

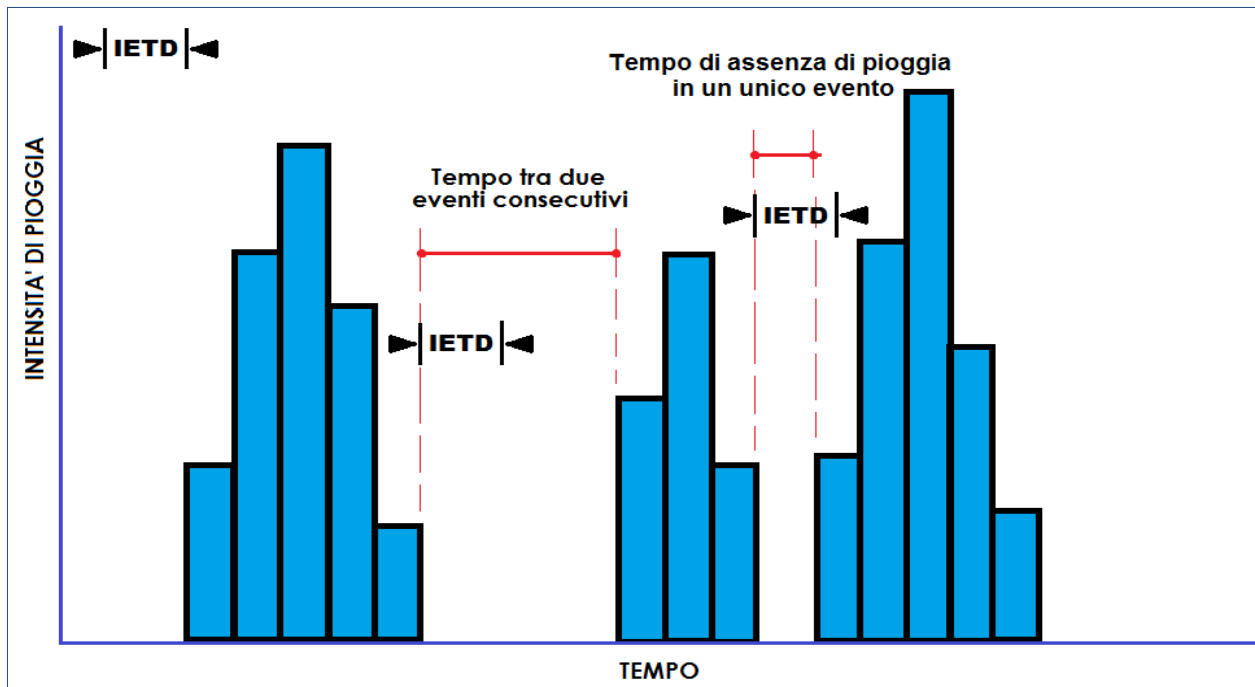
# I FENOMENI D'ACCUMULO DI INQUINANTI E DEL DILAVAMENTO URBANO

(Ing. Luigi Fanizzi - ECOACQUE®)

Un evento di pioggia di lunga durata è costituito da una serie di eventi individuali, quindi, per identificare un singolo evento di pioggia è necessario determinare l'inizio e la fine dello stesso. Un tipico criterio utilizzato per distinguere un evento di pioggia da uno successivo o precedente consiste nella identificazione di un periodo "minimo" di assenza di pioggia o nella definizione del tempo asciutto tra due eventi successivi (*Interevent Time Definition* - IETD). Se si considera, infatti, uno ietogramma generico caratterizzato dalla presenza di intervalli di tempo nei quali non si registrano dati di pioggia (Fig. 1), è possibile osservare che, se questi periodi sono inferiori rispetto ad un valore di riferimento detto tempo asciutto, l'evento che precede il periodo secco deve essere considerato unitamente a quello che segue, al contrario, se lo stesso periodo tra due eventi di pioggia è superiore al tempo di riferimento, l'evento che precede il periodo secco deve essere considerato separatamente rispetto a quello che segue. I principali metodi per la determinazione dell'IETD sono (Muraca e Mangone, 2006):

- metodo basato sull'analisi di autocorrelazione di una serie di dati idrologici corrispondenti ad un anno di riferimento (*a. idrologico*);
- metodo empirico;
- metodo qualitativo basato sull'andamento del volume di accumulo.

