



Alma Mater Studiorum
Il Facoltà di Ingegneria

Radiazione solare ed efficienza energetica in ambiente urbano

docente: Vittorio Degli Esposti

Informazioni sulla lezione

- Lucidi disponibili al sito:
<http://www.elettra2000.it/vdegliespsti>
- Si consiglia comunque di prendere appunti

Contenuto

- 0** **INTRODUZIONE - PANORAMICA GENERALE**
- I** **ONDE ELETTROMAGNETICHE E RADIAZIONE SOLARE**
- II** **INTERAZIONE CON LA MATERIA**
- III** **RADIAZIONE SOLARE E AMBIENTE URBANO**
- IV** **UN PROGRAMMA PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA
ENERGETICA DI UN'AREA URBANA - ESEMPI**

Introduzione - Panoramica generale

Definizioni: potenza ed energia

I consumi energetici

Fonti energetiche: la radiazione solare

Energia e aree urbane

Problematiche ambientali, effetto serra, riscaldamento globale, isola di calore

Potenza ed energia

- **Forza:** Newton [N] ~ forza di gravità di una massa di un etto
- **Energia:** Joule [J] $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ (=lavoro)
 $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$
- **Energia (II):** Tonnellata Equivalente di Petrolio [TEP] ~ 42 GJ
(energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di greggio)
- **Energia termica** Caloria [Cal] ~ 4.2 J
(energia x scaldare 1 g di acqua di 1 °C)
- **E. termica (II)** [BTU] ~ 1 055 J (252 Cal)
(energia x scaldare 1 pound (0.454 kg) di acqua di 1 F)
- **Potenza:** Watt [W]
- 1 kilo Watt-ora [kW-h] è l'energia corrispondente ad 1 kW per la durata di 1 ora = 3.6 MJ (Mega Joules)

Come riferimento

Una **TEP** corrisponde all'incirca al consumo elettrico di una famiglia italiana in un anno

Una Tonnellata di CO₂ [**TCO₂**] è la misura delle emissioni di anidride carbonica

In genere bruciando 1 TEP si producono 2-3 TCO₂

Una TCO₂ corrisponde all'incirca alle emissioni di un'automobile di medie dimensioni per una percorrenza di 7000 km

Una TCO₂ corrisponde all'incirca all'assorbimento di 1300 m² di foresta in un anno

Energia solare e consumi

Potenza irradiata sulla terra: 174 PW (PetaWatt, 10^{15}W) di cui il 30% riflesso indietro

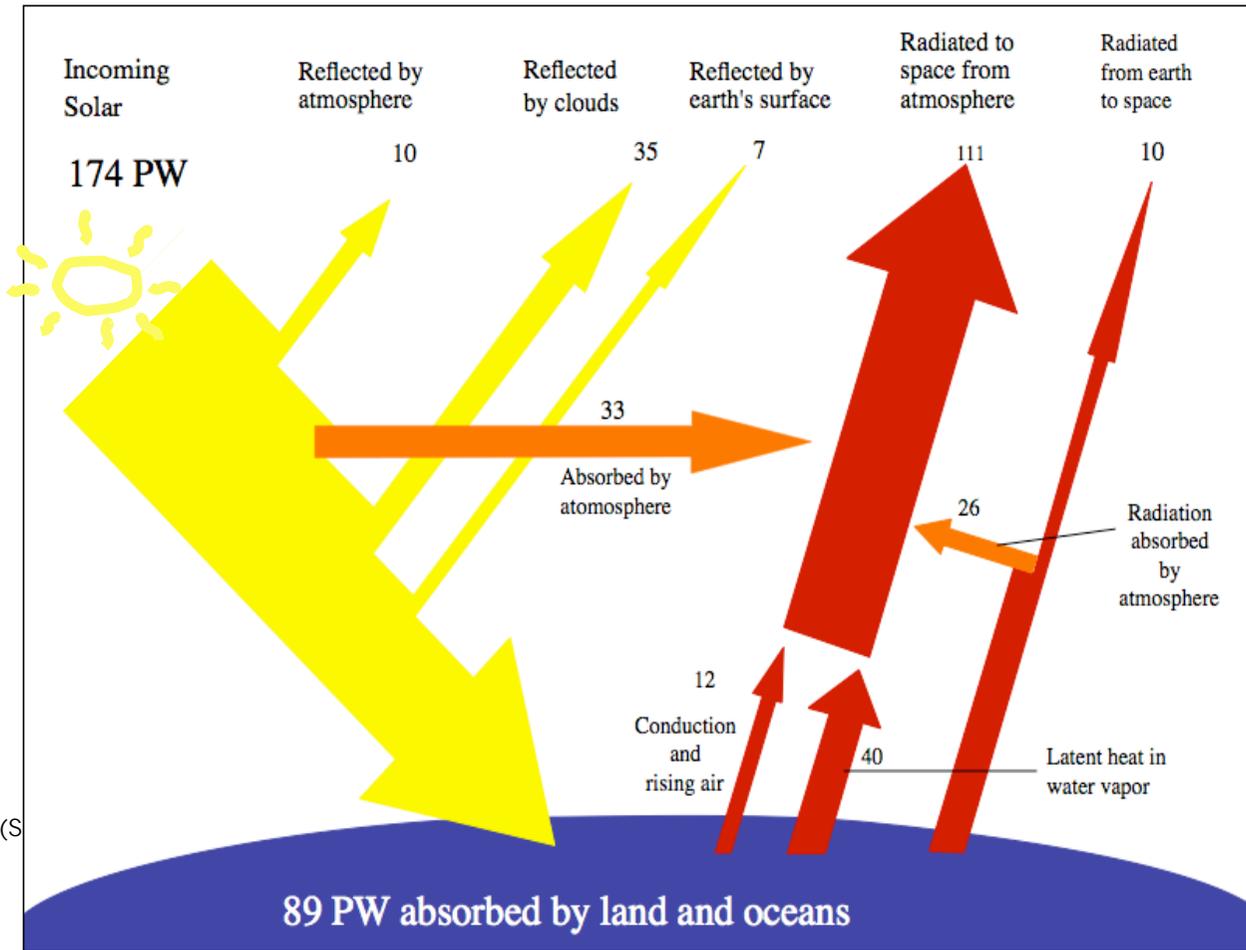
Energia in un anno: 5.5×10^{24} J

Consumi mondo 4.7×10^{20} J in 2008 (80-90% da combustibili fossili)

Quindi il sole irradia sulla terra 11000 volte l'energia necessaria all'uomo

Non tutta è sfruttabile...

Energia solare (II)



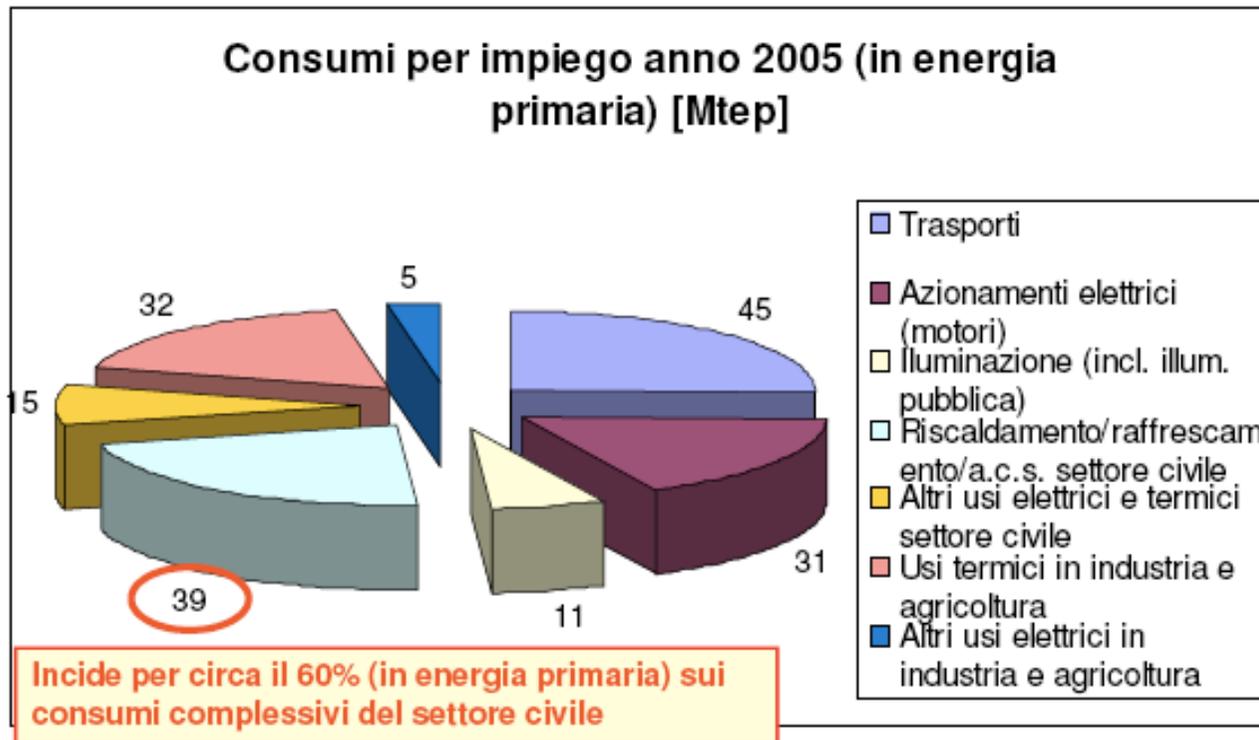
Pero' anche solo sfruttando i deserti:

$20 \times 10^6 \text{ km}^2$ (senza antartide e polo $\sim 26 \times 10^6 \text{ km}^2$) si avrebbe:

$\sim 10 \text{ PW}$, quindi in un anno $0.3 \times 10^{24} \text{ J}$,

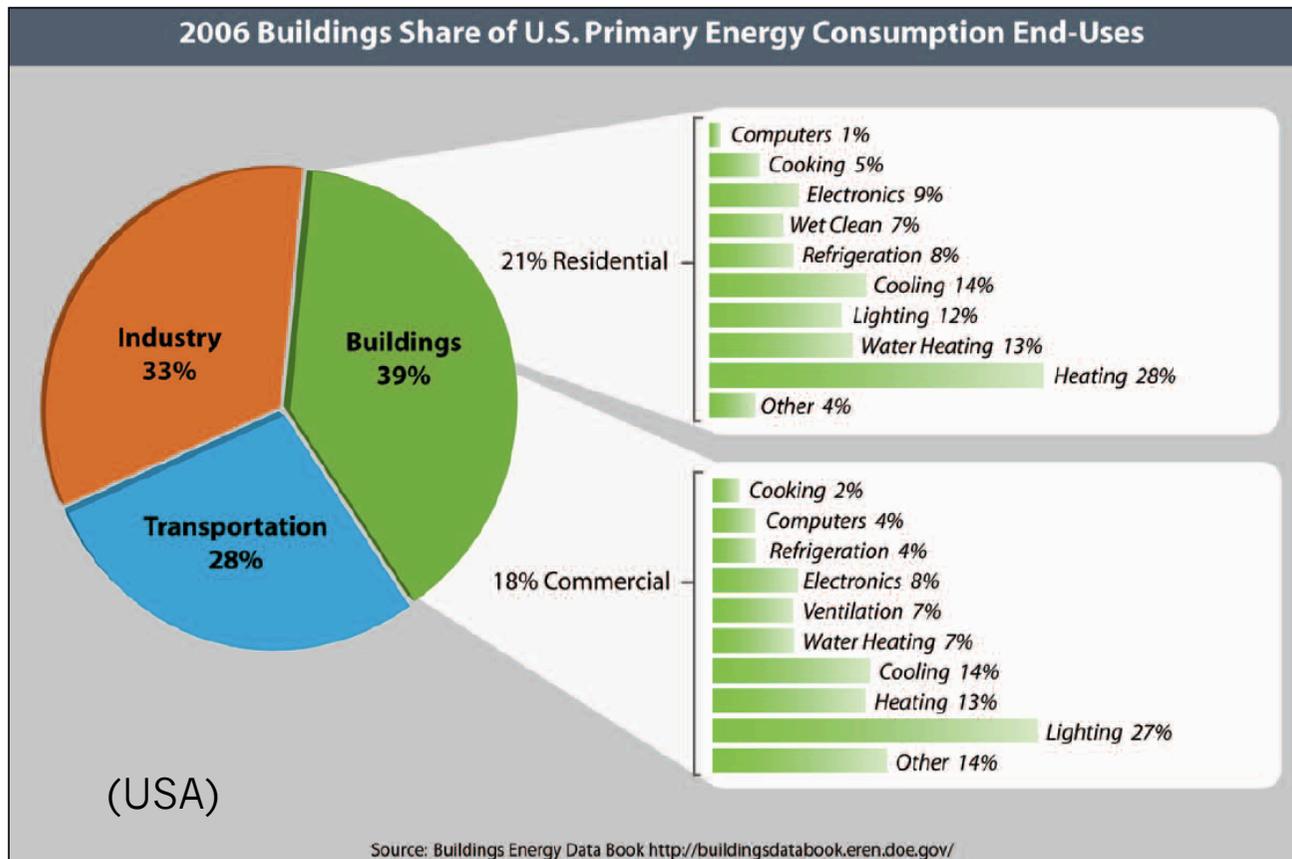
670 volte il fabbisogno!

Consumi energetici (I)



(Italia)

Consumi energetici (II)



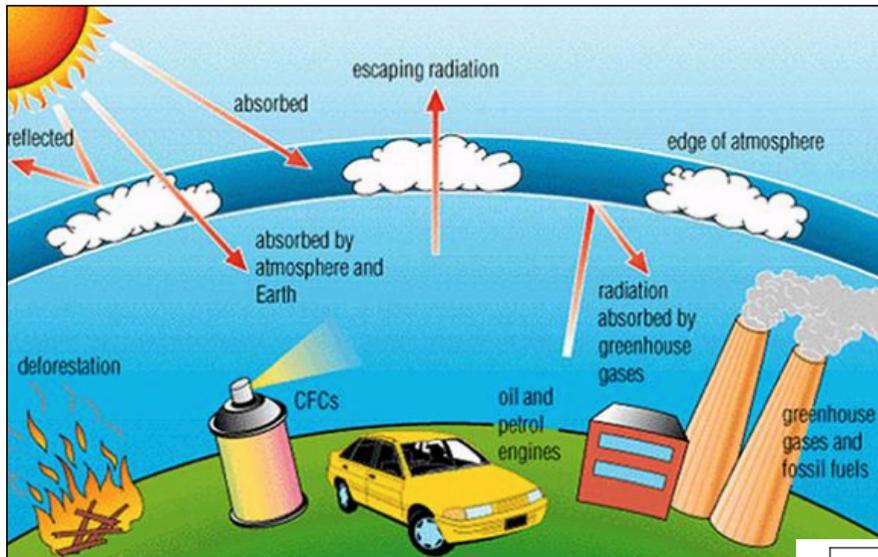
Negli USA il 25% circa dell'energia è impiegata nel condizionamento (raffrescamento) !

