challenge_Codes_WP.pdf)

- (3) [http://www.pewclimate.org/global-warming-in-depth/all\\_reports/buildings](http://www.pewclimate.org/global-warming-in-depth/all_reports/buildings).(2009)
- (4) [http://www.architecture2030.org/current\\_situation/building\\_sector.html](http://www.architecture2030.org/current_situation/building_sector.html). (2009)
- (5) Levine, M., Ürge-Vorsatz, D., Blok, K., Geng, L., Harvey D., Lang S., Levermore G., Mongameli Mehlwana, A., Mirasgedis, S., Novikova, A., Rilling, J., Yoshino, H.: "Residential and commercial buildings. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- (6) Padgett, P., Stenemann, A., Clarke, J., Vanderbergh, M.: "A Comparison of Carbon Calculators", Environmental Impact Assessment Review Vol. 28 (2008) pp. 106-115.
- (7) Boake, T., Carbon Neutral Design Project. [http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty\\_projects/terri/carbon-aia/tools.html](http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/carbon-aia/tools.html).
- (8) Carbon Trust (2007) "Carbon Footprint Measurement Methodology, Version 1.1", The Carbon Trust, London, UK. <http://www.carbontrust.co.uk>. Cited in "A Definition of 'Carbon Footprint'" 07-01 Wiedmann, T., Minx J., ISAUK Research (2007)
- (9) Wackernagel, M., Monfreda, C., Moran, D., Wermer, P., Goldfinger, S., Deumling, D. and Murray, M. (2005). National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method.
- (10) Rees, William E. (October 1992). "Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out". Environment and Urbanisation vol. 4 (2), pp. 121–130.
- (11) Malin, N. "Counting Carbon: Understanding Carbon Footprints of Buildings", Environmental Building News, July 1, 2008.
- (12) [http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty\\_projects/terri/carbon-aia/tools4.html](http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/carbon-aia/tools4.html) (2009)
- (13) eGRID2006 Version 2.1 (April 2007) Summary Tables.
- (14) United Kingdom Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) fuel emission factors (July 2005)
- (15) B. Bordass, from Solar Cities: the Fundamental Documents. S Roaf and R Gupta. With contributions from Dr Bill Bordass, Chiel Boonstra, Catherine Bottrill and Robert Cohen. An outcome of the meetings of the Carbon Counting Working Group, London UK, 2006.
- (16) Bryan H., Trusty W., "Developing an Operational and Material CO<sub>2</sub> calculation protocol for buildings", SB08 Melbourne, Australia (2009).
- (17) Milne, M.: "A Design Tool for Meeting the 2030 Challenge: Measuring CO<sub>2</sub>, Passive Performance, and Site Use Intensity". American Solar Energy Association Conference (2007), Cleveland, Ohio.
- (18) <http://buildcarbonneutral.org/> (2009)
- (19) personal emissions calculator at [http://www.epa.gov/climatechange/emissions/ind\\_calculator.html](http://www.epa.gov/climatechange/emissions/ind_calculator.html) (2009)
- (20) <http://www.energy.ca.gov/2007publications/CEC-999-2007-008/CEC-999-2007-008.PDF> (2009)
- (21) <http://www.epa.gov/OMS/climate/420f05001.htm> (2009)
- (22) <http://www.eia.doe.gov/emeu/rtecs/chapter3.html>

\* \* \*

## TRADUCCIÓN ESPAÑOL

P. La Roche

**Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero en edificios: análisis del funcionamiento de varias herramientas en diferentes climas****INTRODUCCIÓN**

El calentamiento climático es evidente, como se desprende de los incrementos observados en el promedio global de las temperaturas del aire y del océano, la fundición generalizada de la nieve y el hielo y el aumento del nivel del mar (1). Este calentamiento es causado por un aumento en la concentración de las emisiones de gases invernadero debido a actividades humanas y reducirlas es el desafío más apremiante que enfrenta nuestra civilización. Los edificios son responsables directa o indirectamente de una gran parte de estas emisiones originadas principalmente por el consumo de energía. Es difícil medir la cantidad de energía utilizada solamente por el sector de la construcción, ya que generalmente éste no se considera como un sector independiente y no hay suficientes datos. Diferentes fuentes estiman la energía utilizada por el sector de la construcción entre un 20 y un 50% del total de la energía, lo cual es siempre mayor que las emisiones correspondientes a la industria y el transporte. Según Mazria (2) los edificios son responsables de aproximadamente la mitad de las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en los Estados Unidos de América. Por lo tanto, para tener un impacto real sobre el cambio climático, es esencial hacer frente a las emisiones producidas por el sector de la construcción.

La energía utilizada para operar los edificios suele ser la principal fuente de emisiones de  $\text{CO}_2$  relacionadas con la construcción, incluye la calefacción, la refrigeración, la iluminación y la utilización de aparatos electrodomésticos. Estas emisiones pueden provenir de la energía utilizada directamente en el sitio (como el gas natural) o de las plantas de electricidad. La energía utilizada para operar los edificios representa el 43% (3) de las emisiones totales de  $\text{CO}_2$  y el 76% (4) del consumo de electricidad en los Estados Unidos de América.