Un approccio che permette di definire l'IETD e quindi di discretizzare i dati di pioggia registrati in eventi indipendenti è quello dell'analisi di *autocorrelazione*. Questo tipo di approccio si basa sull'analisi della correlazione attesa tra i dati o le osservazioni di una serie di dati di pioggia con prossimità temporale, riferiti ad un anno idrologico tipico. In pratica, mediante tale metodo è possibile valutare il grado di correlazione di un dato al tempo  $t$ , con lo stesso misurato all'istante precedente. Lo spazio temporale che intercorre tra le due osservazioni viene definito come tempo di ritardo (*lag time*).

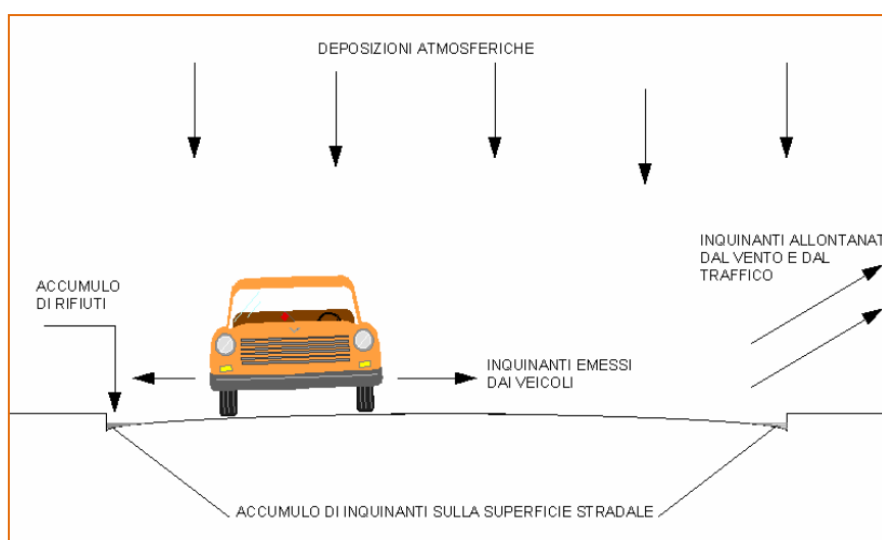


**Fig. 1** – Discretizzazione degli eventi di pioggia in base al tempo asciutto IETD (Adams e Papa, 2000).

Si definisce quindi un coefficiente di autocorrelazione corrispondente ad un campione di osservazioni ( $y_t$  al tempo  $t$ ), per un fissato tempo di ritardo pari a  $k$ , come:

$$r_k = \frac{\sum (y_t - y_m) \cdot (y_{t-k} - y_m)}{\sum (y_t - y_m)^2}$$

dove  $y_m$  è la media del campione di osservazioni  $y_i$ . L'andamento del coefficiente di autocorrelazione rispetto al tempo di ritardo può essere rappresentato mediante un particolare grafico definito *autocorrelogramma*. Il metodo descritto, permette di determinare il tempo necessario per isolare due eventi statisticamente indipendenti con un ben definito livello di significatività, definito come IETD, corrispondente al valore per il quale la funzione di autocorrelazione è sufficientemente vicina a zero. Un approccio empirico per la stima del parametro IETD è basato sulla relazione tra lo stesso IETD e il numero medio annuale di eventi di pioggia osservati in una serie statistica. Dall'analisi dell'andamento del numero medio annuale di eventi di pioggia osservati rispetto al tempo asciutto tra due eventi consecutivi (IETD), si osserva che, se il parametro IETD supera un valore fissato; il numero medio di piogge annuale rimane pressoché invariato. Alcuni ricercatori [Adams et Al., 1986] suggeriscono per la maggior parte dei bacini urbani, valori di IETD variabili tra 1 ora e 6 ore. In Italia, al contrario, sono proposti dalle normative regionali valori molto differenti e variabili da 96 ore per la Regione Lombardia a 48 ore per la Regione Puglia (R. R. Puglia 9 dicembre 2013, N. 26). Un ultimo metodo per la determinazione del tempo asciutto si basa sulla valutazione del volume di accumulo dell'inquinante durante il periodo secco. La quantità d'inquinante asportata dalle superfici impermeabili dipende dalla quantità d'inquinante accumulata durante il precedente periodo secco e dall'energia del deflusso superficiale. Inoltre, l'asportazione di materiale da superfici permeabili (terreno), anche se si verifica solo in corrispondenza di eventi di pioggia gravosi, produce una concentrazione di solidi sospesi (SS) molto elevata. Per quanto riguarda l'accumulo (cd *build-up*) degli inquinanti sulle superfici impermeabili, si può assumere teoricamente una distribuzione dello stesso sulla superficie in maniera casuale. Infatti, il vento e le turbolenze d'aria indotte dal traffico spostano continuamente le particelle dalla superficie stradale ridepositandole su altre superfici. Il fenomeno del "*build-up*", ossia dell'accumulo di materiale solido sulla sede stradale, termini di quantità e di qualità dipende da vari fattori tra i quali: l'estensione e densità dell'urbanizzazione; la prevalenza di zone residenziali o industriali; il tipo di rete fognaria. Tale materiale solido deriva dalle deposizioni atmosferiche, dall'accumulo di immondizia e dal traffico (Figura 2). Sia durante i periodi secchi, sia per effetto di precipitazioni meteoriche sulla sede stradale si depositano polveri e particelle di varia natura, prodotte principalmente dalle emissioni gassose industriali, domestiche e delle automobili, nonché dall'erosione del manto stradale dovuta al traffico veicolare.



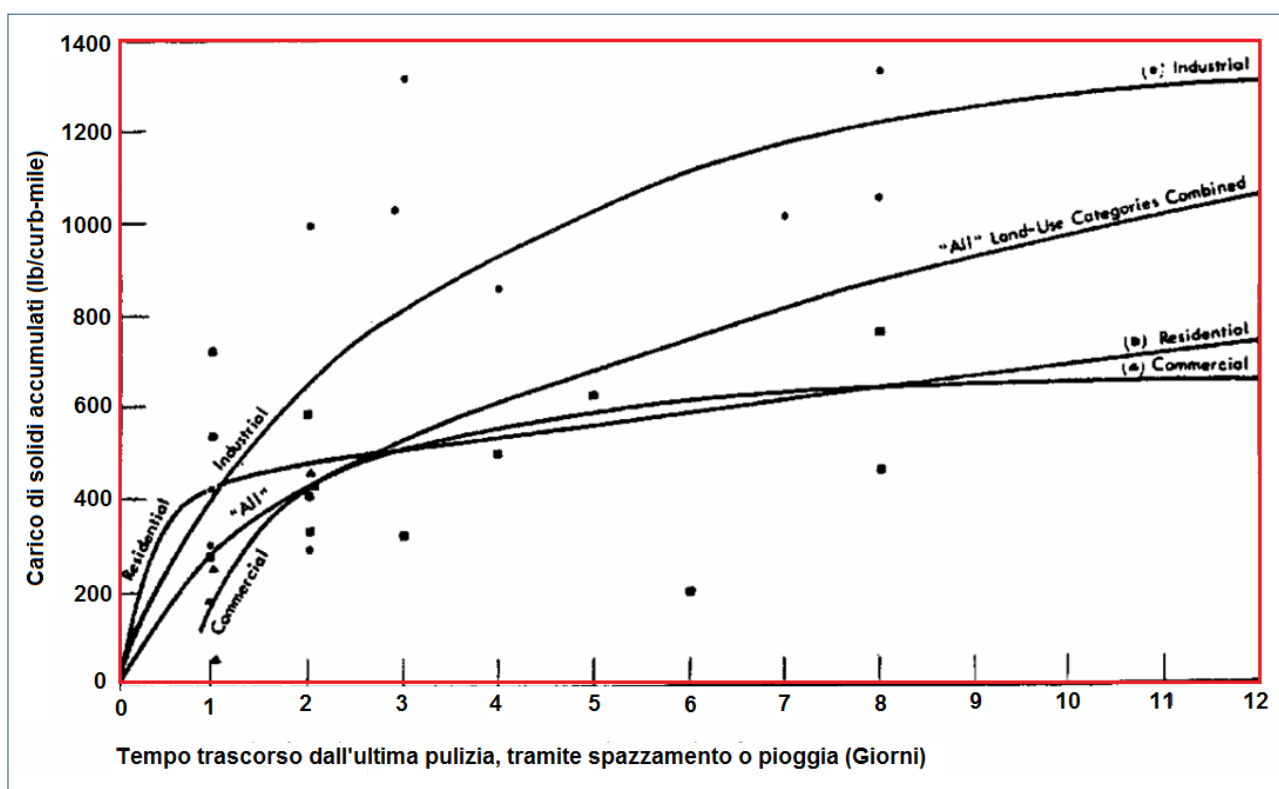
**Fig. 2** – Processi d'accumulo del materiale solido sulla sede stradale.

