

DUNE COSTIERE



❖ **Trasporto eolico**

❖ **Morfologie eoliche**

❖ **Dune costiere:**

- processi e morfologia
- impatto antropico e gestione
- casi studio

TRASPORTO EOLICO

Il **vento** è un importante agente morfogenetico soprattutto nelle regioni a clima arido, dove la copertura vegetale è scarsa o assente e c'è disponibilità di sedimenti

I PROCESSI EOLICI POSSONO PRODURRE:

- FORME EROSIVE
- TRASPORTO
- FORME DEPOSIZIONALI

La sua capacità di erosione, trasporto e deposizione è molto simile a quella dell'acqua, poiché **le leggi generali che regolano il movimento dei fluidi sono valide anche per i gas come l'aria.**

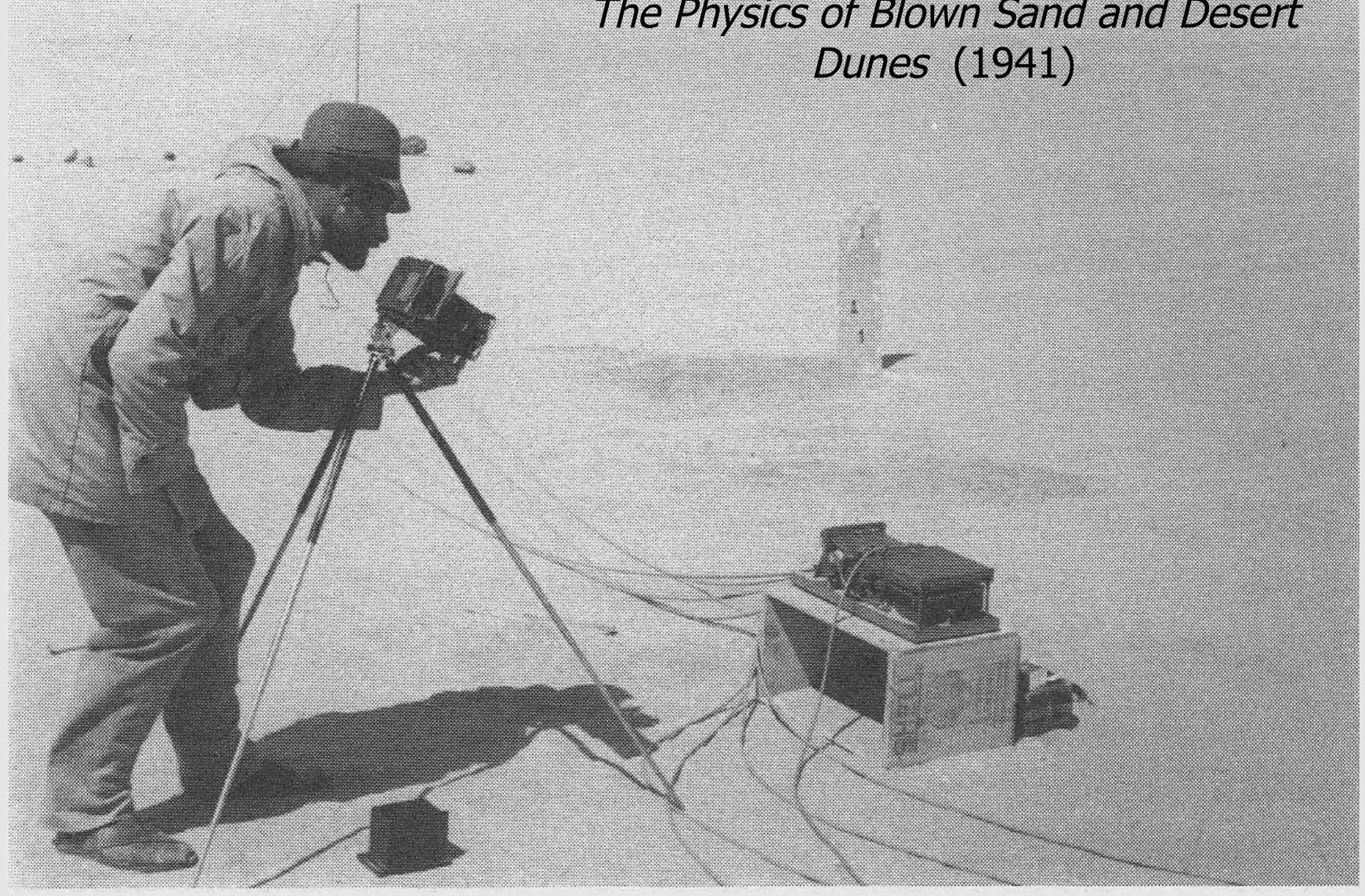
Aria e **acqua** si differenziano, tuttavia, per due proprietà fondamentali:

1. **Densità** – l'aria ha una densità ($1.22 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$) circa 800 volte inferiore rispetto all'acqua, ciò pone limiti alla competenza, cioè alle dimensioni massime delle particelle che possono essere trasportate
2. **Confinamento dinamico** – il vento non presenta quasi mai vie obbligate di scorrimento, ciò gli permette di agire su vaste aree e anche verso l'alto

MECCANICA DEL TRASPORTO EOLICO

BASI SCIENTIFICHE

*Ralph A. Bagnold:
The Physics of Blown Sand and Desert
Dunes (1941)*



MECCANICA DEL TRASPORTO EOLICO

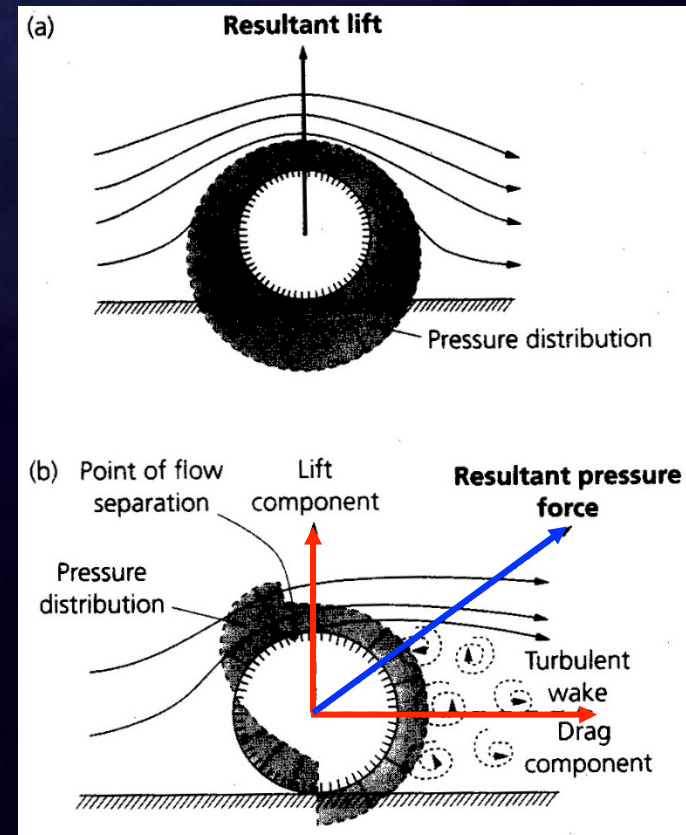
Quando un campo di flusso uniforme viene interrotto dalla presenza di un oggetto si ha un'alterazione del flusso in una regione vicina alla superficie dell'oggetto (strato limite *boundary layer*) a causa delle forze che il fluido impartisce sull'oggetto e viceversa (fenomeni di viscosità e turbolenza).

Una particella, sottoposta all'azione di pressione da parte del vento, tende a essere rimossa se la componente di sollevamento (gradiente di pressione) supera la forza peso e le altre forze resistenti (es. coesione intergranulare).

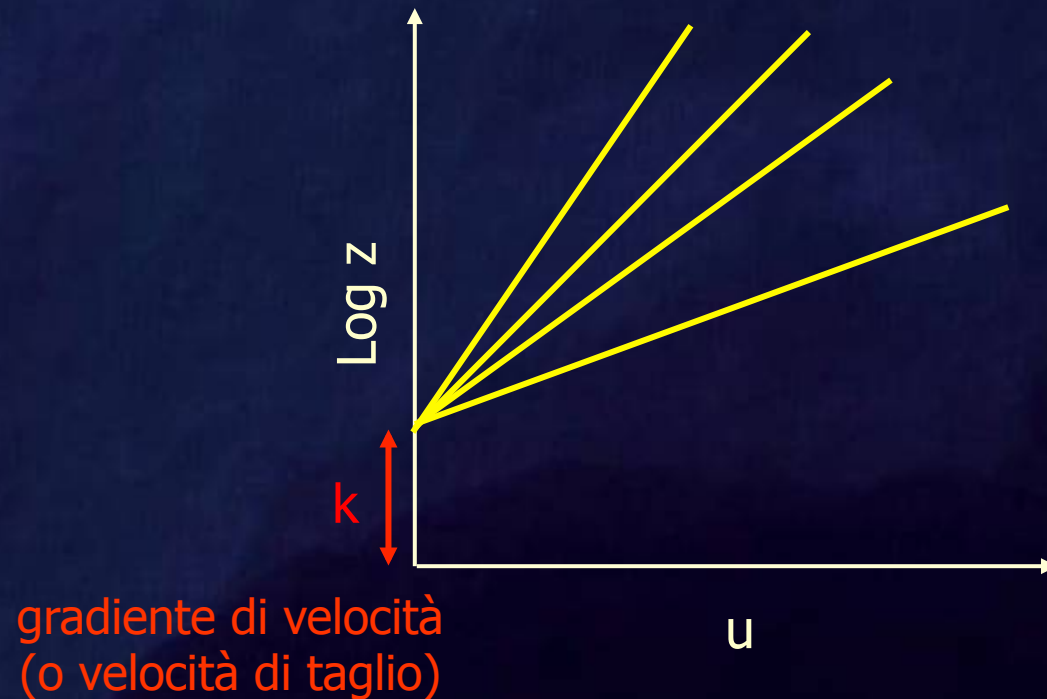
Una volta sollevata, tende a muoversi seguendo la forza risultante tra la componente tangenziale di taglio e quella di sollevamento.

L'azione erosiva e di presa in carico dei sedimenti da parte del vento è detta

DEFLAZIONE.



Il **profilo di velocità (u) del vento** in relazione all'altezza dal substrato (z) è definito dall'equazione di von-Karman/Prandtl



$$u_z = 5.75 \cdot u^* \cdot \log \frac{z}{k}$$

→ altezza dal suolo

→ rugosità del substrato

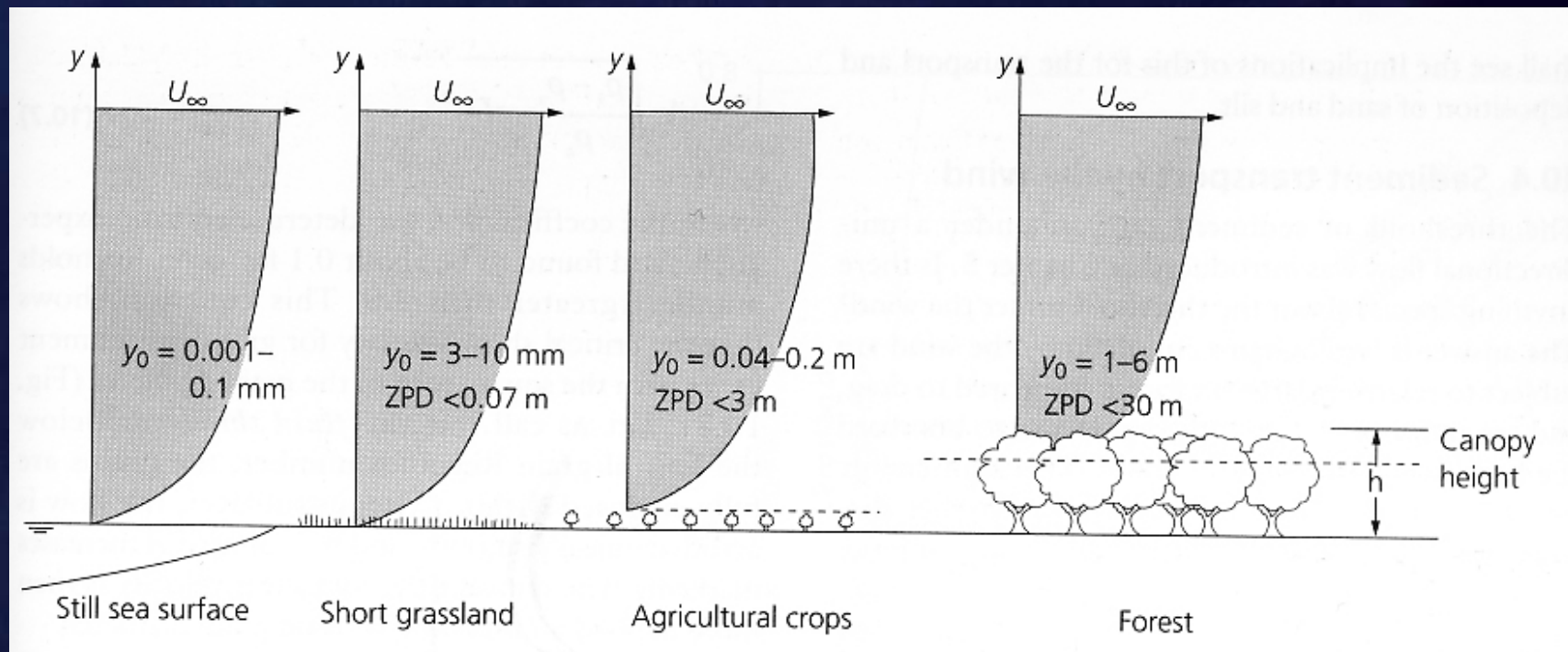
$$u_z = 5.75 \cdot u^* \cdot \log \frac{z}{k}$$

Un importante fattore di controllo, soprattutto nei processi deposizionali, è dato dalle caratteristiche di **rugosità** del substrato.

La rugosità **k** rappresenta l'altezza dal substrato dove la velocità del vento si annulla, dipende dalle caratteristiche dimensionali del substrato e dalle eventuali forme di fondo ($k = 0$ per fondo liscio).

La rugosità k dipende dalle caratteristiche dimensionali del substrato e dalle eventuali forme di fondo ($k = 0$ per fondo liscio).

In generale, k assume il valore di $1/30 D$ (diametro delle particelle), ma varia in presenza di una copertura vegetale e dalla sua tipologia.



$$u_z = 5.75 \cdot u^* \cdot \log \frac{z}{k}$$

La velocità di taglio (shear velocity) u^* è la variabile che viene **convenzionalmente utilizzata per descrivere la capacità di trasporto del vento.**

Corrisponde al gradiente di velocità (è proporzionale all'inclinazione della retta che rappresenta la velocità del vento plottata su scala logaritmica).

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}}$$

← Sforzo di taglio (forza per unità di area)

← Densità dell'aria

Non è possibile attribuire al vento una velocità determinata, poiché questa varia in funzione dell'altezza. A parità di elevazione, inoltre, il vento può registrare diverse velocità, in funzione della rugosità.