Consumi energetici ed aree urbane

- Ormai più del 50% della popolazione mondiale vive nelle aree urbane, il 75% in Europa !
- Le aree urbane occupano ormai il 2.5% di tutte le terre emerse e il 10% del suolo utile in Europa
- In Lombardia: 13,7% del suolo totale e si ha una crescita di 10,2 ha al giorno! (prevalentemente a scapito di aree agricole ad elevato valore agronomico)
- Nelle aree urbane si consuma il 75% dell'energia complessiva

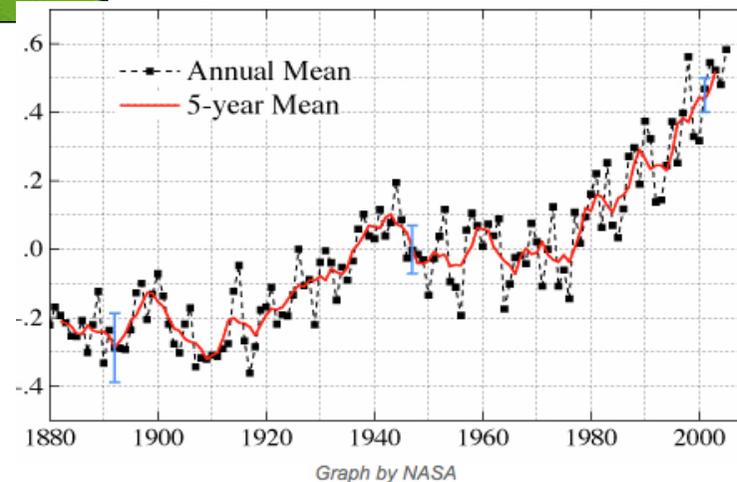


Consumi energetici ed effetto serra (I)



- La produzione di energia da combustibili fossili (combustione) produce CO₂, cioè gas serra
- Il contrario della combustione è la fotosintesi in cui la pianta “fissa” il CO₂ nelle fibre vegetali e nel legno

- L'effetto serra sta portando ad un aumento relativamente veloce della temperatura globale



Composizione dell'atmosfera

<small>ppmv: parts per million by volume</small> Composition of dry standard atmosphere, by volume (sea level)	
Gas	Volume
Nitrogen (N ₂)	780,840 ppmv (78.084%)
Oxygen (O ₂)	209,460 ppmv (20.946%)
Argon (Ar)	9,340 ppmv (0.9340%)
Carbon dioxide (CO ₂)	383 ppmv (0.0383%)
Neon (Ne)	18.18 ppmv
Helium (He)	5.24 ppmv
Methane (CH ₄)	1.745 ppmv
Krypton (Kr)	1.14 ppmv
Hydrogen (H ₂)	0.55 ppmv
Not included in above dry atmosphere:	
Water vapor (H ₂ O)	typically 1% to 4% (highly variable)

Standard atmosphere
Pressure: 1013 hPa
Temperature: 15 °C
Humidity: 7.5 g/m³ (1%)

Consumi energetici ed effetto serra (II)

- La concentrazione di CO₂ è cresciuta da 280 fino a 384 ppmv (0.038% in vol.), quasi 40 % in più rispetto al 1800 !!
- La concentrazione di ossigeno è leggermente calata in percentuale (ma su valori assoluti molto maggiori) rispetto ai valori pre-industriali
- Ormai è chiaro che queste variazioni sono dovute all' attività umana post-industriale
- I consumi energetici, e quindi le emissioni di CO₂, sono in crescita quasi ovunque e soprattutto nei paesi emergenti
- Il riscaldamento globale rischia di scongelare ampie fasce di permafrost in Siberia e Canada, liberando metano ed innescando un circolo vizioso

Come ridurre i consumi (metodi tradizionali)

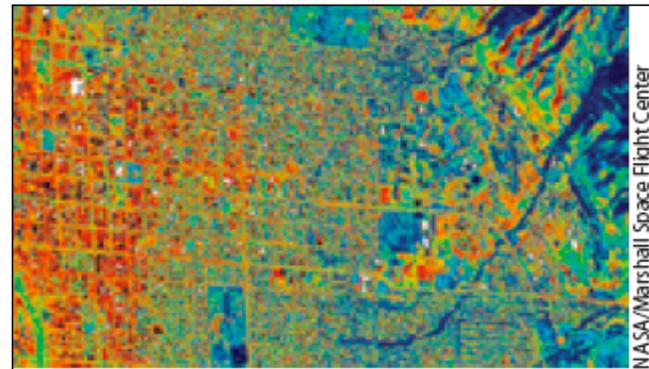
- [Protocollo 20-20-20](#) del 2008: ridurre del 20% le emissioni di CO₂, aumentare del 20% l'efficienza energetica e incrementare del 20% la quota di energie rinnovabili entro il 2020
- Principali metodi proposti:
 - Miglioramento efficienza macchine (automobili, motori elettrici, macchine termiche ecc.)**
 - Cogenerazione**
 - Efficienza energetica degli edifici**
 - Energie rinnovabili (solare, eolico, ecc.)**
 - Valorizzazione rifiuti e biomasse**
 - Ottimizzazione trasporti**
 - Aumento delle aree verdi**

Come ridurre i consumi (metodi innovativi)

- L'ambiente è un *organismo unitario* (non compartimenti stagni!)
- Si hanno interazioni fra diversi fattori o elementi che hanno forte impatto sulla efficienza energetica complessiva
- Si è definito lo studio interdisciplinare di tali interazioni **GEO-INGEGNERIA**, che comprende anche tecniche per intervenire
- A volte le interazioni creano cicli a retroazione positiva che creano picchi fortissimi di consumo energetico o di emissioni serra.

Esempio:

Isola di calore urbana
(Urban heat island)



Isola di calore urbana



Cambiamento del paesaggio:

- Strade ed edifici
- Automobili
- Impermeabilizzazione delle superfici
- Condizionatori → Retroazione Positiva



Fenomeno di innalzamento della temperatura:

- +1-3°C rispetto alle zone rurali (di giorno)
- +7-12°C rispetto alle zone rurali (di notte)



Nel seguito....

- Elementi di base di Geoingegneria
- Breve approfondimento dei fenomeni di interazione fra radiazione solare e ambiente urbano
- Breve approfondimento dell'Isola di Calore Urbana
- Cenni su come valutare l'efficienza energetica di un'area urbana e su come intervenire per migliorarla

Onde Elettromagnetiche e Radiazione Solare

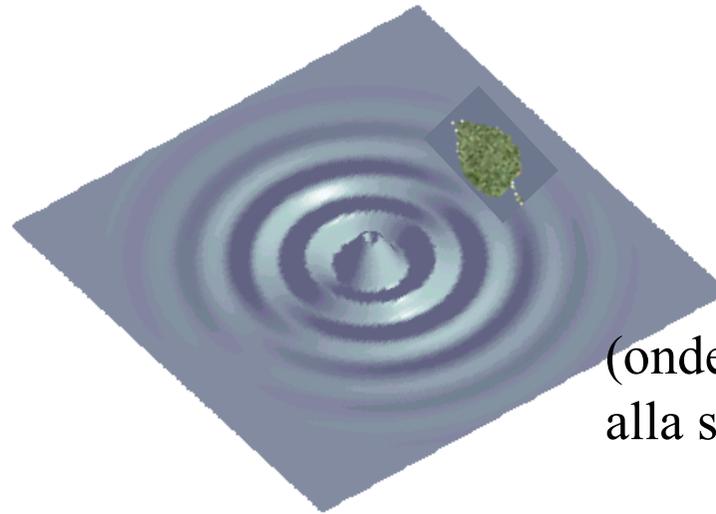
Cos'è un'onda elettromagnetica

Definizioni di base

Proprietà della radiazione solare

Insolazione, potenzialità di sfruttamento

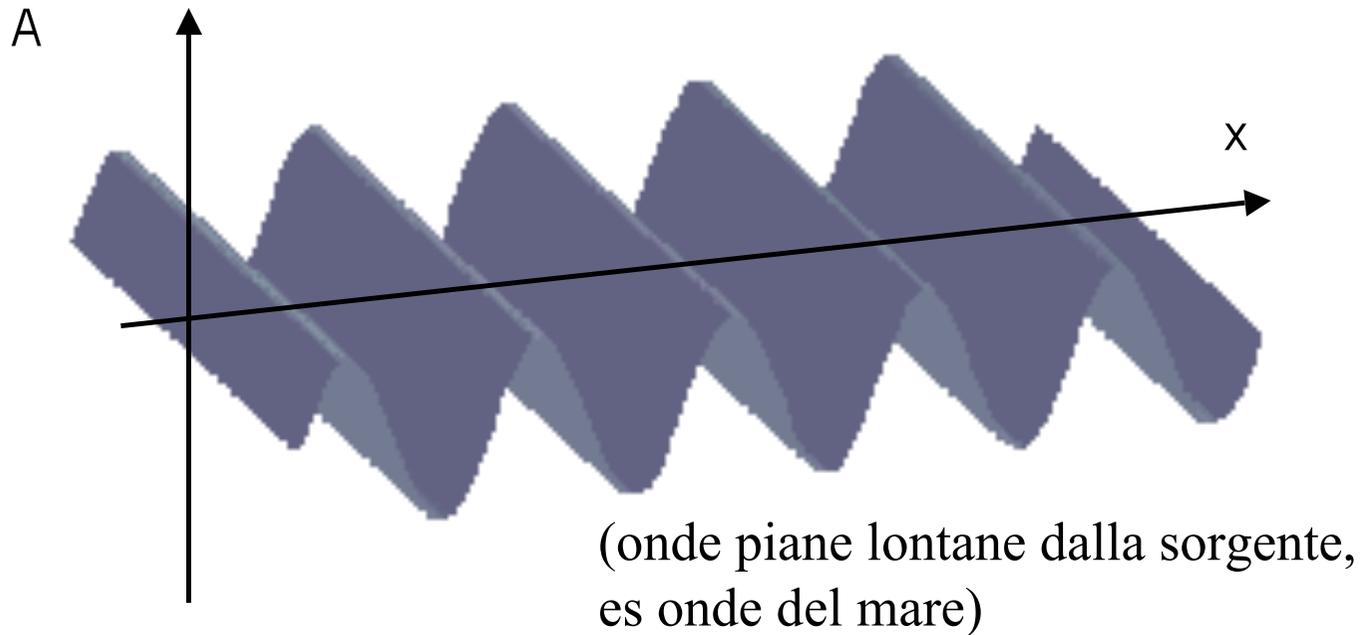
Le onde



(onde sferiche vicine
alla sorgente)

Avendo una foglia sull'acqua, se lanciassimo un sassolino, si creerebbero oscillazioni ma la foglia resterebbe sempre nello stesso punto. Ciò significa che le onde trasportano energia e non materia.

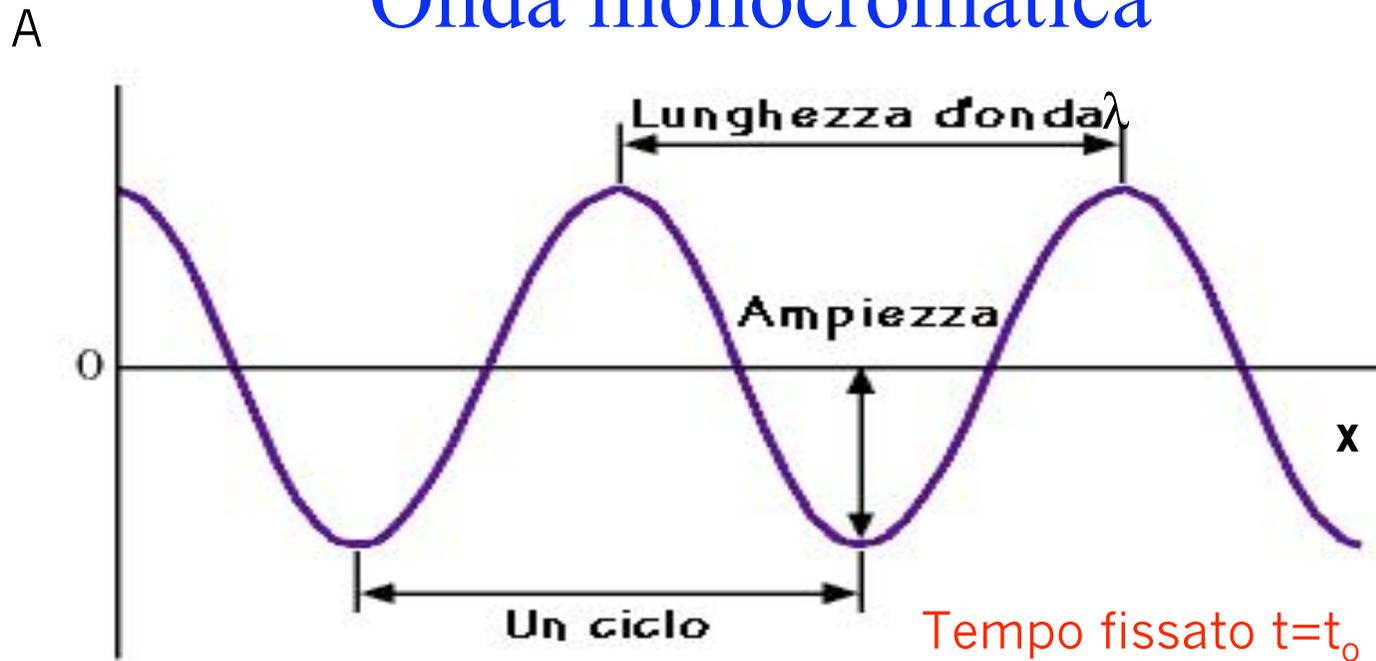
Le onde (II)



Oscillazioni di una grandezza fisica A che si ripetono periodicamente nel tempo e nello spazio secondo l'espressione

$$A=F(x-vt)$$

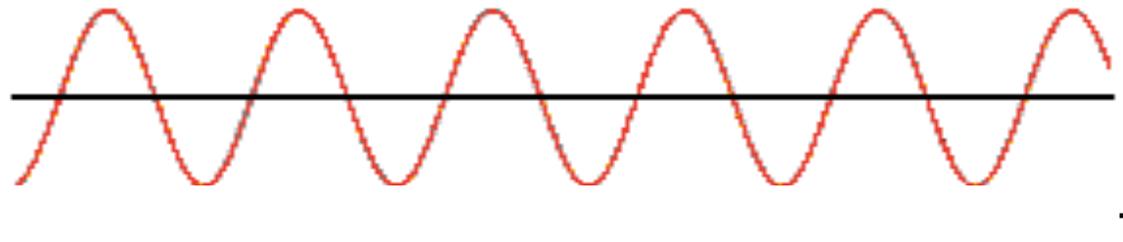
Onda monocromatica



A è la grandezza che oscilla sinusoidalmente, λ è la lunghezza d'onda (distanza tra due creste o due gole, tra due massimi e due minimi).

$$A = k \cos(x - vt)$$

Onda monocromatica (II)



Spazio fissato $x=x_0$

100 MHz= la grandezza varia 100 milioni di volte al secondo

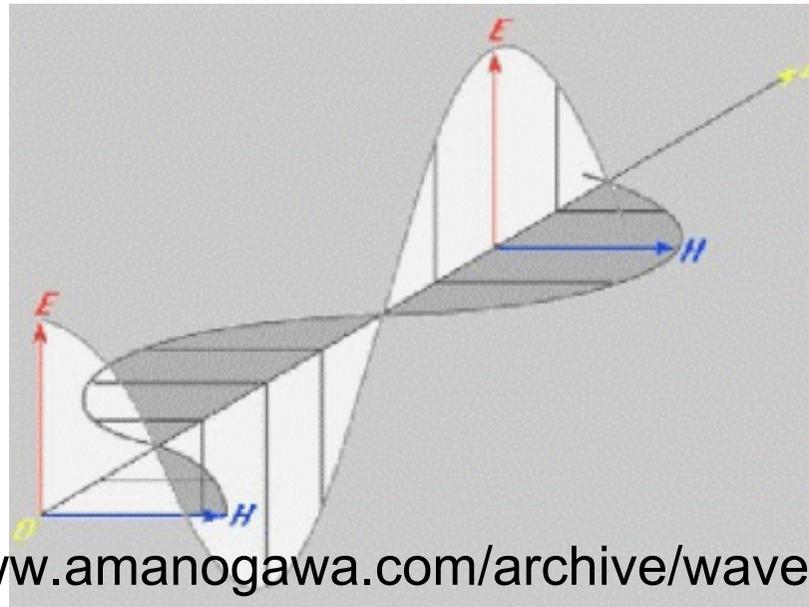
$$v = \lambda \cdot f$$

v = velocità dell'onda [m/s], λ = lunghezza d' onda [m]

f = frequenza [Hz]

Per onde radio a 100 MHz, λ è pari a 3 metri

Onde elettromagnetiche

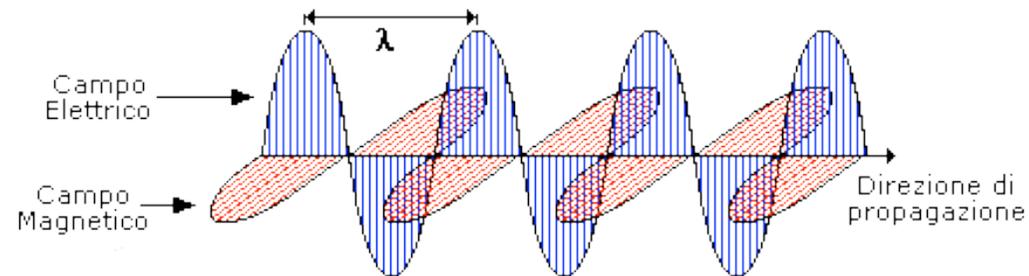


<http://www.amanogawa.com/archive/wavesB.html>

Nelle onde elettromagnetiche la grandezza è una combinazione di campo elettrico **E** e campo magnetico **H**.