Le sostanze accumulate sulla superficie stradale durante il tempo secco possono essere trasportate dal vento vicino ai marciapiedi od ad altre barriere ai lati della strada. Circa l'80 % dei rifiuti stradali si deposita all'interno di una fascia larga 15 cm (Tabella 1). In prossimità del marciapiede ed all'interno di 1 m se ne accumula una quantità superiore al 95 % del totale, come evidenziato dalle indagini di Sartor ed Al. (1972). Esempi di distribuzione granulometrica dei solidi che si possono trovare sulle superfici urbane sono riportati, in letteratura, dal lavoro sui dati raccolti a Washington da Shaheen (1975) ove il fuso granulometrico, preponderante, si concentra fra i 75  $\mu\text{m}$  (10,70 %) ed i 150  $\mu\text{m}$  (17,00 %) ÷ 850  $\mu\text{m}$  (18,00), con picchi fra i 250  $\mu\text{m}$  (15,80 %) ed i 420  $\mu\text{m}$  (22,00 %).

DISTANZA DAL MARCIAPIEDE (cm)	SOLIDI ACCUMULATI (% DEL TOTALE)
0 ÷ 15	78
15 ÷ 30	10
30 ÷ 100	9
100 ÷ 240	1
240 ÷ centro strada	2

**Tabella 1** - Solidi accumulati in funzione della distanza dal marciapiede [Sartor ed Altri, 1972].

La quantità di materiale che si accumula sulla superficie stradale è funzione del tempo secco, inteso come periodo di tempo nel quale non si verifica la rimozione dei depositi per azione di un evento meteorico o per pulizia diretta. Le indagini sperimentali condotte allo scopo di analizzare la fase di deposizione degli inquinanti hanno dimostrato come l'accumulo in superficie non cresca indefinitamente con il prolungarsi del tempo secco, ma tenda a raggiungere un valore limite di equilibrio. Un comportamento di questo tipo è giustificabile solo ammettendo che gli stessi agenti responsabili del deposito, traffico veicolare e vento, contemporaneamente rimuovano lo stesso accumulo con un'efficienza sempre maggiore, via, via che l'inquinante disponibile aumenta. Tra le analisi che hanno confermato questa formulazione, sono sicuramente da citare quelle effettuate da Sartor (Sartor ed Altri, 1974). Gli autori hanno rappresentato graficamente i valori di massa accumulata in funzione del tempo secco antecedente, ottenendo per i solidi totali le curve in Figura 3, che tendono ad approssimarsi al valore limite in un periodo indicativo di dieci giorni, seppur con una notevole dipendenza dal luogo, dalle condizioni climatiche e dall'efficienza della pulizia stradale. In ordinata è riportata la massa depositata, espressa per unità di lunghezza di marciapiede, mentre il tempo asciutto [giorni] in ascissa è computato partendo dall'ultimo lavaggio completo operato dalla pioggia o con mezzi meccanici.



