

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Formative Seminars for UniPA Students

**Modellazione matematica:
Activated Sludge Models e
principali applicazioni**

Palermo, 22 maggio 2015

Alida Cosenza
alida.cosenza@unipa.it

Introduzione alla modellazione

Il modello

- ✓ Un modello è una rappresentazione sintetica di un sistema reale
- ✓ Viene utilizzato come supporto decisionale (progettazione, gestione, ottimizzazione, etc..)

Il valore di un modello non dipende dalla sua completezza ma dalla sua utilità come supporto decisionale


↓

Il modello «perfetto» è rappresentato dal modello più semplice in grado di garantire un efficace supporto decisionale

Introduzione alla modellazione

Le risposte chiave...

- ✓ **Cos'è un modello?** Rappresentazione sistematica di un sistema reale utile per una determinata analisi
- ✓ **Perché modellare?** Per avere uno strumento da utilizzare come supporto decisionale
- ✓ **Qual è il modello perfetto?** Il più semplice modello che fornisce un efficace supporto
- ✓ **Quali sono le caratteristiche di un modello efficace?** - Basato più possibile sui fondamenti scientifici noti, uso prudente della conoscenza empirica; - Include solo gli elementi essenziali e di interesse del sistema che si intende modellare; - Coerente con le pratiche esistenti e future.




Introduzione alla modellazione

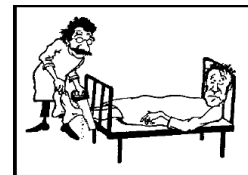
Le risposte chiave...

- ✓ **Quali fattori limitano l'applicazione di un modello?** - Conoscenza della struttura del sistema; - Conoscenza delle caratteristiche e dei parametri del sistema; - Capacità computazionale.

Non innamoratevi del vostro modello!




Epilogo!



Introduzione alla modellazione

Chi può avere l'esigenza di un modello?

- ✓ Un progettista
- ✓ Un ingegnere di processo
- ✓ Un ingegnere di controllo
- ✓ Un operatore
- ✓ Un insegnante
- ✓ Un ricercatore



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Introduzione alla modellazione

Modello per...?

- ✓ Comprendere i meccanismi
- ✓ Progettare
- ✓ Controllare
- ✓ Monitorare
- ✓ Guida degli operatori



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Introduzione ai modelli ASM

Nel 1983 l'International Association on Water Pollution and Control (IAWPRC) ha costituito una "task Group on Mathematical modelling for Design and Operation of Activated Sludge Process" con l'obiettivo di promuovere lo sviluppo di modelli da applicare per la progettazione e per la gestione dei sistemi biologici di trattamento delle acque reflue.


I modelli messi a punto sono:

- ✓ Modello **ASM1** (1987): modello per la rimozione della sostanza organica e dell'azoto
- ✓ Modello **ASM2** (1995): include i processi di rimozione biologica e di precipitazione del fosforo
- ✓ Modello **ASM2d** (1999): analogo all'ASM2 con introduzione del processo di denitrificazione da parte dei batteri PAO
- ✓ Modello **ASM3** (2000): ASM1 con introduzione dei composti di immagazzinamento interno (come considerato in ASM2 e ASM2d)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Modelli ASM

Bilancio di massa



$$\text{Variazione di massa} = (\text{massa influente}) + (\text{massa prodotta a seguito di reazioni}) - (\text{massa effluente}) - (\text{massa consumata a seguito di reazioni})$$

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Modelli ASM

Bilancio di massa

Velocità di variazione $V \frac{dc}{dt} = \left[m^3 \frac{kg}{m^3 h} \right] = \left[\frac{kg}{h} \right]$

Massa influente nell'unità di tempo $q_{in} c_{in} = \left[\frac{m^3}{h} \frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{kg}{h} \right]$

Massa influente nell'unità di tempo $-q_{out} c_{out} = \left[\frac{m^3}{h} \frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{kg}{h} \right]$

Velocità di crescita $V \cdot k \cdot c = \left[m^3 \frac{1}{h} \frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{kg}{h} \right]$

Velocità di consumo $-V \cdot d \cdot c = \left[m^3 \frac{1}{h} \frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{kg}{h} \right]$

$$V \frac{dc}{dt} = q_{in} c_{in} - q_{out} c_{out} + V \cdot k \cdot c - V \cdot d \cdot c$$

