

***Impiego di apparati laser all'infrarosso  
per il telerilevamento dei composti gassosi  
atmosferici: funzionamento e potenzialità***

***Fabrizio Cuccoli***

*CNIT c/o Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni  
Università di Firenze*



**cnit** consorzio nazionale  
interuniversitario  
per le telecomunicazioni

## *Sommario*

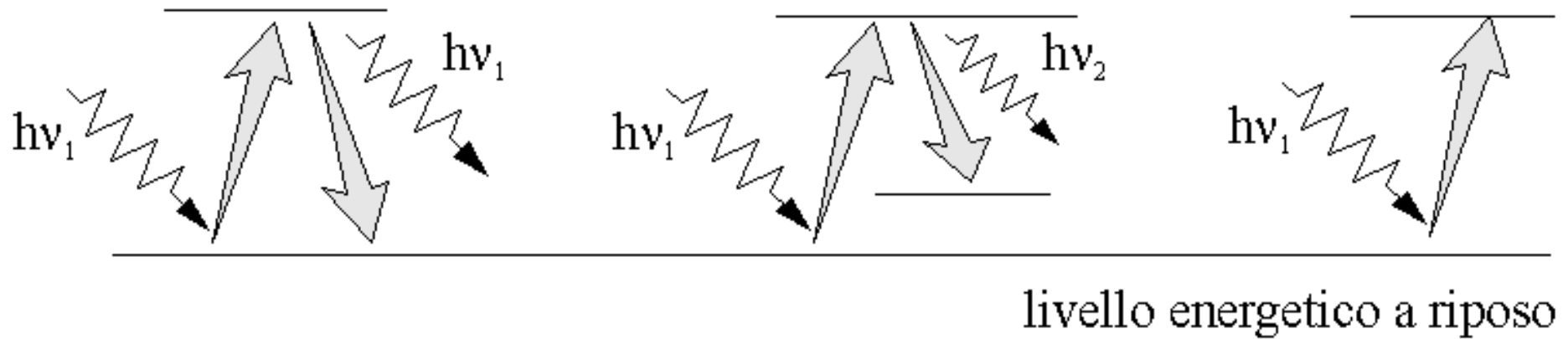
Applicazione di apparati laser all'infrarosso (TDL, tunable diode laser) per il telerilevamento della composizione atmosferica.

- Cenni sull'interazione radiazione - materia in atmosfera
  - Definizione dei principali parametri utili nel telerilevamento della composizione atmosferica
  - Equazioni basilari nel telerilevamento laser DAS (Differential absorption spectroscopy)
- Descrizione e funzionamento della strumentazione a disposizione
  - Descrizione delle modalità di misura
  - Pregi e difetti
- Campi applicativi, potenzialità e limiti del telerilevamento con sistemi TDL
  - Ricostruzione di campi 2D tramite tecniche di inversione tomografiche
  - Stima di flussi di emissione

## Interazione radiazione materia

Fenomeno di emissione-assorbimento di energia da parte della materia (molecole ed atomi).

livello energetico di eccitazione



(a)

(b)

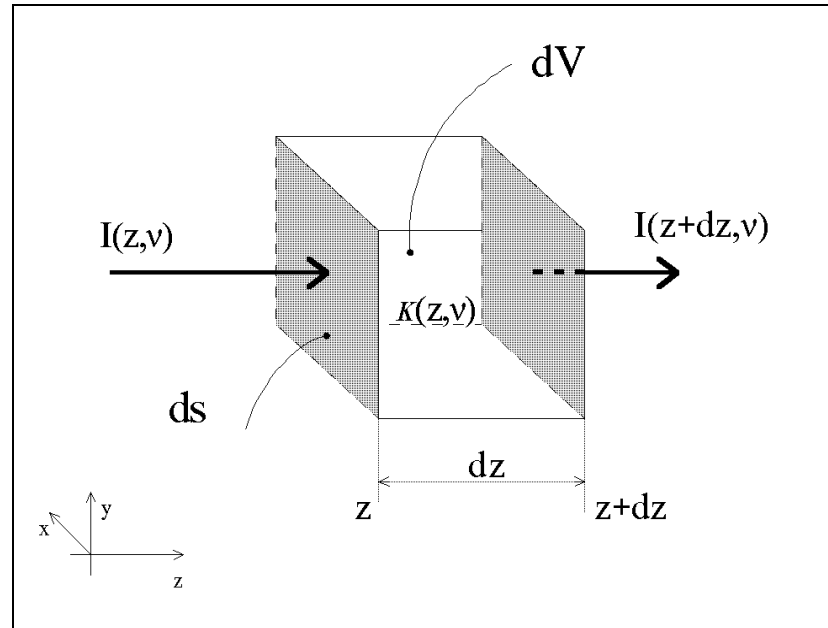
(c)

*scattering risonante*

*scattering non risonante*

*assorbimento*

# Effetti di **scattering** e di **assorbimento** sulla propagazione di un'onda e.m.



$k(z, \nu)$  Coefficiente di attenuazione

$[W/m^2 \cdot Hz]$   $\rightarrow I(z + dz, \nu) = -I(z, \nu)k(z, \nu) \cdot dz$   
(legge di Lambert-Beer -  $\nu=1/\lambda$ )

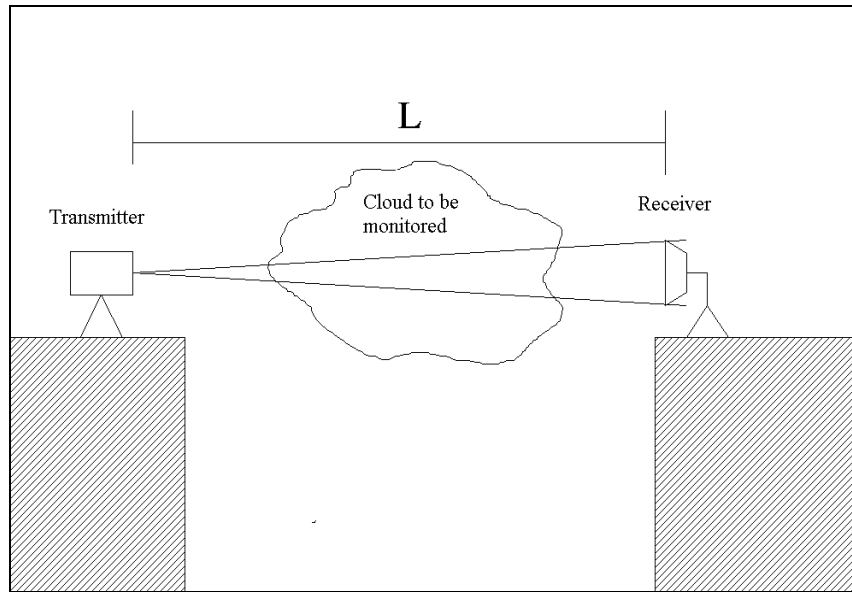
## *Parametri di interesse nel telerilevamento*

$$k(z, \lambda) = k_a(z, \lambda) + k_s(z, \lambda)$$

$k_a(z, \lambda)$	Coefficiente di assorbimento tiene conto della quantità di energia persa per <b>assorbimento</b>
$k_s(z, \lambda)$	Coefficiente di scattering (diffusione) tiene conto della quantità di energia persa per <b>diffusione</b>

Tutti i coefficienti sono funzione della quantità di materia interagente (molecole e atomi) delle condizioni termodinamiche (temperatura e pressione) e delle caratteristiche spettroscopiche.

## Equazioni energetiche



Potenza ricevuta  $P_r(\nu) = P_t(\nu)e^{-\tau(z_t, z_r, \nu)}$

profondità ottica  $\tau(z_1, z_2, \nu) = \int_{z_1}^{z_2} k(z, \nu) dz$

Coeff. di attenuazione  $k(z, \nu) \cong k_A(z, \nu)$

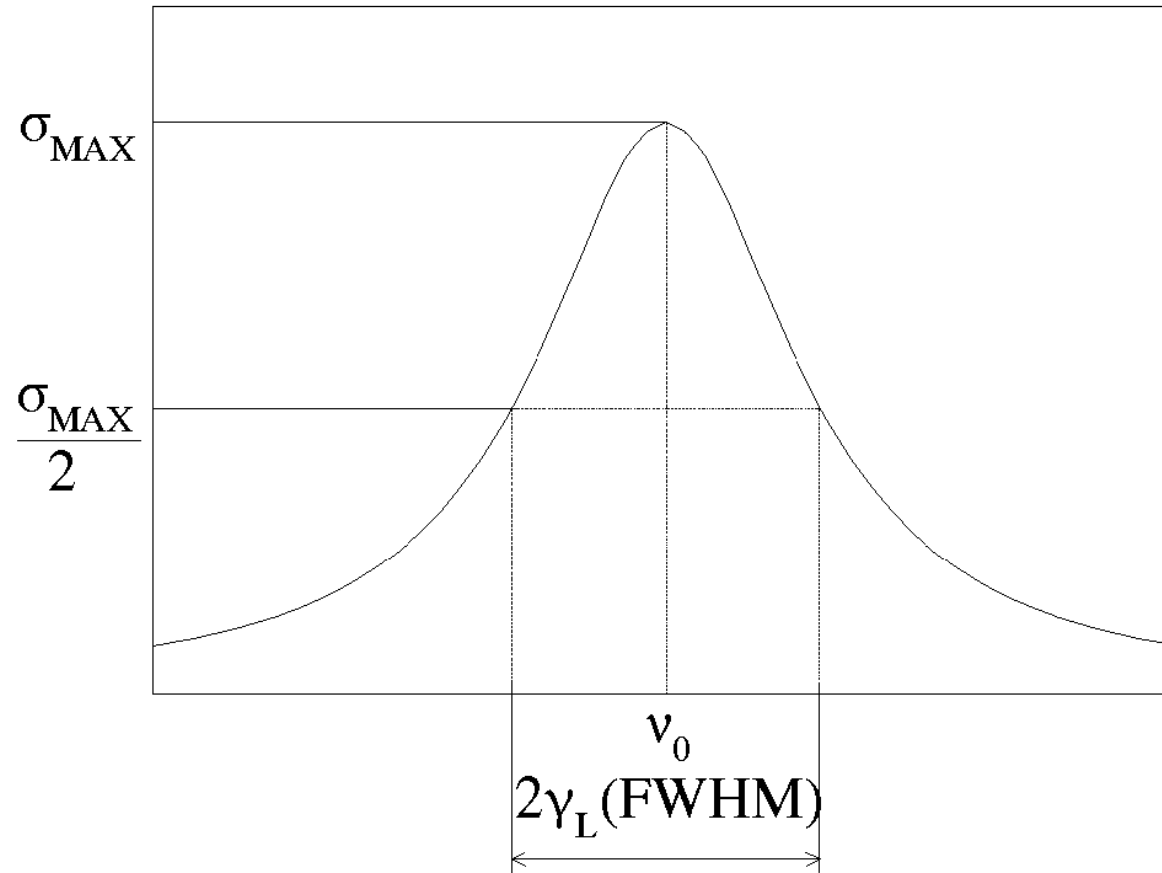
Coeff. di assorbimento

$$k_A(z, \nu) = \sum_{i=1}^N N_i(z) \cdot \sigma_i(N_i(z), P(z), T(z), \nu)$$

Sezione di assorbimento  $\sigma_i(z, \nu) = \sum_{j=1}^{L_i} \sigma_{ij}(N_i(z), P(z), T(z), \nu_{ij}, S_{ij}, \gamma_{ij}, \nu)$

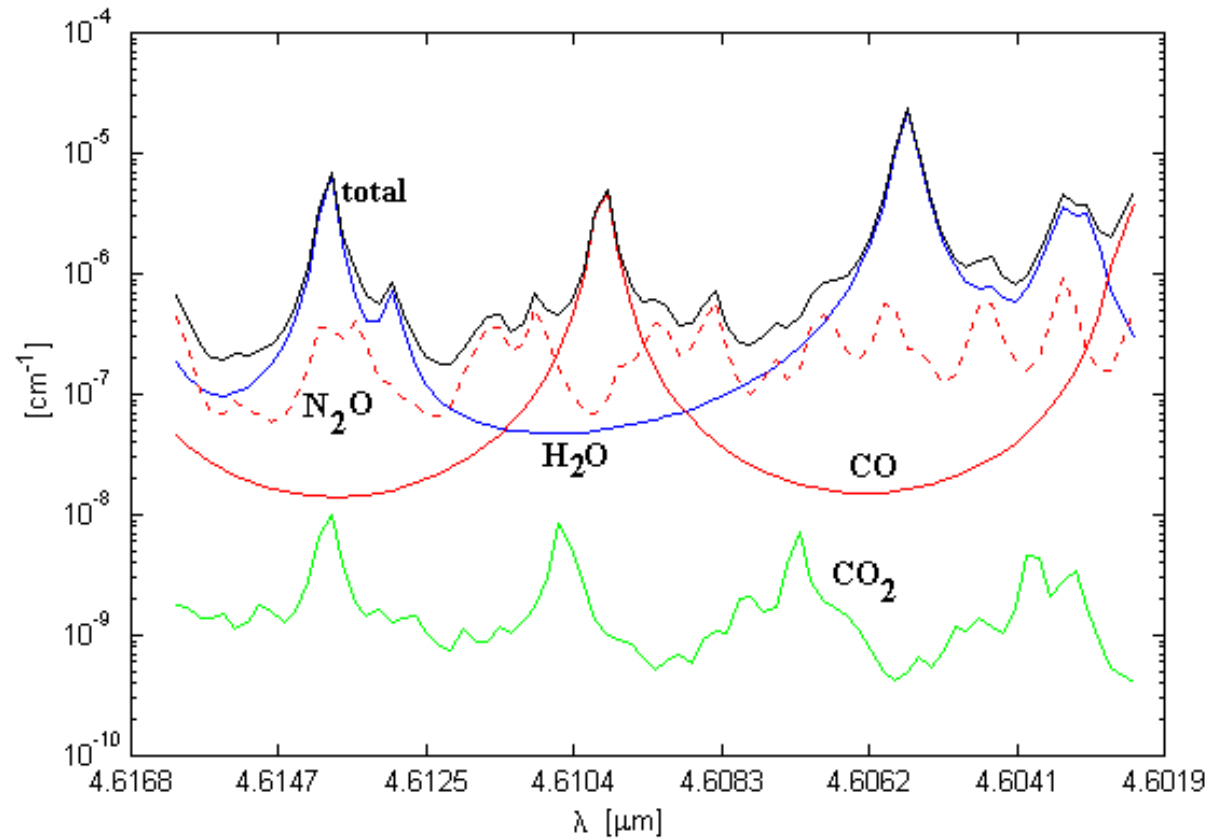
Attenuazione in potenza  $A(\nu) = \frac{P_t(\nu)}{P_r(\nu)} \Rightarrow A(\nu) = e^{\tau(z_t, z_r, \nu)}$