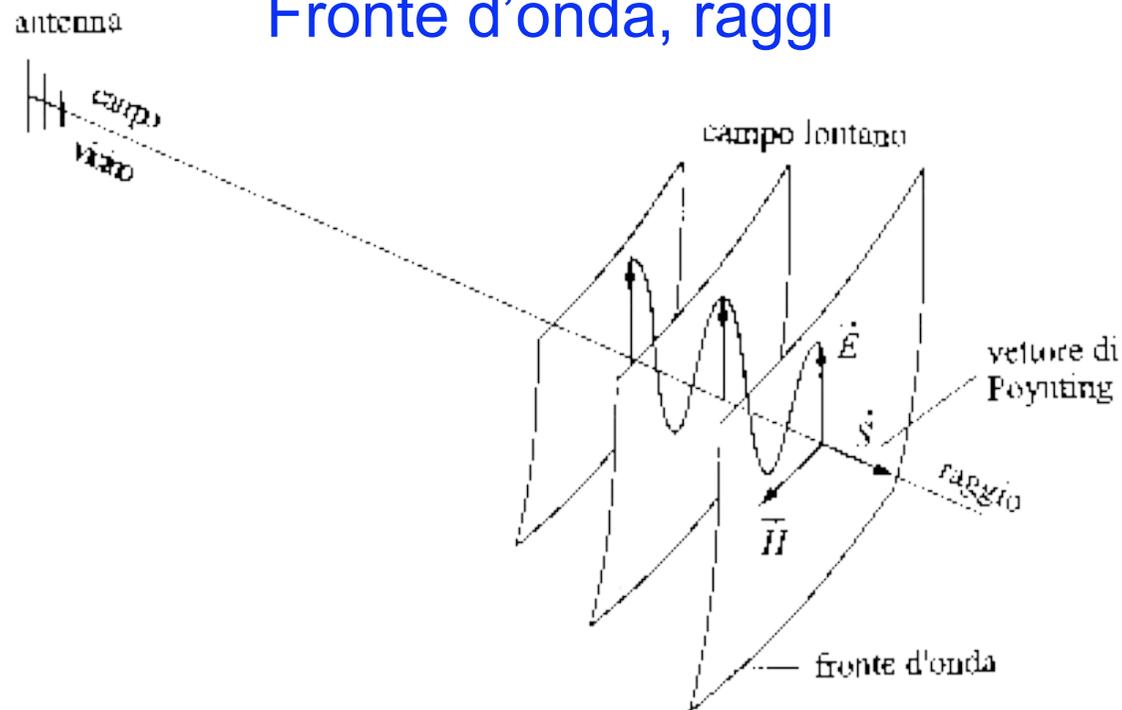
E ed **H** sono grandezze vettoriali cioè hanno 3 componenti ciascuna.

Cosa caratterizza le onde elettromagnetiche?



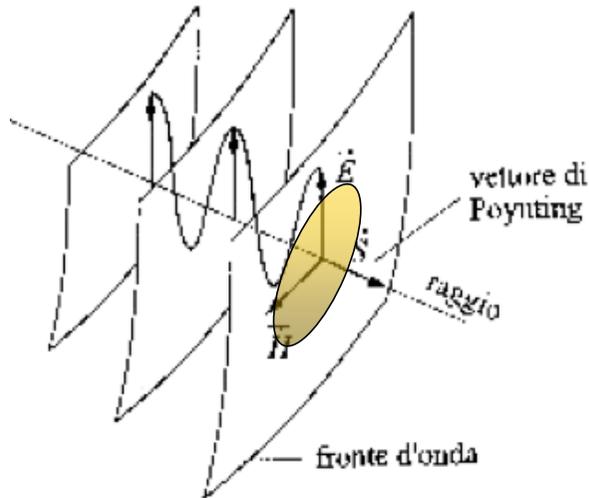
- La lunghezza d'onda λ : la distanza tra una cresta e la successiva
- L'ampiezza: il valore massimo assunto dal campo elettrico e da quello magnetico
- La perpendicolarità dei campi: campo elettrico e campo magnetico sono sempre perpendicolari tra loro
- La direzione di propagazione: è sempre perpendicolare sia al campo magnetico che al campo elettrico: sono onde trasversali
- La velocità v : nel vuoto è sempre 3×10^8 m/s

Fronte d'onda, raggi



Così come nelle onde del mare il fronte d'onda è rettilineo, nelle onde elettromagnetiche è una superficie perché si propagano nello spazio 3D. Il raggio dà la direzione di propagazione ed è perpendicolare al fronte d'onda.

Potenza



Le onde trasportano potenza nella direzione di propagazione. Si parla di densità di potenza, cioè potenza per unità di superficie parallela al fronte d'onda

densità di potenza, o Intensità I dell'onda [W/m²]

$$I = \frac{|\mathbf{E}|^2}{2\eta}$$

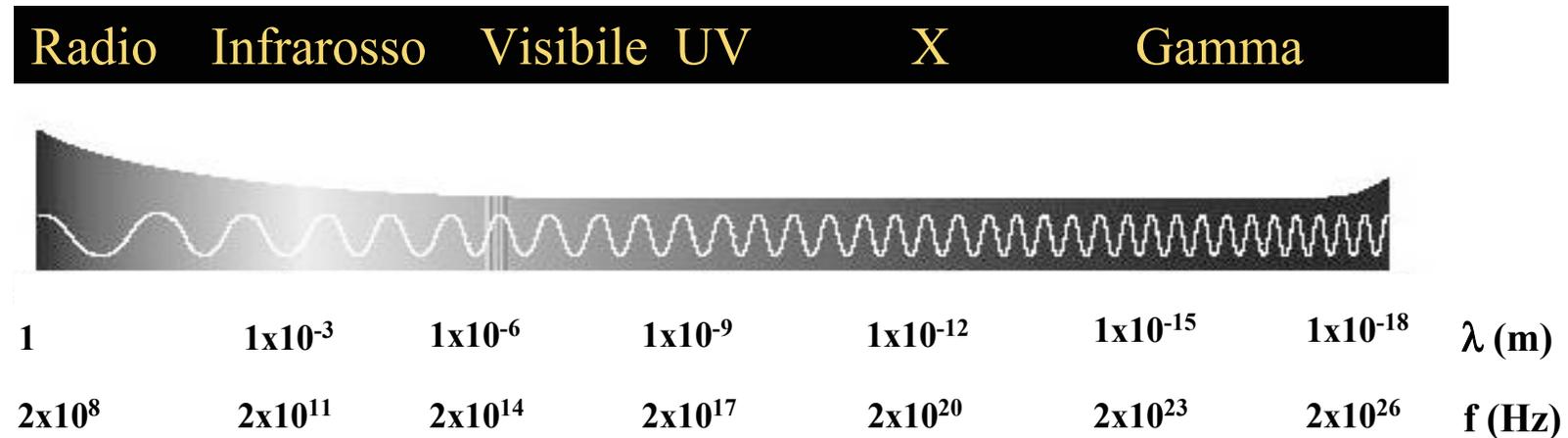
\mathbf{E} vettore campo elettrico

η impedenza del mezzo (nel vuoto: 377 Ohm)

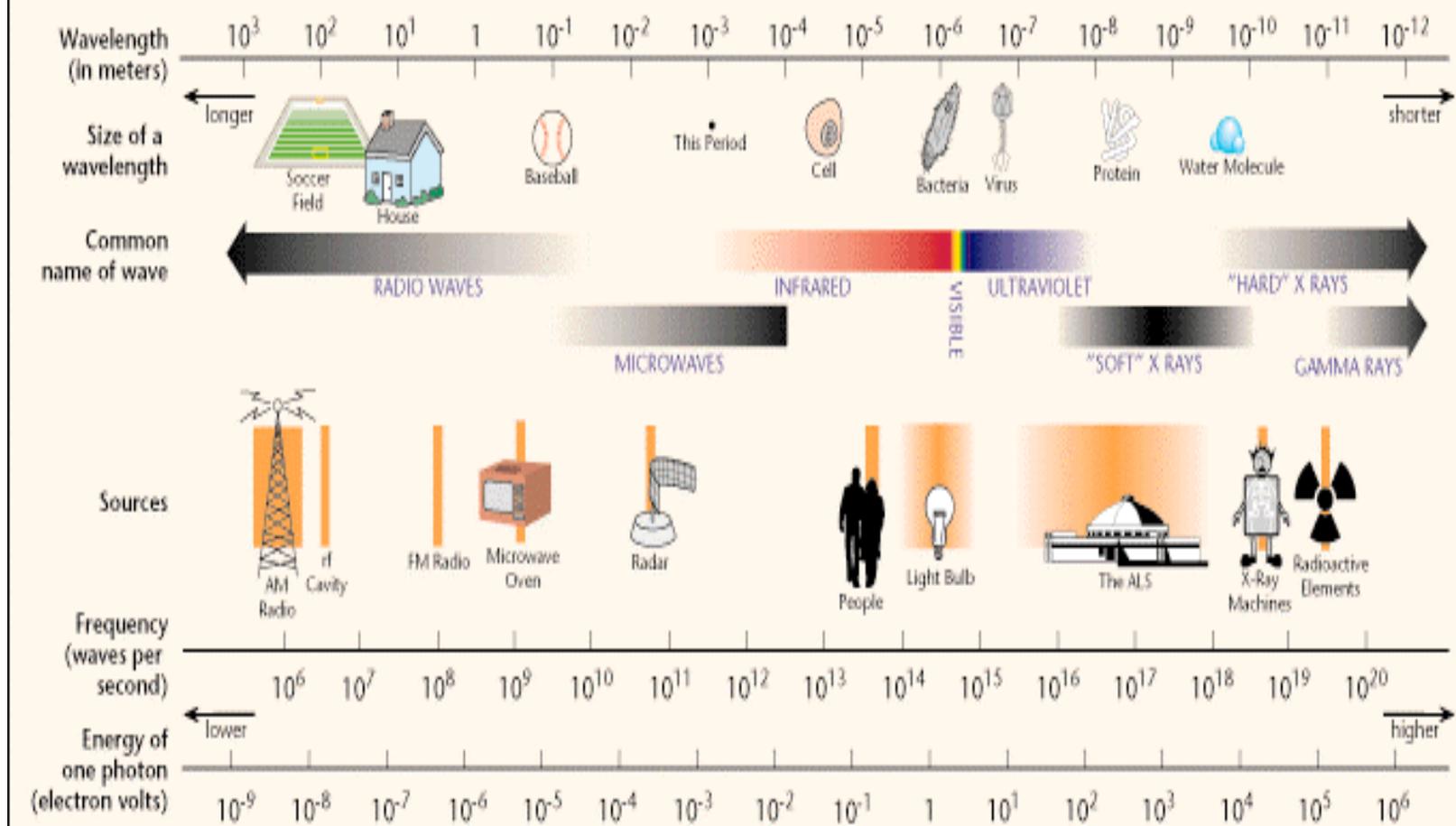
Spettro elettromagnetico

Le onde elettromagnetiche, a seconda della loro frequenza, comprendono moltissimi tipi di onde apparentemente diverse

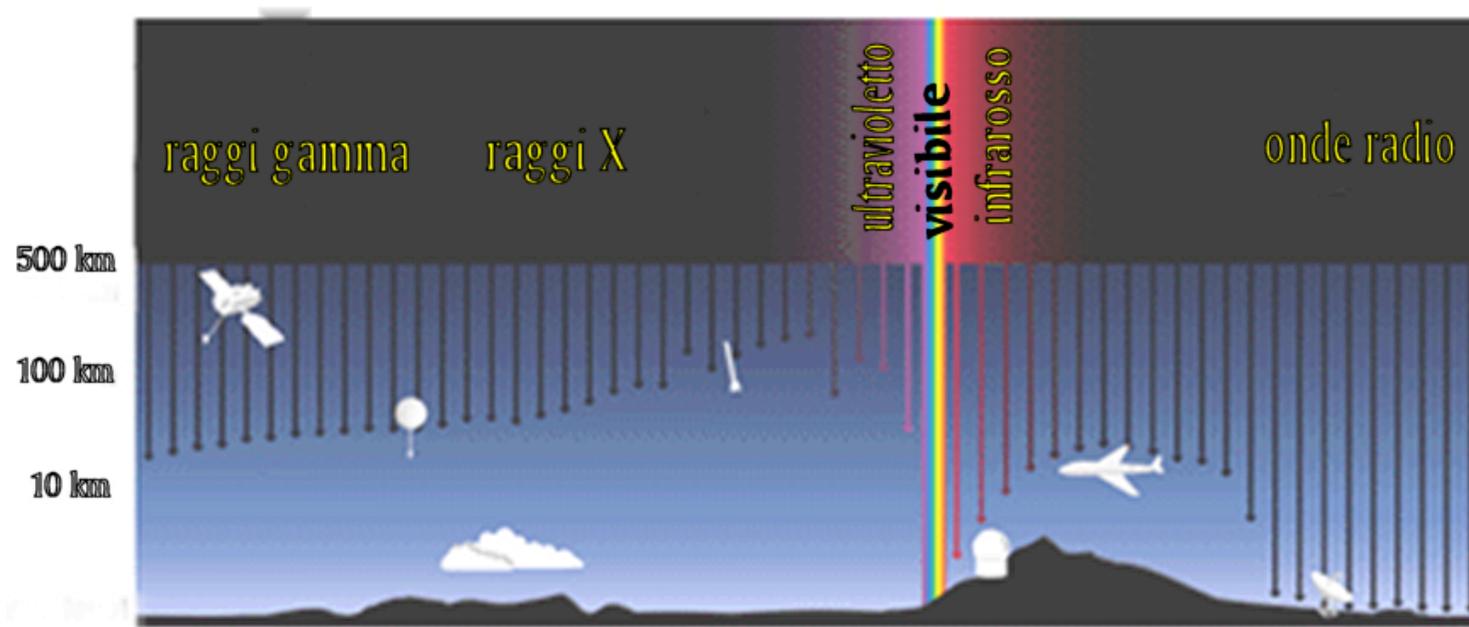
Nel visibile, la frequenza determina il colore ai nostri occhi



THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



fortunatamente l'atmosfera...



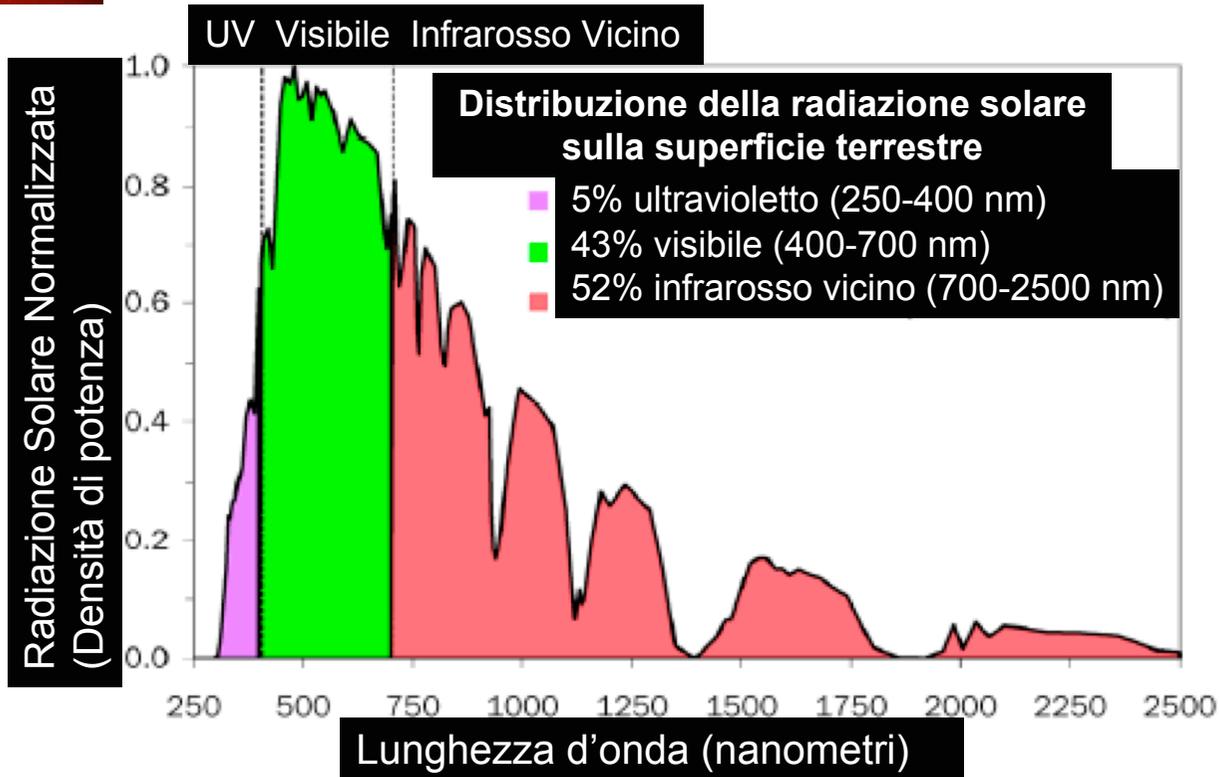
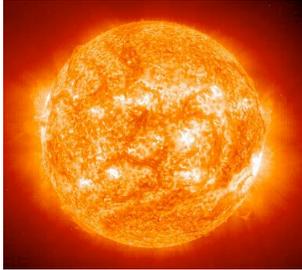
Lascia passare solo la radiazione visibile, le onde radio e una parte delle radiazioni infrarosse..