Per tale ragione la determinazione della velocità critica di erosione dei sedimenti sottoposti ad azione eolica viene definita dalla relazione di Bagnold (1941), ovvero attraverso il calcolo della **velocità di taglio critica**:

$$u^*_c = A \cdot \sqrt{\frac{g \cdot D \cdot (\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}}$$

Dove:

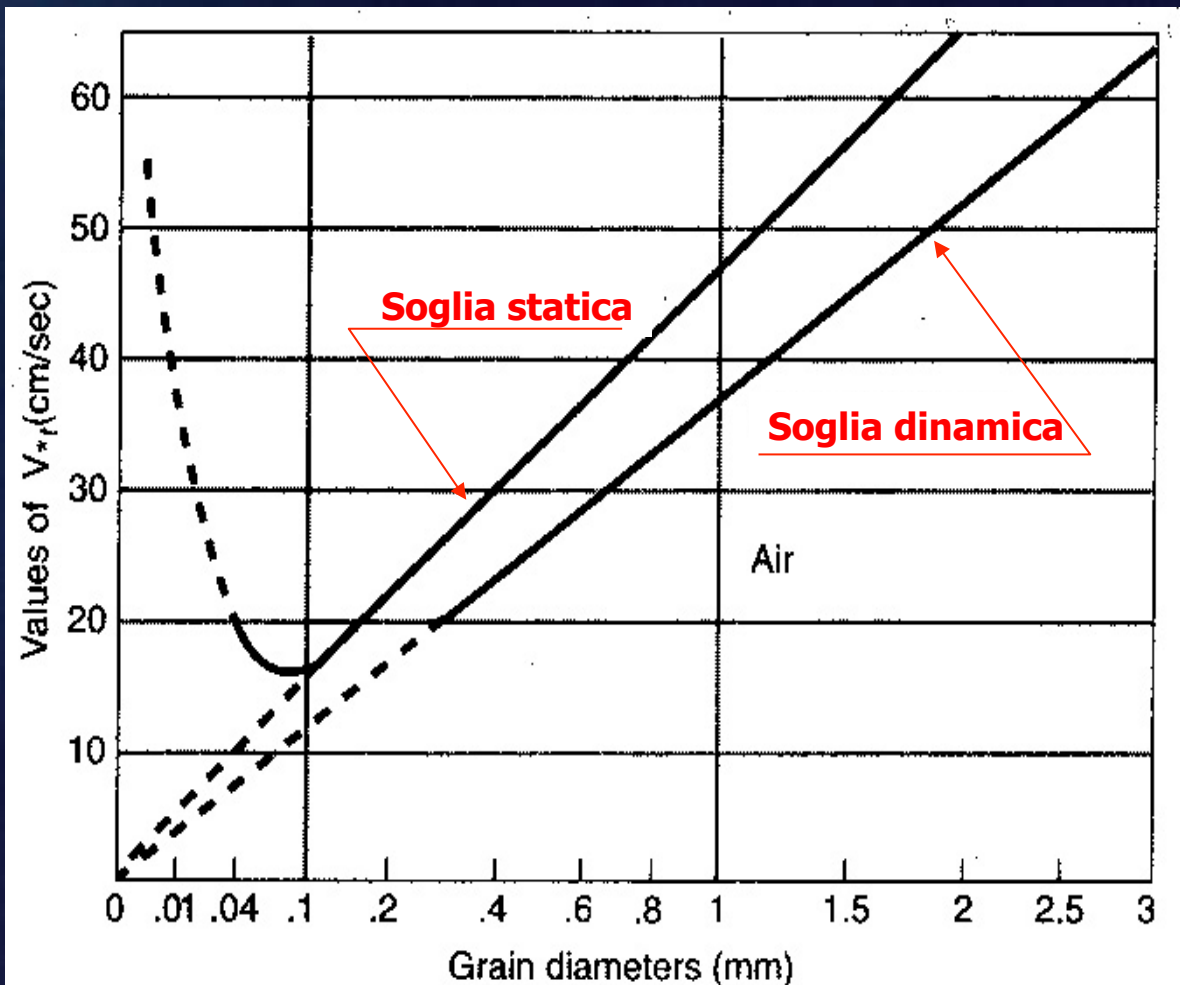
A = coefficiente con valore variabile tra 0.1 (Bagnold, 1941) e 0.2 (Lyles & Woodruff, 1972)

g = accelerazione di gravità

ρ_s e ρ_a = densità del sedimento e dell'aria, rispettivamente

D = diametro dei granuli

Es. Per un granulo di 0.25 mm di diametro, assumendo $A = 0.1$, $u^* = 23$ cm/s



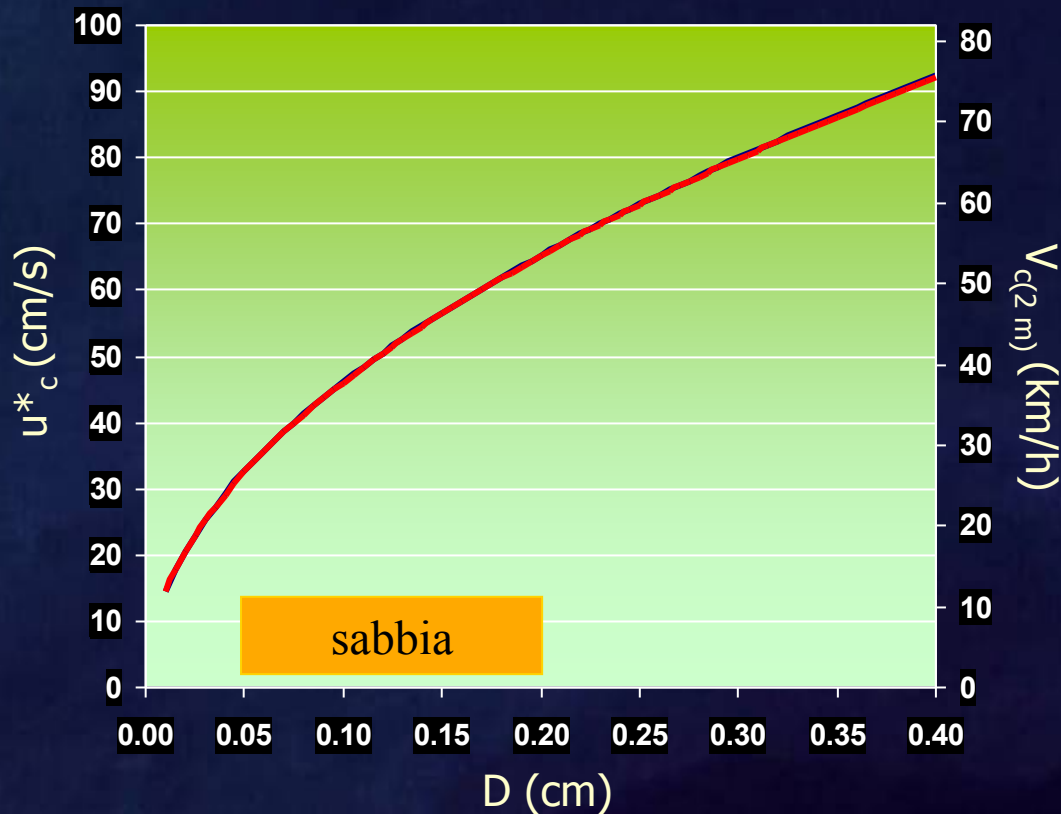
In assenza di movimento da parte delle particelle, la velocità critica di taglio è regolata da una **soglia statica**.

Quando inizia il trasporto, l'energia necessaria per la presa in carico dei sedimenti è minore, a causa dei continui impatti tra i granuli. In questo caso va adottata una **soglia dinamica**, che è circa il 20% inferiore a quella statica.

La velocità critica di taglio aumenta, invece, in presenza di incrostazioni saline, ma soprattutto con l'aumentare dell'umidità nel sedimento.

Con umidità variabile tra $0\% < w < 8\%$ può essere adottata la relazione di Hotta et al. (1984):

$$u_{cw}^* = u_c^* + 7.5w$$



In mancanza di profili di velocità, che richiedono l'impiego di una stazione anemometrica con più quote di misura, il calcolo della velocità critica di taglio può essere eseguito a partire dalle registrazioni del vento alla quota di 2 m.

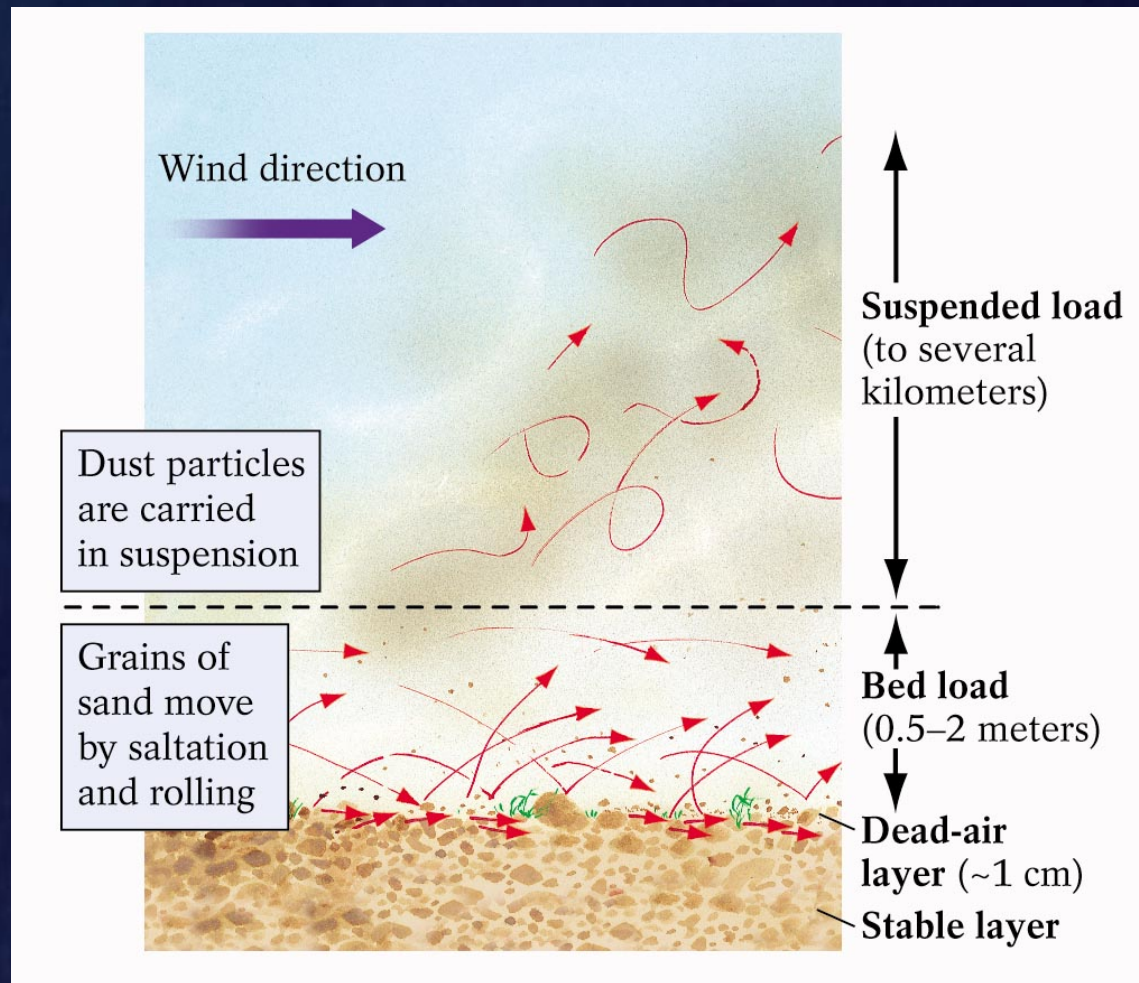
Questa semplificazione, proposta da Hsu (1977) è di largo uso nelle applicazioni di ingegneria ambientale, per il calcolo del trasporto eolico potenziale.

$$u^* = 0.044 \cdot V_{2m}$$

Il grafico riporta i valori di velocità critica di taglio al variare della granulometria. Per confronto, sono indicati i corrispondenti valori di velocità critica del vento (km/h) misurati a 2 m d'altezza.

E' evidente la forte limitazione di competenza del vento, che raramente riesce a mantenere velocità costanti superiori a 70 km/h. Questo fatto spiega la natura quasi esclusivamente sabbiosa dei depositi eolici

LE DIVERSE MODALITÀ DI TRASPORTO



Il vento riesce a trasportare il sedimento secondo le seguenti modalità:

- **SOSPENSIONE**
- **SALTAZIONE**
- **REPTAZIONE**
- **CREEP**

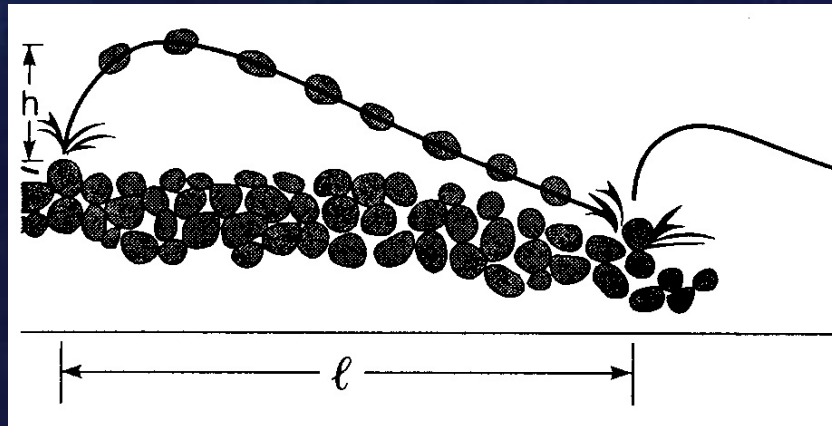
Le ultime 3 modalità vanno a costituire il cosiddetto carico di fondo (**BED LOAD**)

- **SOSPENSIONE** interessa le particelle con $D < 0.08 - 0.10$ mm
- **SALTAZIONE** interessa le particelle con $0.08 < D < 1$ mm
- **REPTAZIONE** e **CREEP** riguardano solamente le particelle $1 < D < 4$

La **SOSPENSIONE** riguarda le particelle di piccole dimensioni, per le quali la forza peso può essere trascurata in rapporto alle fluttuazioni turbolente del vento, rivolte verso l'alto. E' la modalità di trasporto tipica delle polveri eoliche (*dust*), loess, ceneri vulcaniche, etc..

La **SALTAZIONE** è la modalità di trasporto più importante, coinvolgendo circa l'80% dei granuli sabbiosi. Avviene attraverso salti di traiettoria approssimativamente parabolica, con direzione iniziale in media di 34-50° (ma talora quasi verticale) e terminale sub-orizzontale (9-15°).

Lunghezza e altezza della traiettoria sono proporzionali alla velocità del vento. La nube di materiale in saltazione raramente supera lo spessore di 1-2 m, più frequentemente il materiale si muove entro poche decine di cm.



Il movimento di massa delle particelle avviene per trasferimento della quantità di moto mediante impatto (impatto ballistic).

Quando le traiettorie sono molto piccole, si parla di → **REPTAZIONE**

La **REPTAZIONE** riguarda le particelle sabbiose di dimensioni maggiori che si muovono lentamente e in modo irregolare sotto l'azione di bombardamento da parte degli altri granuli. Va quindi intesa come una saltazione limite, confinata in pochissimi cm dal suolo.

Il **CREEP** (scivolamento) è la traslazione orizzontale dei granuli di sabbia molto grossolana per opera della sola componente tangenziale, quando il peso è occasionalmente bilanciato dalla componente di sollevamento.