## *Linea di assorbimento lorentziana*



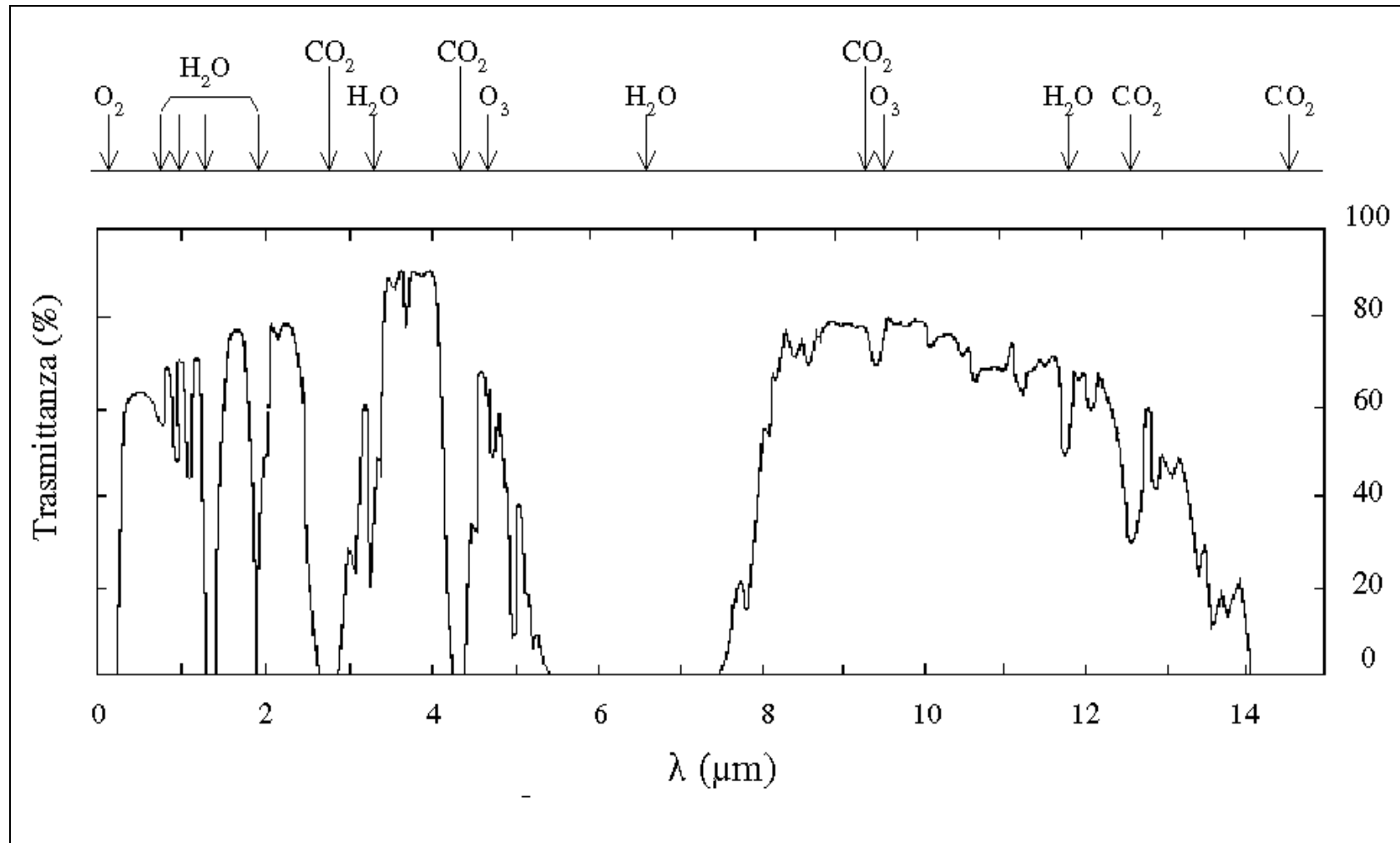
$$\sigma(\nu) = \frac{S}{\pi} \frac{\gamma_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \gamma_L^2}$$

## Esempio di coefficiente di assorbimento

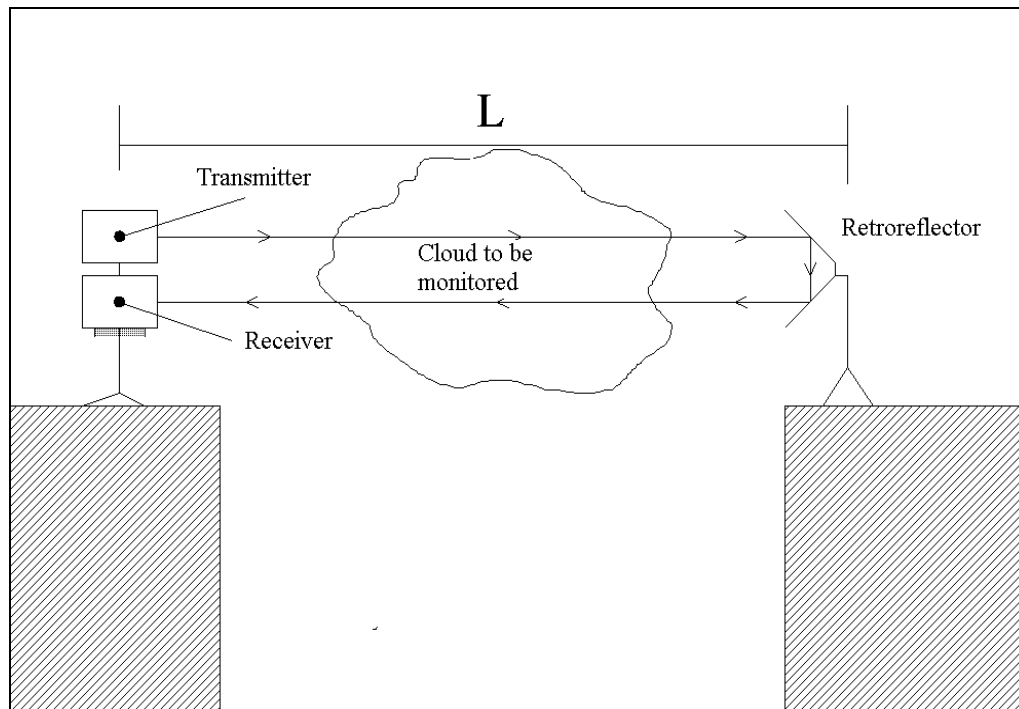


Coefficiente di assorbimento  $k_A(\lambda)$  di un  $\text{cm}^3$  di atmosfera terrestre standard.  
Principali componenti molecolari assorbenti:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$





Valori in percentuale della funzione  $T(\nu) = 1/A(\nu)$  nell'infrarosso relativi alle misure di attenuazione ottenute su un percorso parallelo alla superficie terrestre lungo 1828m e posto al livello del mare



$$\frac{P_t(\nu)}{P_r(\nu)} \propto e^{2\tau(z_t, z_r, \nu)}$$

In caso di attenuazione dominata dall'assorbimento di una singola specie molecolare:

$$\tau(z_t, z_r, \nu) \cong \sigma_0(\nu) \overline{N_0} L - \quad \overline{N_0} = \frac{1}{L} \int_{z_t}^{z_r} N_0(z) dz$$

Si definisce concentrazione lineare la quantità:

$$\overline{N_0} L$$

(unità di misura) [ppm·m] oppure [g/m<sup>2</sup>]

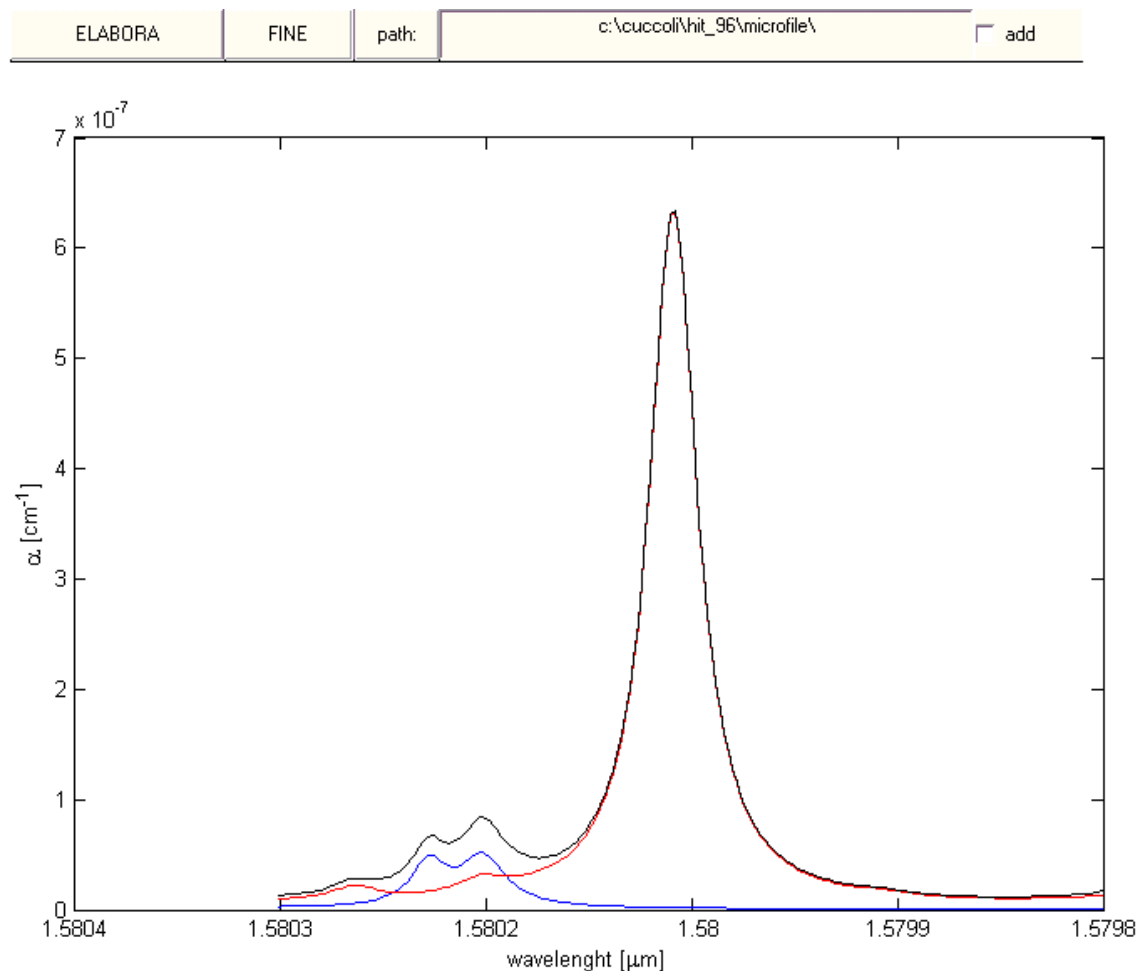
### **Rilevazione armonica .....**

$$\begin{aligned}
 P_{rx}(t) &= ke^{-\sigma(\nu(t))\bar{NL}'} = \\
 &= ke^{-\left[\sigma(\tilde{\nu}) + \sigma'(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu}) + \frac{1}{2}\sigma''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^2 + \frac{1}{6}\sigma'''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3\right]\bar{NL}'} + o\left((\nu - \tilde{\nu})^3\right)} = \\
 &= ke^{-\sigma(\tilde{\nu})\bar{NL}'} e^{-\left[\sigma'(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu}) + \frac{1}{2}\sigma''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^2 + \frac{1}{6}\sigma'''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3\right]\bar{NL}'} + o\left((\nu - \tilde{\nu})^3\right)} = \\
 &= ke^{-\sigma(\tilde{\nu})\bar{NL}'} \left\{ \begin{aligned} &1 - \left[\sigma'(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu}) + \frac{1}{2}\sigma''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^2 + \frac{1}{6}\sigma'''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3\right]\bar{NL}' + \\ &+ \frac{1}{2}\left[\sigma'(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu}) + \frac{1}{2}\sigma''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^2 + \frac{1}{6}\sigma'''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3\right]^2 (\bar{NL}')^2 + \\ &- \frac{1}{6}\left[\sigma'(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu}) + \frac{1}{2}\sigma''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^2 + \frac{1}{6}\sigma'''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3\right]^3 (\bar{NL}')^3 \end{aligned} \right\} + o\left((\nu - \tilde{\nu})^3\right) =
 \end{aligned}$$

$$= ke^{-\sigma(\tilde{\nu})\bar{N}L'} \left\{ \begin{aligned} &1 - \left[ \sigma'(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu}) + \frac{1}{2} \sigma''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^2 + \frac{1}{6} \sigma'''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3 \right] \bar{N}L' + \\ &\frac{1}{2} \left[ \sigma^2(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^2 + \sigma'(\tilde{\nu}) \sigma''(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3 \right] (\bar{N}L')^2 + \\ &-\frac{1}{6} \sigma^3(\tilde{\nu})(\nu - \tilde{\nu})^3 (\bar{N}L')^3 \end{aligned} \right\} + o\left((\nu - \tilde{\nu})^3\right) =$$

$$\nu - \tilde{\nu} = \Delta \nu \cos(2\pi f_0 t)$$

$$\begin{aligned}
&= ke^{-\sigma(\tilde{\nu})\bar{N}L'} \left\{ \begin{aligned} &1 - \frac{1}{4}\sigma''(\tilde{\nu})\Delta\nu^2\bar{N}L' + \frac{1}{4}\sigma'^2(\tilde{\nu})\Delta\nu^2(\bar{N}L')^2 + \\ &\left[ -\sigma'(\tilde{\nu})\Delta\nu\bar{N}L' - \frac{3}{24}\sigma'''(\tilde{\nu})\Delta\nu^3\bar{N}L' + \right. \\ &+ \left. \frac{3}{8}\sigma'(\tilde{\nu})\sigma''(\tilde{\nu})\Delta\nu^3(\bar{N}L')^2 + \right. \\ &\left. - \frac{3}{24}\sigma'^3(\tilde{\nu})\Delta\nu^3(\bar{N}L')^3 \right] \cos(2\pi f_0 t) + \\ &+ \left[ -\frac{1}{4}\sigma''(\tilde{\nu})\Delta\nu^2\bar{N}L' + \right. \\ &\left. + \frac{1}{4}\sigma'^2(\tilde{\nu})\Delta\nu^2(\bar{N}L')^2 \right] \cos(2\pi 2f_0 t) + \\ &+ \left[ -\frac{1}{24}\sigma'''(\tilde{\nu})\Delta\nu^3\bar{N}L' + \right. \\ &\left. + \frac{1}{8}\sigma'(\tilde{\nu})\sigma''(\tilde{\nu})\Delta\nu^3(\bar{N}L')^2 + \right. \\ &\left. - \frac{1}{24}\sigma'^3(\tilde{\nu})\Delta\nu^3(\bar{N}L')^3 \right] \cos(2\pi 3f_0 t) \end{aligned} \right\} + o\left((\nu - \tilde{\nu})^3\right)
\end{aligned}$$