...per osservare le emissioni gamma, X ed ultraviolette degli astri dobbiamo andare nello spazio

Onde non monocromatiche

- Gran parte delle onde presenti in natura non sono monocromatiche (sinusoidali)
- Onde non monocromatiche sono la sovrapposizione di una moltitudine di onde monocromatiche, le componenti spettrali
- Es. i suoni sono composti da molte componenti spettrali
- La luce del sole non è monocromatica, infatti ci appare bianca

Radiazione Solare

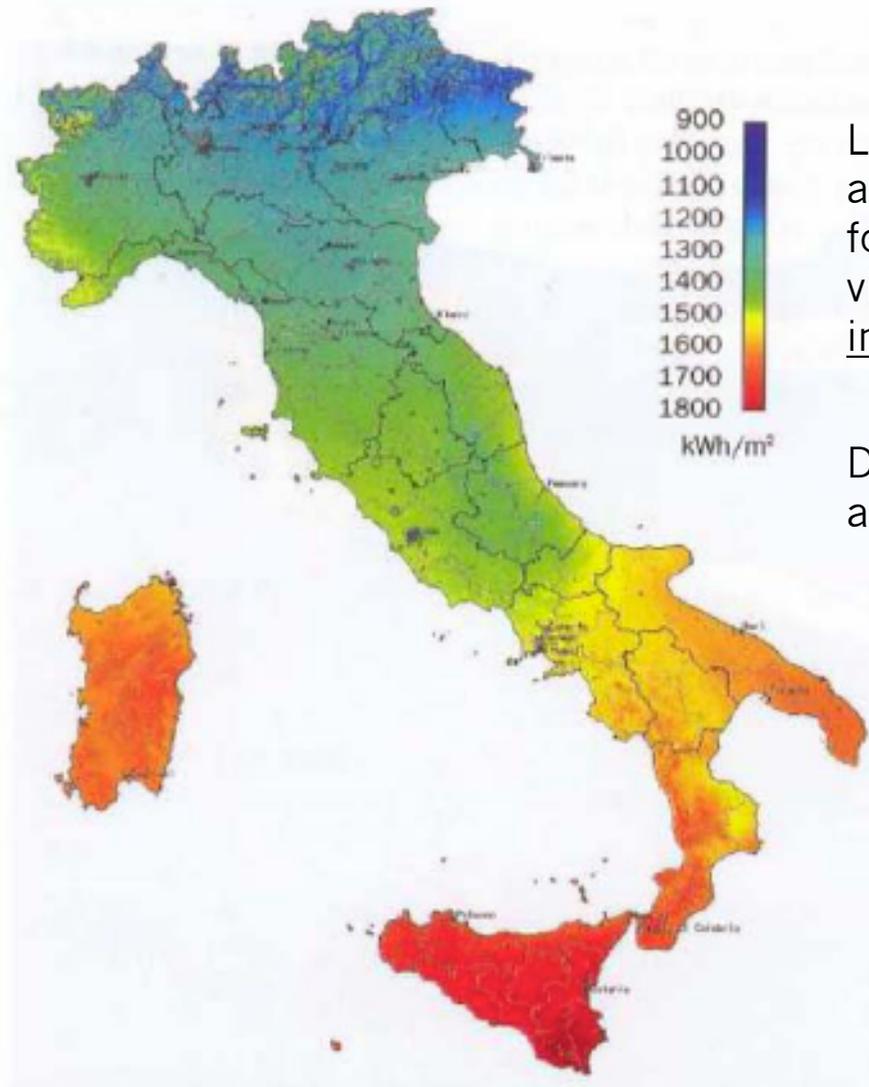


Radiazione Solare (II)

- Ha una densità di potenza (condizioni di cielo chiaro) di circa **1 kW/m²** !
- La densità di potenza effettiva è minore causa nuvole, particelle, ed alternarsi notte/giorno

		Condizioni atmosferiche						
Radiazione solare	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Insolazione



La densità di energia in un anno (o in un mese) [kWh/m²] fornita dalla radiazione solare viene chiamata anche insolazione

Dipende dalla latitudine ma anche dal clima

Considerazioni (I)

Volete una prova della potenza della radiazione solare?

Laciate la macchina per due ore al sole ...

Per ottenere la stessa temperatura (60-70° !) con la macchina in garage ci vorrebbe una stufa da 2 kW !



Considerazioni (II)

- L'energia fornita dal sole si può sfruttare in positivo tramite
 - Pannelli fotovoltaici
 - Pannelli solari termici
 - Sistemi a concentrazione
- Ma è anche importante prevenire gli effetti negativi dell'energia solare
 - Eccessivo riscaldamento locale (isola di calore, effetto serra negli edifici e nei veicoli, ecc.)
 - Desertificazione
 - Riscaldamento globale
- **Purtroppo noi spesso non solo non sfruttiamo l'energia solare in positivo, e non ne preveniamo gli effetti negativi, ma addirittura controbattiamo gli effetti negativi locali con grande dispendio di energia e ulteriore generazione di calore !!**

Onde Elettromagnetiche e Interazione con la materia

Materiali con perdite e privi di perdite

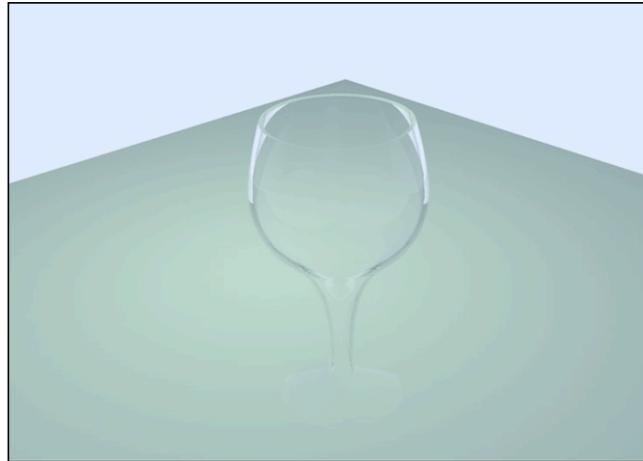
Bilancio di potenza alla superficie di un materiale: riflessione, trasmissione

Calore ed emissione termica

Proprietà di alcuni materiali

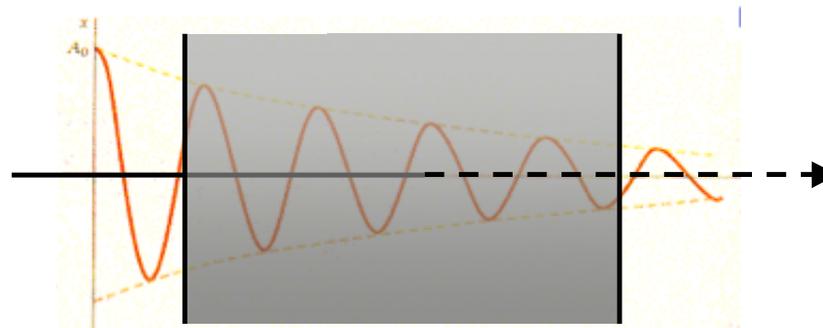
Onde e.m. e materiali privi di perdite

- Le onde e.m. (e quindi la luce) si propagano senza attenuarsi (o attenuandosi poco) nei materiali privi di perdite
- Tali materiali vengono detti anche “trasparenti”
- La proprietà di trasparenza dipende dalla lunghezza d’onda: per esempio i vetri sono trasparenti alla luce visibile ma non agli UV
I muri sono trasparenti alle onde radio ma non alla luce

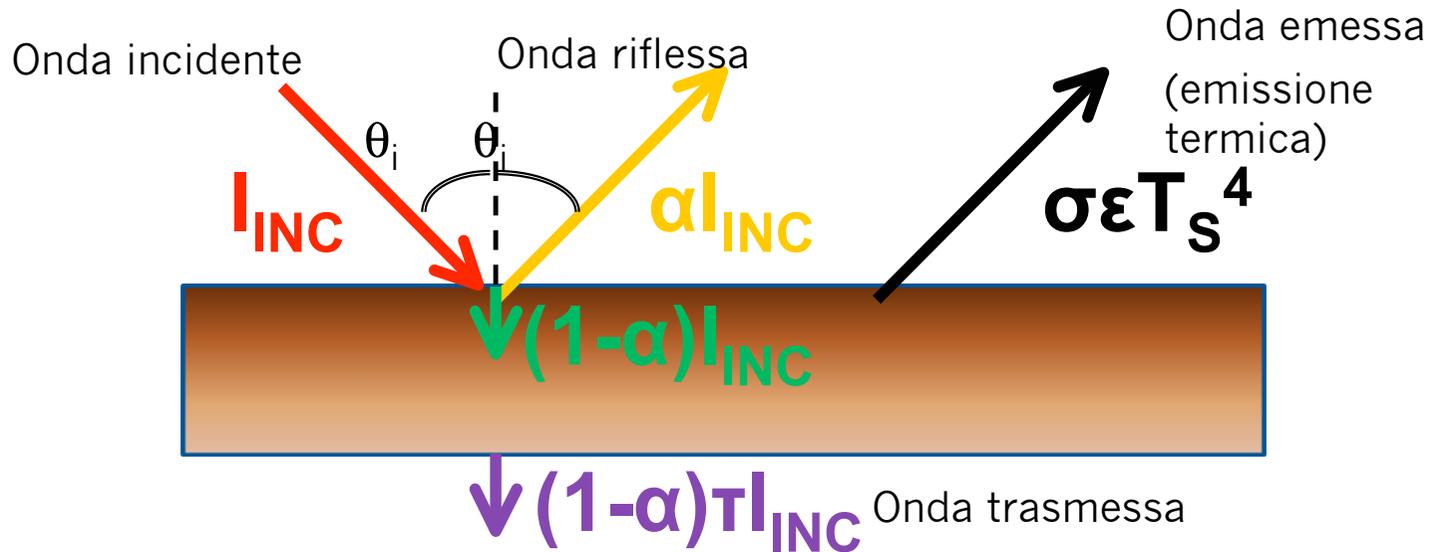


Onde e.m. e materiali con perdite

- Le onde e.m. (e quindi la luce) si propagano attenuandosi (più o meno velocemente) nei materiali con perdite
- Tali materiali vengono detti anche “opachi”
- A frequenze radio sono opachi i materiali che hanno conducibilità elettrica non nulla
- A frequenze più alte sono opachi i materiali in cui le onde e.m. fanno in qualche modo “vibrare” le particelle
- In entrambi i casi l'onda perde potenza e si ha dissipazione di potenza in calore



Bilancio alla superficie di un materiale

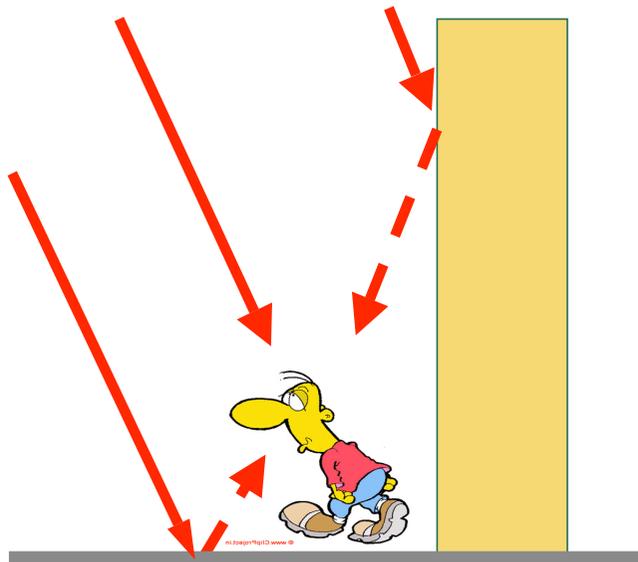


I parametri che influenzano direttamente l'interazione della radiazione con il materiale sono:

- Albedo o riflettività α**
 - Sono tutti parametri in potenza
- Trasmittanza τ**
 - Dipendono dalla frequenza: spesso si danno valori medi per una certa banda
- Emissività ϵ**
 - Es: banda della luce solare, infrarosso, ecc.

Multiple riflessioni

- In presenza di più ostacoli (es in un ambiente urbano) si possono allora avere multiple riflessioni, come in una stanza di specchi
- L'intensità incidente può perciò risultare molto superiore a causa del sommarsi dell'onda diretta e di multiple onde riflesse

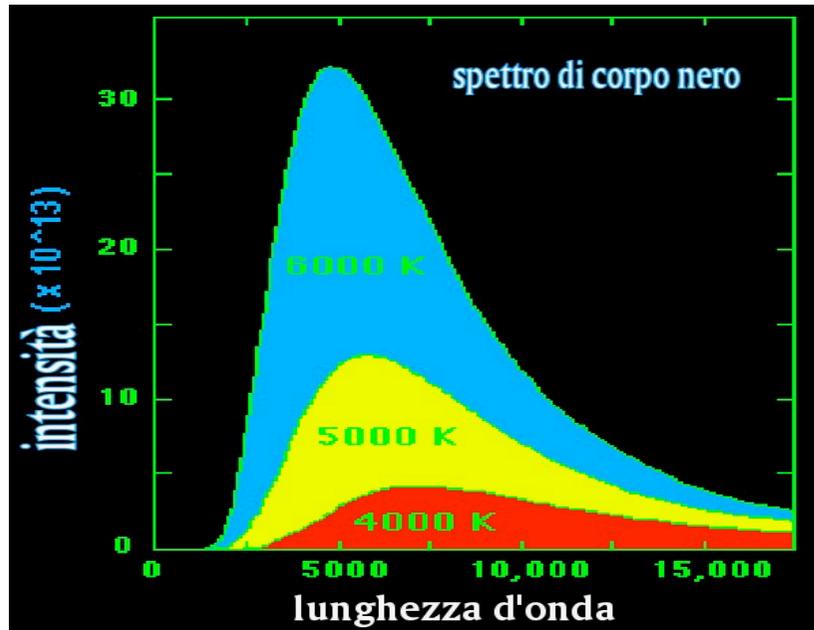


Emissione termica

- Qualsiasi corpo avente una temperatura superiore allo zero assoluto (-273,37 °C) emette radiazione elettromagnetica a largo spettro, questa radiazione prende il nome di radiazione termica
- Il corpo di riferimento è il “corpo nero”
- Più il corpo è caldo e maggiore è l'intensità emessa
- Più il corpo è caldo e più il massimo di emissione cadrà alle lunghezze d'onda più brevi o alle maggiori frequenze
- Si ha:
 - Energia totale = costante di Stefan x temperatura⁴
 - lunghezza d'onda x temperatura = costante di Wien

$$E = \sigma T^4 \qquad \lambda T = w$$

Spettro d'emissione del corpo nero



L'intensità della radiazione emessa da un corpo generico è:

$$I = I_0 \varepsilon$$

ove I_0 è l'intensità del corpo nero ed ε è l'emissività del corpo considerato

I materiali assorbono energia dalla radiazione solare a frequenze ottiche, si scaldano e riemettono energia per emissione termica a frequenze molto più basse, dipendentemente dalla loro temperatura

Albedo di alcuni materiali

(per la banda della luce solare)

Material surface	Solar Reflectance
Black acrylic paint	0.05
New asphalt	0.05
Aged asphalt	0.1
“White” asphalt shingle	0.2
Aged concrete	0.2 to 0.3
New concrete (traditional)	0.4 to 0.5
New concrete with white portland cement	0.7 to 0.8
White acrylic paint	0.8

Radiazione solare e ambiente urbano

L'isola di calore urbana

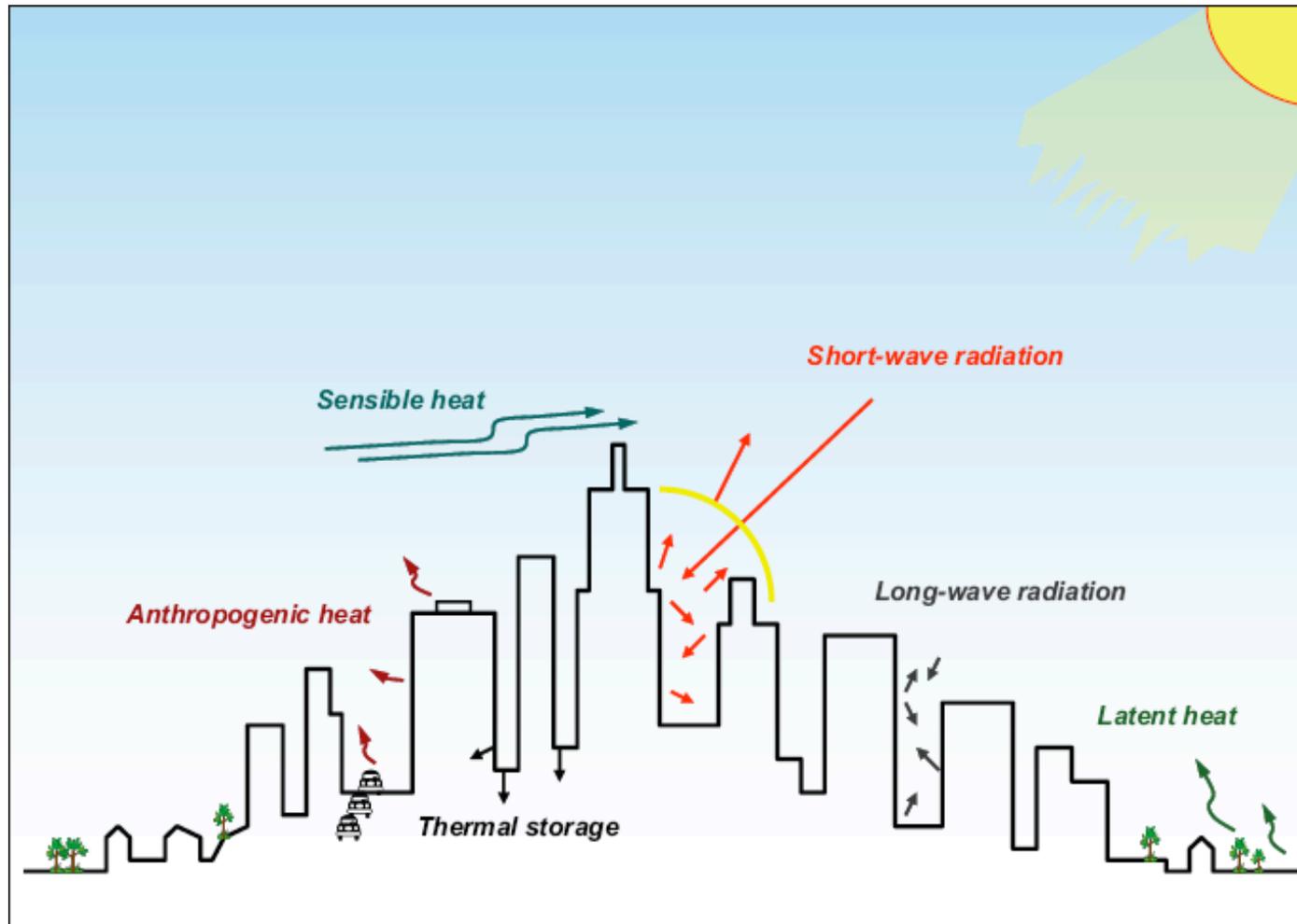
Uso di pannelli: effetti positivi e qualche problema