**Figura 3** - Accumulo SST sulla strada in funzione del tempo secco antecedente [Sartor, Boyd, 1972].

Il processo di accumulo dell'inquinante nelle vicinanze delle cunette stradali è descrivibile per mezzo dell'equazione di conservazione della massa, che generalmente assume la forma lineare indicata nella seguente relazione:

$$\frac{dM_a}{dt} = a_c - r_m \cdot M_a$$

dove:

$M_a$  è la massa di inquinante accumulata nell'area considerata [kg/ha];

$a_c$  è il coefficiente di accumulo [kg/(ha · d)], che esprime la velocità di deposizione degli inquinanti;

$r_m$  è il coefficiente di rimozione, che quantifica la perdita di inquinante [d<sup>-1</sup>].

Gli studi effettuati presso la *Marquette University (Milwaukee, Wisconsin; USA)*, hanno consentito di identificare per la stima del coefficiente di rimozione  $r_m$  la semplice relazione, espressa in funzione dei fattori eolici, dei parametri geometrici della strada e della turbolenza del traffico veicolare.

$$r_m = 0,0116 \cdot (v_{tr} + v_w) \cdot e^{-0,0880 \cdot h_c}$$

dove:

$v_{tr}$  è la velocità del traffico [km/h];

$v_w$  è la velocità del vento [km/h];

$h_c$  è l'altezza della cunetta del marciapiede [cm].

Le analisi effettuate per la summenzionata relazione, hanno comunque fornito un valore medio osservato nell'ordine di  $r_m = 0,30$  [d<sup>-1</sup>]. I valori utilizzati per la taratura della formula si riferiscono a condizioni di traffico veicolare, nel **75 %** dei casi, eccedenti il valore di **20.000** unità giorno; il coefficiente di correlazione dell'espressione, per le condizioni analizzate, è pari a circa **0,86**, che si può ritenere soddisfacente data la natura del problema trattato. Il coefficiente di accumulo  $a_c$ , invece, è esprimibile in ragione delle tre maggiori sorgenti: atmosferica, deposizione di rifiuti e veicolare, come indicato nella seguente relazione.

$$a_c = d_{rf} + \frac{1}{2} \cdot L \cdot d_{as} + \frac{1}{2} \cdot f_{ms} \cdot t_{ve} \cdot d_{ve}$$

dove:

$d_{rf}$  è la velocità di deposizione dei rifiuti in una cunetta [g/(m · d)];

$d_{as}$  è la velocità di deposizione atmosferica secca [g/(m<sup>2</sup> · d)];

$d_{ve}$  è la velocità di deposizione degli inquinanti per il traffico veicolare [g/(veicoli · m)];

$L$  è la larghezza della sede stradale [m];

$f_{ms}$  è un coefficiente sperimentale che tiene conto della manutenzione stradale [n.p.];

$t_{ve}$  è la densità di traffico veicolare [veicoli/ d].

Da indagini sperimentali, inoltre, i coefficienti di accumulo di solidi sono stati stimati per diverse tipologie di uso del suolo secondo i valori indicati in Tabella 2.