<input checked="" type="checkbox"/> -b	<input checked="" type="checkbox"/> H2O	50000
<input checked="" type="checkbox"/> -r	<input checked="" type="checkbox"/> CO2	400
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> O3	0.2
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> N2O	0.012
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> CO	10
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> CH4	2
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> O2	209480
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> NO	0.3
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> SO2	0.1
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> NO2	0.5
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> NH3	0.01
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> HNO3	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> OH	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> HF	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> HCl	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> HBr	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> HI	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ClO	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> OCS	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> H2CO	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> HOCl	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> N2	780840
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> HCN	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> CH3Cl	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> H2O2	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> C2H2	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> C2H6	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> PH3	0

da: D6212+00 a: D6336+00 [left,right] freq=[1.61,1.53]

Left 632.8 right 633 1.58 1.58 ZOOM NO-ZOOM

ordine 0 ☐ soqlia= 0 linear N.x= 200 wavelength -6

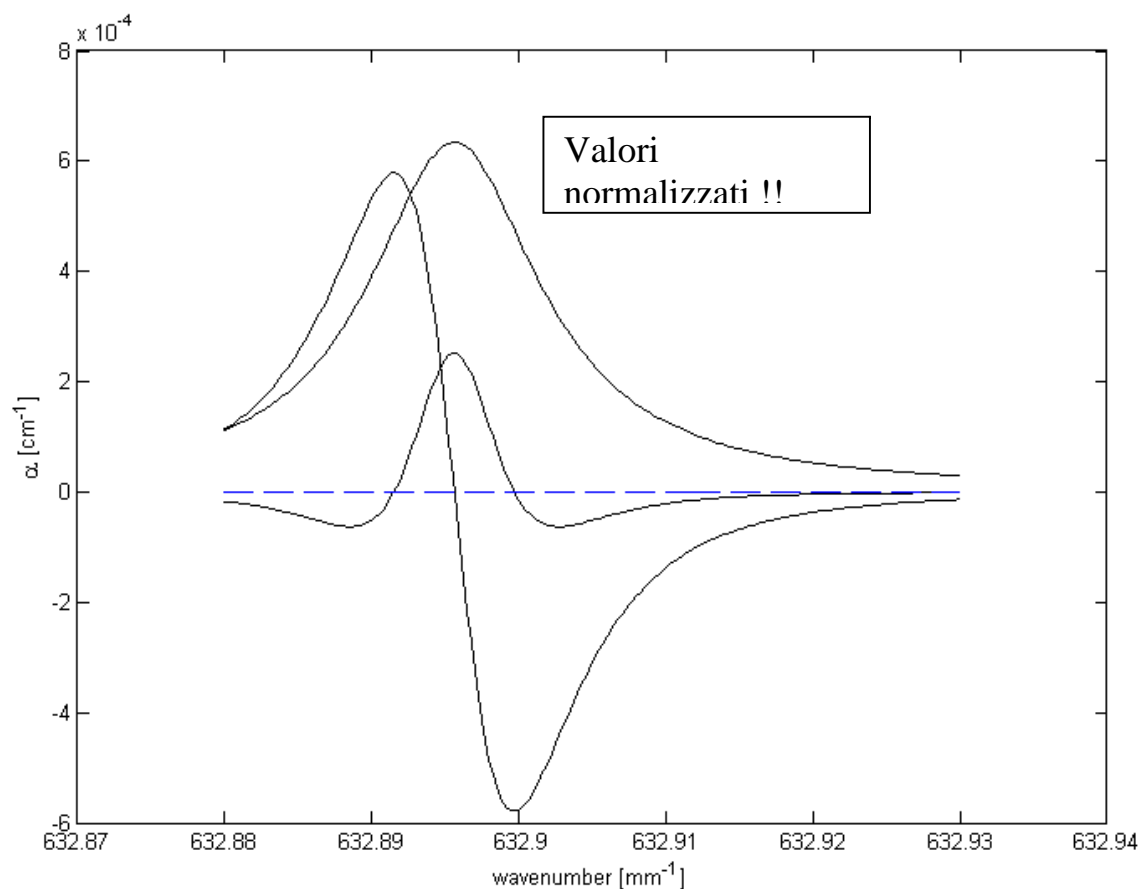
iso-si

AND XOR MAX

T[K] 296

P[mb] 1013

ELABORA FINE path: c:\cuccoli\hit\_96\microfile\ ☒ add

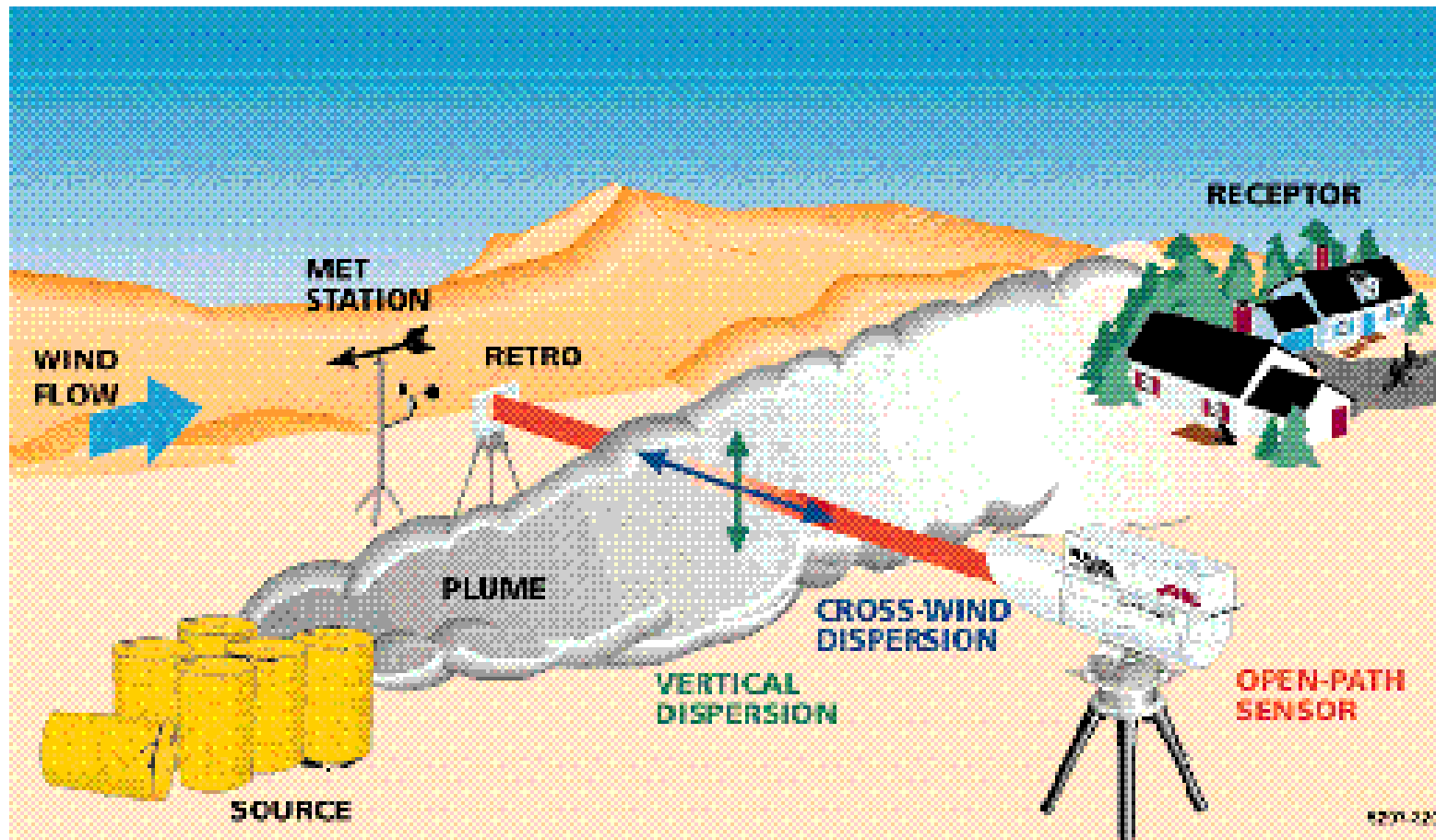


<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	H2O	50000
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	CO2	400000
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	O3	0.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	N2O	0.012
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	CO	10
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CH4	2
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	O2	209480
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NO	0.3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	SO2	0.1
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NO2	0.5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NH3	0.01
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HNO3	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	OH	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HF	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HCl	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HBr	0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	HI	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ClO	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	OCS	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	H2CO	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HOCl	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	N2	780840
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HCN	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CH3Cl	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	H2O2	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	C2H2	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	C2H6	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	PH3	0

da: D6212+00 a: D6336+00 [left,right] freq=[621.21,653.20]  
 Left 632.8 right 633 632.88 632.91 ZOOM NO-ZOOM  
 ordine 0 ☒ soqlia= 0 linear N.x= 200 wavenumber -3  
 iso-si