L'effetto della vegetazione

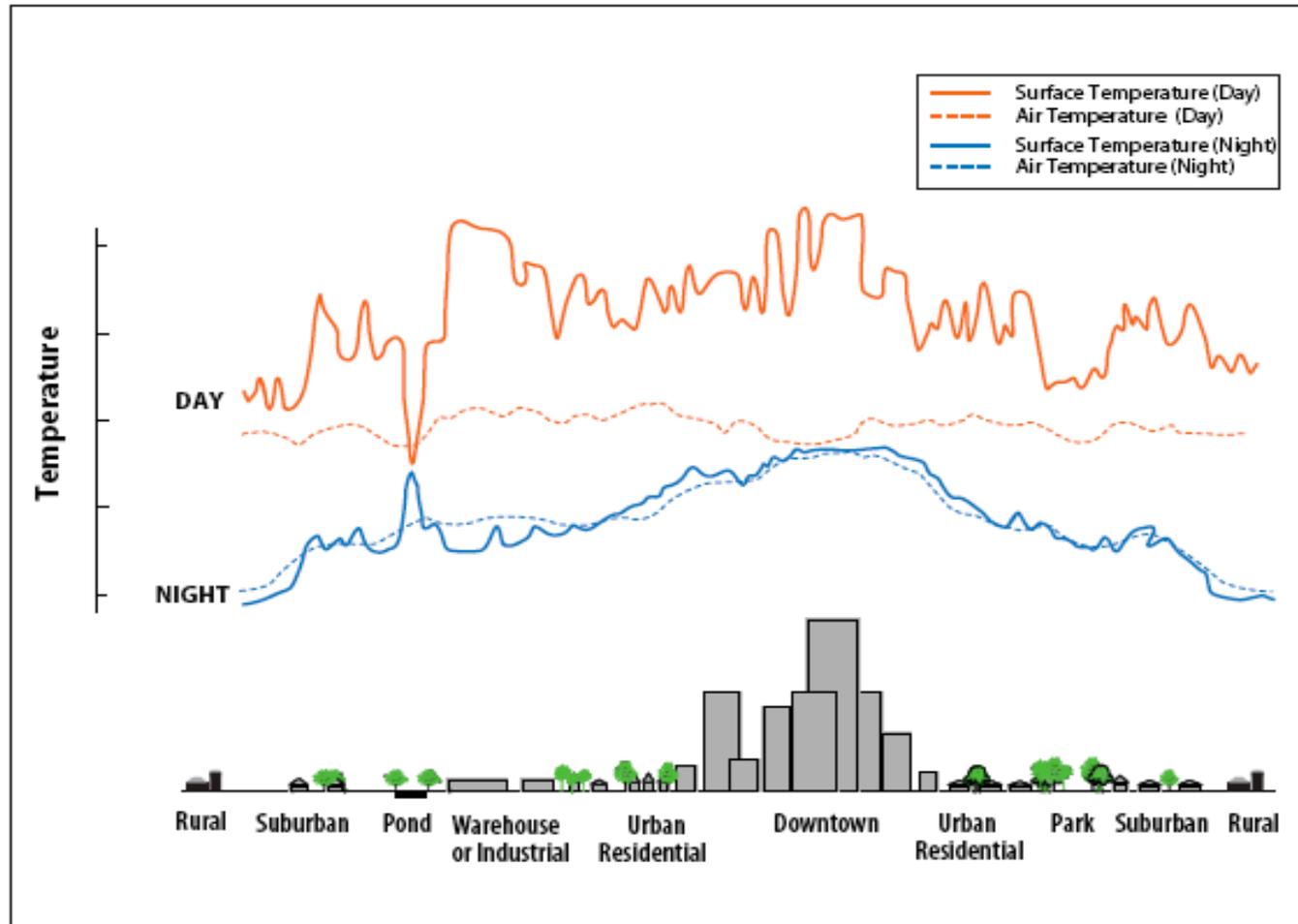
Bilancio energetico complessivo

Esempi

L'isola di calore (I)

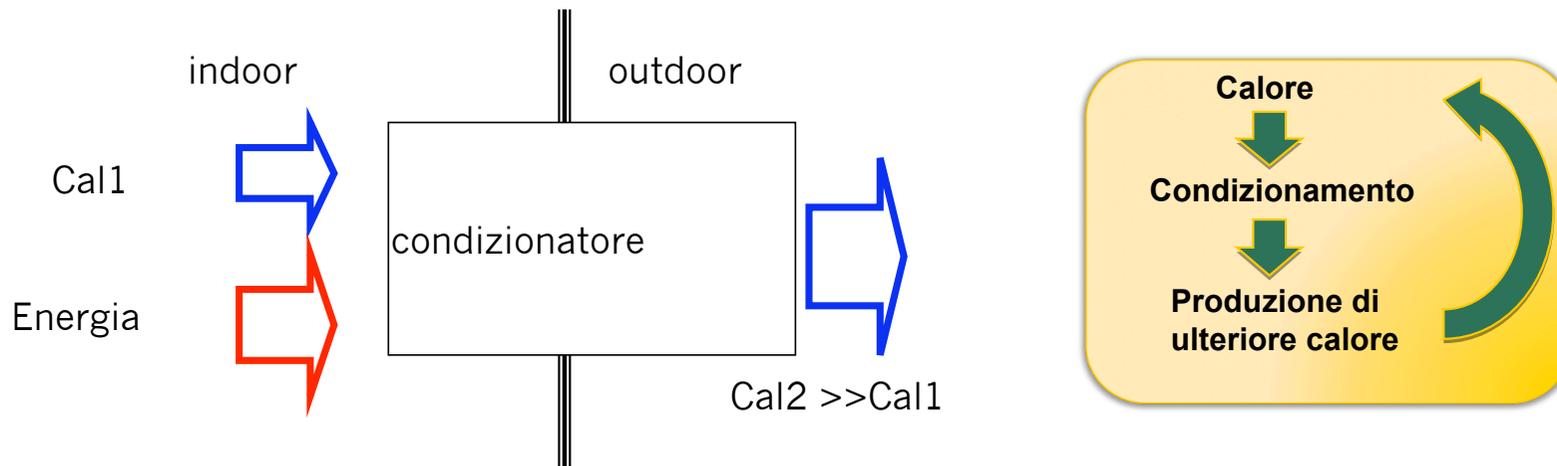


L'isola di calore (II)



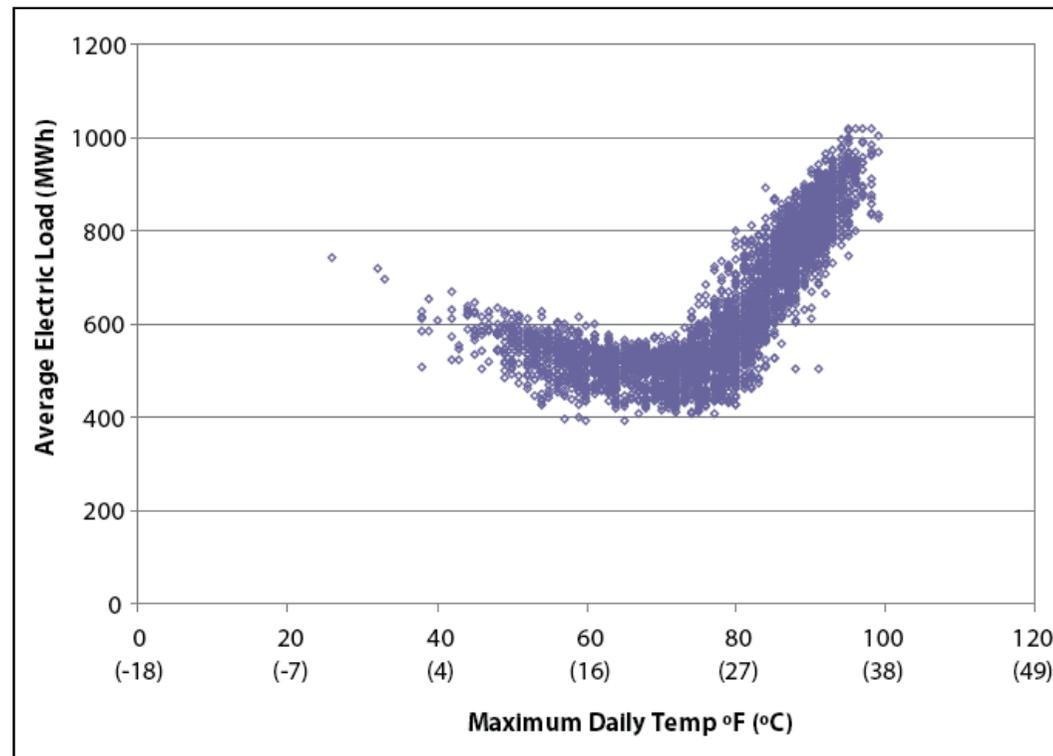
L'isola di calore (III)

- Si ha una temperatura diurna di 2-3 gradi superiore alle zone rurali circostanti
- Si ha una temperatura notturna anche di 12 gradi superiore alle zone rurali circostanti !
- D'inverno l'effetto è positivo in quanto riduce un pò i consumi per il riscaldamento
- D'estate aumenta moltissimo i consumi per il condizionamento in quanto si innesca un ciclo a retroazione positiva dovuto al basso rendimento termico dei condizionatori



L'isola di calore (IV)

- I consumi si impennano: aumenti anche del 100%



Uso di pannelli fotovoltaici in ambiente urbano

-  E' un fattore positivo per sfruttare (anziché subire) la radiazione solare
-  I pannelli producono più energia proprio dove e quando è necessario
-  I pannelli ombreggiano i tetti riducendo del 5-10% la necessità di condizionamento dei piani alti
-  L'efficienza non è elevatissima (max 20%)
-  Siccome l'albedo dei pannelli è basso (circa 0.2), si aumenta il contributo all'isola di calore rispetto all'uso di coperture ad elevato albedo

I vantaggi comunque superano gli svantaggi. Occorre integrarli nel tessuto urbano opportunamente, anche dal punto di vista estetico.

Effetto della vegetazione

- Fotosintesi: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Luce} \Rightarrow \text{Carboidrati} + \text{O}_2$
- evapotraspirazione: sottrazione di energia per la traspirazione della pianta e per l'evaporazione di acqua dal suolo

FOTOSINTESI:

Trasforma

l'energia luminosa (è **inesauribile, è rinnovabile, è gratuita, è distribuita sul pianeta, è pulita,**

ma

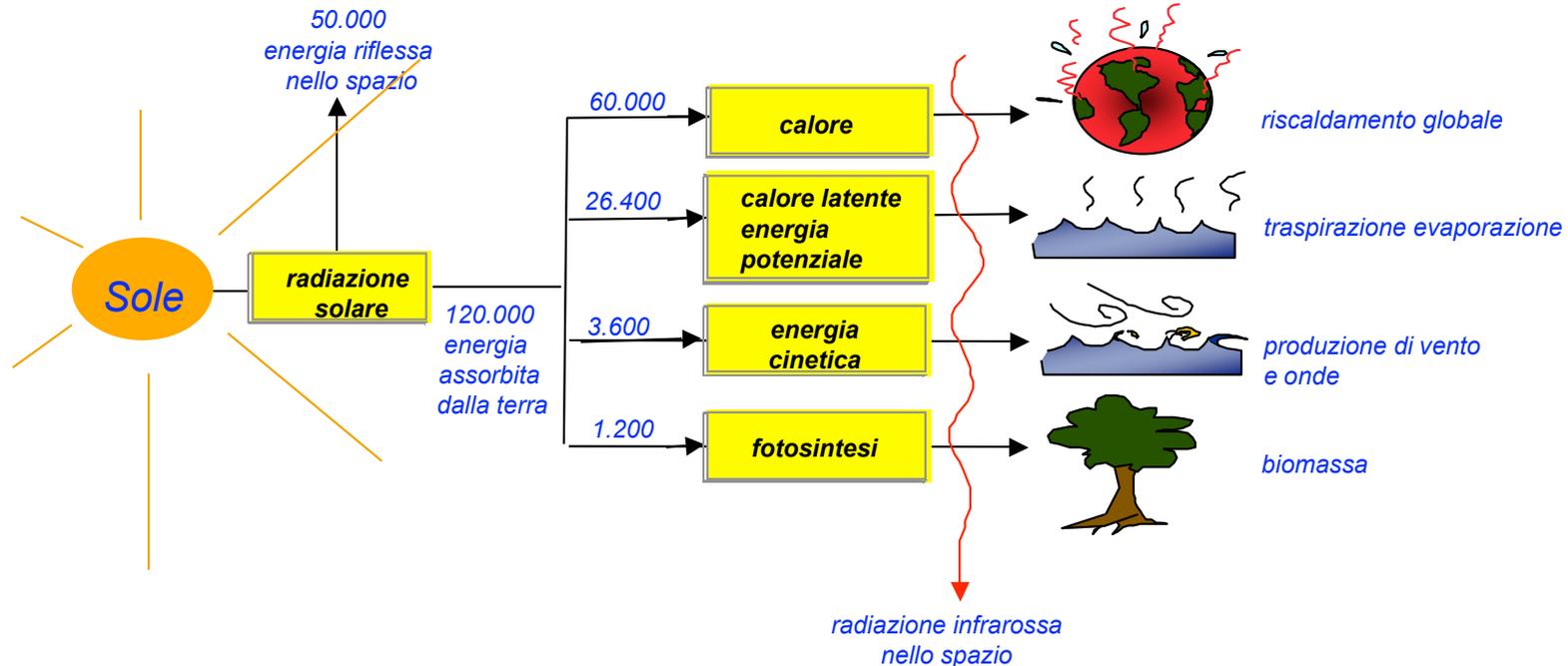
ha bassa intensità (energia/superficie), ha discontinuità temporale, non è trasportabile, non è conservabile, è difficilmente utilizzabile)

in energia chimica (**ha alta intensità, è trasportabile, è conservabile, è facilmente utilizzabile per diversi fini da animali, motori, macchine,...**

ma

produce scorie, è costosa, è esauribile

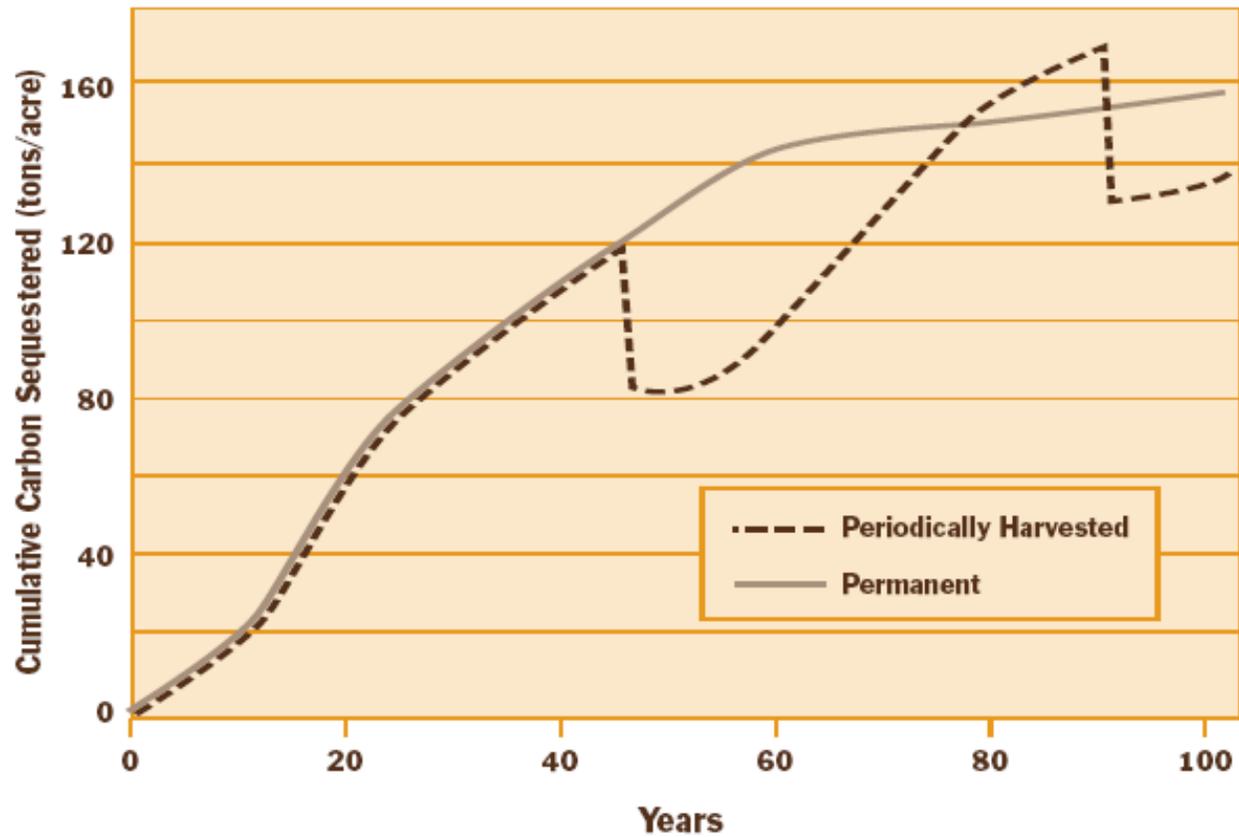
Effetti globali (I)