MORFOLOGIE EOLICHE

I PROCESSI DEPOSIZIONALI

L'interfaccia tra il sedimento sciolto e il vento in movimento su di esso è caratterizzata dalla formazione di **BEDFORMS** (FORME DI FONDO).

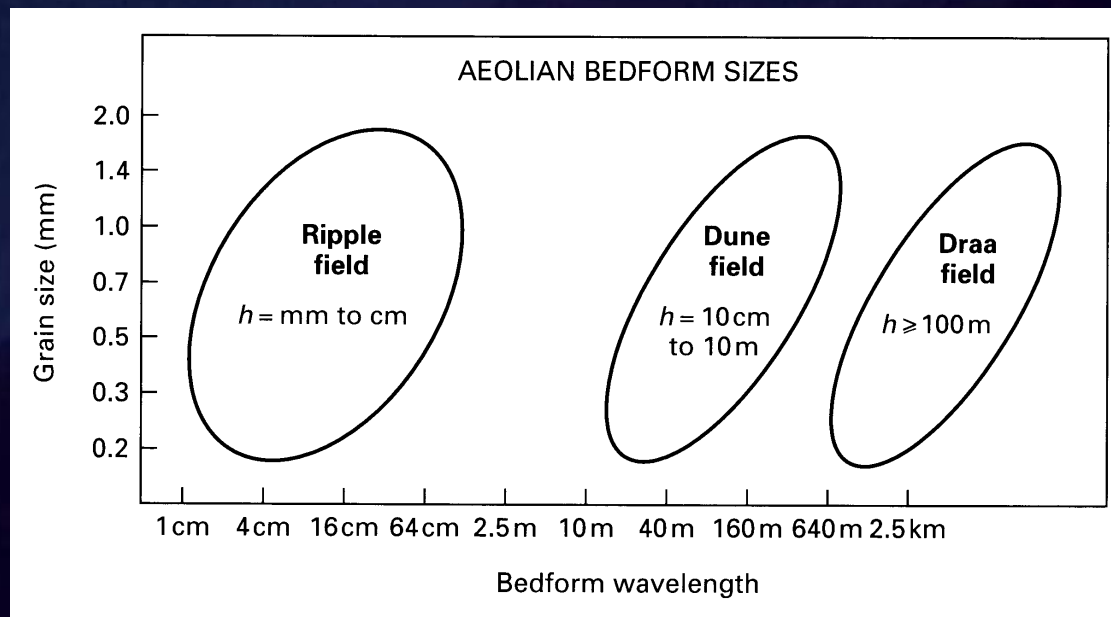
“A bedform is a regularly repeated pattern which forms on a solid surface because of the shearing action of a fluid” (Wilson,1972)



Le forme di fondo risultano come una superficie erosivo / deposizionale che si ripete regolarmente.

Ordine gerarchico delle bedform eoliche (Wilson, 1972)

Ordine	Tipologia	Lunghezza (m)	Altezza (m)	origine
1	Draas	300-5500	20-450	Instabilità aerodinamica
2	Dune	3-600	0.1-100	Instabilità aerodinamica
3	Ripples aerodinamici	0.15-2.5	0.02-0.05	Instabilità aerodinamica
4	Ripples da impatto	0.05-0.20	0.05-1	Meccanismo di impatto

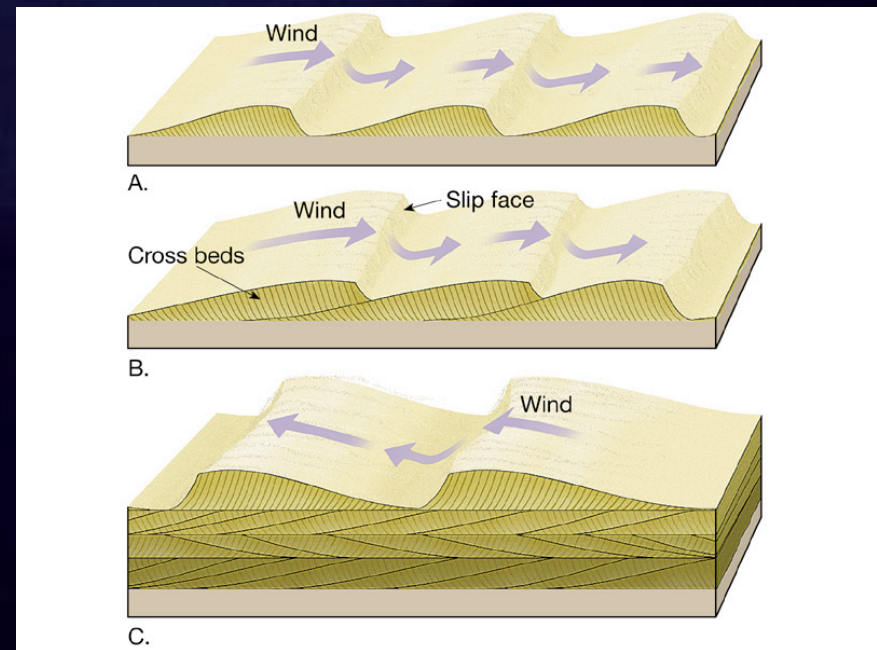


RIPPLES

Sono le forme più piccole, formate da increspature asimmetriche.

Normalmente presentano:
 $L = 1-25 \text{ cm}$ ed $H = 0.5-1.0 \text{ cm}$

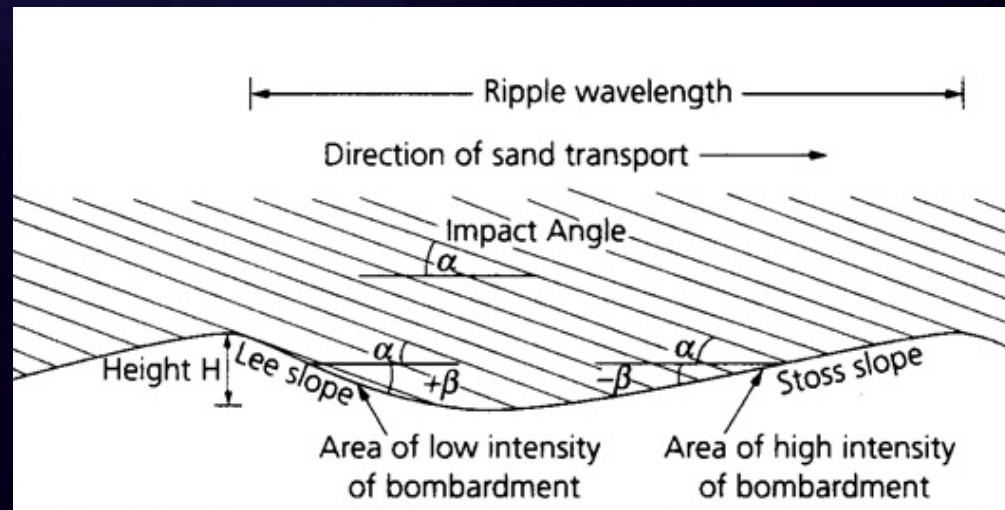
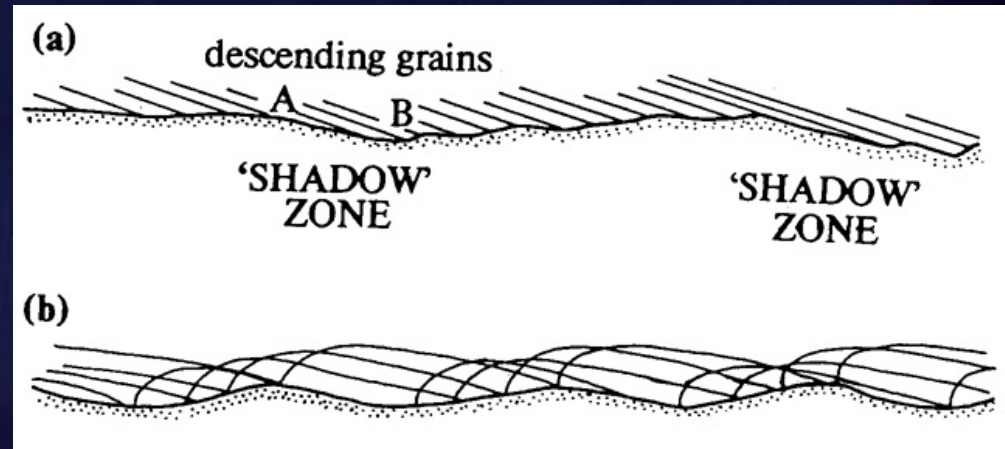
Sono stabili e si formano per bassi regimi di vento. Si appiattiscono e scompaiono quando il vento al suolo supera i 12-14 m/s.



Sebbene non sia ancora ben chiara la modalità di innesco dei processi di formazione delle bedform, si suppone che sia necessaria almeno una forma di nucleo che permetta la concentrazione di particelle.

Un fondo irregolare viene bombardato dai granuli in modo differente, a seconda che le superfici siano esposte o meno alle traiettorie.

Secondo Bagnold, i ripples sono di genesi ballistica (ripples da impatto), con lunghezza corrispondente alla traiettoria massima delle particelle in saltazione





DUNE

Sono le forme tipiche degli ambienti eolici, presentando un'ampia variabilità di dimensioni e forma.

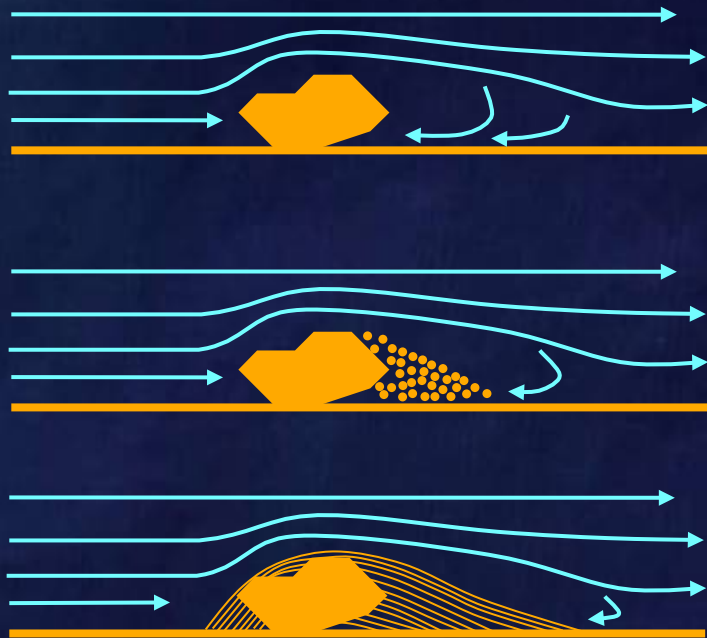
Hanno, di norma, un'altezza di 0.1-15 m e spaziatura da 3 a 600 m.

Quando aumenta l'altezza e la spaziatura si possono definire:

MEGADUNE

DRAA

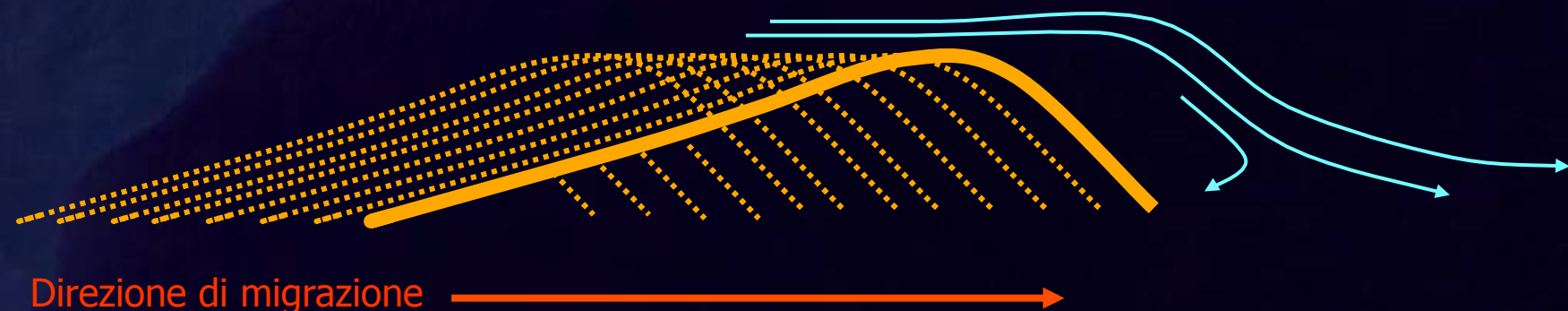




Le dune si formano generalmente quando il flusso del vento viene distorto da un ostacolo, che causa una separazione del flusso.

Nell'area sottovento, la caduta di energia determina la deposizione della sabbia, innescando il processo di formazione di una **duna shadow**.

In generale, a processo avvenuto, le dune tendono a muoversi, secondo la direzione del vento, a causa dell'erosione del lato dolce sopravvento, con deposizione (per scivolamento) sul lato sottovento

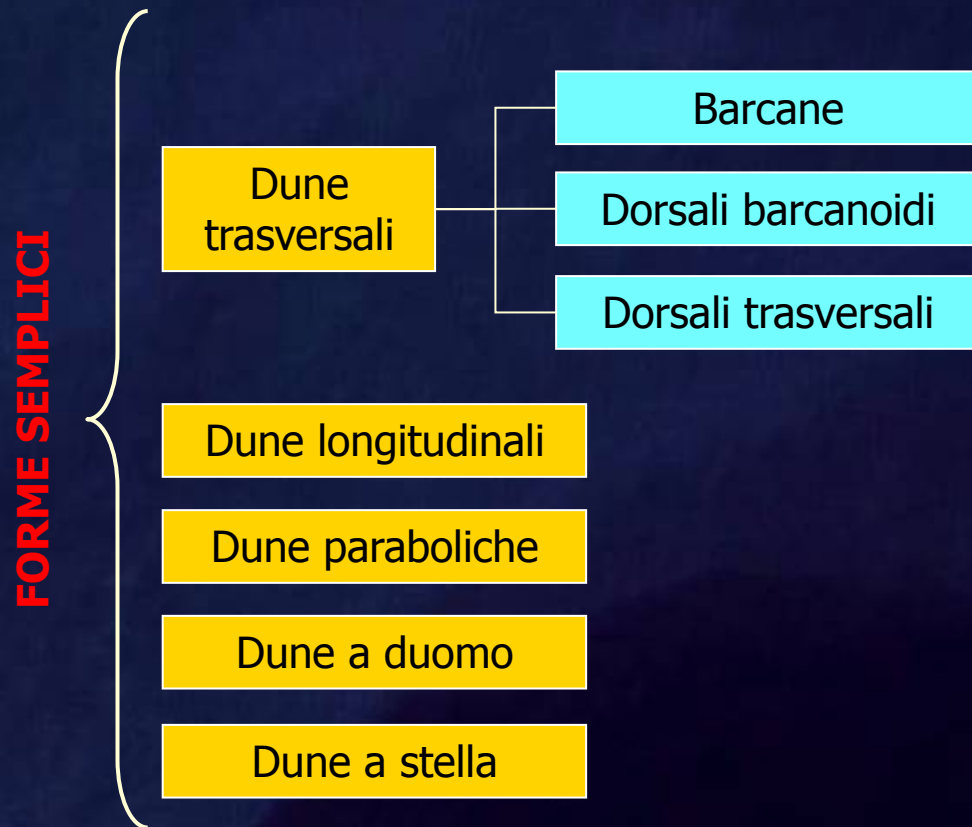


La formazione di dune shadow avviene anche in presenza di vegetazione, sempre a causa del processo di separazione del flusso.