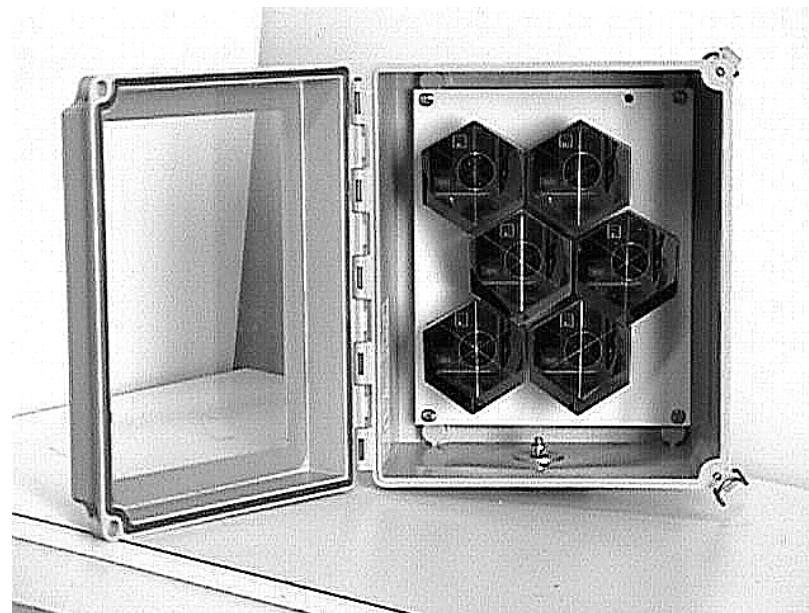
AND XOR MAX  
 T(K) 296  
 P[mb] 1013

## *Configurazione con retroriflettore*



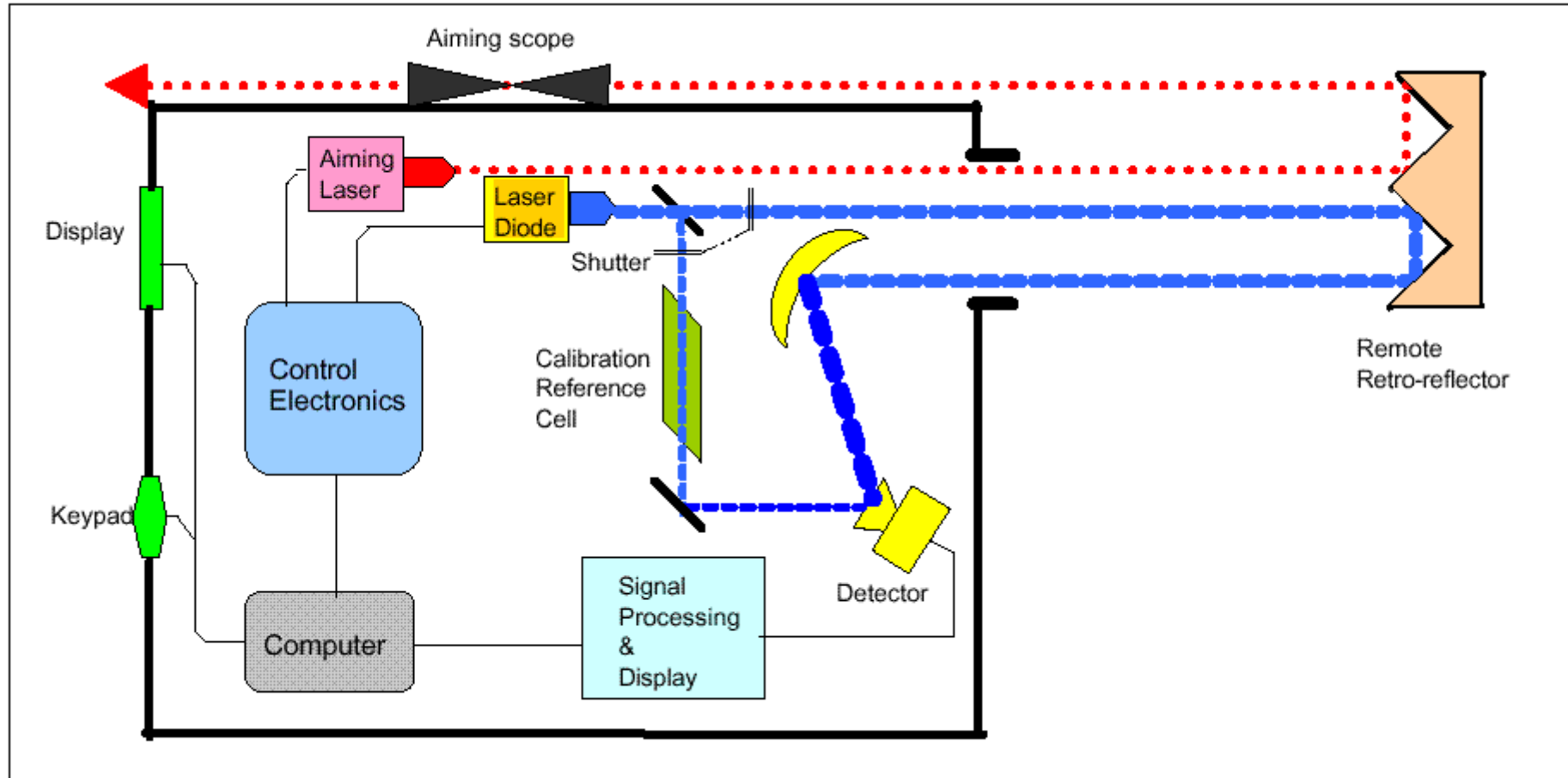


## Apparati principali per la misura della concentrazione lineare

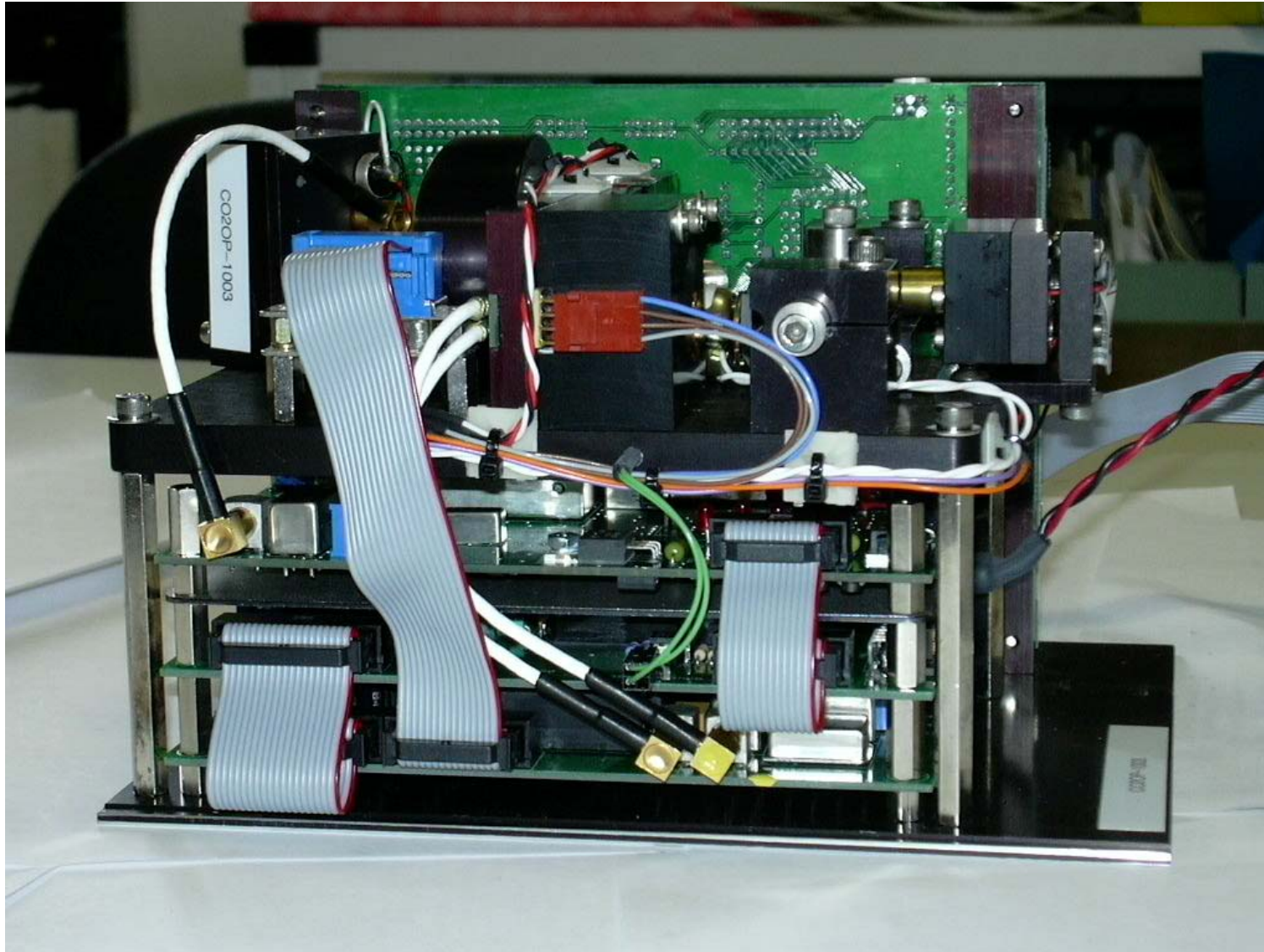


- ⇒ Gasfinder: Unità laser ricetrasmittente (Boreal-laser) con TDL all'infrarosso a temperatura ambiente.
  - Potenza emessa 1-10 mw,
  - larghezza spettrale della riga laser  $10^{-12}$  m (circa),
  - divergenza del fascio 2 mrad (circa)
- ⇒ retroriflettore a vertice di cubo
  - portata in distanza (max 1000 m)

## *Schema di funzionamento del Gasfinder*

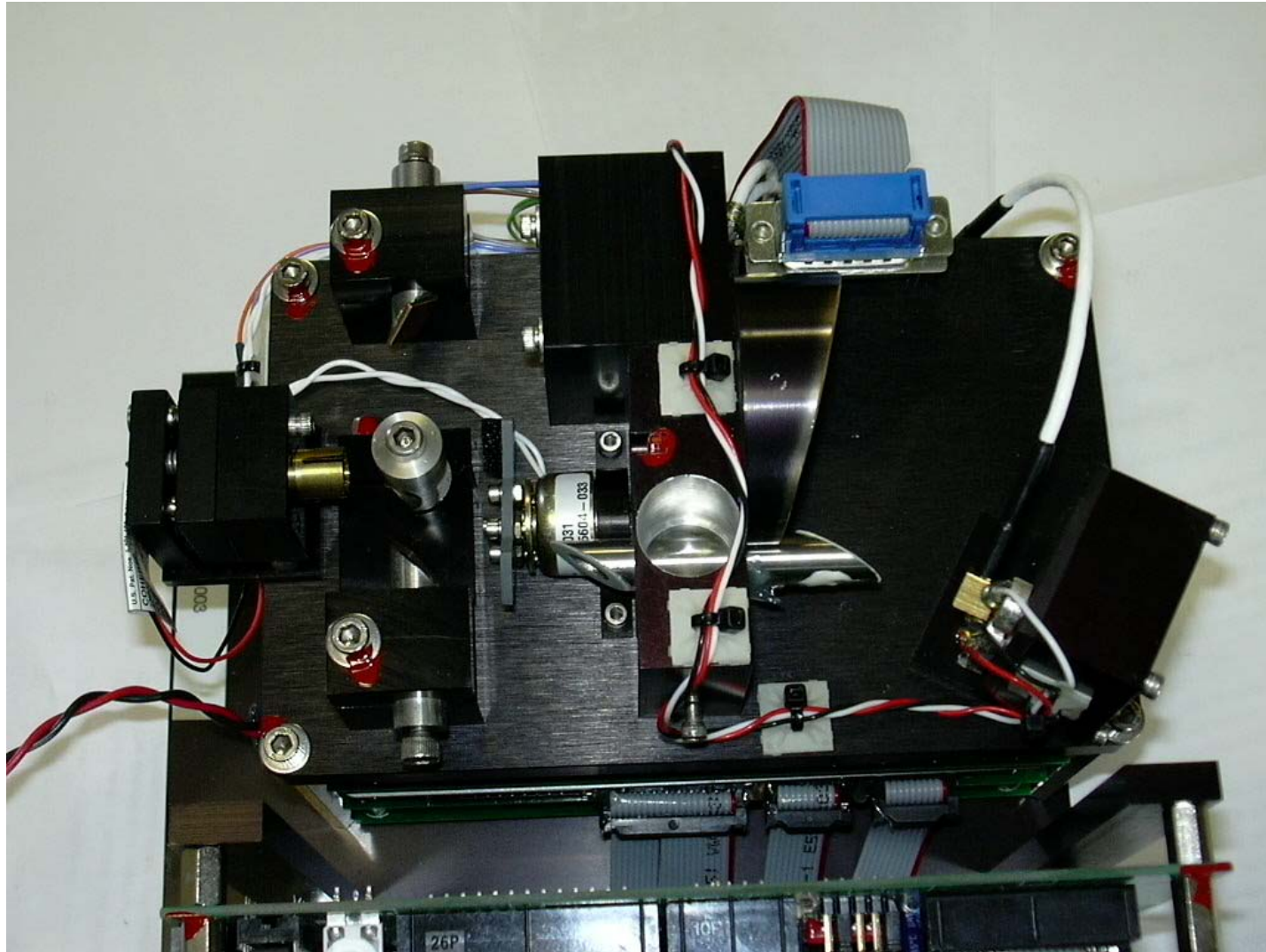


*Foto GF*

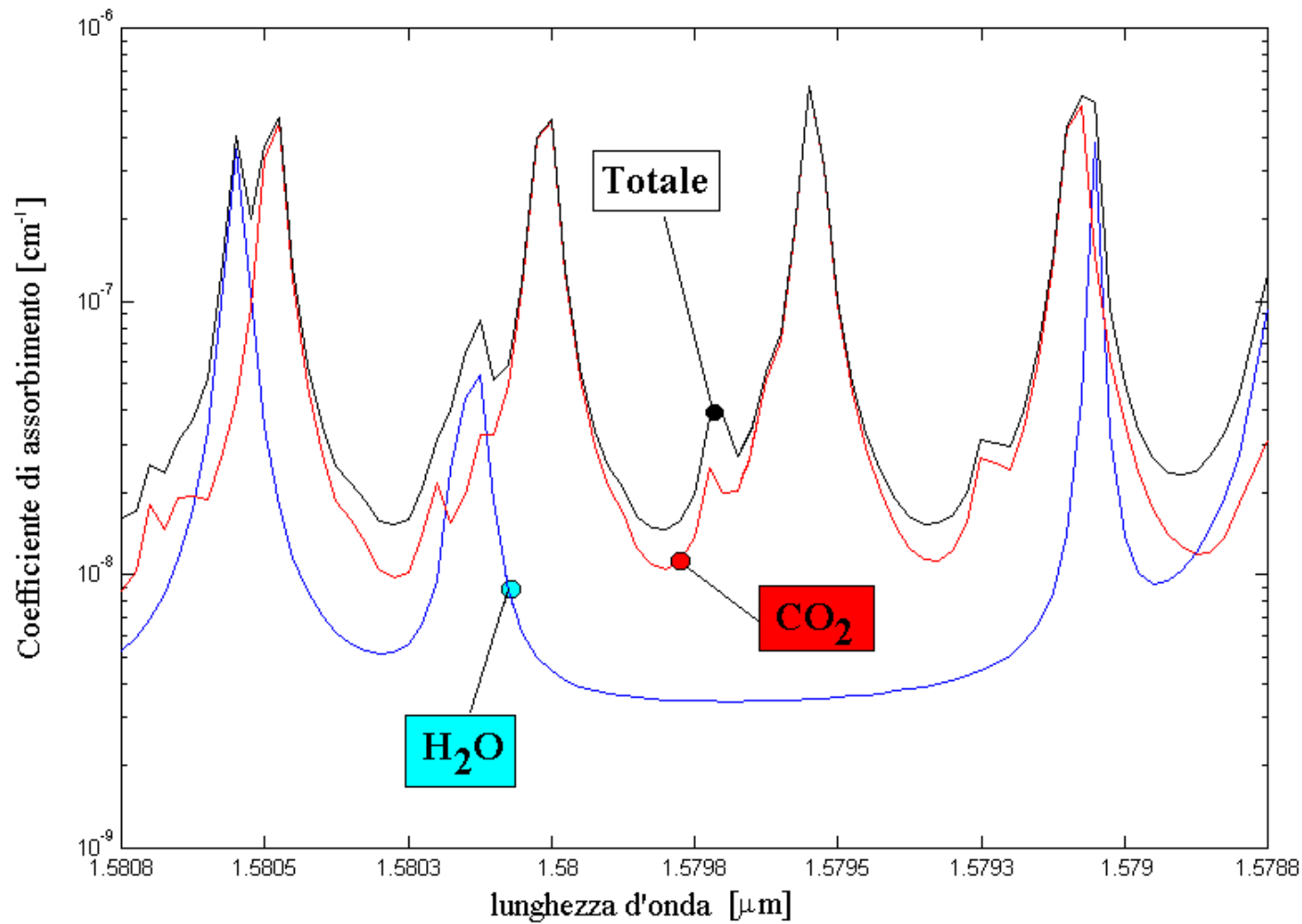




*Foto GF*



## *Intervallo spettrale di scansione per la misura della CO<sub>2</sub>*



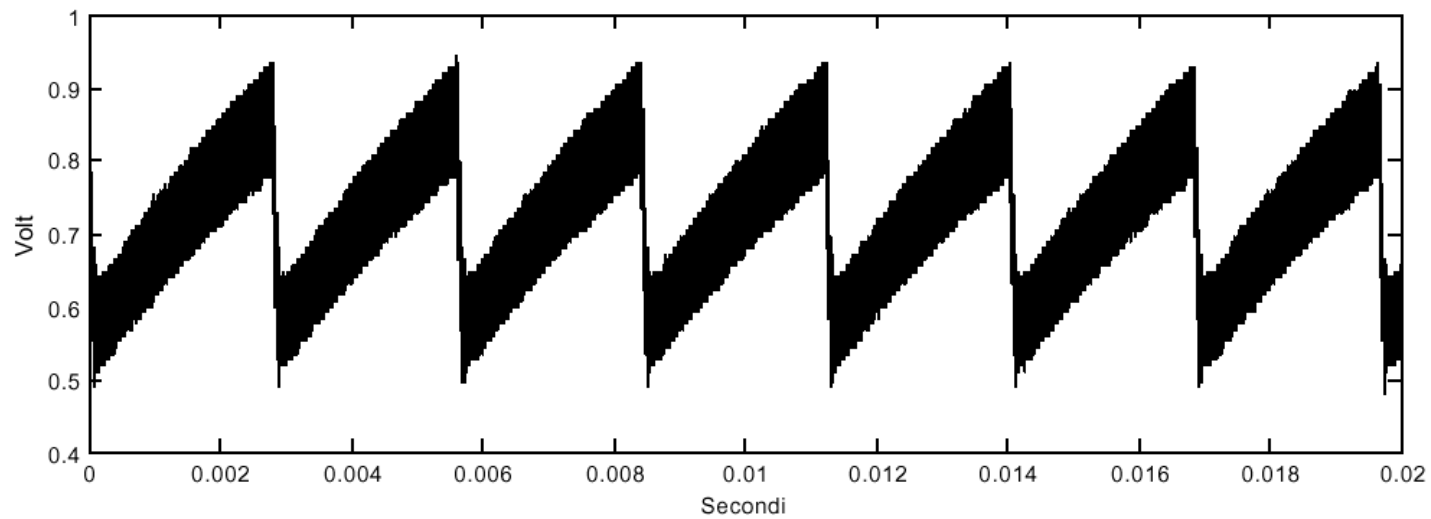
L'intervallo utilizzato per la misura della CO<sub>2</sub> è centrato in 1580 nm