De acuerdo al IPCC (5) las edificaciones también proporcionan la oportunidad más económica para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  (Fig. 1). Las medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los edificios se dividen en tres categorías: reducción del consumo energético y la energía incorporada en los edificios, sustitución de los combustibles tradicionales por combustibles de fuentes renovables, y

el control de las emisiones de gases de efecto invernadero de gases no- $\text{CO}_2$ . Un gran número de tecnologías que están disponibles comercialmente, probadas y adoptados en la práctica pueden reducir sustancialmente el consumo de energía mientras que proporcionan los mismos servicios y a menudo importantes beneficios.

**1. HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO DE CARBONO****1.1. Tipos de herramientas para el cálculo de Carbono**

El concepto de huella de carbono ha sido definido de varias maneras, las cuales usualmente incluyen un estimado de las emisiones de dióxido de carbono de una persona en un período determinado (6). Actualmente existen herramientas para el cálculo de la huella de carbono disponibles "on line" para determinar las emisiones de carbono. Aunque no es directamente aplicable en el proceso de diseño arquitectónico, este tipo de herramientas pueden ayudar a generar una idea de la relación numérica entre el estilo de vida, los patrones de consumo y las emisiones (7).

Otras definiciones de la huella de carbono consideran el análisis del ciclo de vida. "The Carbon Trust" las describe como "... una metodología para estimar la emisión total de gases de efecto invernadero (GEI) en equivalentes de carbono de un producto a través de su ciclo de vida, desde la producción de la materia prima utilizada en su fabricación, hasta la eliminación del producto terminado (excluyendo emisiones de partículas contaminantes) (8).

Algunos autores (9) ven la huella de carbono como parte de la huella ecológica. Sin embargo, la huella ecológica indica una demanda de recursos y se expresa en unidades de superficie, hectáreas, o incluso planetas. La huella ecológica, desarrollada por Rees y Wackernagel (10) mide cuanta superficie bioproductiva (en la tierra o en el agua), requiere una población determinada para producir de forma sostenible todos los recursos que consume y para absorber los residuos que genera, utilizando la tecnología dominante. La huella de carbono es una emisión, no una demanda, y se mide en unidades de masa, y no unidades de área.

No sólo las herramientas para el cálculo de huella de carbono generan resultados en diferentes unidades (planetas versus kilogramos), otras complicaciones surgen del hecho de que hay varios gases de efecto invernadero con potencial de calentamiento diferentes. Para determinar el impacto de estos gases en una unidad estándar única, las emisiones de gases de efecto invernadero se convierten en dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ), basado en su potencial de 100 años de calentamiento global. Incluyen dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y  $\text{SF}_6$ , y algunos gases fluorados como los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre. Las emisiones que incluyen varios gases se pueden entonces expresar en  $\text{CO}_2\text{e}$ . Para normalizar los resultados,  $\text{CO}_2\text{e}$  es utilizado en todo el documento, aun cuando el  $\text{CO}_2$  sea la única salida. Una unidad de  $\text{CO}_2\text{e}$  es igual a una unidad de  $\text{CO}_2$ .

Este documento compara un grupo de herramientas que calculan las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la medición de las emisiones totales de un edificio. Un edificio visto como sistema es directamente responsable de la generación de gases de efecto invernadero por su operación, su construcción, uso del agua, y la generación de residuos (11) y también es responsable indirectamente por las emisiones del transporte desde y hacia el edificio. La mayoría de las herramientas disponibles para calcular carbono ofrecen la posibilidad de determinar las emisiones por el uso de la energía en los edificios o por el transporte, pero muy pocas pueden determinar las emisiones causadas por el uso del agua en los edificios, el tratamiento de los residuos, o la construcción. Un pequeño grupo de estas también ofrecen la posibilidad de calcular el impacto de carbono de los alimentos de origen vegetal o animal que comemos. Este último no fue considerado debido a que el arquitecto no tiene ningún control sobre los alimentos que se consumen en el edificio.

**1.2. Emisiones de carbono de los edificios**

Las emisiones totales [Ecuación 1] se obtienen sumando las emisiones directas e indirectas. A los efectos de este documento, las emisiones directas son aquellas

por las cuales el edificio es directamente responsable [Ecuación 2]. Si el edificio se entiende como un subsistema de un sistema mayor, entonces, estas emisiones son el resultado directo de la interacción entre el sistema externo y el sistema de construcción. Por lo general están vinculadas a la piel del edificio o con los insumos y salidas de la edificación como (energía, agua, residuos, materiales). Las emisiones indirectas son afectadas por los atributos del edificio pero no proceden de una interacción directa entre el edificio y el exterior. Las emisiones del transporte son indirectas porque están afectadas por la localización de la construcción, pero no son producidas por el propio edificio o por entradas y salidas con el edificio .

$$Te = Tde + Tide \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$Tde = Oe + Ce + We + Wae \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$Te = Oe + Ce + We + Wae + Tre \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

Emisiones totales	$T_e$
Emisiones directas totales:	$Tde_e$
Emisiones indirectas:	$Tid_e$
Emisiones operacionales	$O_e$
Emisiones por Construcción	$C_e$
Emisiones por Agua	$We$
Emisiones por Desperdicios	$Wa_e$
Emisiones por Transporte	$Tr_e$