La duna shadow presenta una caratteristica forma a piramide, con una cresta rettilinea che separa due superfici di scivolamento inclinate, ad opposta immersione, dette **SLIPFACE**.

Le dune possono essere classificate in base alla loro forma, all'orientazione dell'asse della duna rispetto alla direzione del vento dominante, al numero di slipface (Mc Kee, 1979).

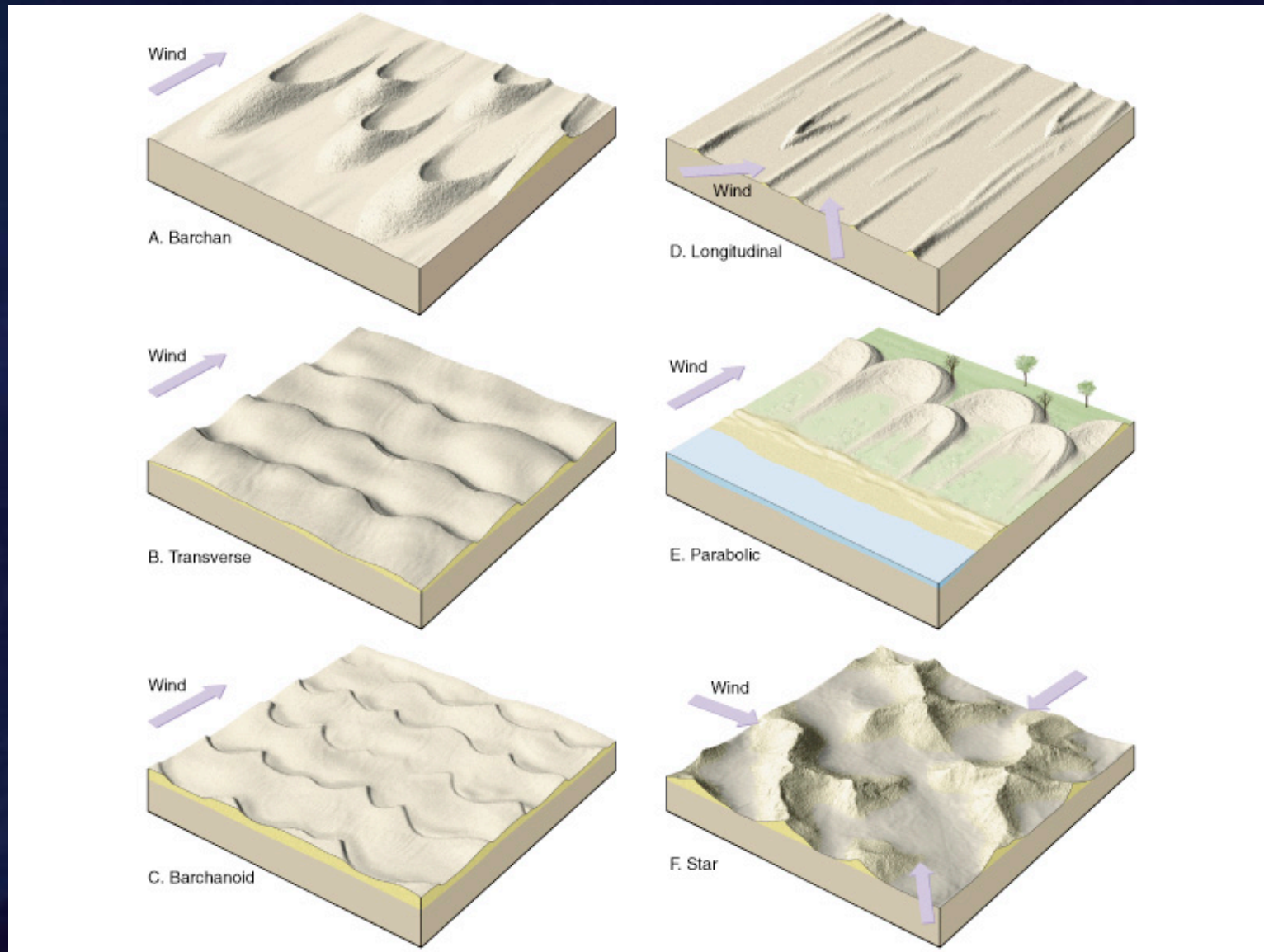


Forma	Dir. vento	N. slipface
mezzaluna	trasversale	1
mezzelune coalescenti	trasversale	1
dorsale asimmetrica	trasversale	1
dorsale simmetrica	parallela	2
ad "U"	parallela	1 o più
circolare o ellittica	parallela	poco definita
picco centrale con tre o più braccia	multipla	3 o più

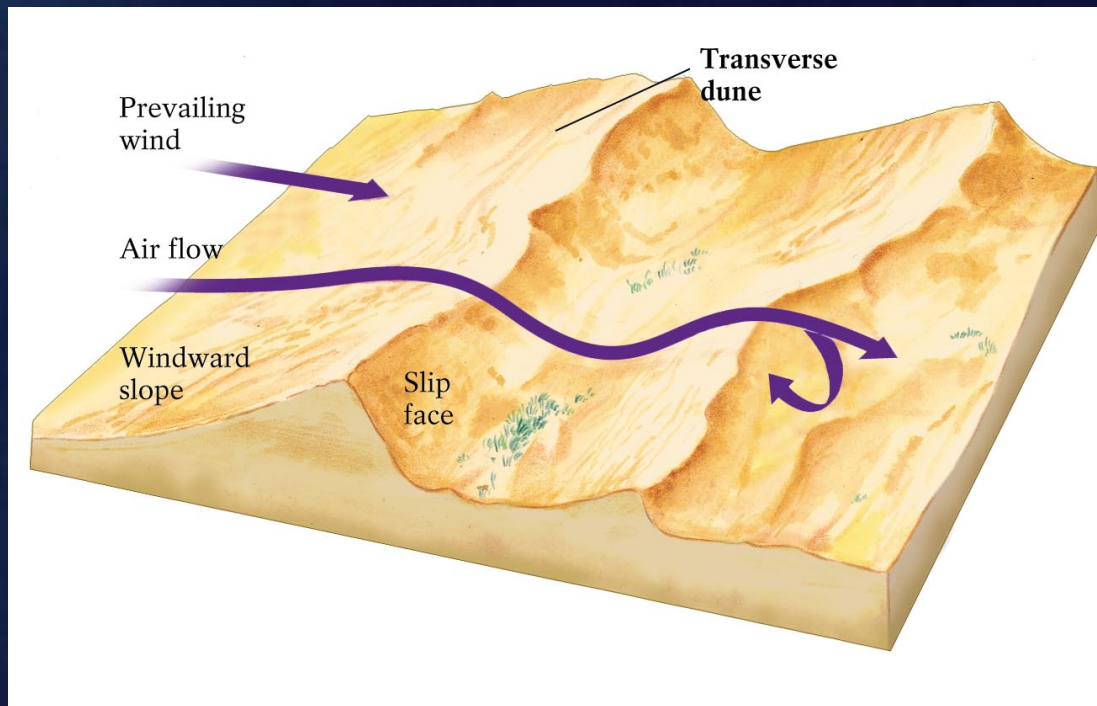
FORME COMPOSTE → costituite da 2 o più dune dello stesso tipo, coalescenti o sovrapposte

FORME COMPLESSE → costituite da diversi tipi di dune che si fondono e sovrappongono

Vari tipi di forme di dune



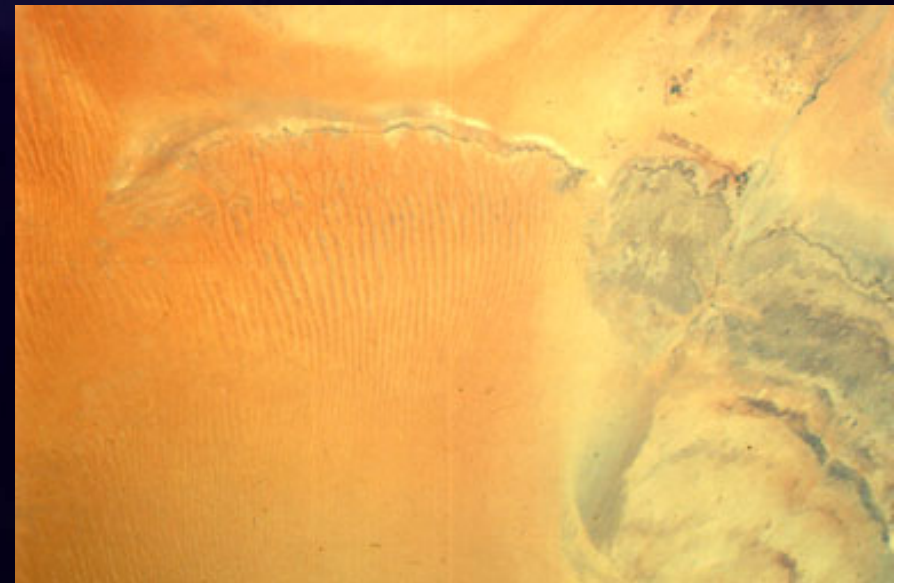
Le varie forme dipendono da complesse relazioni tra il regime del vento e la disponibilità di sedimento



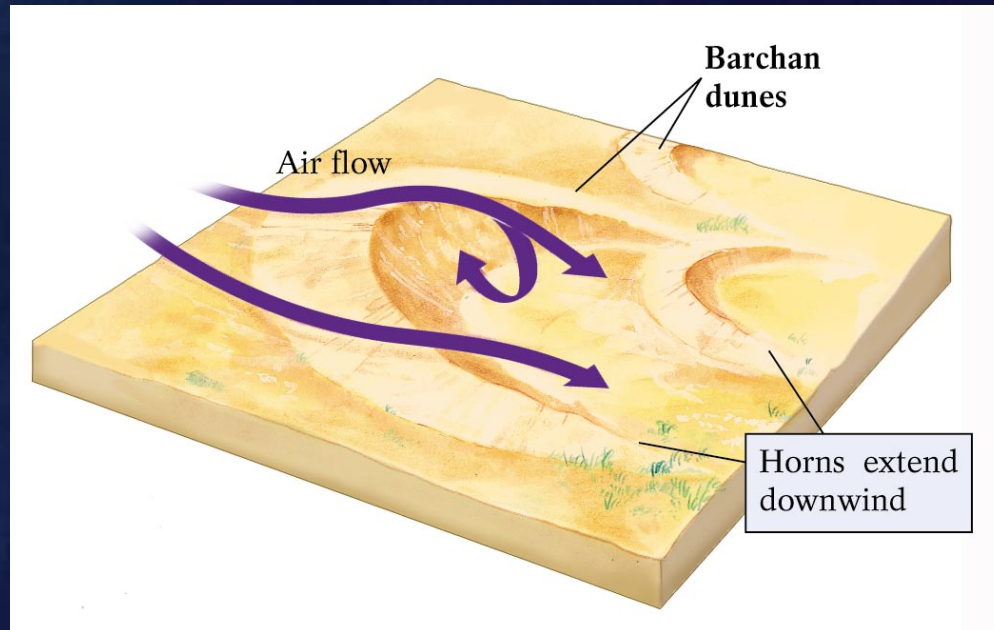
DUNE TRASVERSALI (dorsale trasversale)



- Creste trasversali, con direzione perpendicolare al vento prevalente
- Direzione costante del vento
- Notevole disponibilità di sedimento



BARCANE



- Forma a mezzaluna
- Direzione costante del vento
- Le estremità biforcate sottovento
- Carico sedimentario scarso

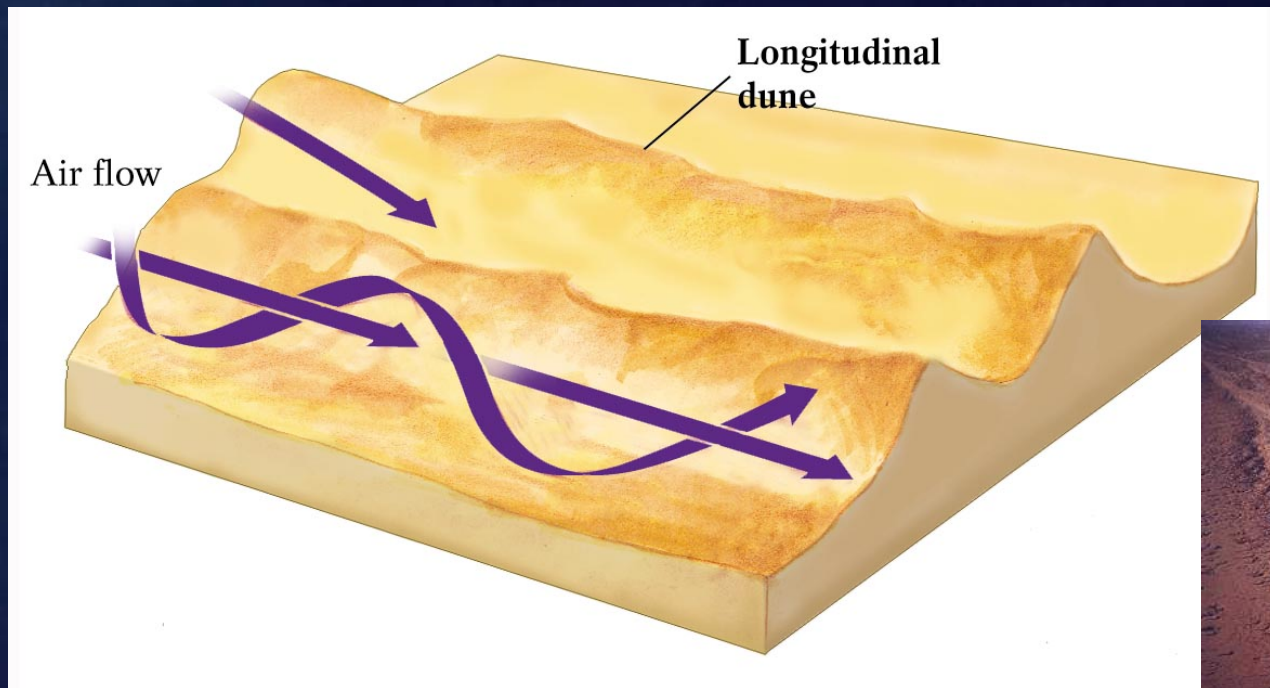


DORSALE BARCANOIDE



Copyright, P. Hesp

Guerrero Negro, Baja California, Mexico



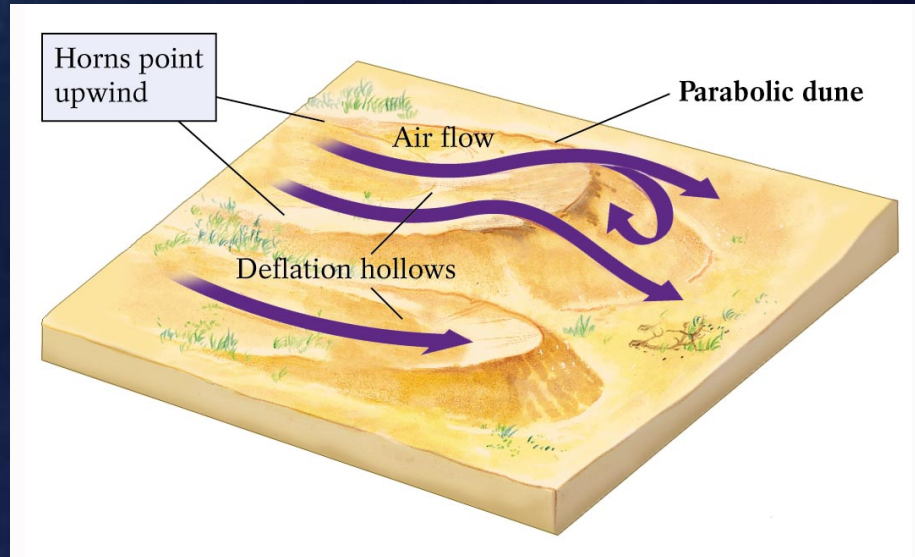
DUNE LONGITUDINALI



- Creste longitudinali parallele alla direzione del vento prevalente
- Direzione bimodale stretta del vento
- Carico sedimentario: moderato
- Note in deserto come **Seif dunes**