## *Modalità di misura*

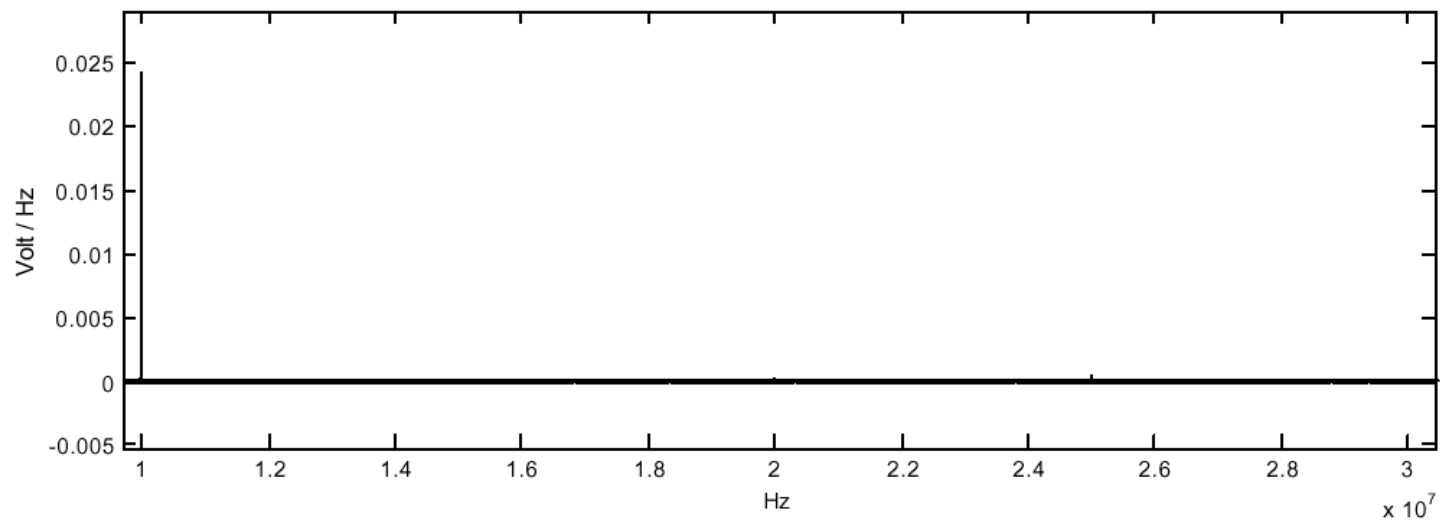
1. La lunghezza d'onda della radiazione laser IR emessa dal diodo dipende dall'ampiezza della corrente di alimentazione.
2. La corrente di alimentazione ha un andamento a dente di sega al quale è sommato un segnale sinusoidale di portante  $f_0$ .
3. L'estensione del dente di sega garantisce la scansione dell'intera riga di assorbimento (ordine di  $10^{-10}$  m) della specie molecolare sotto osservazione.
4. La modulazione sinusoidale permette la rivelazione armonica: il comportamento non lineare del mezzo attraversato causa la comparsa di armoniche superiori rispetto alla fondamentale.
5. Il circuito di ricezione del gasfinder rileva la seconda armonica ( $2f_0$ ) che risulta anch'essa essere proporzionale alla concentrazione lineare (poiché è proporzionale alla combinazione lineare delle derivate prima e seconda della profondità ottica).
6. La radiazione laser viene inviata alternativamente alla cella di riferimento contenente un campione noto di aria (in termini di concentrazione della specie di interesse) e al retroriflettore esterno.

7. I dati acquisiti dall'esterno sono messi in correlazione con quelli acquisiti dalla cella campione.
8. Tramite minimi quadrati viene calcolato il coefficiente di regressione lineare e il coefficiente di correlazione (cella di riferimento ed esterno) tra i due set di dati
9. Il coefficiente di regressione lineare, moltiplicato per la concentrazione nota della cella campione, fornisce la concentrazione lineare lungo il percorso ottico gasfinder-retroriflettore.
10. Il coefficiente di correlazione (0-100%) fornisce un indice sulla bontà della misura.

## *Segnale trasmesso*

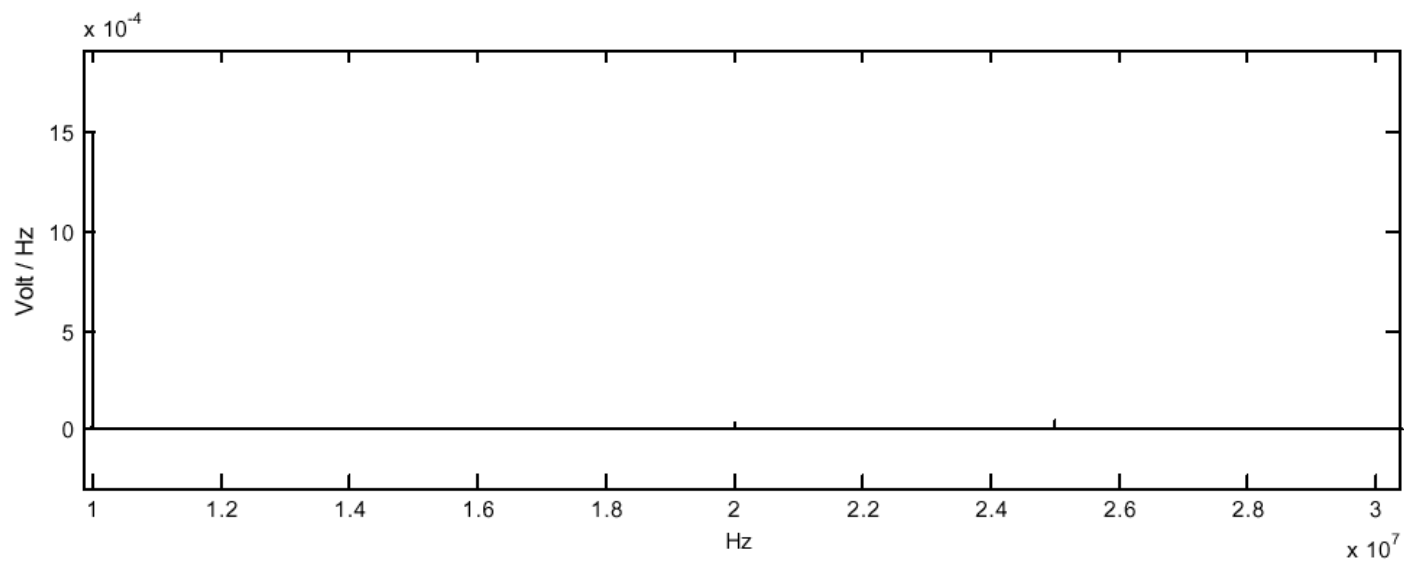
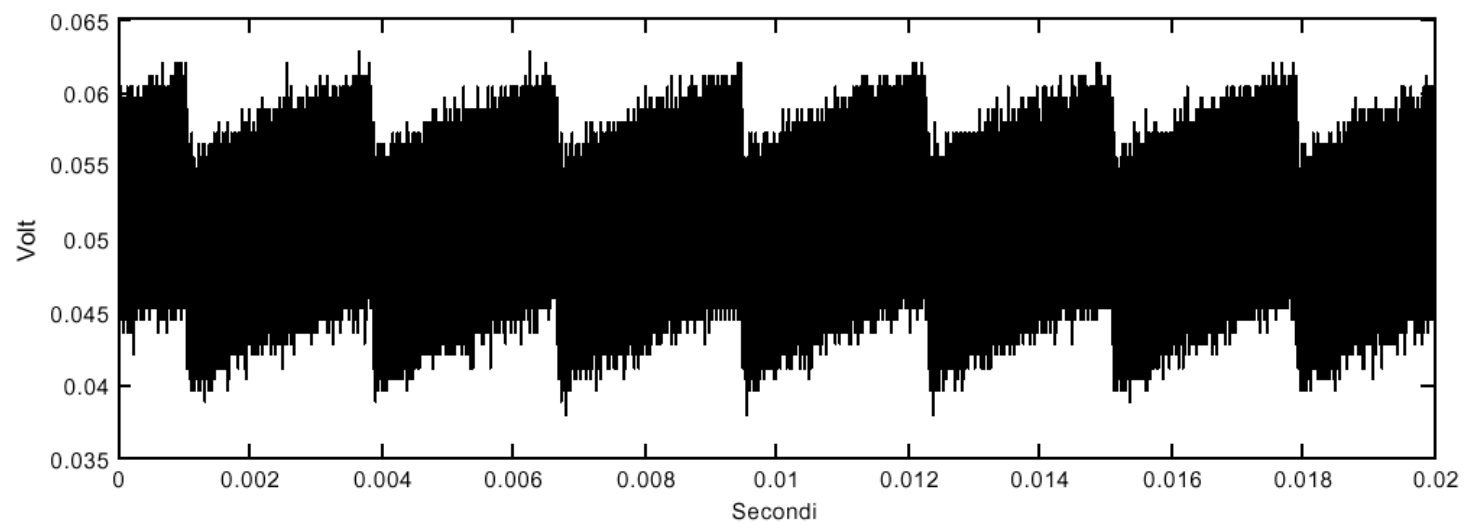