La energía utilizada para operar los edificios ( $O_e$ ) suele ser la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero en las edificaciones. Estas emisiones generalmente se catalogan como directas cuando se originan por la energía utilizada "directamente" en el sitio (como el gas natural) o indirecta cuando se originan en la planta de energía (electricidad). Para diferenciarlas de  $Tde_e$  y  $Tid_e$ , éstos se definen como las emisiones directas e indirectas por la operación del edificio. Las emisiones por operación incluyen calefacción, refrigeración, iluminación, calentamiento de agua doméstica y aparatos electrodomésticos y pueden ser directas o indirectas. Por ejemplo, la emisión de una calefacción puede ser directa (si ésta es de gas), o indirecta (si trabaja con electricidad). Estas emisiones pueden determinarse a partir de herramientas de modelaje energético en un edificio propuesto o de la medición en un edificio existente.

Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del proceso de construcción ( $C_e$ ) usualmente se generan durante la fabricación de los materiales utilizados en la construcción, durante el

transporte de materiales para dicha construcción y durante la construcción del edificio.

El consumo de agua en la construcción también genera emisiones de gases de efecto invernadero ( $Wa_e$ ). El agua utilizada en el edificio debe ser bombeada desde la fuente y el tratamiento, mientras que las aguas residuales procedentes del edificio también deben ser tratadas para eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos. Estas emisiones por agua son diferentes a las emisiones por la calefacción de agua doméstica incluida en la operación del edificio.

Los residuos sólidos (no transportados en el agua) procedentes de la construcción también deben ser trasladados desde el edificio y tratados posteriormente generando emisiones ( $Wa_e$ ). Más residuos requieren más tratamiento que usualmente generan más gases de efecto invernadero en forma de metano de los vertederos.

La gente debe moverse hacia y desde el edificio, y el método de transporte utilizado también genera gases de efecto invernadero en cantidades variables (autobús, tren, automóvil) ( $Tr_e$ ).

## 2. HERRAMIENTAS PARA EL CONTEO DE CARBONO

Uno de los principales criterios para la selección de las herramientas comparadas en este documento es que no debían tener costo para el usuario y debían ser de fácil uso para poder ser utilizadas por todos los PROYECTISTAS en las fases iniciales del proceso de diseño arquitectónico, pero con la suficiente precisión que permitieran proporcionar algunos datos útiles para el diseñador. Una tabla completa con las cuarenta herramientas analizadas es presentada por el autor en la página web del Carbon Neutral Design Studio Project (12). Esta tabla incluye además de una imagen representativa de la pantalla de entrada y de salida: a) la dirección URL b) los ámbitos en los que la herramienta calcula las emisiones de carbono y las subáreas en cada uno de estos, c) la facilidad de uso en escala de tres niveles: fácil, moderado y difícil, d) el tiempo para completar la información necesaria medida también en una escala de tres niveles: menos de 5 minutos, entre 5 y 15 minutos y más de 15 minutos, e) las unidades utilizadas y f) las observaciones generales (Fig. 2).

La Tabla 1 incluye todas las herramientas comparadas para este trabajo. La primera columna muestra los nombres de las herramientas, mientras que el resto de las co-

lumnas contiene las diferentes fuentes de emisión: operación, transporte, residuos, la construcción y el agua con sus respectivas subáreas. La mayoría de las herramientas calculan algún tipo de energía de funcionamiento y algún modo de transporte (por lo general automóvil o avión), pero pocos de ellos calculan las emisiones originadas por los residuos, la construcción o el agua. El tono gris en el gráfico indica que la herramienta tiene al menos cierta capacidad de cálculo en esa área, mientras que el rectángulo negro indica mayor capacidad de cálculo en la subárea.

## 3. COMPARANDO EMISIONES CO<sub>2</sub> POR GAS NATURAL Y ELECTRICIDAD EN HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO DE CARBONO

Debido a que muchas herramientas pueden calcular las emisiones de gas y electricidad (Tabla 1), las emisiones por este concepto fueron seleccionadas para establecer un primer punto de comparación, proporcionando los mismos insumos y comparando los resultados obtenidos. No todas las herramientas se pueden comparar, ya que tenían diferentes unidades de medición (por ejemplo, planetas vs kilogramos), entonces sólo se seleccionaron para ser comparadas aquellas herramientas que utilizaban la opción de proporcionar una salida y entrada razonable y comparable (Figuras 3 y 4). La Tabla 2 muestra los datos de entrada utilizados en las herramientas para la comparación.

Se compararon 14 herramientas, que generaron diferentes valores de emisiones de CO<sub>2</sub>. Se introdujo para la electricidad, un valor de entrada de 12.000 kWh, las emisiones varían desde 2.673 kg hasta 8.182 kg de CO<sub>2</sub> al año. El promedio fue de 5.286 kg por año, o 0,44 kg / kWh. El rango de emisiones es de 0,22 a 0,68 kg por kWh (Fig. 3). Como referencia, el factor de emisión promedio de la electricidad producido por la red eléctrica en los EE.UU. es de 0,62 kg/kWh (13) y en el Reino Unido es de 0,43 kWh/kg (14).