Formato e notazione

Il formato matriciale

La simbologia adottata per indicare le componenti nella matrice del modello prevede che le **componenti particellate** vengano indicate con la lettera **X** e quelle **solubili** con la **S**. L'utilizzo dei pedici consente di specificare i singoli componenti, ad esempio:

- ✓ X_H (biomassa eterotrofa); X_{AUT} (biomassa autotrofa); X_{PAO} (organismi fosforo accumulanti); X_{TSS} (solidi sospesi totali)...
- ✓ S_{NH4} (ammoniaca disciolta); S_{O2} (ossigeno disciolto); S_{PO4} (fosforo inorganico solubile); S_I (materiale organico solubile inerte)...

Formato e notazione


Il formato matriciale: esempio

Componente $i \rightarrow$	S_1	S_2	Cinetica
Processo $j \downarrow$			
r_1	v_{11}	v_{12}	ρ_1
r_2	v_{21}	v_{22}	ρ_2
Spiegazione parametri stechiometrici e unità di misura	Spiegazione S_1 , e unità di misura	Spiegazione S_2 , e unità di misura	Spiegazione parametri cinetici e unità di misura

$$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j \Rightarrow \begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = r_1 = v_{11}\rho_1 + v_{21}\rho_2 \\ \frac{dS_2}{dt} = r_2 = v_{12}\rho_1 + v_{22}\rho_2 \end{cases}$$

Formato e notazione

Le funzioni di Switch



Le **“funzioni di switch”** contenute nelle espressioni della velocità interrompono o limitano una certa reazione in presenza di determinate condizioni ambientali (necessarie nei processi che dipendono dal tipo di elettroni: presenza o assenza di ossigeno e/o nitrati).

Esempio di funzione di switch per i microrganismi nitrificanti

$\frac{S_o}{S_o + K_o}$

⇒

Quando la concentrazione di ossigeno disciolto (S_o) si annulla la funzione di switch fa annullare la velocità di crescita dei microrganismi nitrificanti

Frazioni del COD

Ripartizione del Carbonio

$COD_{TOT} = \underbrace{S_A + S_F + S_I + X_I + X_S + X_H + X_A + X_{PAO} + X_{PHA}}_{\text{componenti solubili}} + \underbrace{X_H + X_{AUT} + X_{PAO}}_{\text{componenti particolate}} + \underbrace{X_A + X_{PAO} + X_{PHA}}_{\text{componenti specializzate}}$

 = In all ASM models
 = In ASM1 and ASM2d

Classificazione dei substrati

Frazioni dell' azoto

$C_{TN} = C_{TKN} + S_{NO3} = X_{TKN} + S_{TKN} + S_{NO3} =$
 $= [X_I i_{NXI} + X_S i_{NXS} + (X_H + X_{AUT} + X_{PAO}) i_{NBM}] + [S_{NH4} + S_I i_{NSI} + S_S i_{NSs} J + S_{NO3}$

Classificazione dei substrati

Frazioni del fosforo

$C_{TP} = X_{TP} + S_{TP} =$
 $= [X_I i_{PXI} + X_S i_{PXS} + (X_H + X_{AUT} + X_{PAO}) i_{PBM}] +$
 $+ [S_{PO4} + S_I i_{PSI} + S_S i_{PSs} J$

Struttura dei processi biochimici

Cinetica dei processi – crescita batterica

Si ricorda che la forma più utilizzata per esprimere la dinamica della cinetica del processo biologico di **crescita batterica** è quella di **Monod**, tipica delle reazioni enzima-substrato (E-S).

$$\frac{dX}{dt} = \hat{\mu} \frac{S}{K_S + S} X$$

Equazione di Monod

X concentrazione batteri (g/l)
 $\hat{\mu}$ velocità massima specifica di crescita [g batteri prodotti/ (g batteri tempo)]; indice di crescita illimitata
 S concentrazione substrato (g/l)
 K_S costante di semisaturazione (g/l): indice di crescita limitata

Struttura dei processi biochimici

Cinetica dei processi – crescita batterica

Nel caso in cui la disponibilità di substrato sia elevata e $S \gg K_s$ la **crescita** della biomassa avviene in modo **illimitato** seguendo l'espressione cinetica che segue:

$$\frac{dX}{dt} = \hat{\mu}X$$

La variazione del substrato dovuto alla crescita della biomassa viene ricavata introducendo il **fattore di resa cellulare** o **coefficiente di crescita cellulare** (Y):

$$Y = \frac{\text{biomassa prodotta}}{\text{substrato utilizzato}} = \frac{(dX/dt)_{\text{cresc}}}{(dS/dt)}$$