**Freq rampa  
357 Hz**

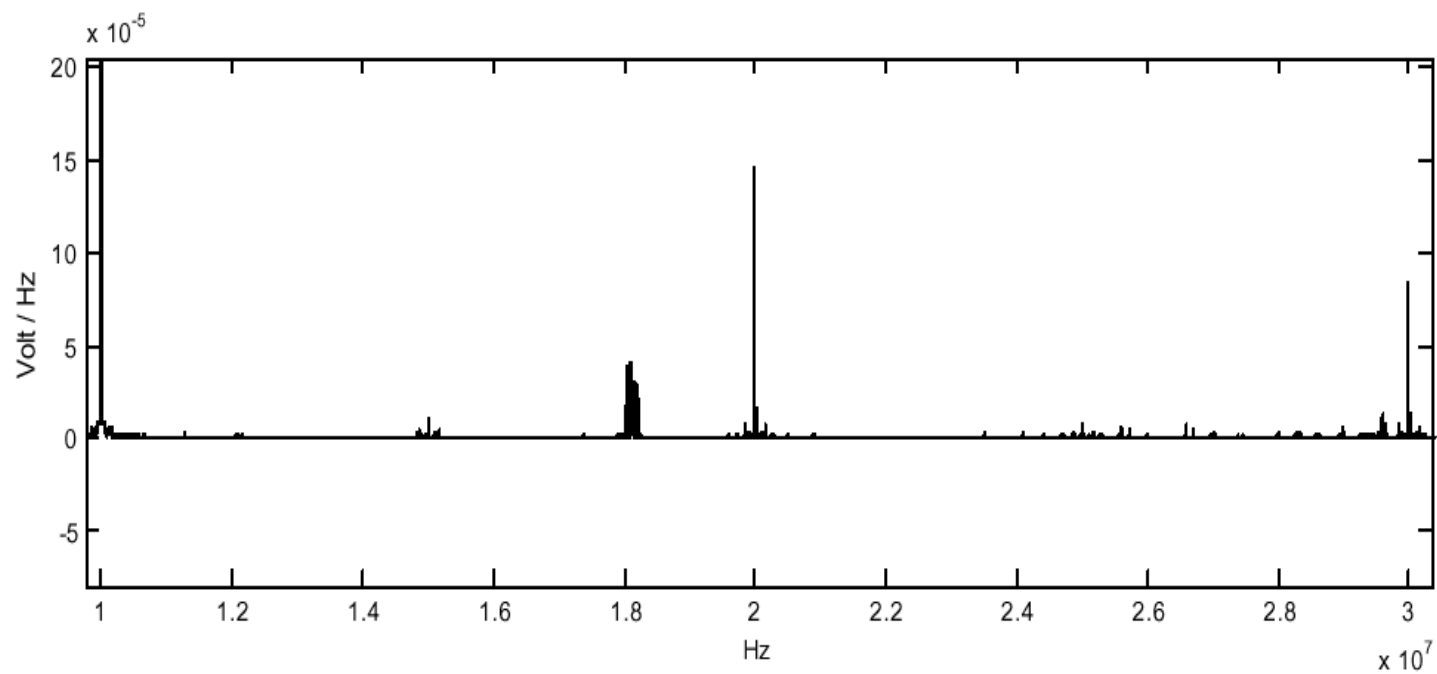


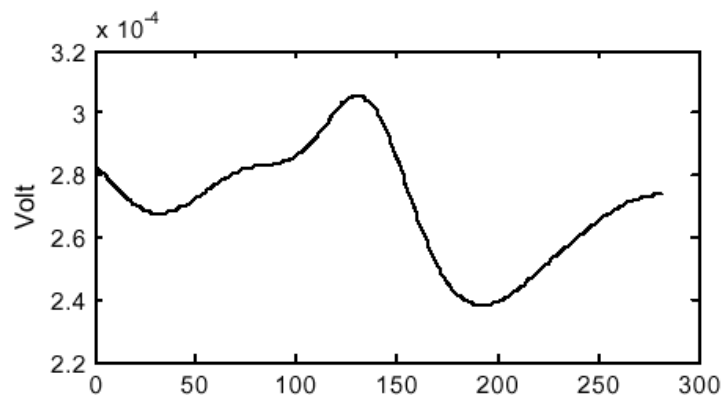
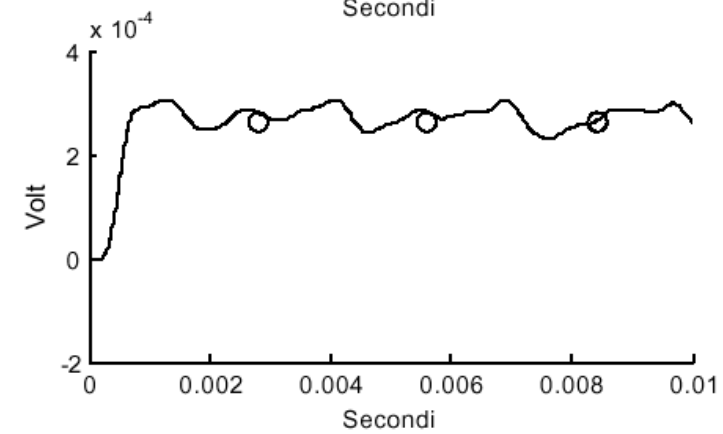
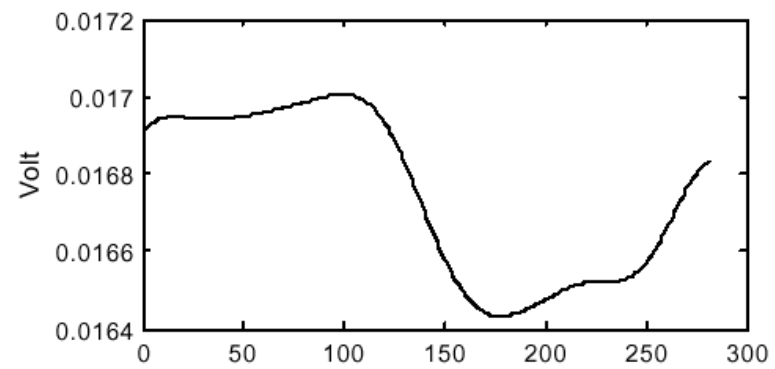
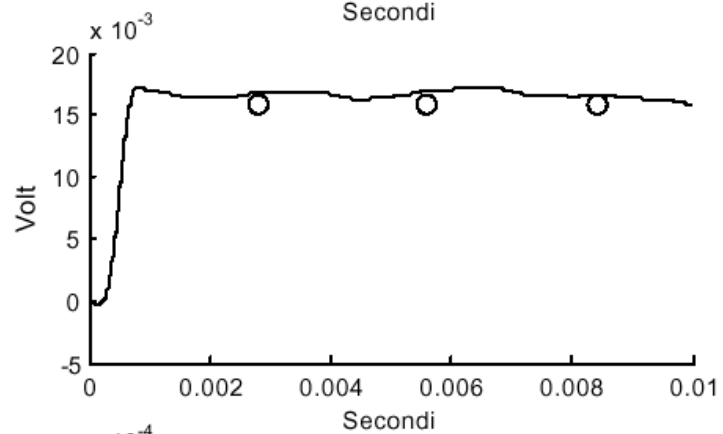
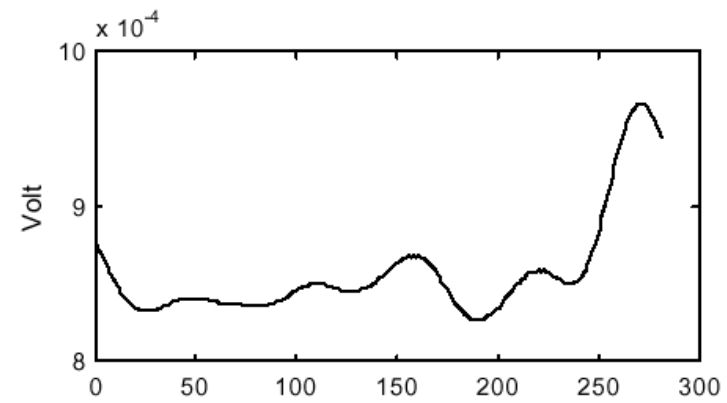
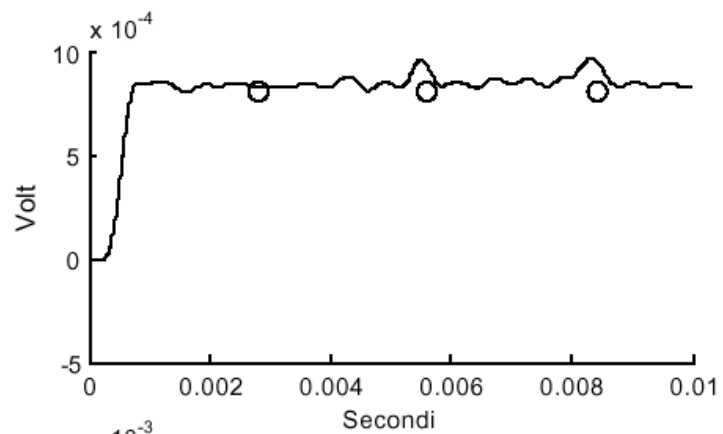


## *Segnale ricevuto (5 m)*

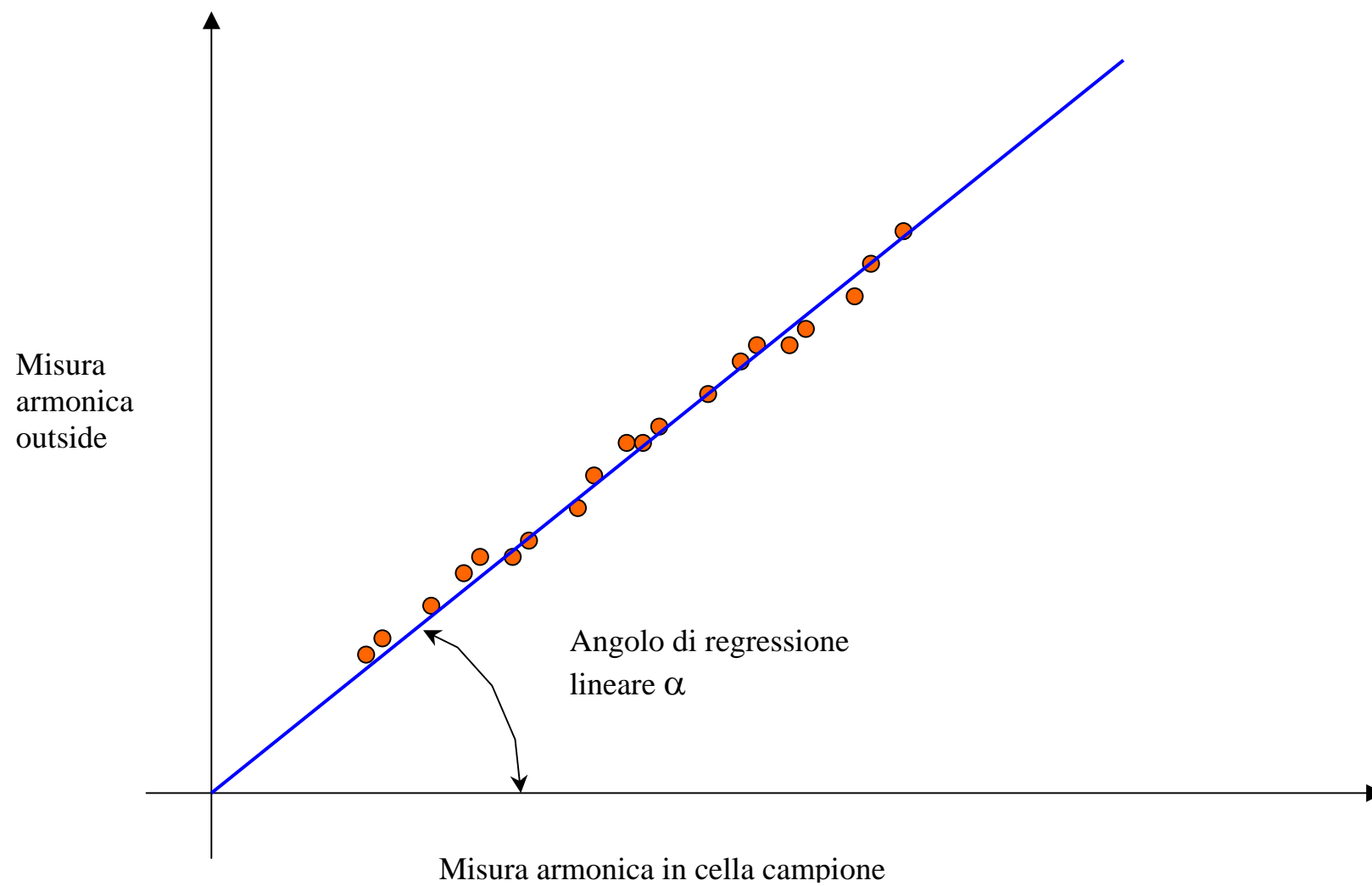


## *Segnale ricevuto con buffer (70 m)*





# Metodo di misura con cella campione e regressione lineare



$$C_{\text{out}} = \alpha \cdot C_{\text{in}}$$

## *Pregi e difetti*

- Operazioni di allineamento semplici e veloci (ma limitate ad un solo percorso ottico)
- Tempi di elaborazione trascurabili (1 secondo circa)
- La presenza della cella campione:
  - garantisce alta affidabilità della misura e non necessitano operazioni di calibrazione (auto calibrazione)....
  - ....ma limita le capacità di misura ad una sola specie
- L'utilizzo della seconda armonica permette di enfatizzare il contributo della specie sotto osservazione rispetto agli altri fenomeni di attenuazione (vapore acqueo).
- Per la misura di più specie sono necessarie lunghezze d'onda diverse quindi è necessario un diodo per ogni specie.

## *Applicazioni*

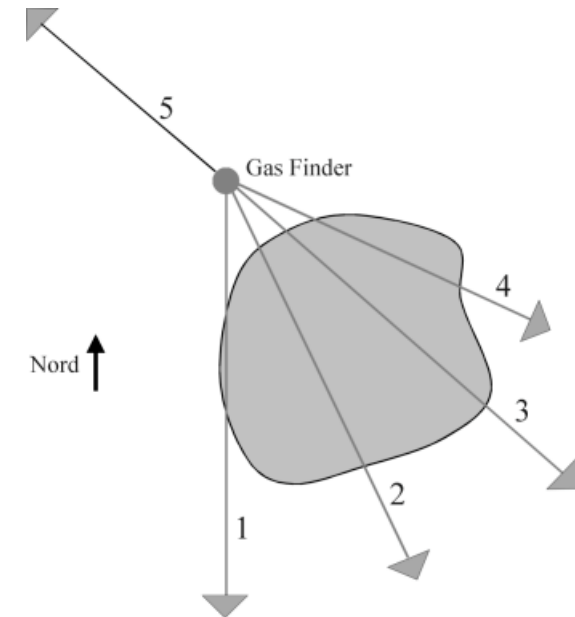
Monitoraggio urbano  
Controllo della qualità dell'aria  
(NO<sub>x</sub> CO)

Monitoraggio impianti industriali  
Controllo di emissioni nocive  
(HF, H<sub>2</sub>S, CO, CH<sub>4</sub>)

Monitoraggio aree geotermiche e vulcaniche  
Controllo di situazioni di rischio  
(CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S)

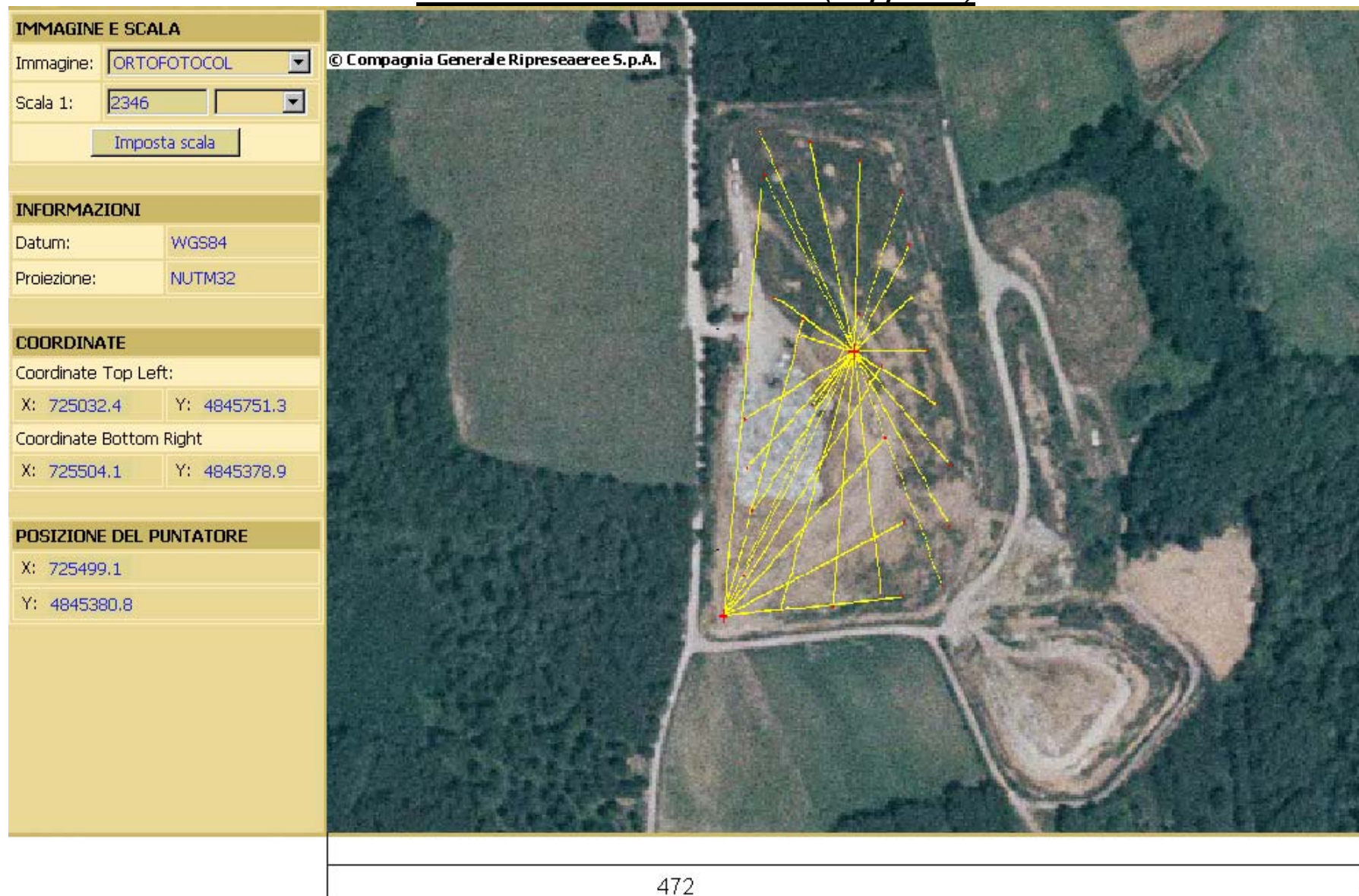
Monitoraggio aree adibite a discarica  
Controllo degli odori  
(H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>)