En el caso de gas natural se utilizó un valor de entrada para el gas natural de 2.610 m<sup>3</sup>, los resultados oscilaron entre 4.182 kg y 5.465 kg de CO<sub>2</sub> / año. El promedio fue de 5.043 kg de CO<sub>2</sub>, equivalente a 0,187 kg/kWh cercano al factor de emisión de combustible de gas natural propuesto por el DERA (14).

Desafortunadamente la mayoría de estas herramientas no son transparentes y no es fácil determinar los métodos de cálculo y los factores de conversión utilizados. La variabilidad en los resultados generados por las herramientas para el cálculo de CO<sub>2</sub> indica

que probablemente sea mejor seleccionar un factor de conversión y multiplicar por el estimado de energía o por el consumo de la energía registrada utilizada en el edificio.

#### **4. COMPARANDO LAS EMISIONES CO<sub>2</sub> DE LAS DIFERENTES HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO DE CARBONO EN DIFERENTES CLIMAS**

Se analizó una vivienda unifamiliar en cuatro climas diferentes para determinar su efecto en las emisiones. La vivienda tiene dos niveles de 14,63 m por 7,3 m cada para un total de 213 m<sup>2</sup> de superficie, igual a la vivienda promedio en EE.UU. Los cuatro tipos de climas son los clásicos de acuerdo a su efecto en el bienestar térmico humano, y aún cuando la mayoría de los archivos climáticos utilizados son del estado de California, más que representar un clima específico del estado, representan al tipo climático: a) CALIENTE Y SECO representado por la zona climática 15 (El Centro), b) CALIENTE Y HÚMEDO representada por Miami, Florida, c) TEMPLADO representado por la zona climática de California 6 (Los Angeles), y d) FRÍO representado por la zona climática 16 de California; los archivos climáticos de formato Energy Plus Weather (EPW) se utilizaron para las simulaciones y la temperatura y la humedad relativa de estos archivos fueron trazados en las cartas psicrométricas, en las Figuras 5, 6, 7 y 8.

Las emisiones por operación, cambian de acuerdo a las necesidades de climatización.

El edificio utiliza diferentes cantidades de energía para proporcionar bienestar térmico en climas diferentes. Para calcular estas emisiones en los diferentes climas se hicieron algunos supuestos para cada una de las áreas en las que los edificios emiten carbono (la energía de operación, la construcción, residuos, agua y transporte) y las cuales se explican en las secciones siguientes.

##### **4.1. Energía por operacion**

El código de energía de California, Apartado 24 (14) se utilizó para el diseño de la envolvente del edificio en todas las zonas climáticas. Se utilizó un horno de gas con un AFUE del 80%. Se utilizó el mismo envolvente en la zona caliente y húmeda y en la zona de clima caliente y seca (Tabla 3). Las emisiones por operación incluyen todas las emisiones producidas por la energía utilizada para mantener en funcionamiento el edificio y todo lo que esta en su interior. Según Bordass (15) el proceso de estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la operación en los edificios contiene cinco pasos:

1. Definir los límites de la edificación. Estos límites deben estar donde tengan un sentido práctico en términos de contar la energía (por ejemplo, el área cubierta por los medidores eléctricos). Se puede tener más de un límite, por ejemplo, para una universidad pudiera ser el campus, los edificios específicos, y los departamentos individuales, y para un edificio alquilado todo el edificio, y cada uno de los arrendamientos.
2. Medir los flujos de cada fuente de energía a través de los límites establecidos. Generalmente estos son los totales anuales de combustible, aunque se pueden incluir los perfiles de carga.
3. Definir los factores de dióxido de carbono para cada fuente de energía.
4. Multiplicar cada flujo de energía por el correspondiente factor de conversión de dióxido de carbono para obtener las emisiones asociadas con cada combustible.
5. Sumarlas para obtener el total anual de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para calcular los factores de CO<sub>2</sub> para cada fuente de energía se deben determinar los factores de emisión para cada uno. En los Estados Unidos hay varios métodos para determinar el factor de conversión (16):

- El “EPA Power Profiler” perfil del poder EPA. Calcula los factores de emisión de CO<sub>2</sub> de las emisiones de promedio anual históricas para cada código postal de EEUU..
- La “EPA eGRID”. Una base de datos que contiene las emisiones de CO<sub>2</sub> por hora para cada planta eléctrica de EE.UU.. Sin embargo, estos datos también son históricos y no es una tarea trivial estimar la generación a partir de esta base de datos.
- El modelo NREL. Desarrollaron impactos directos e indirectos de los combustibles de un edificio típico, utilizando CO<sub>2</sub>e, que incluye además de CO<sub>2</sub>, otros importantes gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub>, como el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Este modelo genera factores de emisión para todas las regiones de EE.UU., así como un total para toda la nación.

- El modelo de CEC/E3. Recurrió a la utilización de un modelo de simulación para predecir emisiones de CO<sub>2</sub> para California.

Dos programas, HEED y Design Builder, fueron utilizados para calcular el uso de energía en los cuatro lugares. Los resultados fueron promediados y se indican en las secciones siguientes.