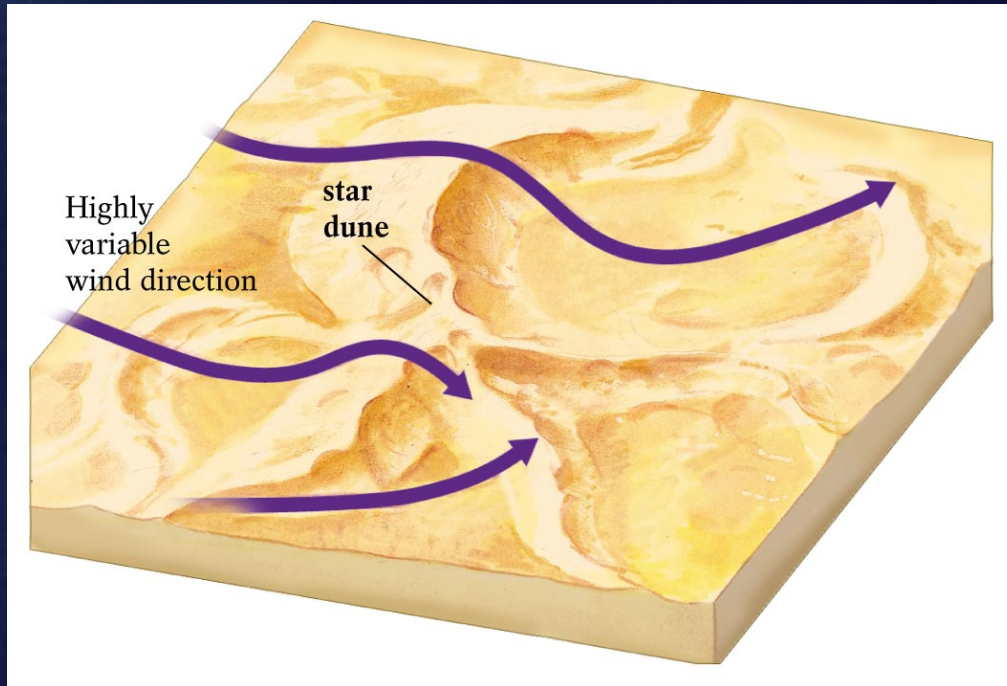


DUNE PARABOLICHE



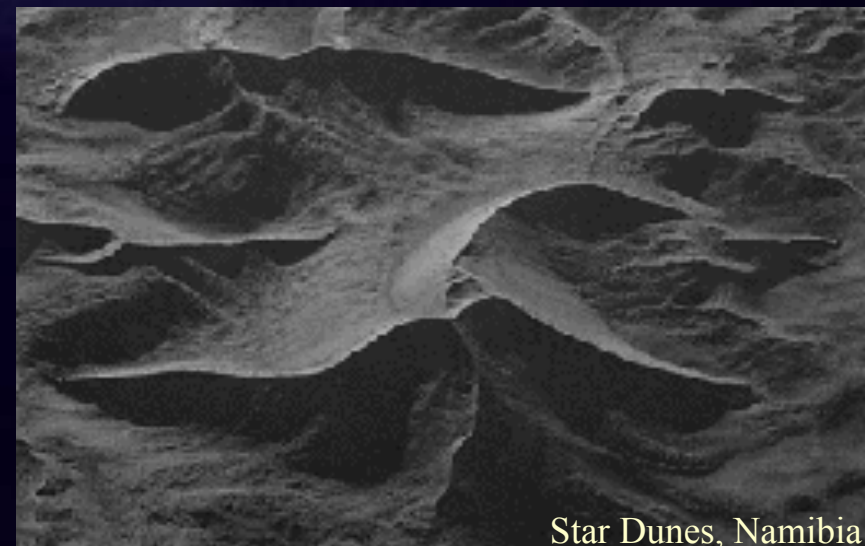
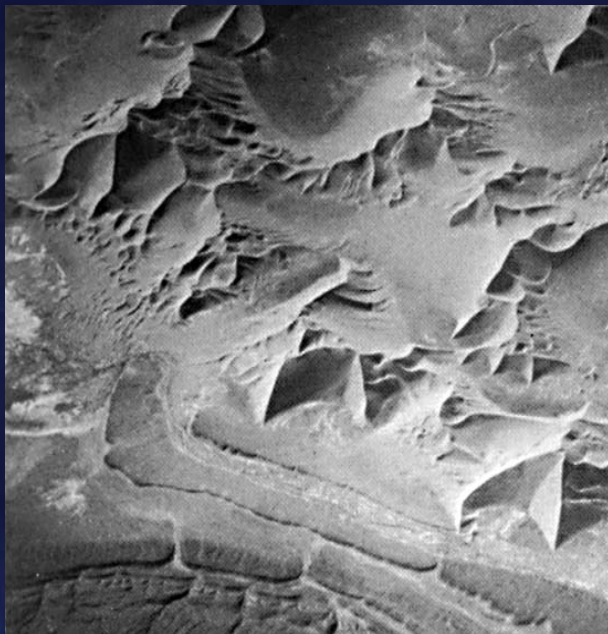
- Forma a parabola, opposta alla barcana
- Direzione costante del vento
- Le estremità biforcute sopravvento
- Presenza di vegetazione
- Carico sedimentario: abbondante





DUNE A STELLA

- Forma tipica di stella
- Direzione variabile del vento
- Carico sedimentario: variabile



Star Dunes, Namibia

Transverse Dune



Seasonal reversal
of crest line



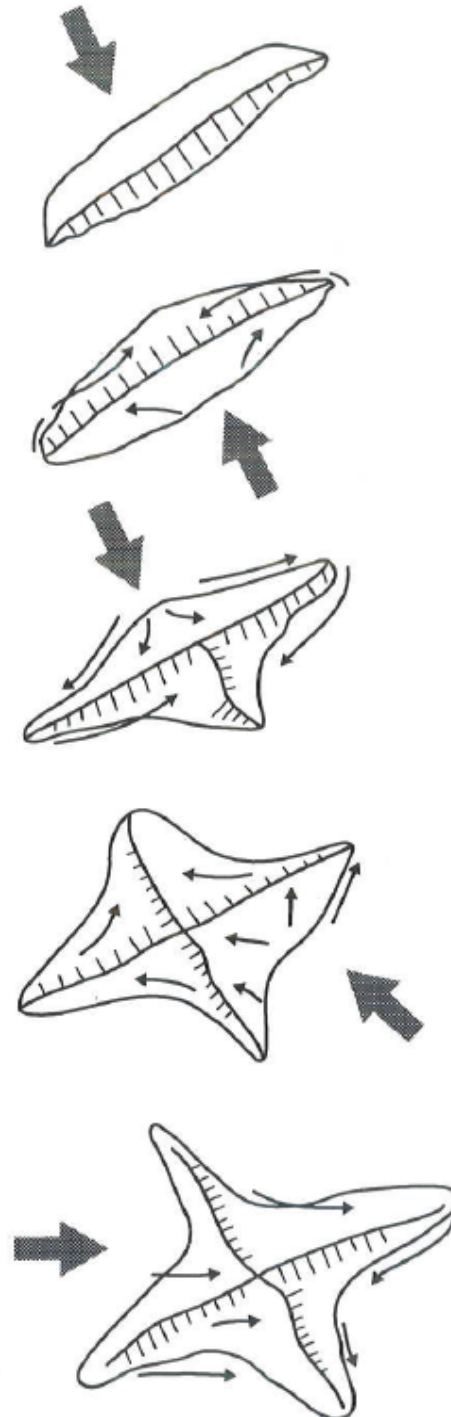
Reversing dune
with incipient
star dune arm



Development of arm
by secondary flow



Accentuation of
arms by third wind
direction and secondary
flow

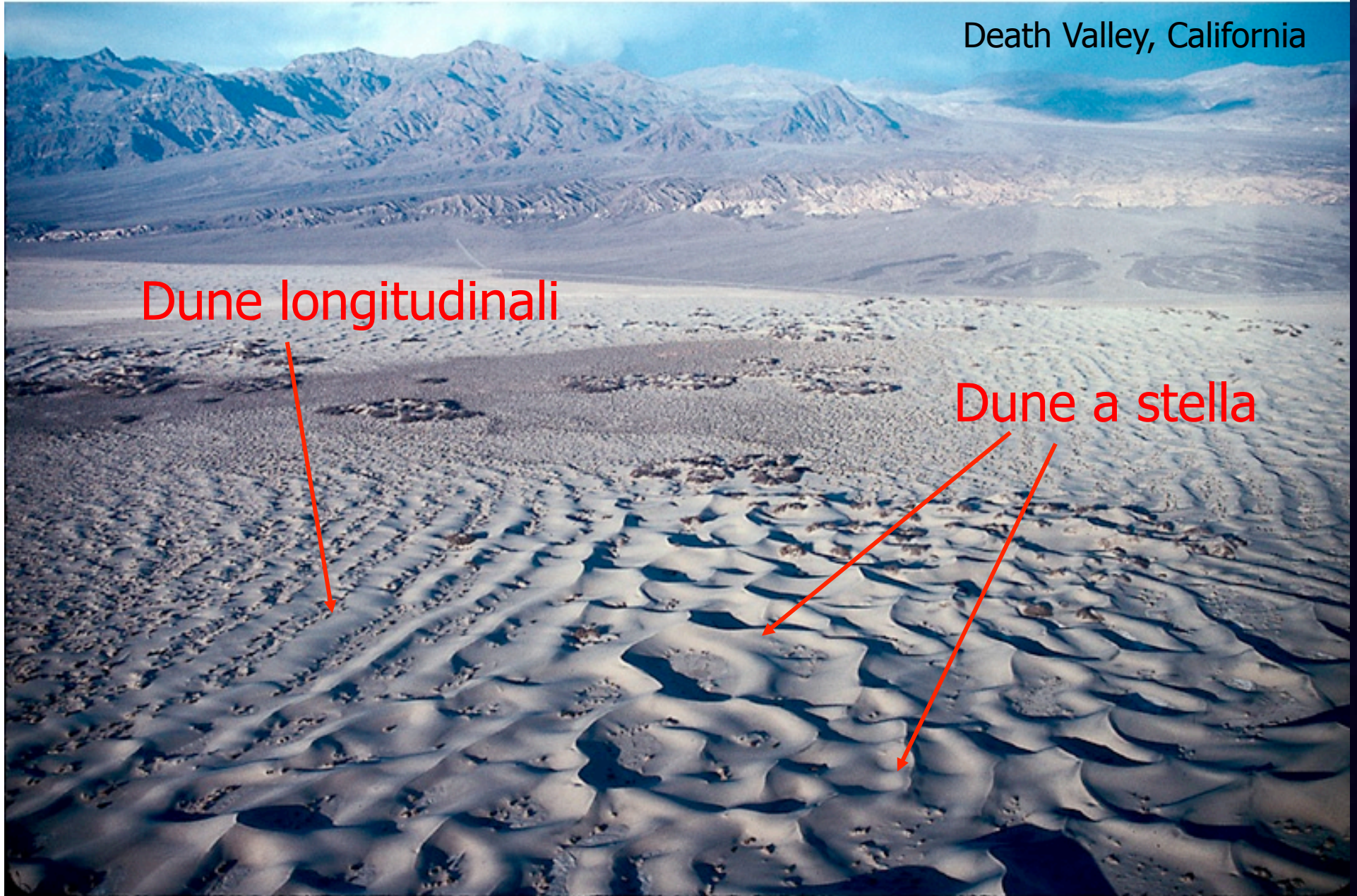


Modello di formazione di
dune a stella a partire da
una originaria duna
trasversale e in condizioni
di vento proveniente da
direzioni variabili
(da Lancaster, 1995).

Death Valley, California

Dune longitudinali

Dune a stella



Una classificazione diversa viene proposta da Livingston & Warren (1996), secondo i quali possiamo distinguere:

Dune a sviluppo libero

- Sono dune libere di migrare e prevalgono nelle regioni a clima arido, in assenza di vegetazione.
- Tipiche dei deserti e delle coste della fascia equatoriale
- Forme trasgressive nelle regioni costiere a clima temperato

Dune ancorate

- Sono dune che si sviluppano grazie alla vegetazione, che ancora la sabbia e permette la crescita del deposito per alimentazione continua nello stesso punto.
- Tipiche delle aree costiere a clima temperato
- Corrispondono alle **dune vegetate** di Goldsmith (1985)