Flussi di energia solare (in miliardi di watt)

Anche se la fotosintesi riesce ad assorbire solo l'1% dell'energia solare che arriva sul Pianeta, riesce ad assorbire una quantità di energia pari a 9 volte il consumo energetico di tutti gli abitanti della Terra. Vale a dire che circa il 10% dei vegetali prodotti della fotosintesi, se utilizzati per produrre energia, basterebbero a soddisfare il fabbisogno energetico di tutta la popolazione mondiale

Effetti globali (II)

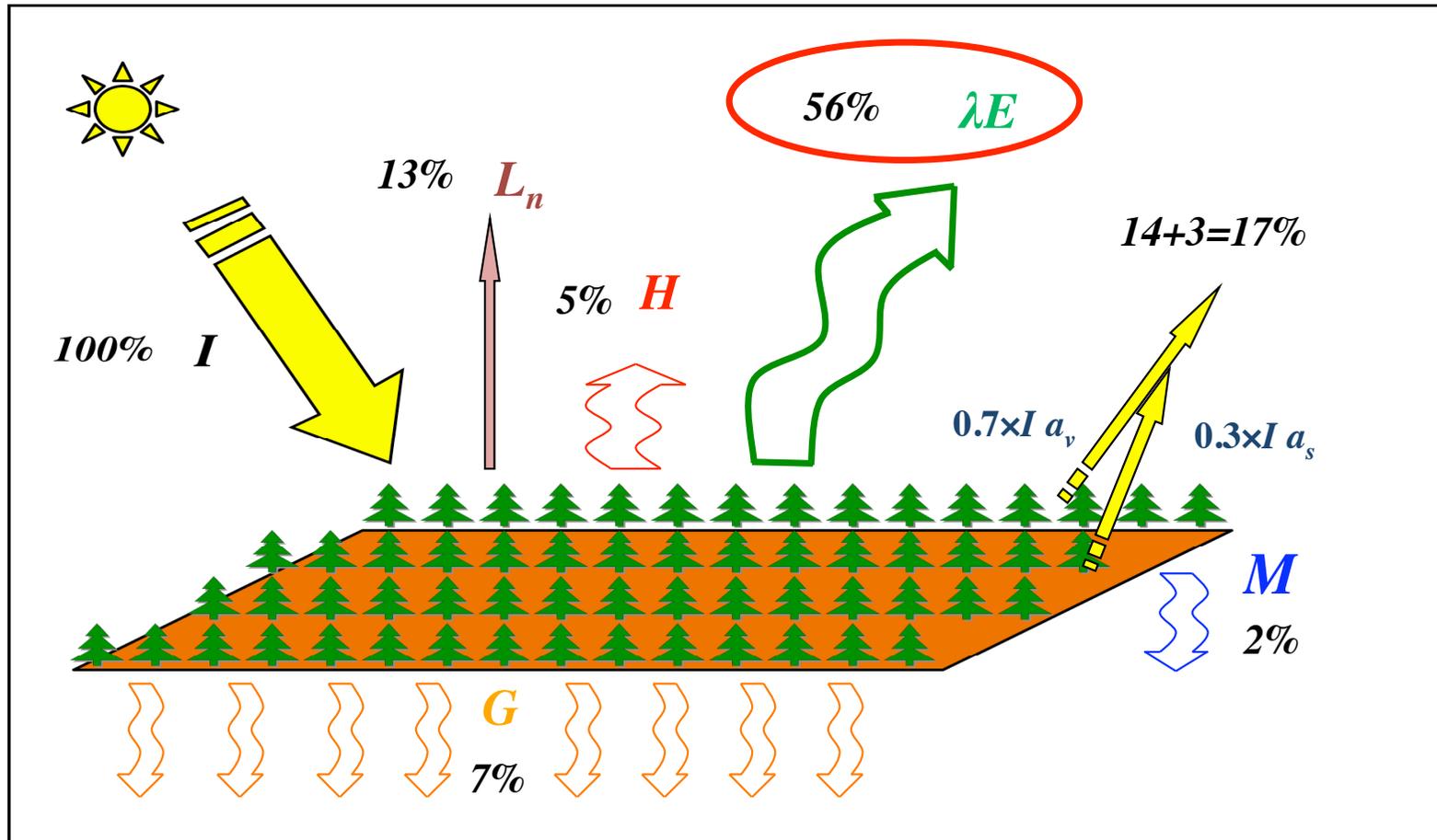


Source: Stavins (1999), based on data from Moulton and Richards (1990) and Richards (1997a).

Note: Time profile is of loblolly pine in the Mississippi Delta states region of the United States.

Effetti locali (I)

$$(1 - a_{tot})I = L_n + G + H + \lambda E + M \left[\frac{W}{m^2} \right]$$



Effetti locali (II)

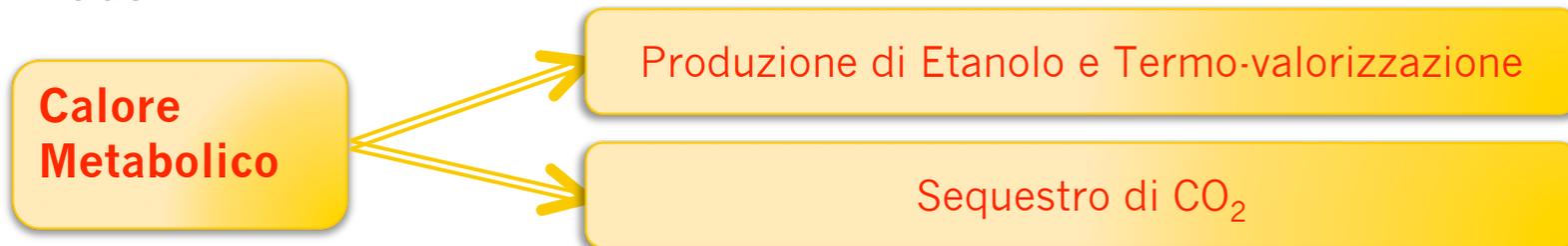
La vegetazione in ambiente urbano favorisce la diminuzione del fenomeno di isola di calore:

Abbatte costi energetici
Migliora la qualità della vita

Fattori determinanti:

- Evapotraspirazione
- Assorbimento per funzioni metaboliche
- Ombreggiamento
- Maggiore albedo rispetto all'asfalto
- Ridotta emissione termica per ridotta temperatura
- Minore radiazione IR sulla pelle umana

Inoltre:



Considerazioni sull'efficienza energetica urbana

- Si tratta di ridurre i consumi energetici sia invernali sia estivi
- Per i consumi invernali: isolamento termico. L'apporto del sole in inverno è abbastanza limitato nei nostri climi
- Per i consumi estivi: attenzione alle pareti vetrate e ai tetti
- Dal punto di vista dell'area urbana nel suo complesso occorre ridurre l'isola di calore
 - Attento studio delle orientazioni di strade ed edifici in modo da ridurre l'effetto di intrappolamento della radiazione solare
 - Utilizzo di materiali ad elevato albedo sulle pareti a sud e sui tetti
 - Utilizzo di asfalti ad elevato albedo
 - Alberature a foglia caduca soprattutto su aree asfaltate e contro le pareti rivolte a mezzogiorno
 - Aumento delle aree verdi

Esempio: stanza con parete vetrata posta a sud

Per una stanza 4x5 in inverno 1 kW per il riscaldamento

In estate a mezzogiorno la parete vetrata $2 \times 2 = 4 \text{m}^2$ è esposta al sole.
Il vetro ha una trasmittanza elevata (0.9) e quindi il sole trasporta
all'interno $1 \times 0.9 \times 4 \times \cos(70^\circ) = 3.6 \times 0.34 = \underline{1.2 \text{ kW}}$ (ultimo fattore dovuto
all'inclinazione del sole)

Per compensare questa potenza termica occorrerà utilizzare un
condizionatore (efficienza termica 0.6) che per controbattere solo
questo calore dovrà consumare $1.2 / 0.6 = \underline{2 \text{ kW}}$!

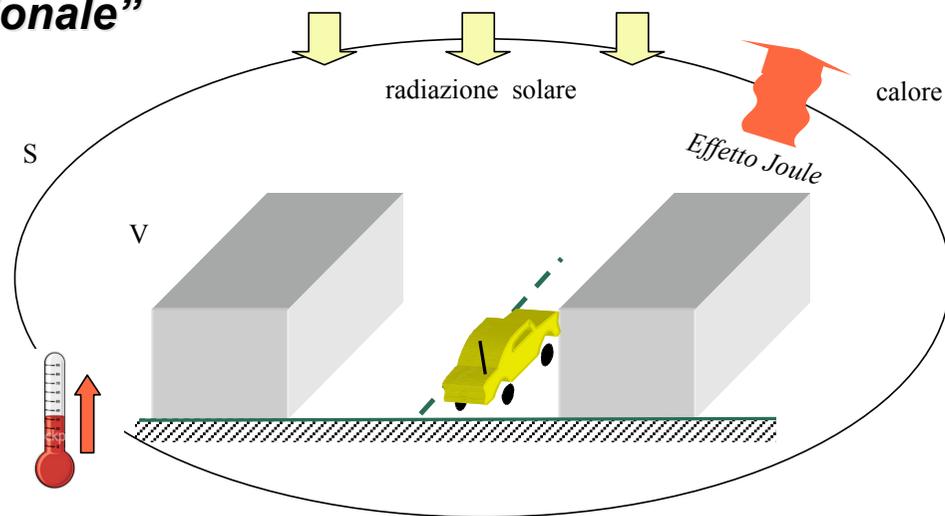
Montando delle barriere frangisole
si potrebbe evitare quasi del tutto
questo consumo. Se su tali
barriere si montassero pannelli
solari, si produrrebbe per di più
energia...

es: $1 \times 4 \times 0.34 \times 0.2 \sim 300 \text{ W}$



Esempio: sezione di area urbana stilizzata

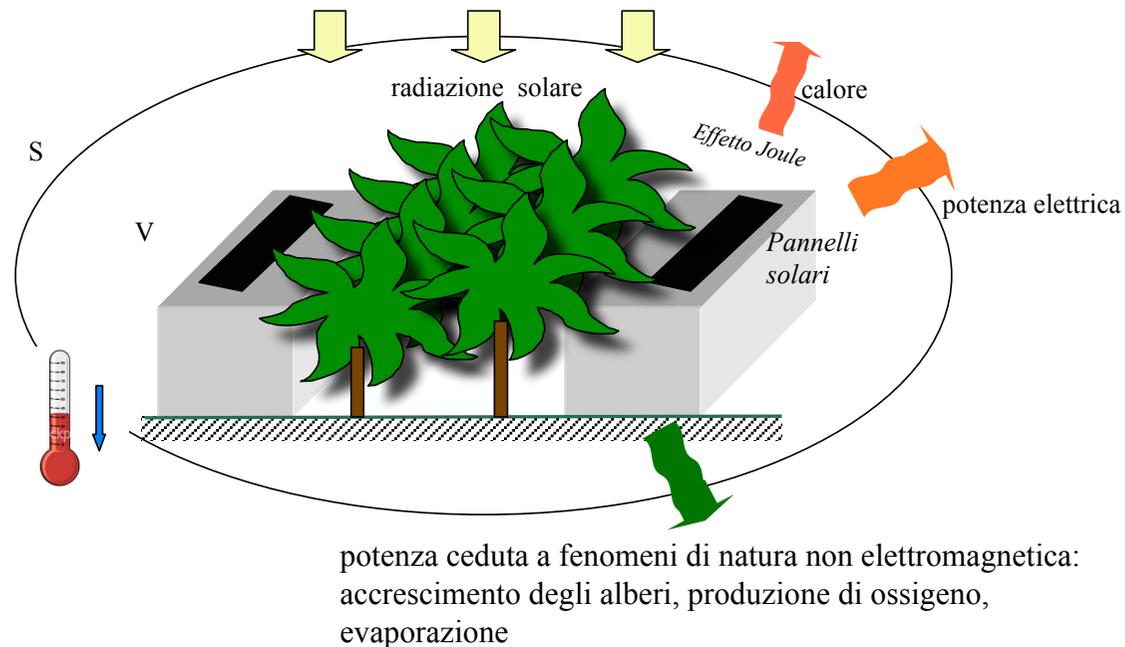
**Area urbana
"Tradizionale"**



Supponiamo nel complesso la strada + edifici adiacenti abbia un'area di 1 ha (ettaro) = 10000m^2 , divisa a metà in superficie edificata e strade. Se il sole è allo zenit, come ai tropici nel solstizio (per semplicità) sulla zona incide una potenza di $1\text{KW} \times 10000 = 10\text{MW}$ (10 megawatt!!).

calcolo...

Esempio: sezione di area urbana stilizzata “geo-ingegnerizzata”



Ora i tetti (50% della superficie) sono coperti da pannelli fotovoltaici. Le strade (restante 50% della superficie) sono totalmente alberate...
calcolo...