HEED, Home Energy Efficient Design (17), es una herramienta de análisis que permite

calcular el desempeño energético del edificio. Cuando HEED se inicia hace cuatro preguntas sobre el proyecto (tipo de construcción, metros cuadrados, número de pisos, y tipo de clima donde esta ubicado el edificio) y con esta información se crea el esquema 1, un edificio que cumple con el Código Energético de California. Luego diseña un segundo sistema que generalmente es alrededor de un 30% mejor que el edificio construido de acuerdo al código. Luego sugiere otras estrategias que el diseñador puede utilizar usando los esquemas restantes. HEED hace que sea muy fácil cambiar cualquier aspecto del diseño del edificio y después de cada cambio de diseño HEED muestra cómo es el desempeño de la construcción comparándolo con los esquemas iniciales.

DesignBuilder es una interfaz de usuario para la simulación térmica utilizando el modelo EnergyPlus. DesignBuilder dispone de un modelador de sólidos OpenGL, que permite la construcción de modelos en tres dimensiones. Estos elementos 3-D proporcionan una percepción visual del espesor real del elemento y de las áreas internas o habitaciones y de los volúmenes. El usuario puede alternar entre la edición del modelo y los datos de desempeño ambiental sin la necesidad de ejecutar los módulos externos y los datos de importación.

Estos programas determinan la energía anual utilizada por el edificio la cual se multiplica por un factor de conversión para obtener las emisiones de gases de invernadero. Debido a que se utilizan diferentes proveedores de electricidad en diferentes lugares, y esto también varía dependiendo de la hora, lo cual puede crear aun más confusión, se utilizan los mismos factores de conversión para la electricidad y el gas en todos los climas: 0,62 kg de CO<sub>2</sub>e por kWh de electricidad, que es el valor promedio de los Estados Unidos (13) y 0,19 kg de CO<sub>2</sub>e por kWh para el gas natural, el cual es el valor propuesto por el DEFRA (14).

##### **4.2. Construcción**

Aun cuando la mayoría de las emisiones de un edificio se originan durante su operación, para lograr la neutralidad en emisiones de carbono se debe conseguir la neutralidad de las emisiones por la operación del edificio. También se deben incluir las actividades que ocurren durante la vida del edificio, desde la fabricación hasta la demolición. Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del proceso de construcción están generalmente relacionadas con la energía incorporada en el edi-

ficio y se pueden generar en tres etapas diferentes: a) durante la fabricación de los materiales utilizados en la construcción, b) durante el transporte de materiales para la construcción y c) durante la construcción del edificio. Los materiales que necesitan más energía para producir, tales como el acero, el aluminio y el cemento, por lo general son responsables de un mayor número de emisiones que materiales como la piedra o la madera. Los materiales locales generalmente producen menos emisiones que los materiales que tienen que ser transportados desde distancias mayores. El proceso de construcción también afecta a las emisiones incorporadas en el material, y un sistema de construcción eficiente, racional y de semi-prefabricados generará menos emisiones que un proceso de construcción ineficiente.

Hay dos problemas importantes que hacen que las emisiones procedentes de la construcción sean difíciles de calcular. El primer grupo de problemas se refiere a la fabricación, el transporte y la construcción: hay demasiadas variables que están interconectadas y son difíciles de estimar. Por ejemplo, si queremos considerar el impacto de los bloques de cemento, tendríamos que conocer el origen de los materiales utilizados en su fabricación, la distancia recorrida a la planta, el tipo de energía utilizada en la planta, la distancia recorrida al sitio de construcción y el modo de transporte. El segundo grupo se refiere a la cantidad de los materiales utilizados en la construcción, que debe ser multiplicado por un factor de conversión para determinar las emisiones. La multiplicación de estas dos incógnitas creará una incógnita aún mayor. Como los edificios se hacen cada vez más eficientes en cuanto al consumo de energía, y las emisiones por operación disminuyen, las emisiones de la construcción se convertirán en una parte más significativa de las emisiones durante la vida del edificio.

Las emisiones por construcción se calcularon utilizando Buildcarbonneutral (18), una herramienta de cálculo muy simple que proporciona resultados aproximados. Se utilizaron los siguientes datos de entrada en la herramienta de cálculo: un área de piso de 214 m<sup>2</sup>, dos pisos de altura, sistema estructural de madera, eco-región climática Mediterránea de California, vegetación existente previamente desarrollada con la hierba corta, paisaje perturbado de 604 m<sup>2</sup> y 139 m<sup>2</sup>. Las emisiones totales de la construcción fueron de 53 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Se estimó la vida del edificio en 50 años, lo cual es equivalente a 1.061 kg / año de CO<sub>2</sub>e durante la vida

útil del edificio. El mismo número se utilizó en todos los lugares. Si los componentes de la construcción se pueden reciclar o la vida de la construcción se puede alargar, el impacto sería menor. Si el edificio requiere de remodelaciones importantes entonces las emisiones relacionadas con la construcción serán más altas. Los resultados de Buildcarbonneutral no son precisos, y aunque la imprecisión es bastante grande, esta herramienta puede proporcionar una idea aproximada de las emisiones relacionadas con la construcción.