## Emissioni di CO2 a Pienza (SI)

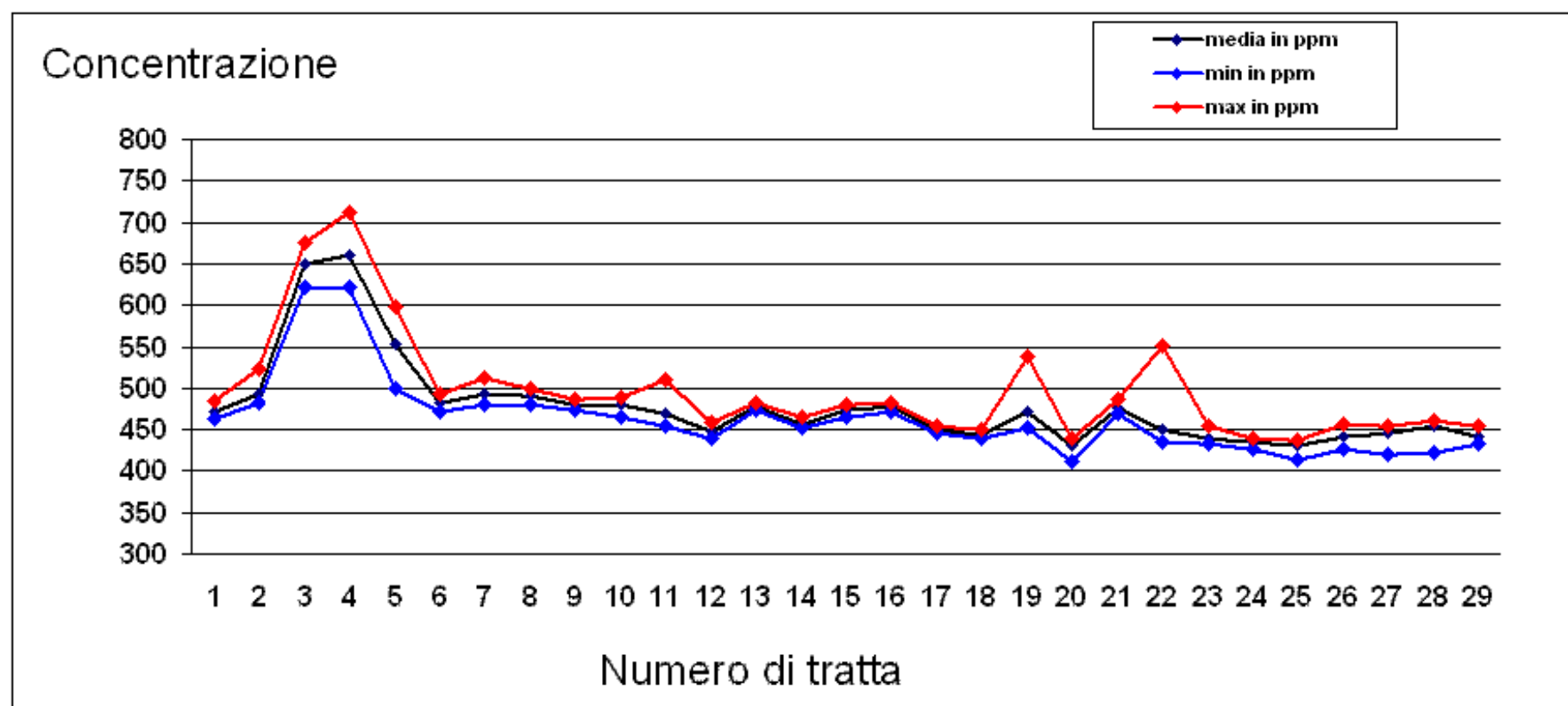


N_tratta	Lunghezza tratta	Inizio	Fine	Durata	Concentrazione media* di tratta	Concentrazione minima di tratta	Concentrazione massima di tratta	Deviazione standard	N. valori utili	Concentrazione lineare media* di tratta
	[m]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[sec]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]		[ppmm]
1	22	10:16:52	10:26:05	553	642	409	2871	399	321	14122
2	23	10:53:22	10:59:51	389	<b>870</b>	406	2297	363	225	20014
3	24	11:04:00	11:20:26	986	633	378	1615	193	568	15187
4	18	11:22:26	11:36:16	830	436	364	970	71	446	7851
5	20	11:40:55	11:47:20	385	<b>383</b>	376	391	3	214	7652

### *Emissioni di CO2 in discarica (Poppi AR)*



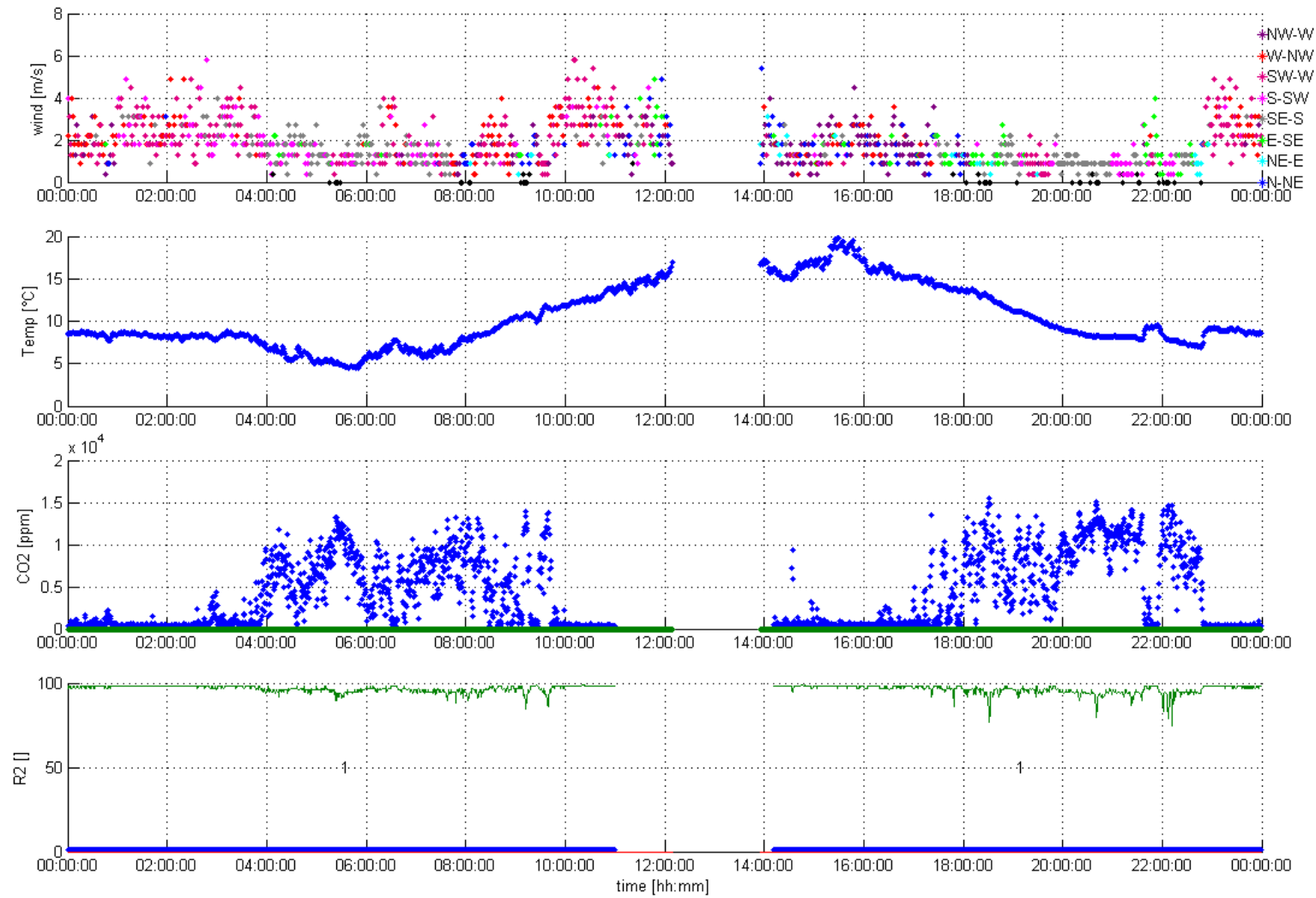




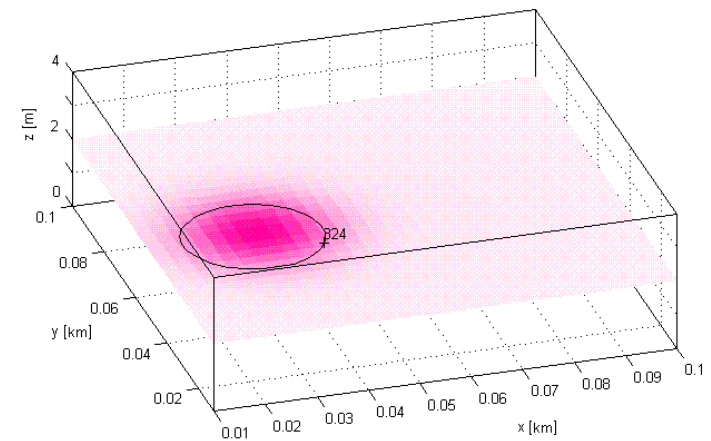
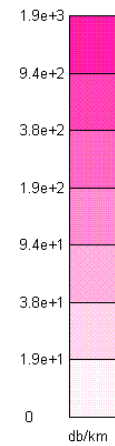
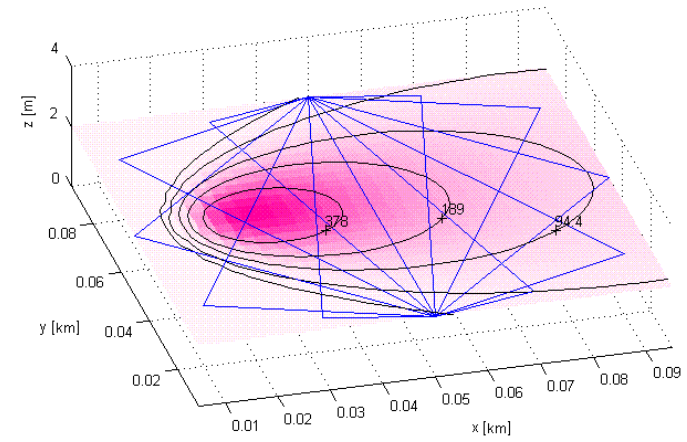
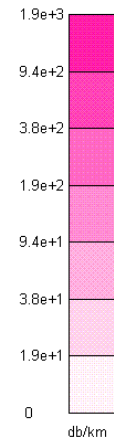
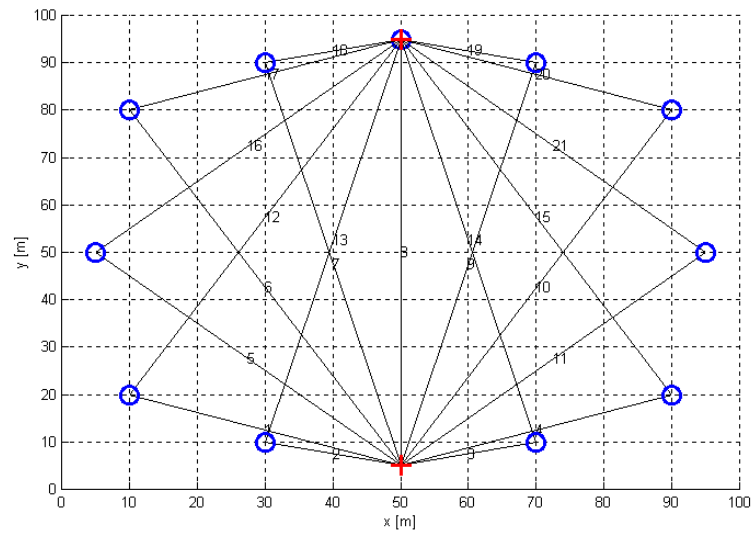
*Emissioni di CO2 a Bagni di S.Filippo (SI)*