Un programma per la valutazione dell'efficienza energetica urbana

Nuovo approccio alla efficienza energetica urbana

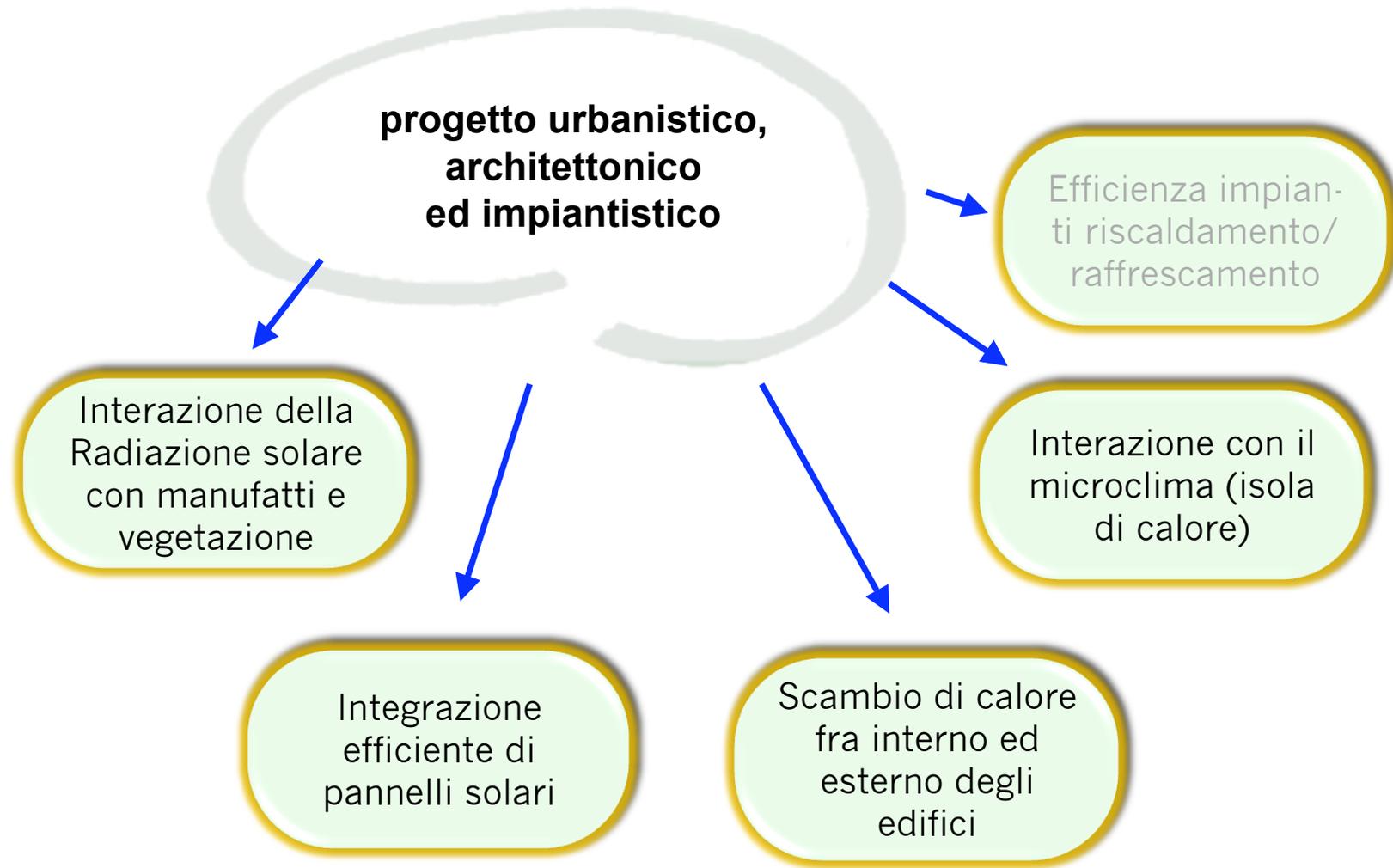
Mappe urbane e ray tracing

Esempi di calcolo del calore assorbito

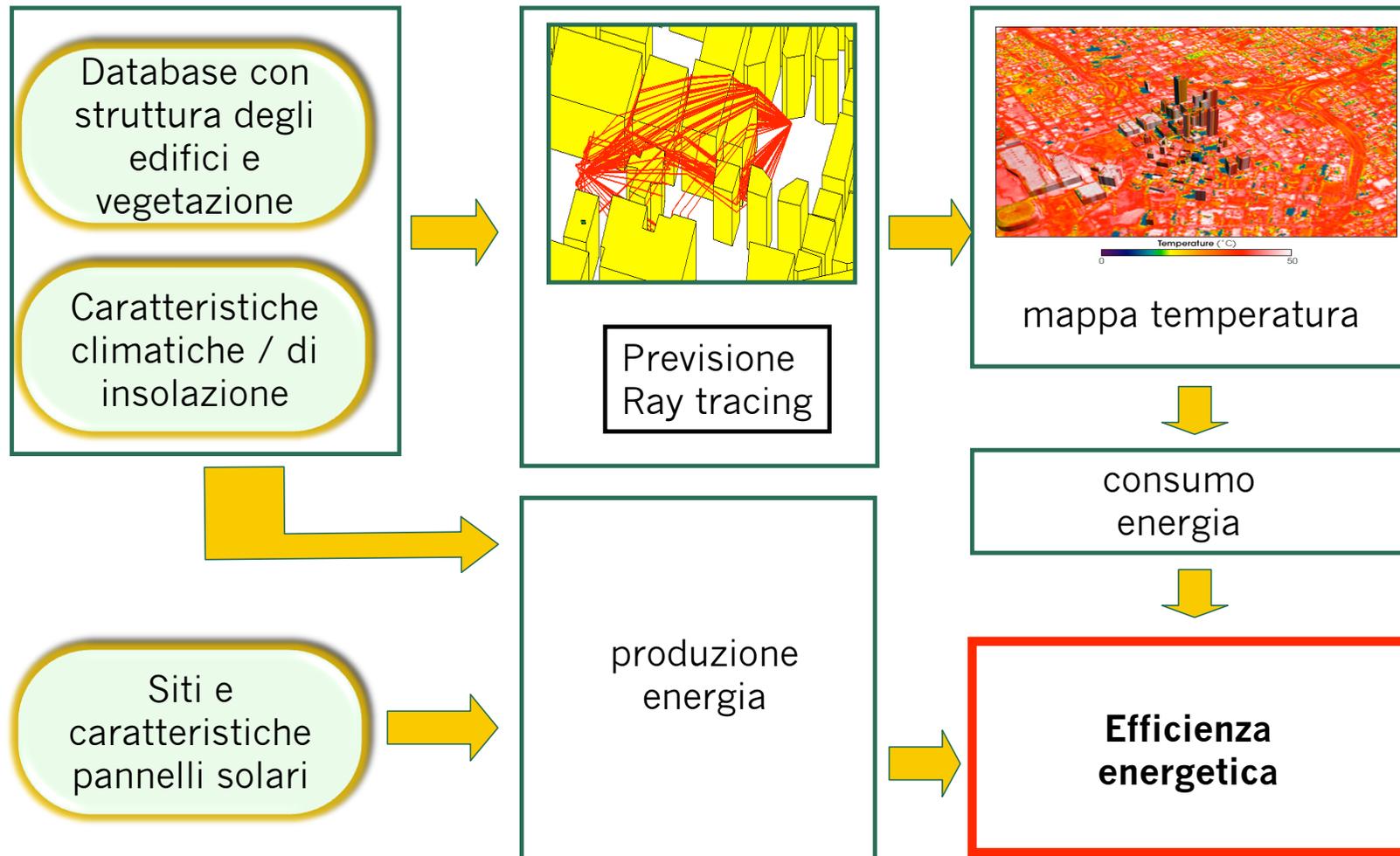
Esempio di calcolo della temperatura raggiunta dalle superfici

Sviluppi futuri

Nuovo approccio all'efficienza energetica urbana

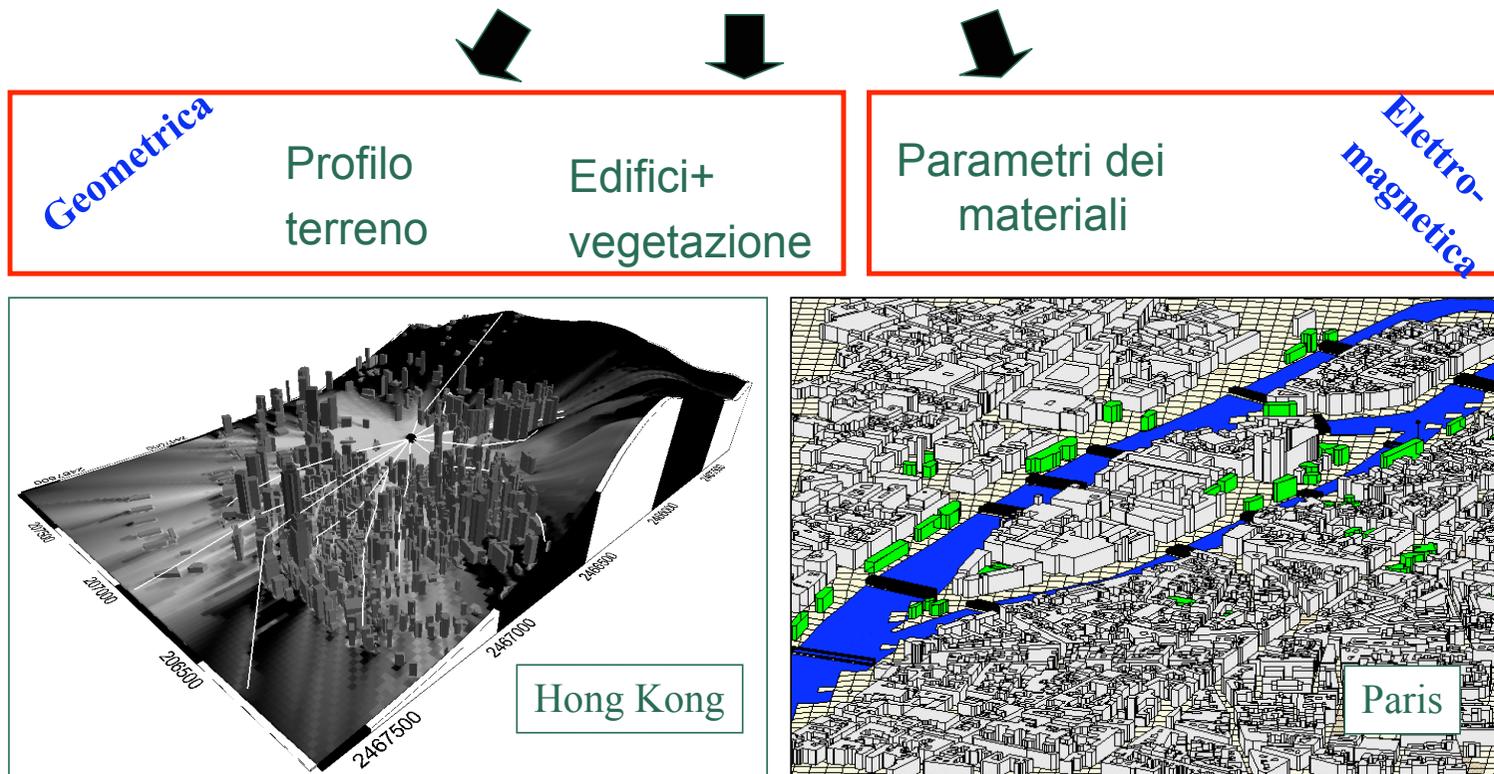


Valutazione della efficienza energetica di un'area urbana in relazione alla radiazione solare