Velocità di rimozione del substrato

Equazione di Michaelis-Menten

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y} \hat{\mu} \frac{S}{K_s + S} X$$

Esempio di modello cinetico

Rimozione del substrato S_s

S_s = substrato
 S_o = ossigeno disciolto
 X_H = biomassa

Esempio di modello cinetico

Rimozione del substrato S_s

Processo	Componenti			Cinetica
	S_s	S_o	X_H	
Crescita aerobica eterotrofi	$-\frac{1}{Y_H}$	$\frac{Y_H - 1}{Y_H}$	1	$\hat{\mu}_H \left(\frac{s_s}{K_s + s_s} \right) \left(\frac{s_o}{K_o + s_o} \right) X_H$
Decadimento eterotrofi	$1 - f_p$		-1	$b_H X_H$

Esempio di modello cinetico

Rimozione del substrato S_s

$$\frac{ds_s}{dt} = \frac{q_{in}}{V} s_{s,in} - \frac{q_{out}}{V} s_s - \frac{1}{Y_H} \mu x_H + (1 - f_p) b_H x_H$$

$$\mu = \hat{\mu} \frac{s_s}{K_s + s_s} \frac{s_o}{K_o + s_o}$$

$$\frac{dx_H}{dt} = \frac{q_{in}}{V} x_{H,in} - \frac{q_{out}}{V} x_H + \mu x_H - b_H x_H$$

$$\frac{ds_o}{dt} = \frac{q_{in}}{V} s_{o,in} - \frac{q_{out}}{V} s_o + k_L a (s_{o,sat} - s_o) + \frac{1 - Y_H}{Y_H} \mu x_H$$

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Modello matematico ASM2d applicato ad un caso reale



(Mannina G, Cosenza A, Vanrolleghem PA, Viviani G, 2011)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Il caso studio...

L'impianto reale ha uno schema Bardenpho



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Il modello in sintesi...

19 processi

}

- Idrolitici
- Organismi autotrofi
- Organismi eterotrofi
- Organismi eterotrofi PAO

14 componenti

}

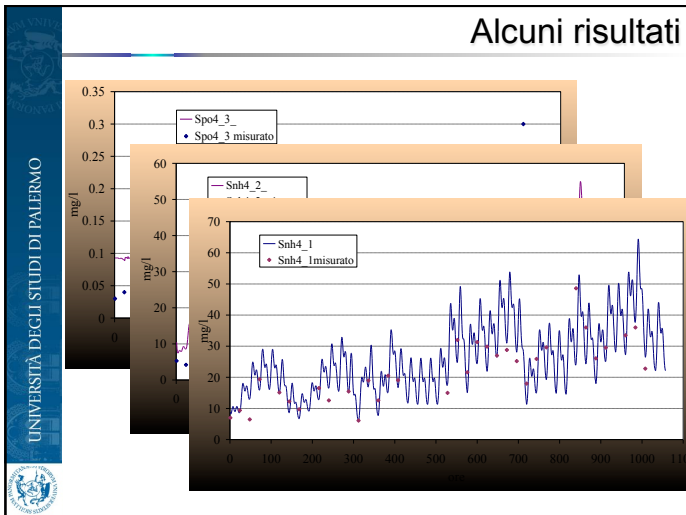
- Particellate
- Solubili

42 parametri

}

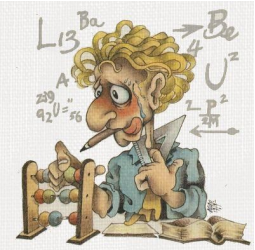
- Cinetici
- Stechiometrici

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Modello matematico ASM2d-SMP-GHG



(Mannina and Cosenza, 2015)

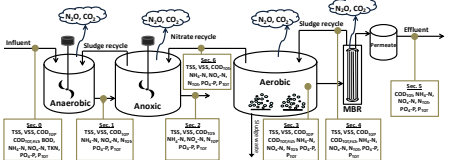



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Il modello in sintesi...