#### 4.3. Residuos

Los residuos generados por el edificio también deben ser tratados. Si hay más residuos estos requieren de más tratamiento y a veces generan metano, que es un potente gas de efecto invernadero que puede ser producido en los vertederos de basura. Para calcular las emisiones producidas por los residuos, se utilizó la sección de residuos de la calculadora de emisiones de carbono desarrollada por la EPA (19). Con esta herramienta se pueden también estimar los efectos de reciclado en las emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque en muchas ciudades y hogares se recicla, esto todavía no es obligatorio en la mayor parte de los Estados Unidos, por lo que para estos cálculos no se asumió que el usuario reciclabía. De acuerdo con esta herramienta, las emisiones por residuos para una familia de cuatro sería 1.856 kg/año CO<sub>2</sub>e, y si se recicla (plástico, aluminio, periódicos, vidrio, revistas, etc.) de las emisiones se reducirían a 1.044 kg de CO<sub>2</sub>e. Si posteriormente se incrementa el reciclaje y se incrementa el compostaje, las emisiones se reducirían aún más.

#### 4.4. Agua

El agua suministrada y procedente del edificio también debe ser tratada, y éste es un proceso que también genera emisiones de gases invernadero ya que el agua que se utiliza en el edificio debe ser bombeada desde la fuente, luego se le da el tratamiento necesario para hacerla potable, bombeándose a la edificación para el consumo. Las aguas residuales procedentes de la construcción también deben ser tratadas en forma anaeróbica o aeróbica, lo que también genera emisiones de carbono de forma indirecta mediante el uso de energía para estos procesos y directamente por la liberación de metano.

Un estudio realizado por el Assembly Committee on Water Parks and Wildlife (20) calculó la energía contenida en el agua en California. El estudio estima qué cantidad de energía es necesaria para cada sector de acuerdo al ciclo de uso del agua en función del número de kilovatios-hora (kWh), necesarios para recolectar, extraer, transportar, tratar y distri-

buir un millón de galones (MG) de agua, y el número de kWh necesarios para tratar y disponer de la misma cantidad de aguas residuales. Para el Sur de California la energía contenida por MG es de 13.021 kWh. Para proporcionar 552.670 litros de agua por año para una familia de cuatro en el sur de California se requieren entonces de 1901 kWh. Si cada kWh de electricidad en California genera alrededor de 0,32 kg de CO<sub>2</sub>e (13), una familia de cuatro genera alrededor de 605 kg de CO<sub>2</sub> al año equivalente a 0,0034 kg de CO<sub>2</sub> / l. Este número también se utiliza para los cuatro sitios.

#### 4.5. Transporte

Un edificio también es responsable indirectamente de una cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del transporte. La ubicación del edificio afecta la forma en la cual los usuarios se mueven desde y hacia el edificio. Una ubicación cercana a líneas de transporte público o en zonas urbanas con mayor densidad peatonal generalmente reduce las emisiones de carbono relacionadas con el transporte. Suponiendo que cada familia recorre un total de 24.140 kilómetros por año en sus automóviles, con una eficiencia de 9,36 km/litro y utilizando un factor de 2,32 kg de CO<sub>2</sub> por litro (21), cada familia genera un valor anual de 5.984 kg de CO<sub>2</sub>e al año. Este valor puede ser asignado a la casa, el trabajo o dividirse entre ambos y en este artículo fue asignado a la casa. Las emisiones por transporte aéreo no se incluyeron porque no se ven afectados por la ubicación de la residencia. Las emisiones con transporte o sin transporte están incluidas en la comparación.

### 5. RESULTADOS: EMISIONES DE CARBONO EN CUATRO CLIMAS

En el clima frío, las emisiones por energía operacionales son 6.050 kg de CO<sub>2</sub>e, es decir, el 69% de las emisiones totales (Tabla 4). Para determinar el impacto de las diferentes fuentes de energía en el funcionamiento se realizó un análisis más detallado, que incluye la calefacción, la refrigeración, ventiladores, electrodomésticos, calentadores de agua, y la iluminación. Este análisis indica que en climas fríos, después de promediar los resultados obtenidos por HEED y Design Builder, la mayoría de las emisiones de energía por operación provienen del uso de la calefacción (36% más un 6% adicional por ventilación).

Las emisiones por operación conforman una menor proporción del total de emisiones en clima templado, con 3.857 kg de CO<sub>2</sub>e (59% del total). La calefacción y la

refrigeración son una parte menor del total de operación, y la calefacción del agua, electrodomésticos y la iluminación se convierten en factores más importantes.

La energía operacional en climas calidos secos es responsable de 5.807 kg. de CO<sub>2</sub>e, lo cual es una gran parte de las emisiones totales (68%). La mayoría de estas emisiones (41%) son por enfriamiento y 8% por ventilacion.

La energía operacional en climas calido húmedos cuenta es responsable de la emisión de 5.052 kg de CO<sub>2</sub>e, lo cual consiste en el 65% de las emisiones de construcción total. La mayoría de las emisiones de energía operacionales en clima cálido seco son por enfriamiento (40%) más el 7% por ventiladores, que también son parte del sistema de climatización.

En la casa utilizada como referencia, la operación es la mayor fuente de emisiones (Fig. 9 y Tabla 4) y en el area de operaciones, calefacción y refrigeración varía según el clima, pero normalmente es el factor más importante (Fig. 10).