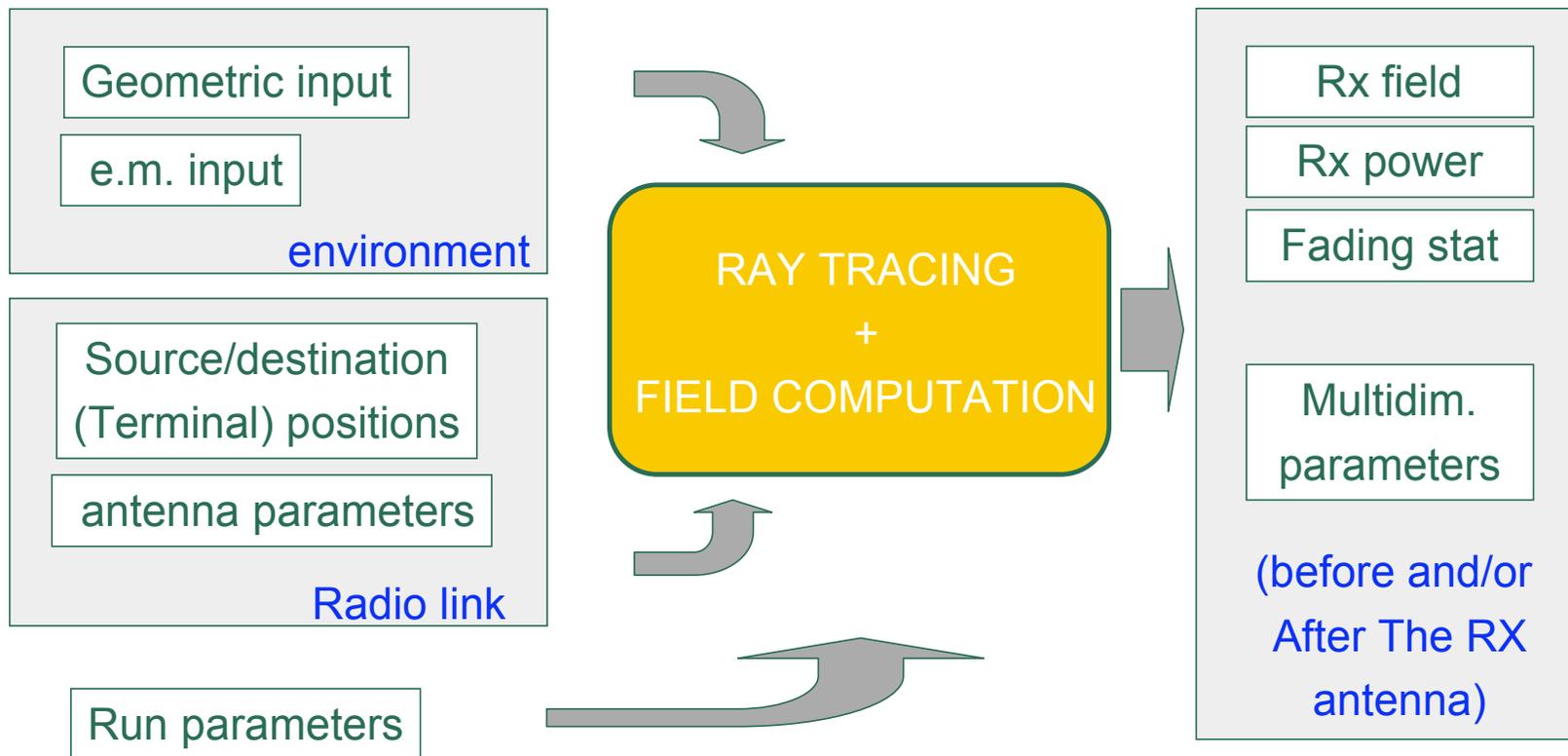


Mappe urbane digitalizzate

Modelli di propagazione deterministici richiedono mappe digitalizzate

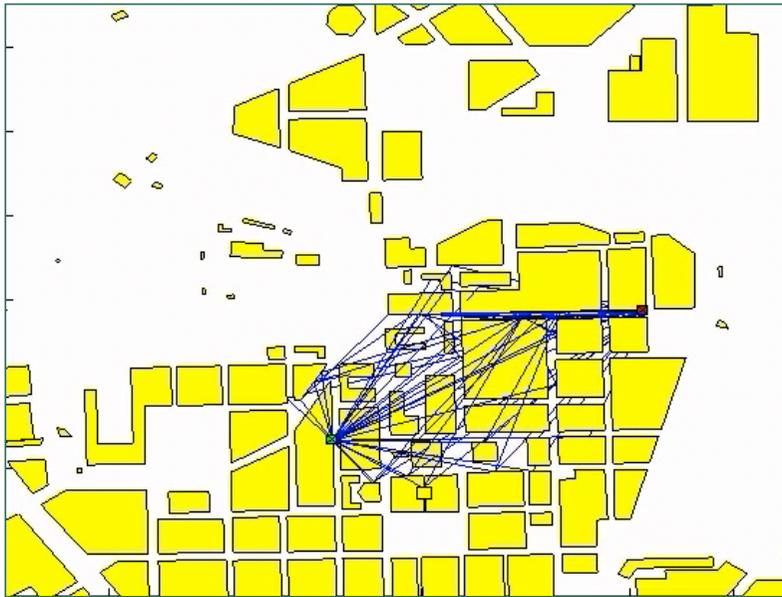


Schema di un programma di ray tracing

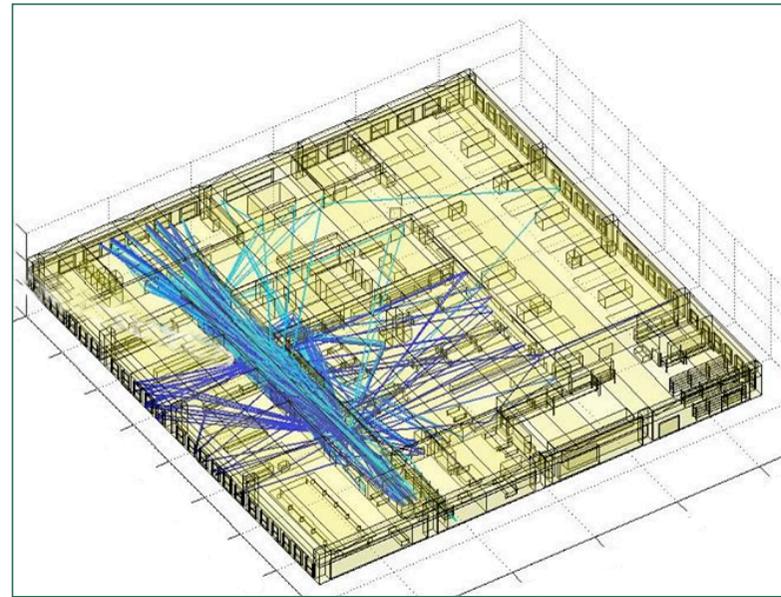


Esempi di tracciamento di raggi

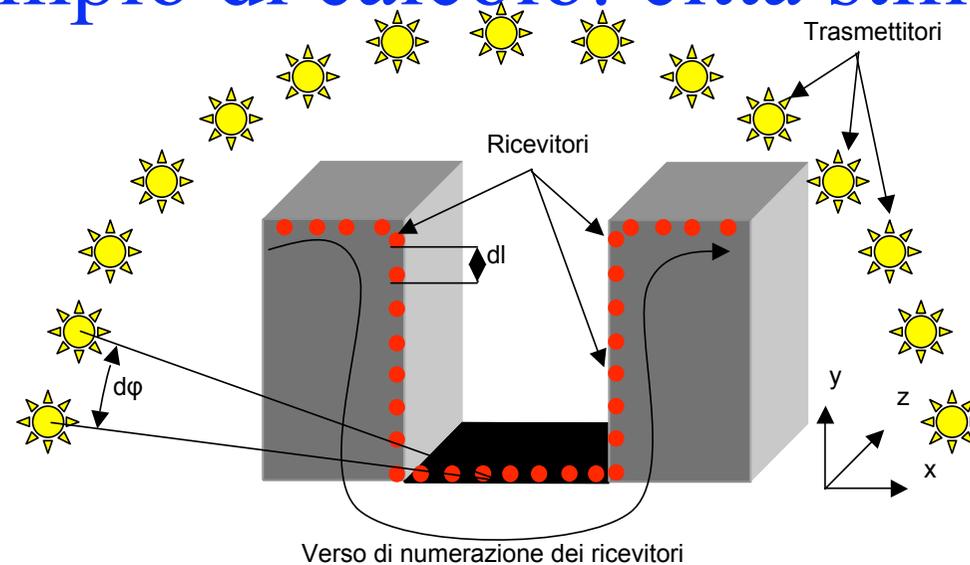
outdoor



indoor



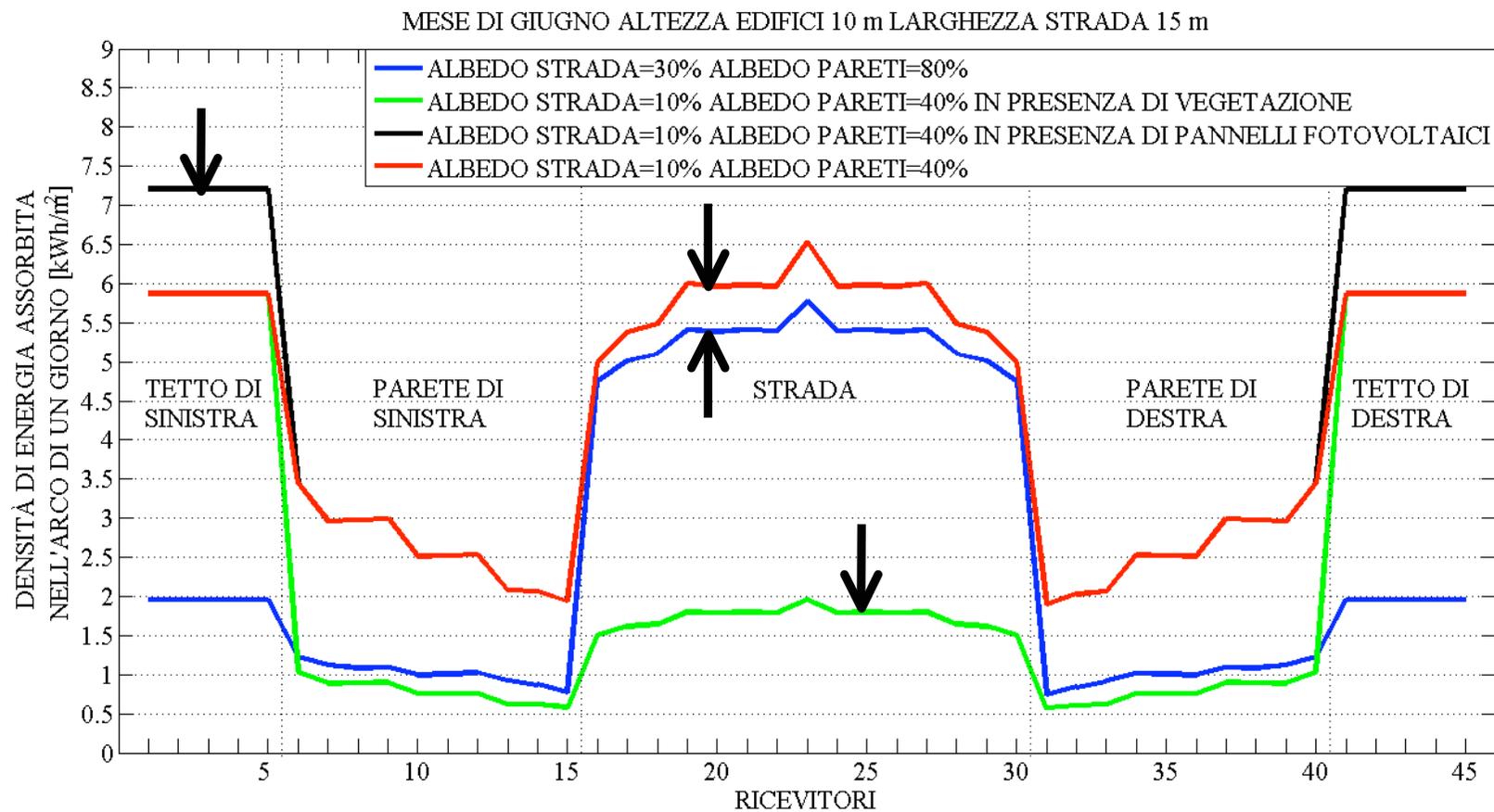
Esempio di calcolo: città stilizzata



Lo scenario utilizzato per modellare l'ambiente urbano è composto da:

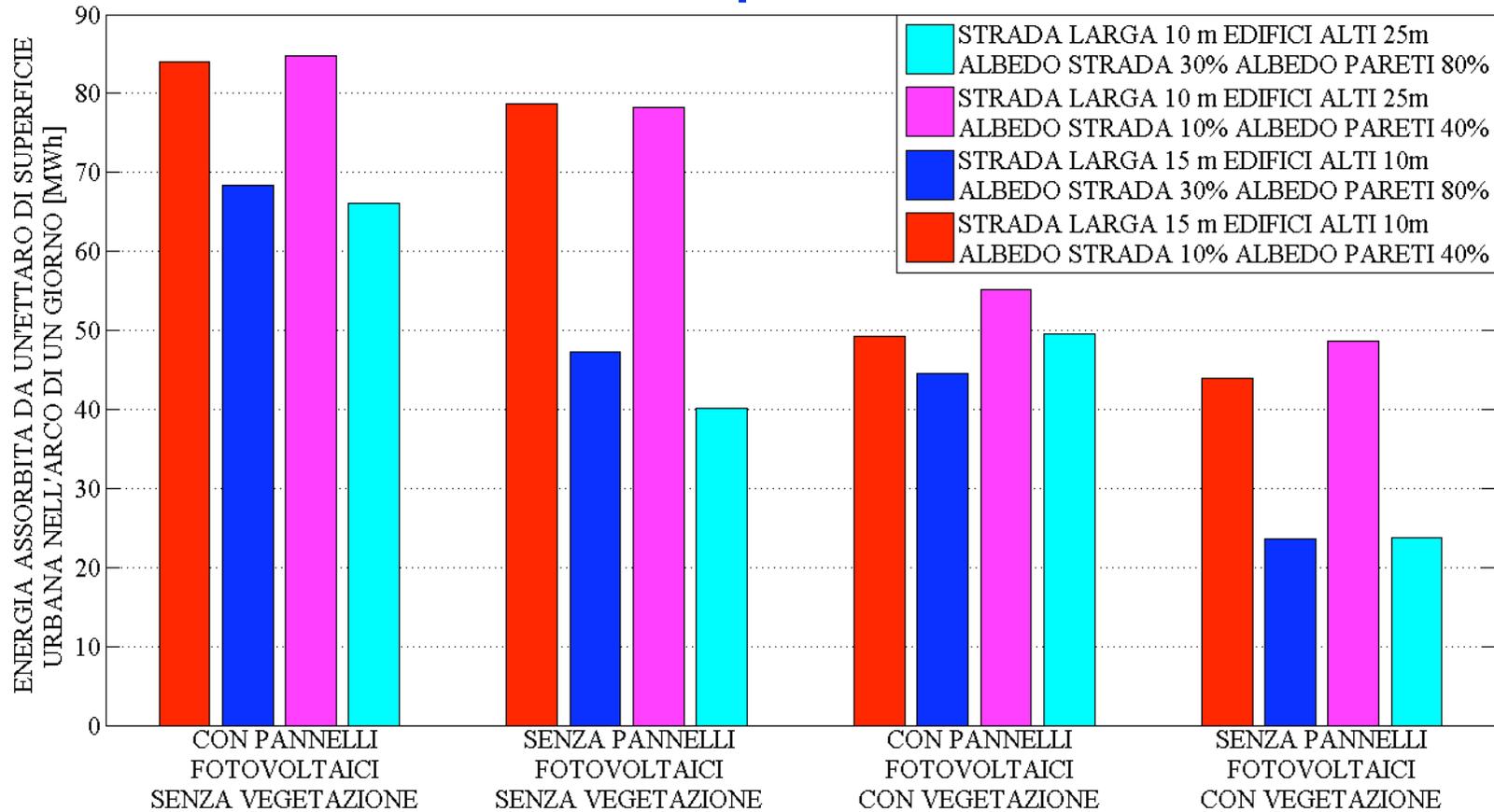
- Due edifici separati da una strada in direzione nord-sud
- Ricevitori disposti sulla strada, sulle pareti e sui tetti degli edifici
- Trasmittitori disposti lungo una semicirconferenza

Energia assorbita sulla sezione del dominio



Il grafico sopra mostra l'andamento della densità di energia assorbita in un giorno lungo le diverse superfici in diverse condizioni.

Es: calcolo tramite ray tracing della radiazione solare dissipata in calore



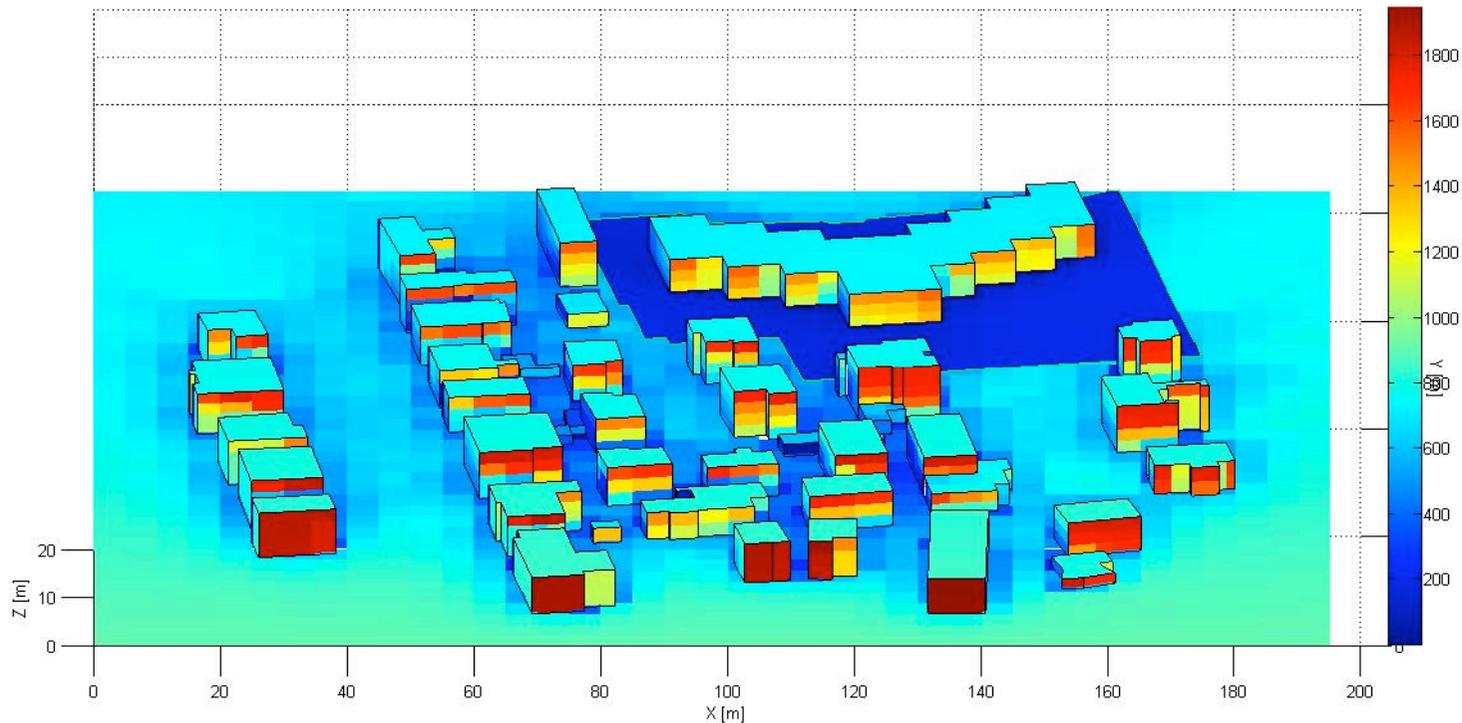
Il grafico mostra l'energia dissipata in un giorno da un ettaro di un modello di superficie urbana nel mese di giugno per diverse combinazioni dei parametri

Esempio di calcolo: città reale (I)



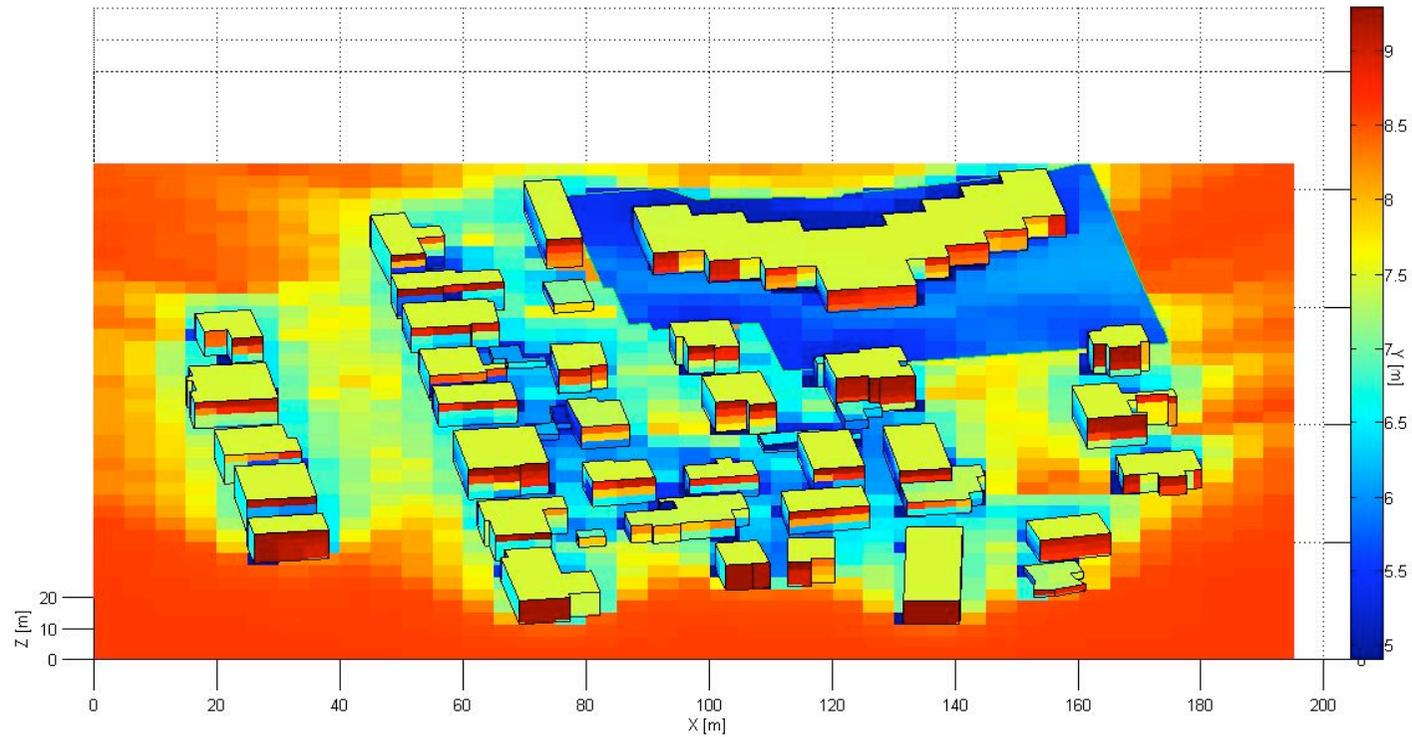
Cesena (zona ippodromo)

Esempio di calcolo: città reale (II)



simulazione dell'area: potenza specifica assorbita nell'arco di un giorno invernale (il path solare è relativo al solstizio di inverno, mentre l'indice di chiarezza utilizzato è quello medio del mese di Dicembre).

Esempio di calcolo: città reale (I)



Temperatura media superficiale nel mese di Dicembre

Sviluppi futuri

- Migliorare il calcolo della temperatura delle superfici
- Passare al calcolo della temperatura dell'aria (tenendo conto dei moti di convezione e del vento)
- Fare un calcolo complessivo della efficienza energetica di un'area urbana tenendo conto di tutti i fattori
- Si avrà così un tool di verifica e anche di progetto di un'area urbana