DENOMINAZIONE D'USO DEL SUOLO	COEFFICIENTE DI ACCUMULO $a_c$ [kg/(ha · d)]
Zone residenziali ad alta densità	10 ÷ 25
Zone residenziali a bassa densità	5 ÷ 6
Zone commerciali	15
Zone industriali	35

**Tab. 2** – Coefficiente di accumulo solidi per alcune destinazioni d'uso del suolo.

Per fissate condizioni al contorno  $r_m$  ed  $a_c$  sono costanti e l'equazione differenziale di conservazione della massa, può quindi essere facilmente integrata e riscritta nella forma integrale; nella quale la massa accumulata sulle superfici impermeabili del bacino  $M_a(t)$  [kg/ ha] è valutata in funzione del tempo asciutto  $t_a$  [d], tenendo conto anche della massa di inquinante residua dopo l'evento meteorico o l'operazione di pulizia meccanica precedente dei solidi  $M_a(0) \cong 0,3750 \cdot a_c$  [kgSST/ha].

$$M_{a(t)} = \frac{a_c}{r_m} \cdot (1 - e^{-r_m \cdot t_a}) + M_{a(0)} \cdot e^{-r_m \cdot t_a}$$

I coefficienti di accumulo  $a_c$  e rimozione  $r_m$  assumono le unità di misura precedentemente definite. Secondo questa formulazione, la massa di solidi accumulata sulla superficie del bacino cresce esponenzialmente con il tempo secco tendendo asintoticamente al valore teorico di accumulo limite  $M_{eq}$  [kg/ha], pari al rapporto  $a_c/r_m$ , in corrispondenza del quale si verifica l'equilibrio tra massa accumulata e rimossa (Fig. 4).

$$M_{eq} = \frac{a_c}{r_m}$$

L'obiettivo della progettazione è quindi dimensionare il tempo di ritenzione in modo tale da rendere efficace l'abbattimento dell'inquinante riversato nel ricettore: questo è indiscutibilmente correlato al carico inquinante raccolto nel bacino, che dipende a sua volta dalla funzione di accumulo. Un esempio di questa modalità di dimensionamento è descritto nella ricerca condotta da Jacobsen ed Altri (1988), che porta a definire un intervallo di tempo asciutto ottimale, considerando l'insieme dei fenomeni di accumulo degli inquinanti nella superficie contribuente e rimozione degli stessi nel bacino d'invaso, compreso fra **72** ore e **96** ore. Altre definizioni d'intervallo di tempo asciutto basate sulla funzione di accumulo dipendono dalla valutazione della percentuale raggiunta dall'inquinante rispetto il valore di saturazione. In questo caso l'obiettivo del progetto può essere per esempio la determinazione dell'intervallo ottimale di lavaggio delle superfici stradali in funzione del carico prodotto. Sartor et Al. (174) ha formulato l'accumulo superficiale secondo un modello lineare (Fig. 4), ossia ha ipotizzato che la massa accumulata ( $M_a$ ) sia proporzionale alla durata del tempo secco antecedente ( $t_a$ ).