Il modello ASM2d-SMP-GHG è diviso in due sotto-modelli:

- ✓ **Fisico**: simula i principali fenomeni fisici connessi alla presenza di una membrana (adesione e distacco delle particelle sulla superficie della membrana; resistenza dovuta al deposito delle particelle...) (2 processi, 6 parametri di interesse)
- ✓ **Biologico**: simula tutti i processi di degradazione della sostanza organica e di rimozione di N e P; inoltre descrive la produzione di N₂O e CO₂ (gas serra, GHG) (39 processi biologici, 109 parametri di interesse)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Il modello in sintesi...

Formazione dello strato di cake

La formazione dello strato di cake è un processo continuo e dinamico

Fase di filtrazione

Fase di controlavaggio

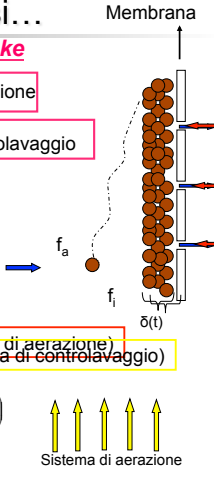
Probabilità di adesione dei solidi

Adesione

Distacco (K_d funzione del sistema di aerazione)

Distacco (K_d funzione del sistema di controlavaggio)


adesione **distacco**



$$E = \frac{F_r}{F_i + F_a}$$

$$\left(\frac{dM_{sf}}{dt}\right)_a = E \cdot MLSS \cdot J$$

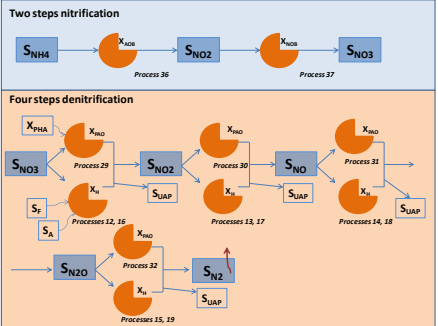

$$\left(\frac{dM_{sf}}{dt}\right)_d = -K_d \cdot M_{sf}$$

$$\left(\frac{dM_{sf}}{dt}\right) = (E \cdot MLSS \cdot J) - (K_d \cdot M_{sf}) \longrightarrow \delta(t) = \left(\frac{M_{sf}(t) \cdot f}{\rho}\right)$$


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Il modello in sintesi...

Sotto-modello Biologico: il modello tiene conto del doppio step di nitrificazione e dei 4 step di denitrificazione

Alcuni risultati

Sotto-modello Biologico

Produzione di N_2O e CO_2 per m3 di acqua trattata al variare dell'SRT dell'impianto.

All'aumentare dell'SRT sia CO_2 che NO_2 aumentano

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Formative Seminars for UniPA Students

Determinazione della stabilità biologica di rifiuti pretrattati e non

Alida Cosenza
alida.cosenza@unipa.it

Palermo, 22 maggio 2015

Introduzione

Generalità

Il decreto n.36 del 13 gennaio 2003, recepimento della direttiva 99/31/CE, stabilisce che i rifiuti possono essere collocati in discarica solo dopo trattamento, ad eccezione dei rifiuti inerti.

↓

Riduzione dei quantitativi di sostanza organica biodegradabile conferiti in discarica, con l'obiettivo di limitare la presenza in discarica di sostanze che, sottoposte ai processi biochimici di degradazione, causino emissioni di biogas e determinino il carico inquinante del percolato

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Introduzione

Trattamento dei rifiuti

Bioessiccamento

Obiettivi:

- ✓ assicurare la stabilità biologica dei rifiuti per lo stoccaggio a lungo termine, in modo tale da ridurre od eventualmente annullare maleodoranti emissioni di gas e polveri, ed igienizzare il rifiuto;
- ✓ produrre un buon substrato per la termoutilizzazione (elevato potere calorifico).

Fasi:

- ✓ Blanda triturazione meccanica;
- ✓ Trattamento biologico (aerazione forzata);
- ✓ Stoccaggio temporaneo in discarica o utilizzo come combustibile da rifiuto (CDR)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Introduzione

Trattamento dei rifiuti

Biostabilizzazione o trattamento meccanico biologico (TMB)

Obiettivi:

- ✓ ottenere un prodotto stabile da un punto di vista biologico, tale da potersi ritenere "inerte"



Fasi:

- ✓ Pretrattamento meccanico mirato a separare la frazione umida contenente il materiale organico;
- ✓ Stabilizzazione della frazione umida (aerazione, rivoltamento, bagnatura...);
- ✓ Post trattamento meccanico mirato alla raffinazione del materiale da destinare alla copertura giornaliera di discariche, a ripristini ambientali o in discarica quale materiale "inerte"


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO



Stabilità biologica

Cos'è la stabilità biologica?