DUNE COSTIERE

DUNE COSTIERE

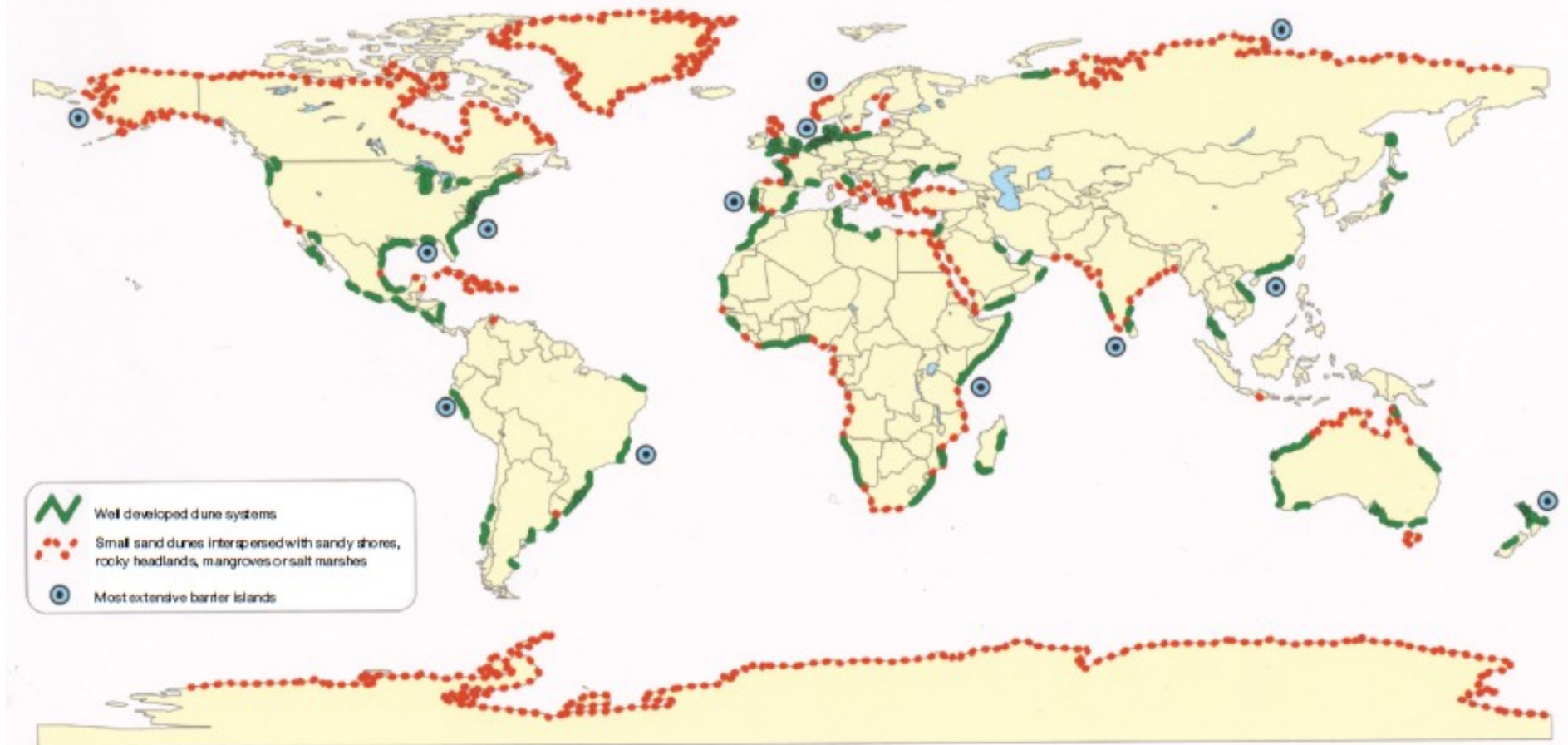
- In generale sono simili a quelle desertiche in termini di
 - Processi (vento) e materiale (sabbia)
 - Strutture sedimentarie interne (stratificazione incrociata)
 - Forme (rilievi di varia forma e orientazione)

- Differenze:
 - I campi di dune sono generalmente lineari, paralleli alla linea di riva
 - La vegetazione gioca un ruolo fondamentale (ancora la sabbia)
 - Il clima non è un importante fattore di controllo

- Si possono ritrovare nelle regioni aride, temperate ed umido-temperate, sotto forma di depositi a sviluppo libero o ancorati

- Più difficilmente si ritrovano in quelle umido-tropicali a causa di:
 - Elevata alterazione chimica dei suoli
 - Elevata umidità che inibisce il trasporto eolico
 - Elevata densità di vegetazione, con scarse superfici di deflazione

Distribuzione a livello mondiale delle dune costiere (Martinez et al., 2004)



Sistemi di dune costiere ben sviluppati



Piccoli sistemi di dune costiere inframezzati ad altre morfologie (saltmarshes, coste rocciose)



Grandi sistemi di isole barriera

DUNE COSTIERE

AVANDUNA (foredune)

È il tipico deposito eolico ancorato alla vegetazione, parallelo alla linea di costa, che occupa nel momento della formazione la posizione più avanzata verso mare



Sinonimi:

- dune embrionali (embryo dunes)
- umbrafon dunes
- beach dunes
- retention ridges
- bank dunes
- frontal dunes
- talora "beach ridges"

- ✪ è una forma relativamente stabile che si evolve in sito in risposta all'interazione tra il trasporto eolico della sabbia e la vegetazione;
- ✪ morfologicamente è costituita da un complesso di creste discrete ed avvallamenti variabili nella forma e nelle dimensioni.

DUNE COSTIERE

Secondo **Psuty** (1989) le dune costiere possono essere distinte in due grandi categorie:

- **Dune primarie o AVANDUNE** (*foredune*)
- **Dune secondarie** che comprendono:
 - Forme trasgressive o migranti
 - Paleodune
 - Campi sabbiosi (sand sheet)

Con riferimento alle sole dune costiere ancorate **Hesp** (1988) distingue:

- **avandune incipienti**
- **avandune stabilizzate**

Riunendo le due diverse classificazioni di **Hesp** e **Psuty** possiamo distinguere:

a) AVANDUNE O DUNE PRIMARIE

a.1 – Avandune incipienti o embrionali

Sono costituite da piccole forme di accumulo, soprattutto di tipo shadow, dapprima isolate, poi via via coalescenti. L'innesco del processo è dato da ostacoli di varia natura e da piante pioniere.

a.2 – Avandune in s.s. (*established foredunes* di Hesp)

Insieme coalescente di forme solo in parte stabilizzate dalla vegetazione, in continuità morfologica o distaccato dalla precedente fascia

b) DUNE SECONDARIE

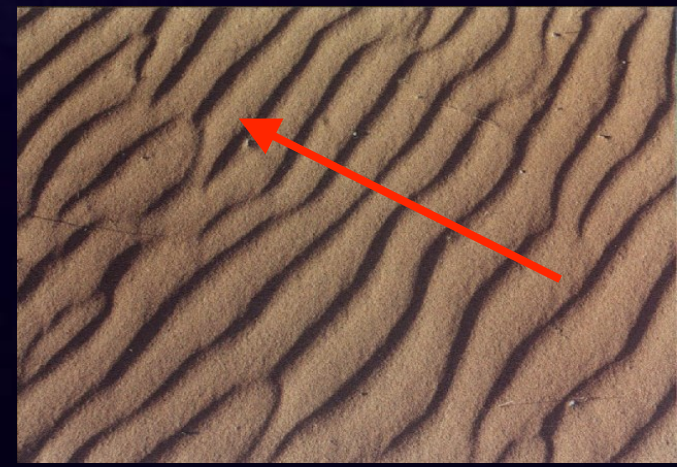
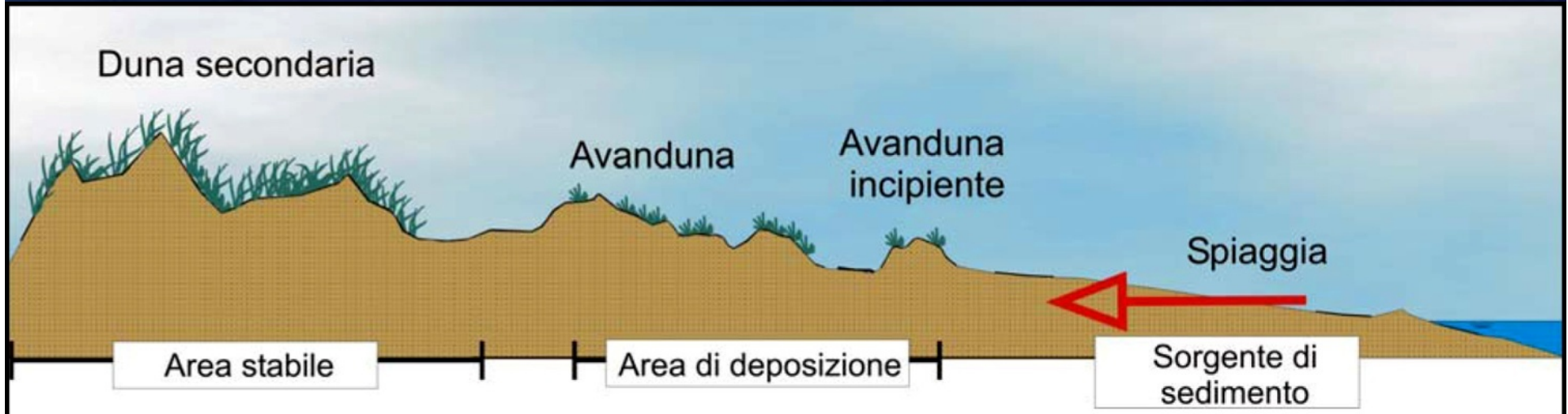
b.1 – Dune stabilizzate

Rappresentano vecchi cordoni di avandune, relegati in una posizione passiva a seguito della formazione di nuovi cordoni frontali

b.2 – Dune trasgressive

Insieme di forme instabili, che possono comprendere dune a barcana, paraboliche, trasversali e longitudinali, tutte a sviluppo libero

Il sistema spiaggia - duna



a) AVANDUNE O DUNE PRIMARIE



Avanduna s.s.

Avanduna
incipiente

avandune incipienti (depositi shadow)



**L'Avanduna gioca
un ruolo attivo
nell'interscambio
di sedimento con
la spiaggia
(Psuty, 1989)**



Il profilo spiaggia - duna
risponde alle variazioni di
energia dovute ai processi
costieri (vento, onde, correnti).
Ogni componente del profilo
può cedere o guadagnare
sedimento in momenti diversi.

b) DUNE SECONDARIE

b.1 – Dune stabilizzate



Copyright IGNS & L.Homer

b) DUNE SECONDARIE

b.2 – Dune trasgressive



Copyright W. Illenberger



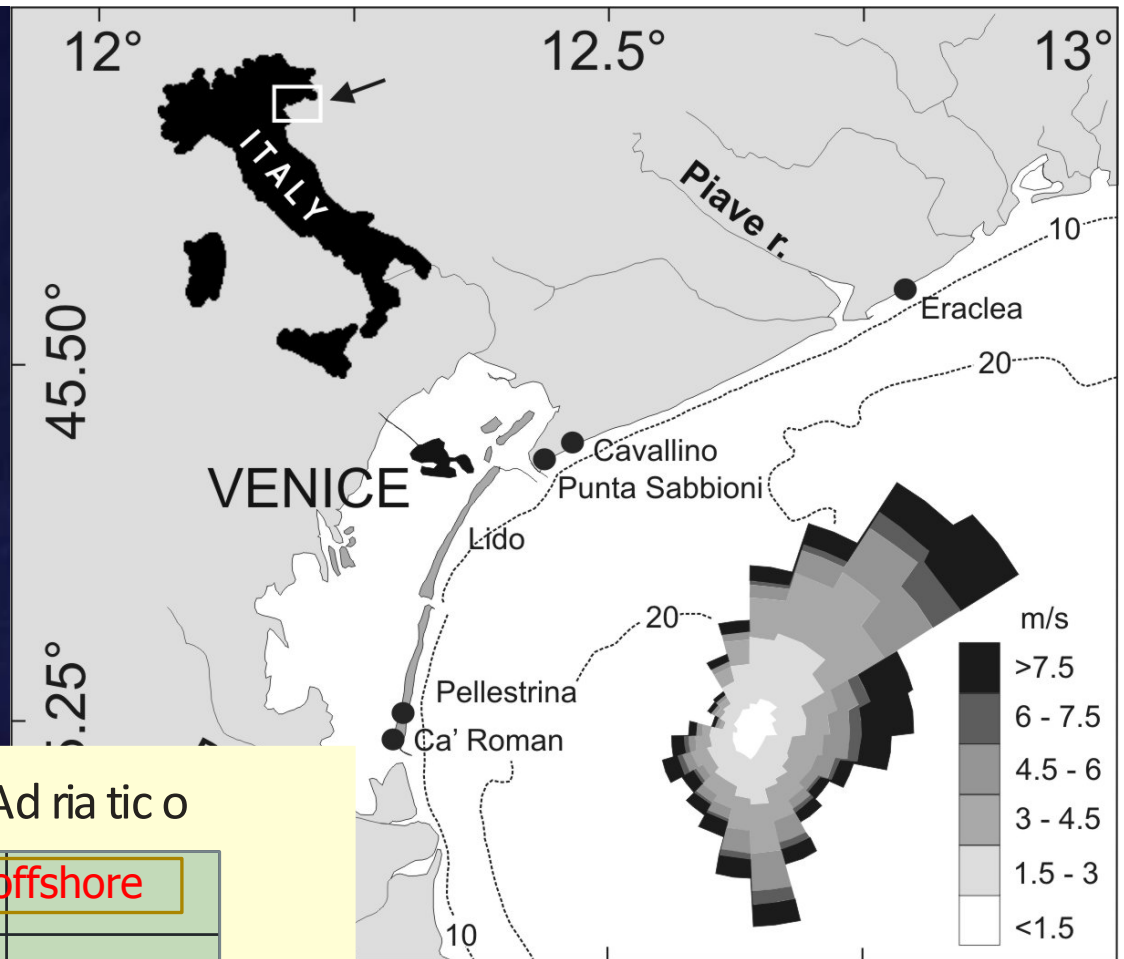
SOUTHLAND
REGIONAL
COUNCIL

FATTORI DI CONTROLLO PER LO SVILUPPO DELLE DUNE COSTIERE

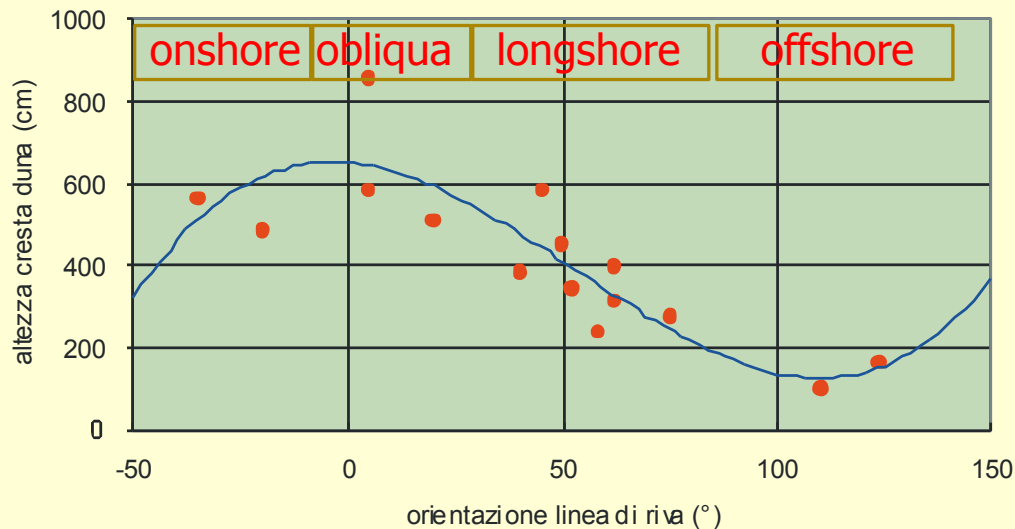
- 1) Regime anemologico ed esposizione al vento dominante
- 2) Caratteristiche del sedimento
- 3) Vegetazione
- 4) Caratteristiche morfodinamiche e contesto evolutivo delle spiagge
- 5) Impatto antropico