## 6. DISCUSIÓN

La Figura 11 muestra las emisiones de todas las fuentes, promediadas para las cuatro zonas climáticas. La operación de la edificación es claramente la fuente más importante, alrededor del 66%. Esta cifra muestra el impacto relativo de las variables en cada clima para este edificio. Sin embargo, debido a que no considera el número, tipo y tamaño de los edificios ubicados en cada clima, no es una representación exacta de la distribución total de las emisiones en los cuatro climas.

La Figura 12 indica la distribución de las emisiones de todas las fuentes, incluido el transporte, promediadas para las cuatro zonas climáticas. Esta cifra da una idea muy general de las cantidades que están directamente relacionadas con los edificios (la construcción, el agua, el funcionamiento, los residuos) e indirectamente relacionadas (transporte).

La cifra para el transporte se determinó a partir de una distancia de 19.312 kilómetros (12.000 millas), ligeramente superior a los 11.400 millas por año, que fue el promedio de viaje de un vehículo en los Estados Unidos, pero mucho menos de 25.000 millas, que fue el número promedio de millas recorridas por vehículo en los Estados Unidos por una familia de cuatro miembros (22).

La energía utilizada por la calefacción y el enfriamiento es responsable por la mayor cantidad de emisiones en todos los climas. Las estrategias, como mejorar el aislamiento de las paredes, sistemas de enfriamiento y calentamiento más eficientes, ventanas mejores y más herméticas, combinadas con estrategias de diseño solar pasivo pueden reducir estas emisiones. Se deben generar diagramas de diferentes tipos como causa efecto para determinar los problemas más acuciantes en cada clima y las estrategias de diseño más eficaces. En este artículo se utilizaron gráficas de tarta (Figuras 11 y 12) para indicar la fuente de las emisiones, y otros tipos de diagramas pueden tambien ser desarrollados para ayudar a implementar el diseño de estrategias eficaces. La distribución de estas emisiones en estos cuadros ayudaría a determinar prioridades y la eficacia de diferentes estrategias de diseño que podrían aplicarse para reducir estas emisiones. La operación es la mayor fuente de emisiones en todos los climas, siendo más significativa en climas fríos (69%) y menos significativa en clima templado (45%). Las emisiones de calefacción constituyen el factor más significativo en climas fríos (37% en la Figura 13), mientras que el enfriamiento es el más significativo en climas calido seco (41% en la Figura 15) y en climas calido húmedo (40% en la Figura 16). En el clima templado el enfriamiento e iluminación (19%) son ligeramente más importantes que la calefacción y la refrigeración (Fig. 14).

Los aparatos electrodomésticos son también fuentes importantes de emisiones en el clima templado. En todos los casos se asume que el edificio tiene una calefacción que funciona con gas natural, pero si la electricidad se utilizara para la calefacción, probablemente habría una mayor contribución por parte de la calefacción. En estas simulaciones tal vez el papel de los aparatos electrodomésticos esté subestimado, pero los datos se pueden modificar en posteriores simulaciones para incluir un uso cada día mayor de energía de los aparatos electrónicos en nuestros hogares.

Es importante establecer relaciones entre las emisiones de gases invernadero y las estrategias de diseño. Muchos tipos de estrategias de diseño pueden afectar a las emisiones (por ejemplo, la colocación de voladizos, añadir aislamiento en las paredes, utilizar mejores ventanas, utilizar estrategias de energía solar pasiva, viviendas cerca de las fuentes de trabajo, trabajo desde la casa, reciclaje, etc.). Determinar el efecto de todas estas estrategias en las emisiones de gases de efecto invernadero de un edificio está fuera del alcance de este artículo. Sin embargo se hace una primera aproximación estudiando

el efecto de varias estrategias de diseño en las emisiones por operación. Estas estrategias son: el nivel de aislamiento de la pared, las características de las ventanas, la eficiencia de los sistemas de enfriamiento y de los sistemas de calefacción. Para cada uno de éstos se calculan tres niveles de calidad (Tablas 5, 6, 7). También se calcula el efecto de la aplicación de dos estrategias de diseño pasivo (ganancia directa en el clima frío y ventilación nocturna en clima cálido seco). El nivel de hermetismo de la edificación es constante, con un máximo de un cambio de aire por hora, lo cual no es difícil de lograr. Este valor no se ha modificado a fin de no introducir otra variable en el diseño, aunque los edificios construidos con más aislamiento y con paneles estructurales aislantes probablemente serían mucho más herméticos.

Las emisiones de gases de efecto invernadero por calefacción (Tabla 8) demuestran claramente el efecto de una mejor envolvente en el rendimiento. En climas fríos, las emisiones por calefaccion de bajo rendimiento (72% AFUE), viviendas con poco material aislante y con ventanas de cristales simples, son de 13,466 kg CO<sub>2</sub>e. Cuando la calefacción se mejora a 97 AFUE% y las paredes de la casa contienen mucho más aislamiento, las emisiones se reducen a 1,091 kilos de CO<sub>2</sub>e lo cual es sólo el 8,1% de la cantidad anterior. Si las ventanas se ubican en la fachada sur, y se reducen en el este, oeste y la norte, se añade un voladizo en el lado sur y los pisos se cambian por losas de hormigón, las emisiones se reducen más todavía a sólo 291 kg de CO<sub>2</sub>e (Fig. 17), lo cual es sólo el 2,2% de las emisiones originales. Si se estudian por separado, añadiendo estas tres nuevas estrategias "solares pasivas" (ventanas hacia el sur, los voladizos y losas de hormigón) se reducen las emisiones alrededor de un 9% en envolventes de baja calidad, 37% en la vivienda connstruída de acuerdo al código energético y 73% en envolventes de alta calidad.