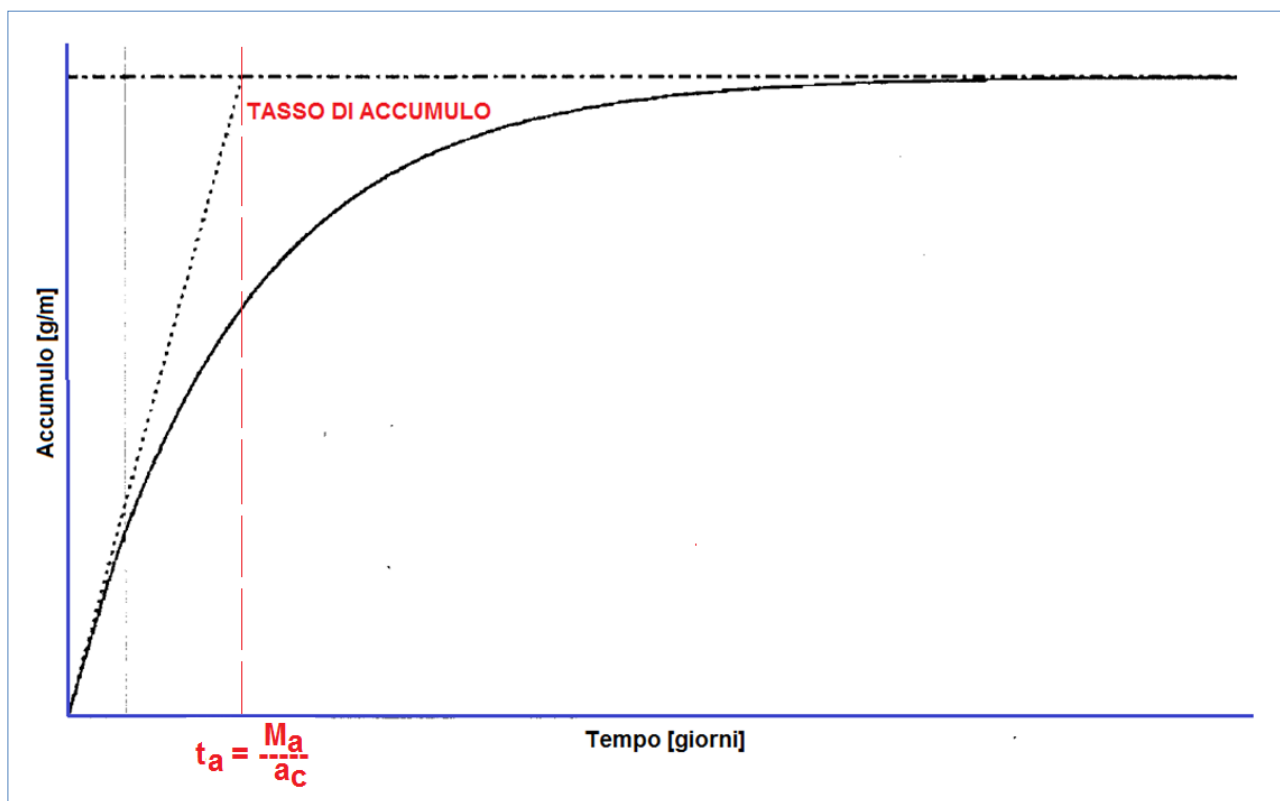


Fig. 4 – Andamento tipico della curva di accumulo di un inquinante.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. D. Sartor, G. B. Boyd, F. J. Agardy (1974): "Water pollution aspects of street surface contaminants", J. WPCF, No. 46, pp. 458-667, Washington.
- [2] B. J. Adams, F. Papa (2000): "Urban Storm water management planning with analytical probabilistic models", John Wiley & Sons inc, New York.
- [3] J. D. Sartor, G. B. Boyd, F. J. Agardy (1974): " Water pollution aspects of street surface contaminants", Vol. 46, N. 3, Journal of Water Pollution Control Federation, John Wiley & Sons inc, New York.
- [4] R. Puglia 9 dicembre 2013, N. 26: "Disciplina delle acque meteoriche di dilavamento e di prima pioggia (attuazione dell'art. 113 del D. Lgs. N. 152/06 e s.m.i.)", BUR Regione Puglia N. 166 del 17.12.2013, S.T.E.S. srl, Potenza.
- [5] T. H. Jacobsen, Y. A. Yousef, M. P. Wanielista (1988): "Rainfall analysis for efficient detention Pond", Atti del Convegno Internazionale "Design of urban run-off qualità controls", ASCE Publication, Missouri, USA.
- [6] A. Muraca, V. Mangone (2006): "Drenaggio urbano teorie e applicazioni per l'accumulo, il trattamento e lo smaltimento delle acque meteoriche", Ed. Nuova Bios, Castrolibero (CS).
- [7] D. G. Shaheen (1975), "Contributions of Urban Roadway Usage to Water Pollution", Ed. U.S. EPA-600/2-75-004, Washington, D.C.