1) Regime anemologico

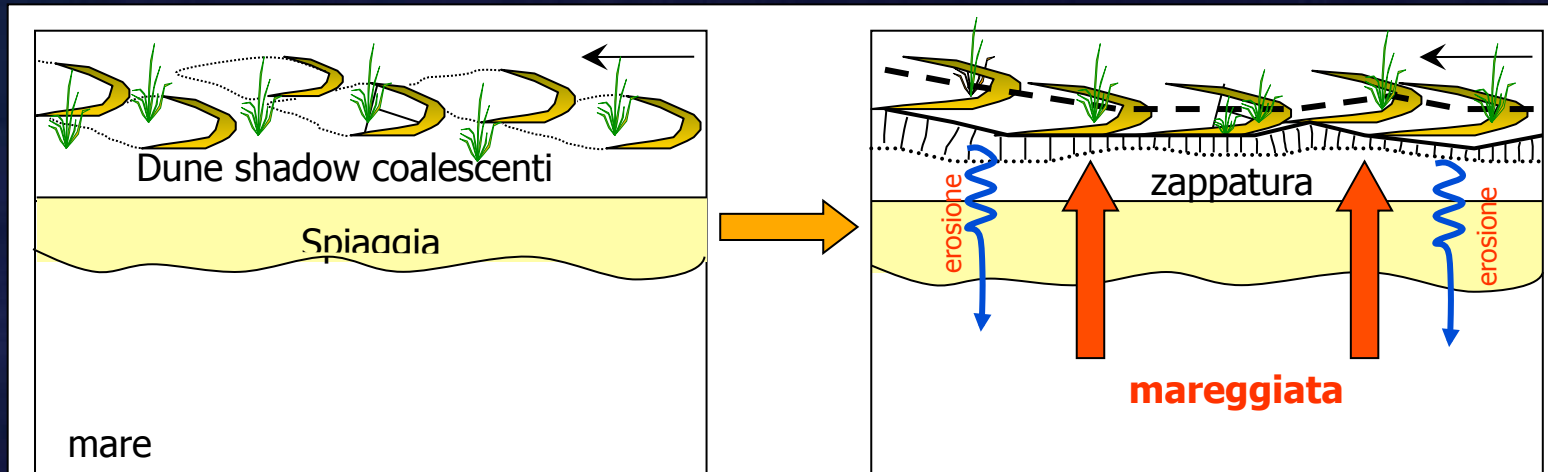
- esposizione al vento dominante
- importanza della componente *onshore* del vento



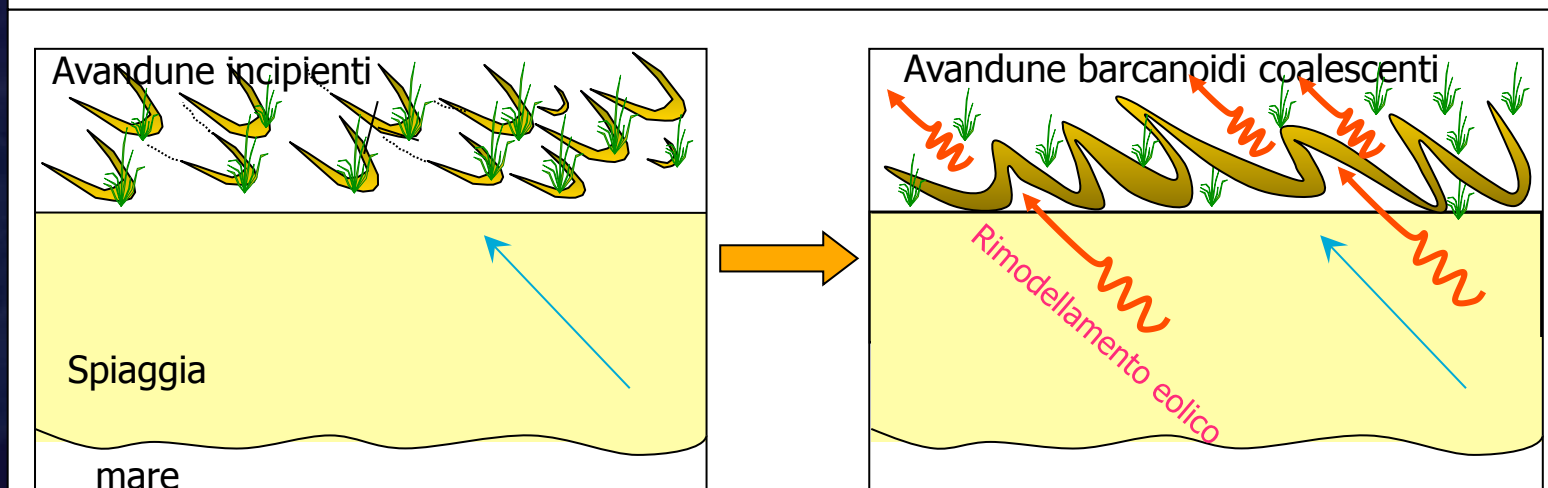
Altezza delle dune in Alto Adriatico



L'esposizione al vento (effetto *fetch*) condiziona dimensioni e morfologia delle dune costiere

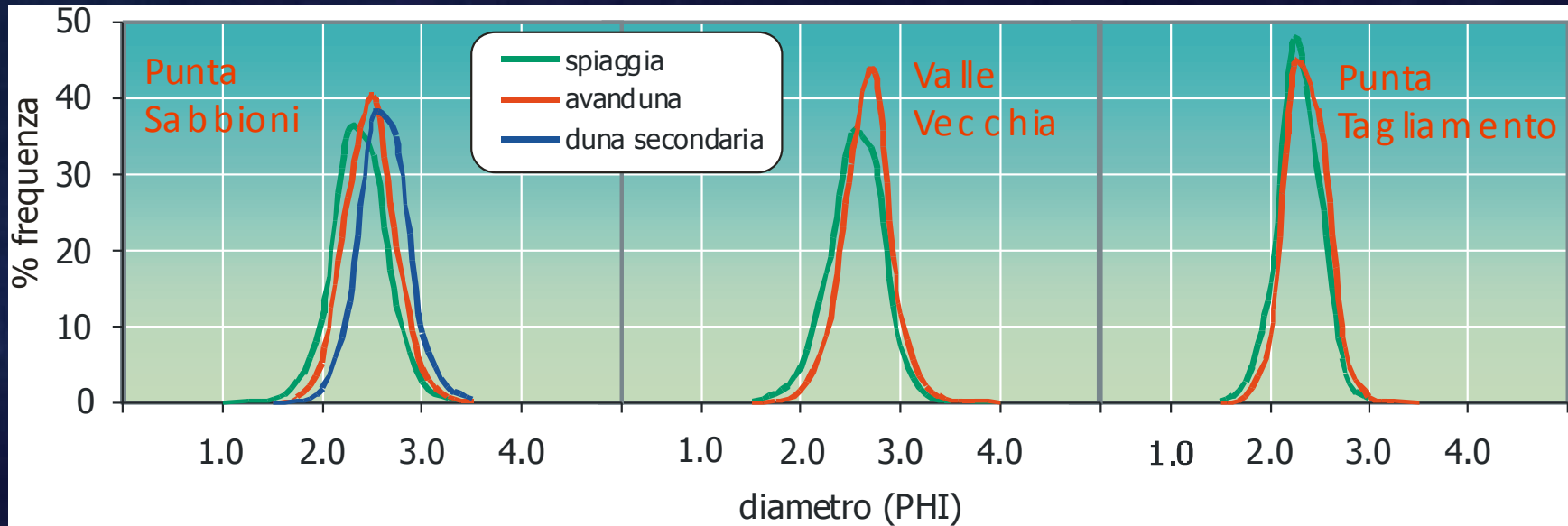


ORIENTAZIONE LONGSHORE



ORIENTAZIONE OBLIQUA

2) Caratteristiche del sedimento

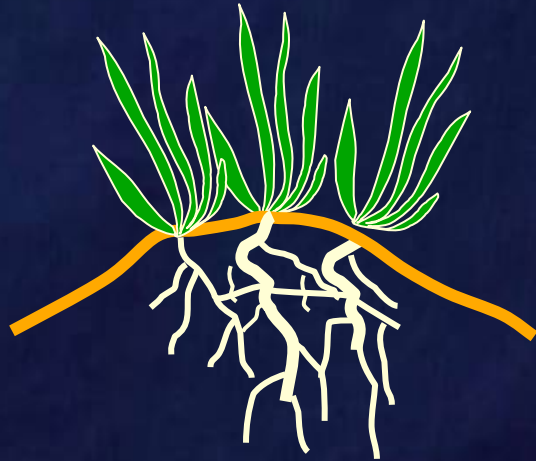


- Il trasporto eolico è limitato essenzialmente alla sabbia
- Il vento seleziona il materiale di spiaggia in modo molto efficace
- I depositi di duna sono in generale debolmente più fini del materiale sorgente
- I depositi di duna sono meglio classati di quelli di spiaggia

3) La vegetazione

La formazione delle dune è direttamente collegata alla presenza della vegetazione, in particolare di quella pioniera (graminacee, es. *Ammophila*), che favorisce la formazione di depositi embrionali, a distanze anche molto ridotte dalla linea di riva

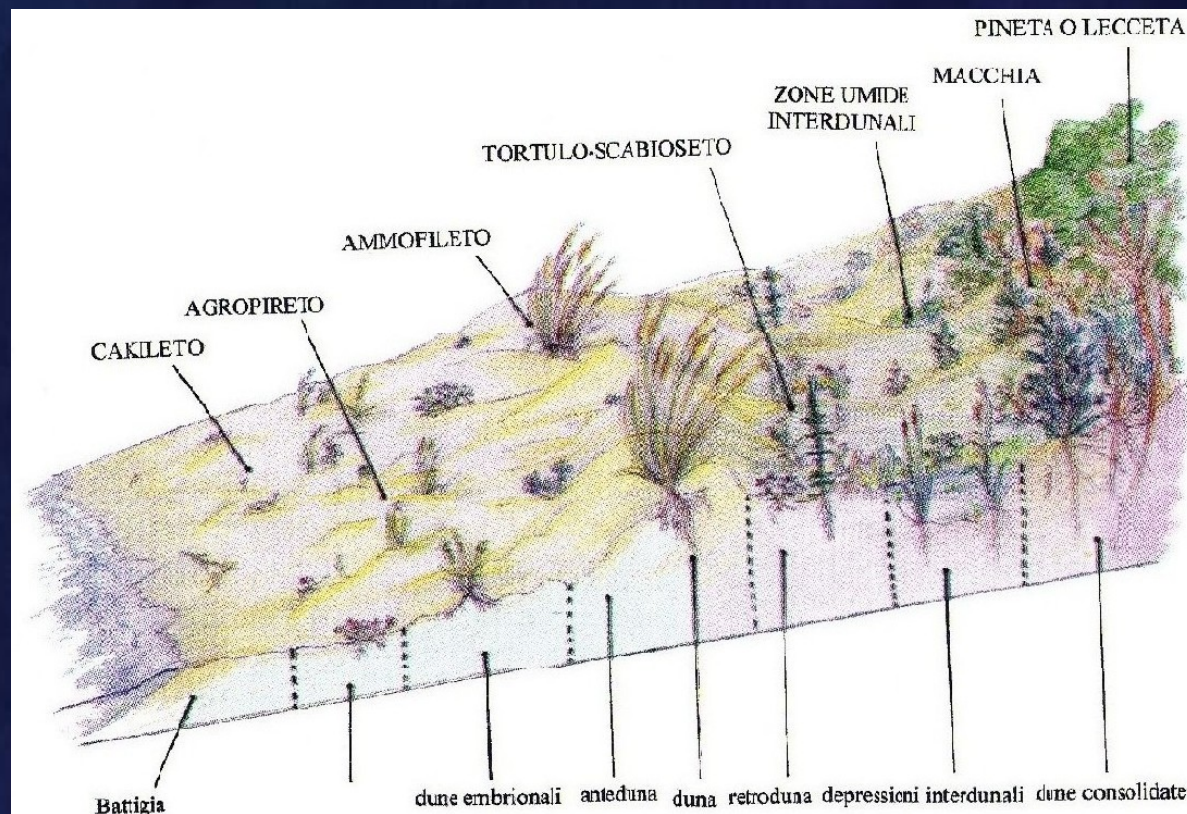
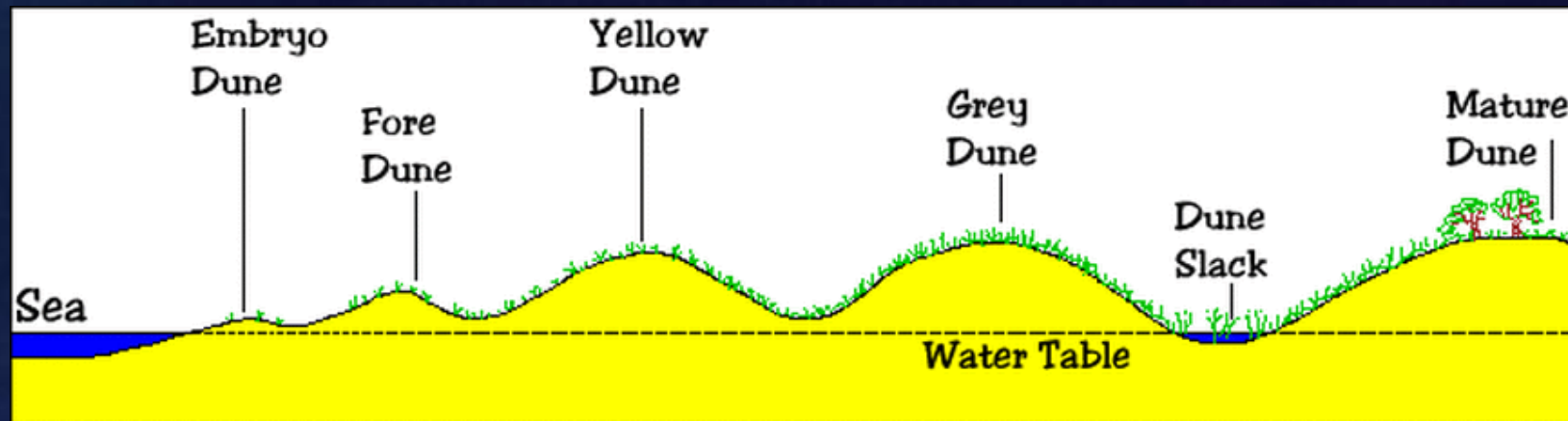




La **vegetazione**, oltre a innescare il processo di formazione delle dune, tende a svilupparsi grazie al continuo intrappolamento della sabbia, che seppellisce i rizomi.

La duna, al tempo stesso, viene stabilizzata, grazie al fitto intreccio dell'apparato radicale, che ne conferisce una sorta di armatura interna, aumentando la coesione del materiale.