Las emisiones de gases de efecto invernadero ocasionadas por enfriamiento también se ven afectadas por la calidad de la envolvente y la eficiencia del sistema de climatización. En climas cálidos secos las emisiones en una vivienda con un sistema de aire acondicionado de bajo rendimiento (8,9 SEER), y pobemente aislada, y con ventanas de un solo cristal es de 9,523 kg. de CO<sub>2</sub>e. Cuando se actualiza a 97 AFUE el aire acondicionado y la casa está muy aislada (véase la Tabla 9), las emisiones se reducen a 1.994 kg de CO<sub>2</sub>e que es solamente el 20,9% de la cantidad anterior. Si se añade ventilación nocturna a la mejor

envolvente con un sistema de aire acondicionado más eficiente, las emisiones se reducirían a 732 kg de CO<sub>2</sub>e lo cual es sólamente el 7.7% del valor original (Fig. 18). La ventilación nocturna, el sombreado de las ventanas de la fachada sur y la utilización de masa térmica, reducen las emisiones en aproximadamente un 26% en edificios pobremente aislados, un 55% en edificios construidos de acuerdo al código de construcción y un 63% en edificios superaislados (Fig. 18). Aplicando estas simples estrategias de diseño (mejor envolvente, sistemas mecánicos eficientes y estrategias de diseño pasivo) se reducirían las emisiones de CO<sub>2</sub>e de 13.466 kg a 291 kg de CO<sub>2</sub>e en climas fríos y de 9.523

kg a 732 kg de CO<sub>2</sub>e en climas cálidos secos, lo que demuestra claramente el poder de uso energías eficientes y de un diseño más sensible al clima.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el mercado existen muchas herramientas para el cálculo de carbono, y las cuales son accesibles "on line". Sin embargo, no existe una herramienta única que pueda ser utilizada para calcular todas las emisiones relacionadas con la construcción.

En la Tabla 10 se enumeran un conjunto de herramientas que pueden ser utilizadas para

determinar las emisiones en todas las áreas relacionadas con los edificios residenciales. Los datos de entrada de estas herramientas puede ser sumados en una hoja de cálculo para determinar el número final.

## AGRADECIMIENTOS

Parte de este proyecto fue financiado por la Society of Building Science Educators a través del Carbon Neutral Design Project y Energy Design Resources, financiado por los clientes de las compañías de electricidad de California. También estoy muy agradecido a Charles Campanella por su ayuda en muchas de las simulaciones térmicas.

## FIGURAS Y TABLAS

1. Potencial de mitigación por sector económico estimado en 2030 comparados con puntos de referencia. Los potenciales no incluyen las opciones no técnicas, tales como cambios de estilo de vida. Fuente IPCC: 2007.
2. Porción de la tabla de la página web Carbon Neutral Design.
3. CO<sub>2</sub> emisiones por electricidad en kg de CO<sub>2</sub> per kWh usadas por las 14 herramientas.
4. Emisiones de CO<sub>2</sub> por gas natural normalizadas en kg de CO<sub>2</sub> per therm de gas usadas por las 14 herramientas.
5. Clima cálido seco.
6. Clima cálido húmedo.
7. Clima templado.
8. Clima frío.
9. Origen de emisiones de CO<sub>2</sub> en diferentes climas (construcción, residuos y agua son constantes).
10. Origen de las emisiones de energía de operación en diferentes climas promediados de HEED y Design Builder.
11. Origen de las emisiones promediadas en los cuatro climas (excluye el transporte).
12. Origen de las emisiones promediadas en los cuatro climas (incluyendo el transporte).
13. Fuentes de emisiones por operación para el clima frío.
14. Fuentes de emisiones por operación para el clima templado.
15. Fuentes de emisiones por operación para el clima caliente y seco.
16. Fuentes de emisiones por operación para el clima caliente y húmedo.
17. Las emisiones en clima frío, con estrategias diferentes, incluyendo las estrategias pasivas (Ganancia solar directa).
18. Las emisiones en climas cálidos secos, incluyendo las estrategias pasivas (ventilación nocturna).

### Tabla 1

Comparación de herramientas calculadoras

### Tabla 2

Datos de entrada para la herramienta

### Tabla 3

Características de la envolvente de la edificación

### Tabla 4

Fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub> en distintos climas (emisiones por construcción, residuos y agua son constantes)

### Tabla 5

Características de la envolvente

### Tabla 6

Características de las ventanas

### Tabla 7

Sistemas mecánicos

### Tabla 8

Emisiones de gases de efecto invernadero por calentamiento (kg de CO<sub>2</sub>e)

### Tabla 9

Emisiones de gases de efecto invernadero por refrigeración (kg de CO<sub>2</sub>e)

### Tabla 10

Herramientas para el cálculo de emisiones de gases invernadero para edificios residenciales

\* \* \*