La stabilità biologica indica lo stato in cui, garantite le condizioni ottimali per l'esplicarsi delle attività microbiologiche in condizioni aerobiche (ottimizzazione dei parametri chimico-fisici), i processi di biodegradazione si presentano alquanto rallentati (Adani e Tambone, 1998).



Il grado di stabilità biologica di un rifiuto è un indicatore indiretto di:


- ✓ potenziale di produzione di cattivi odori;
- ✓ potenziale di produzione di biogas;
- ✓ potenziale di produzione di lisciviati inquinanti.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO



Stabilità biologica

L'indice di respirazione dinamico (IRD) come misura della stabilità biologica




L'IRD misura il grado di decomposizione della sostanza organica biodegradabile per mezzo di un metodo respirometrico.

↓


Definisce la qualità delle matrici organiche ottenute dai processi di biotrasformazione

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO



Stabilità biologica

L'indice di respirazione dinamico (IRD) come misura della stabilità biologica




La misura dell'IRD permette di simulare in condizioni di laboratorio (dinamicamente) un processo aerobico.

La misura, in particolare, consiste nella valutazione diretta del consumo di ossigeno di una biomassa in condizioni reali ed ottimali. In tal senso è possibile differenziare 2 procedure e risultati:

- > **IRDP** - potenziale, il campione viene "standardizzato" imponendo un contenuto di acqua noto (0.75*Capacità idrica massima - CIM)
- > **IRDR** - reale, il campione viene analizzato allo stato reale (contenuto di umidità reale)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO




Stabilità biologica

L'indice di respirazione dinamico (IRD) come misura della stabilità biologica

$$IRD_h = \frac{Q \cdot \Delta O_2}{V_g \cdot VS \cdot DM} \cdot 31.98 \quad [mgO_2 / (kgVS \cdot h)]$$

Q = portata di aria [l/h]
 ΔO_2 = differenza di concentrazione di ossigeno [ml/l]
 V_g = volume occupato da 1 mole di gas alla temperatura dell'aria immessa [l/mole]
 VS e DM massa di sostanza volatile e secca presente nel sistema [kg]
 31.98 = peso molecolare di O_2 [g/mole]

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO




Stabilità biologica


L'indice di respirazione dinamico (IRD) come misura della stabilità biologica

La procedura per la determinazione dell'IRD è standardizzata

Specifica Tecnica UNI/TS 11184 "Rifiuti e combustibili ricavati da rifiuti -Determinazione della stabilità biologica mediante l'Indice di Respirazione Dinamico (IRD)"



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

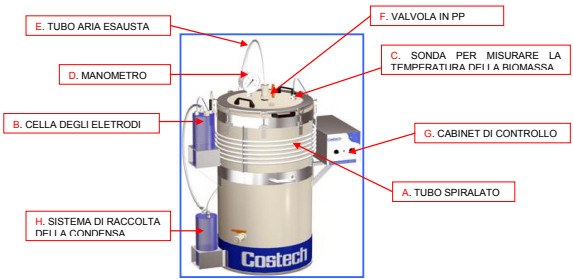


Stabilità biologica


Strumentazione per la determinazione dell'IRD

Respirometro

La prova, eseguita attraverso un respirometro adiabatico a flusso continuo. Il laboratorio ISA del DICAM è dotato del Respirometer 3024 Costech S.p.A.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO




Stabilità biologica


Indice di respirazione dinamica

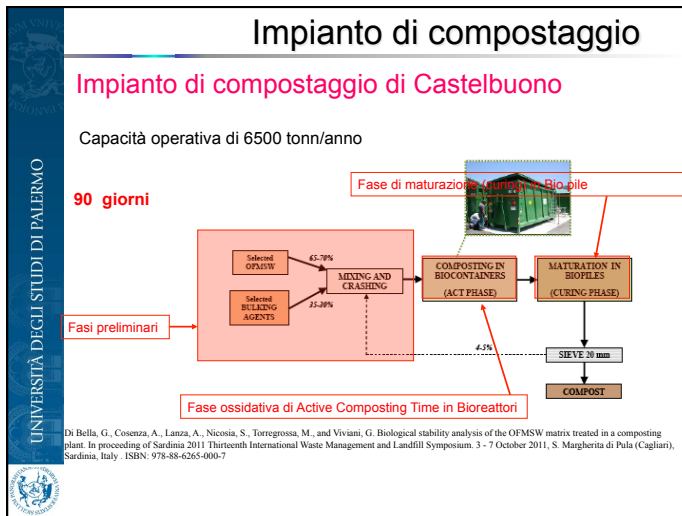
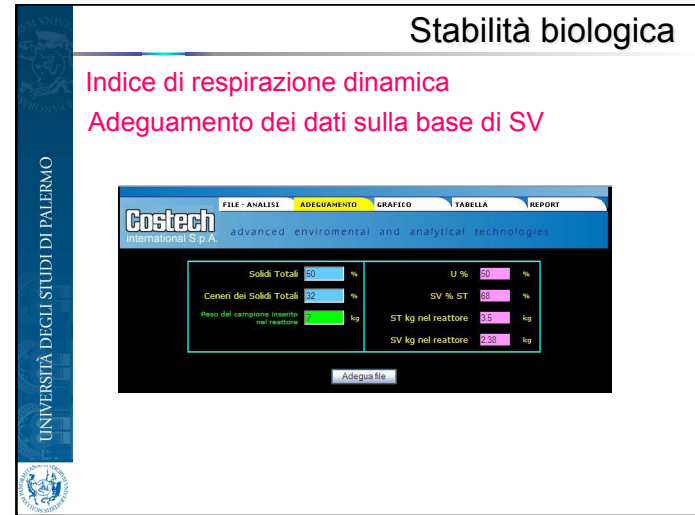
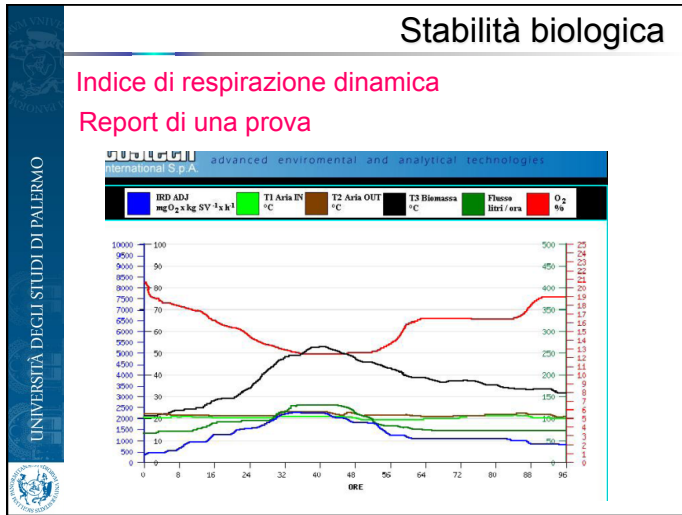
Parametri monitorati nel corso della prova

- ✓ Concentrazione di ossigeno dell'aria esausta [$mg L^{-1}$]
- ✓ Temperatura interna al reattore (biomassa) [$^{\circ}C$]
- ✓ Temperatura aria IN [$^{\circ}C$]
- ✓ Temperatura aria OUT [$^{\circ}C$]
- ✓ Flusso di aria immessa [$L h^{-1}$]
- ✓ Percentuale di ossigeno consumato



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO





Impianto di compostaggio

Impianto di compostaggio di Castelbuono
Campagna sperimentale

Campaign	Code Sample	Composting time [days]	Composting phase	OFMSW [%]	Bulking agents [%]
CAMPAIGN 1	1	0	Biocontainer filling	63	37
	2	7	ACT	-	-
	3	15	ACT	-	-
	4	43	Curing	-	-
	5	70	Curing	-	-
	6	104	Curing	-	-
CAMPAIGN 2	1	0	Biocontainer filling	66.6	33.34
	2	18	ACT	-	-
	3	33	Curing	-	-
	4	48	Curing	-	-
	5	70	Curing	-	-
	6	100	Curing	-	-

Obiettivi:
Campagna 1: start-up dell' impianto e ottimizzazione delle condizioni operative
Campagna 2: ottimizzazione del processo ai fini della produzione di compost di qualità