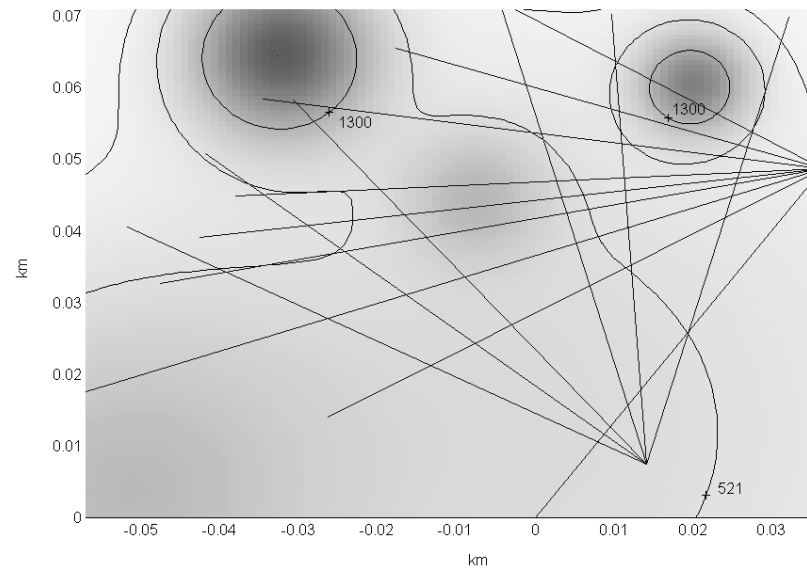
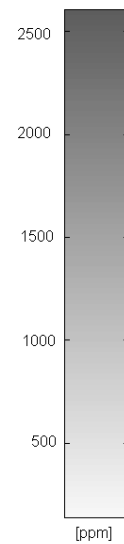
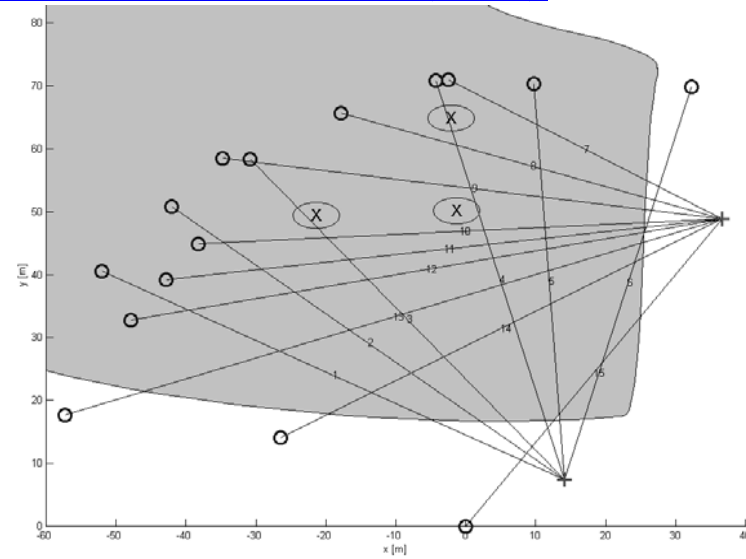
## Emissioni di CO<sub>2</sub> a Bagni di S.Filippo (SI)



# Tomografia 2D



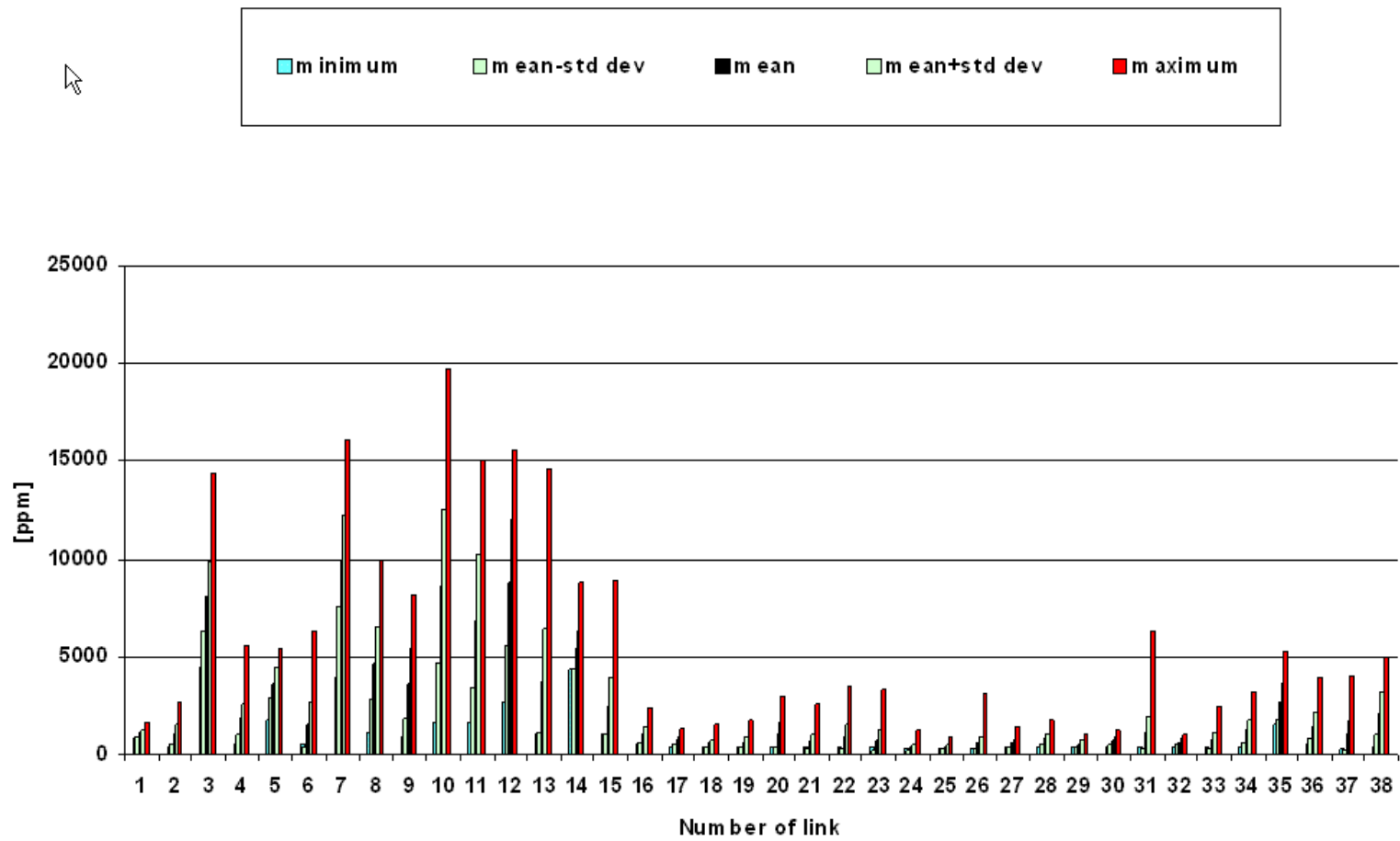
## Emissioni di CO<sub>2</sub> a Pozzuoli (NA)





## Emissioni di CO2 dal letto del torrente Ambra (SI)



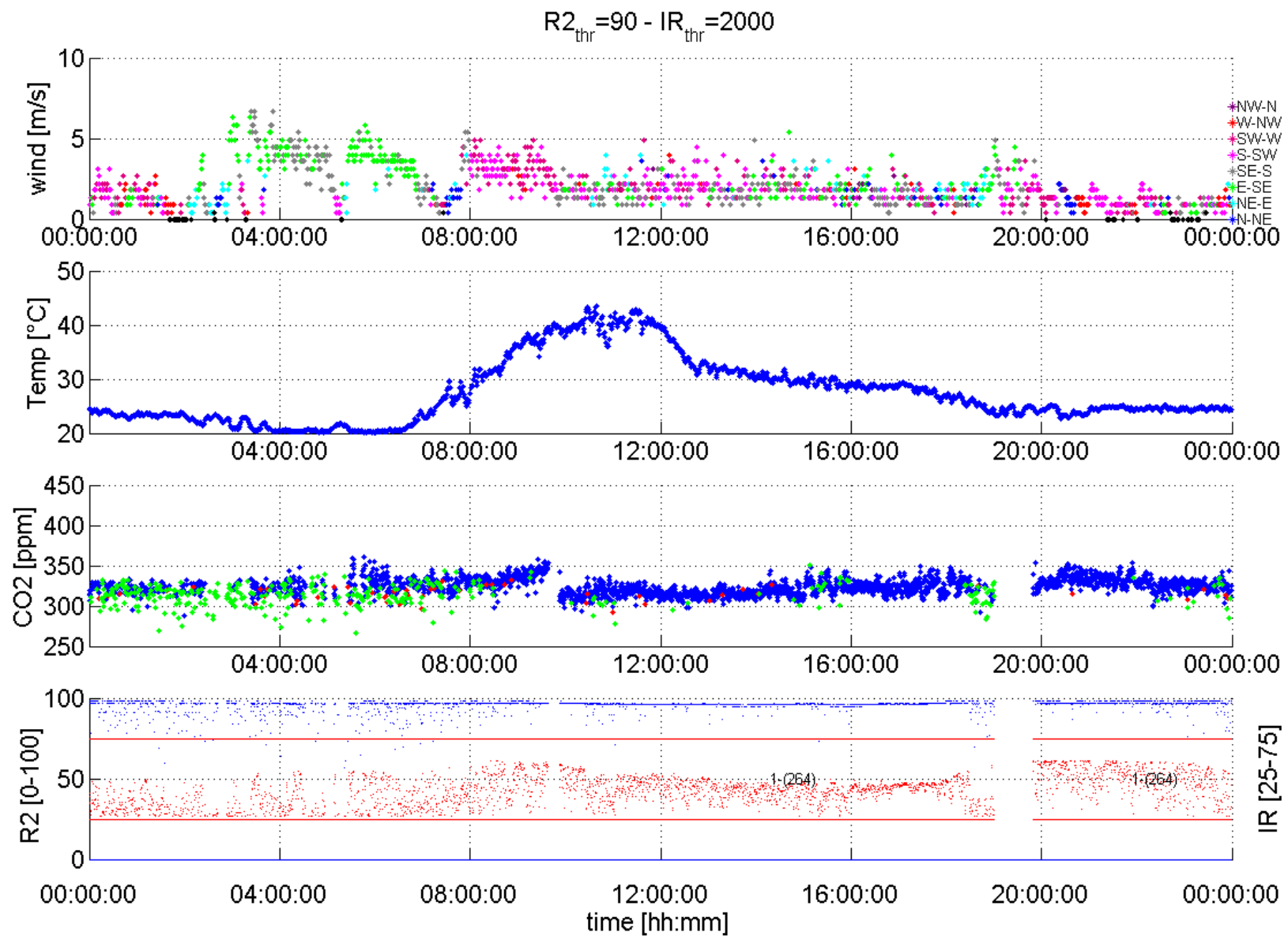


## Emissioni di CO<sub>2</sub> dai Vulcani (Isola di Vulcano)





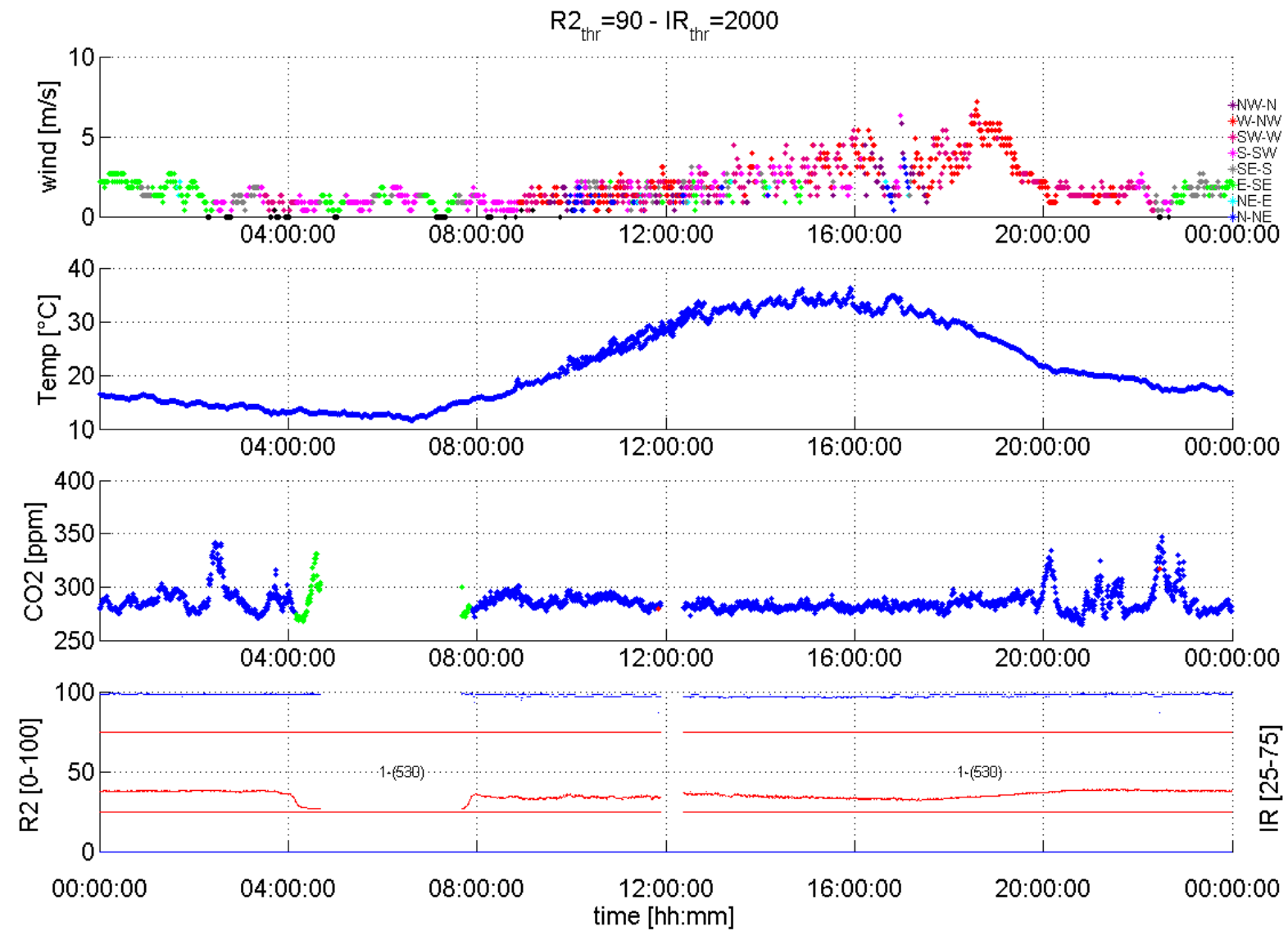






## Emissioni di CO2 dai siti di rifiuti (Case Passerini, Firenze)





Sito web per scaricare documenti:

***<http://radar.det.unifi.it/radar/accesso.html>***