SUCCESSIONE DELLE DUNE DAL PUNTO DI VISTA VEGETAZIONALE



La tipica successione delle coste venete

Cakile maritima



Agropyron junceum



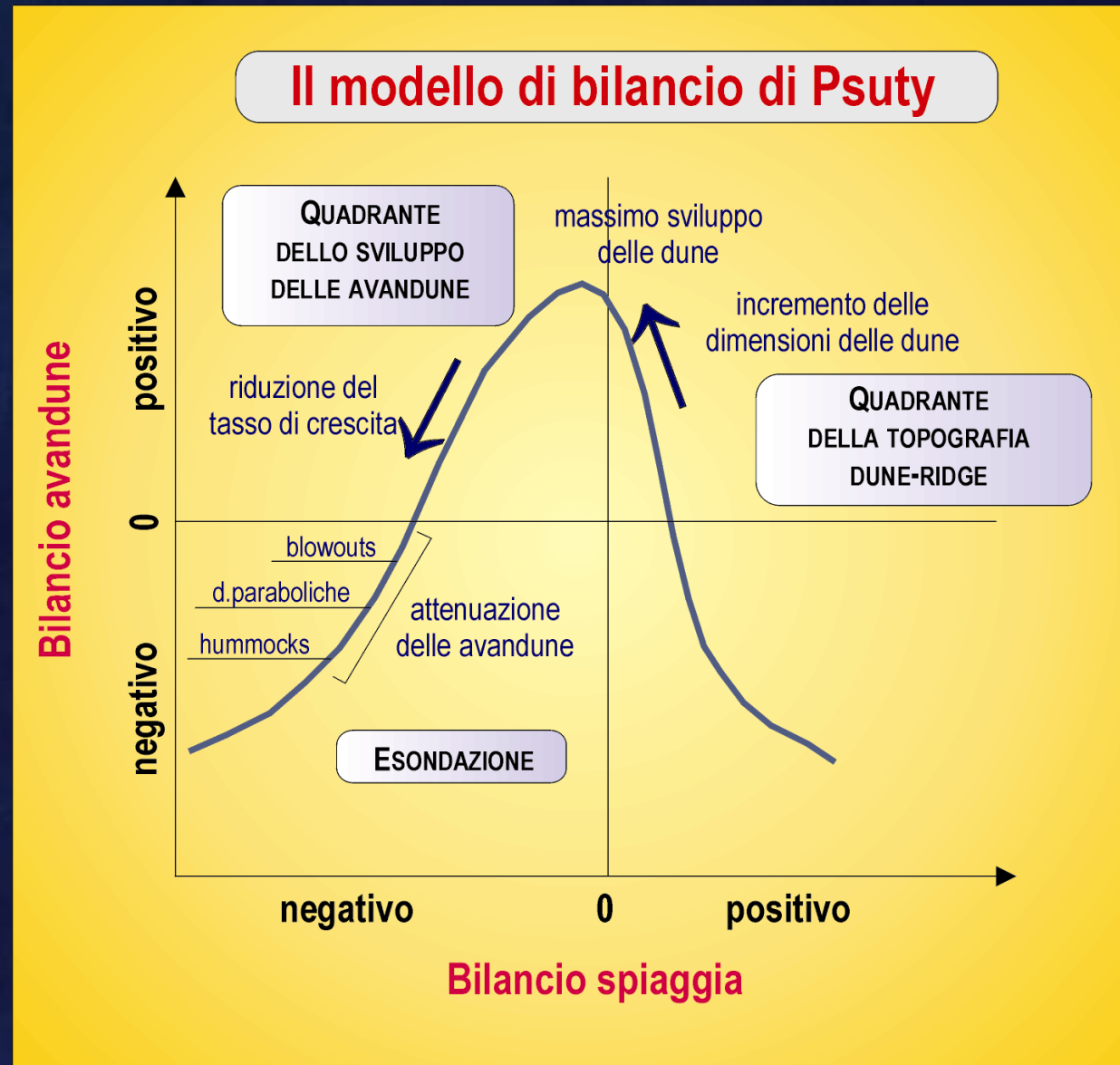
Ammophila littoralis



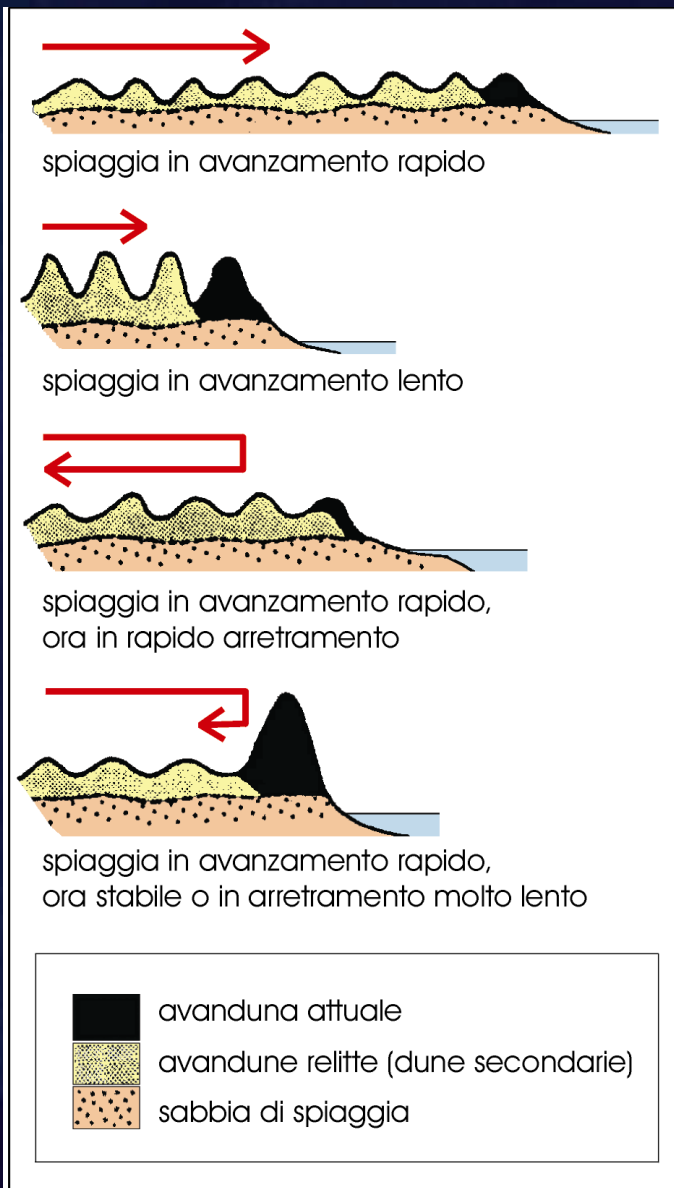
Eringium maritimum



4) Caratteristiche morfodinamiche e contesto evolutivo delle spiagge



Uno degli indicatori dinamici più evidenti dello "stato" di una spiaggia è dato dalla morfologia delle avandune, cioè delle dune ubicate più a ridosso della linea di riva



(Da Sheperd, 1990 mod.)

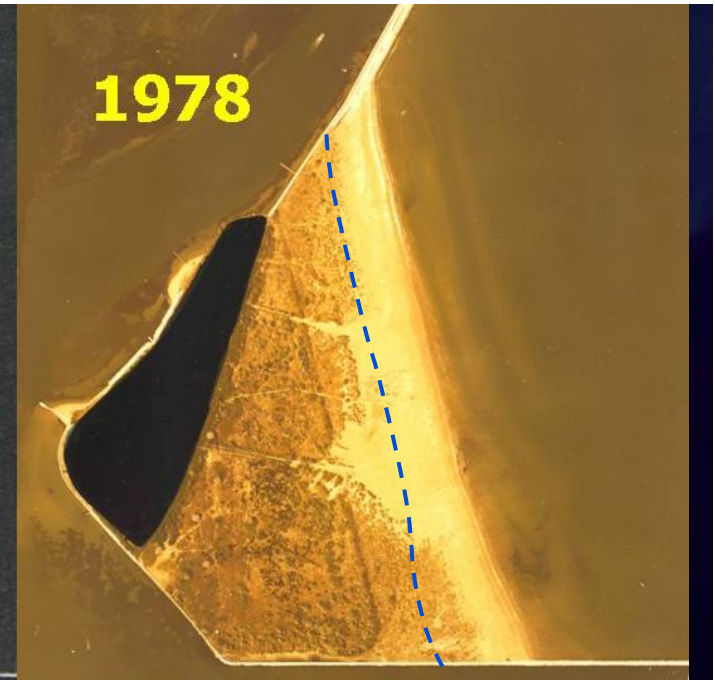
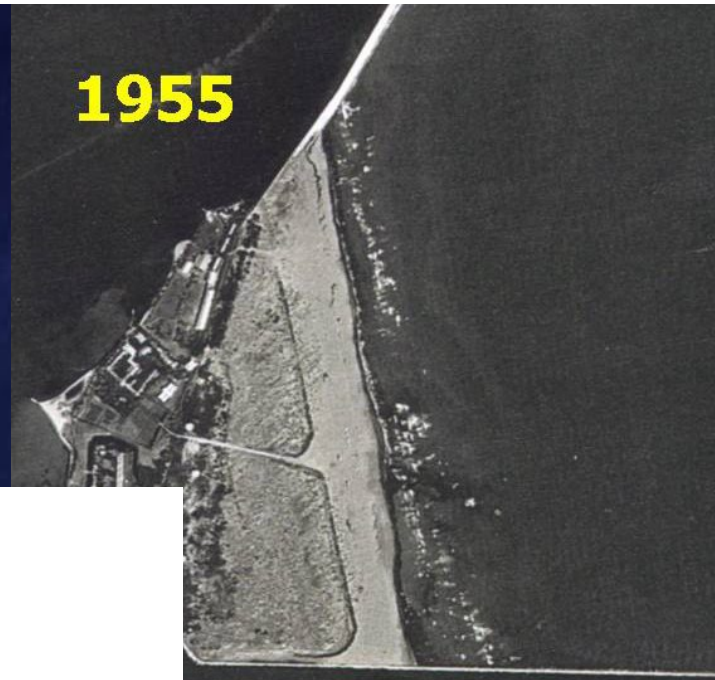


**DELTA CUSPIDATO =
Wave-dominated delta**

PROGRADAZIONE

↓
Creste dunose,
Beach ridges

Il sistema
progradante di
Ca'Roman (VE)



Se l'avanzamento non è
così rapido
si può avere lo sviluppo di
veri e propri cordoni di
dune
che indicano ciascuno i
diversi stadi di
accrescimento





Duna stabilizzata

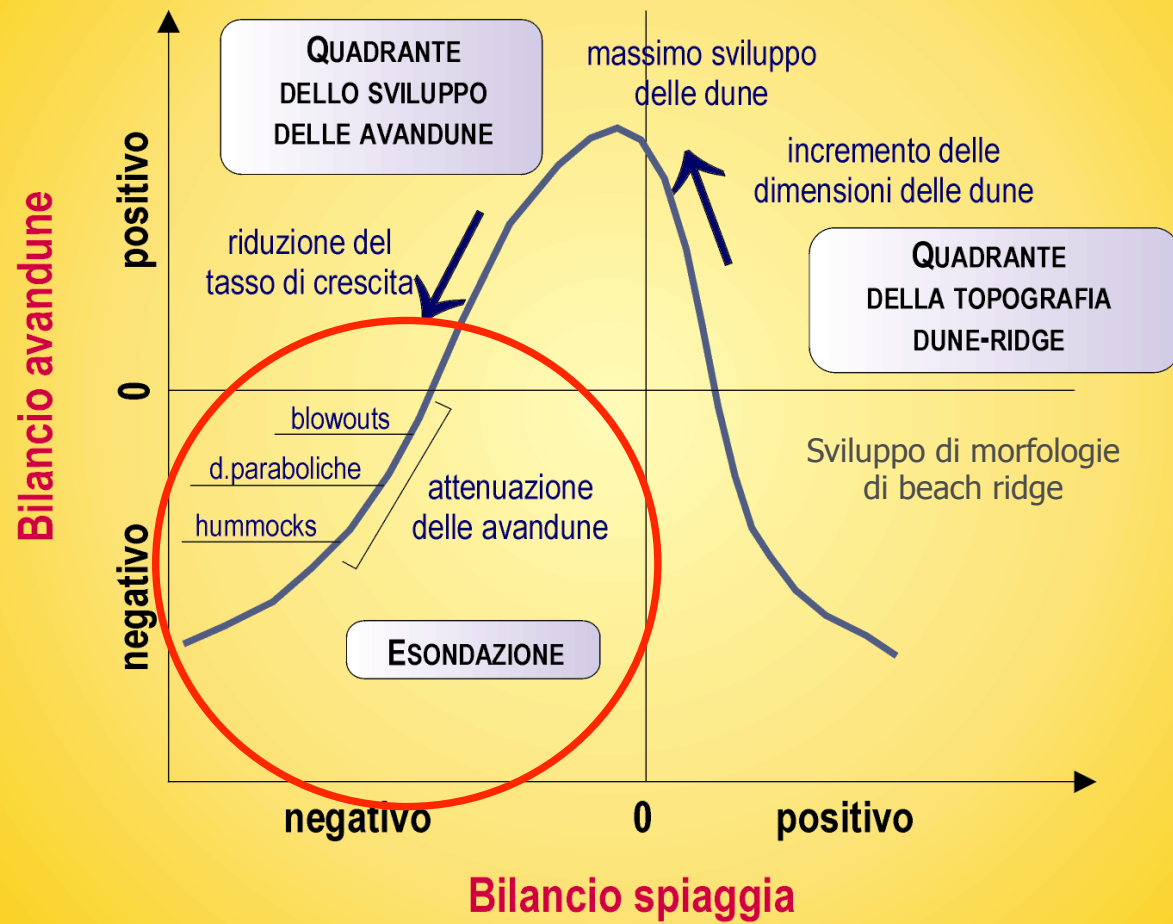
Avanduna

Avanduna
incipiente

Battigia



Il modello di bilancio di Psuty

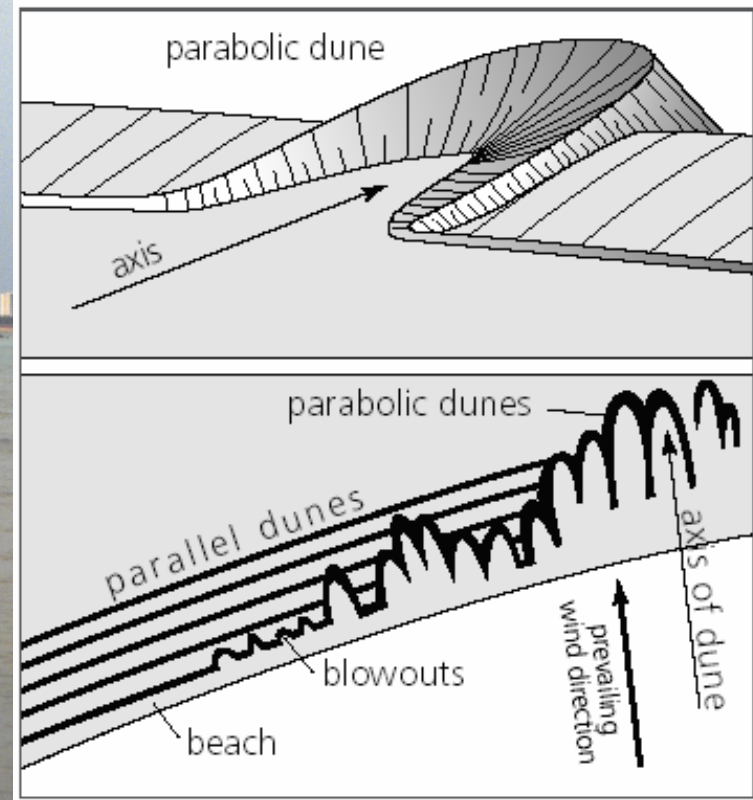


L'arretramento della costa si manifesta attraverso la formazione di forme trasgressive

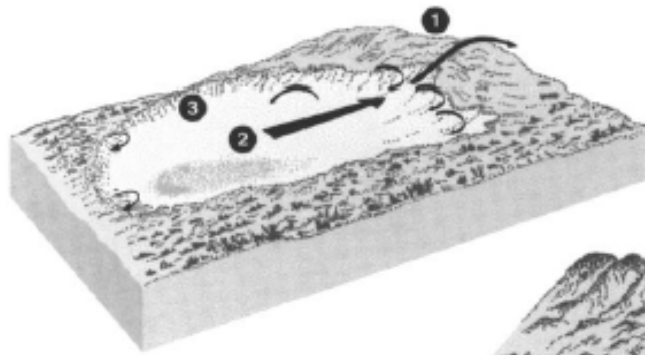
Il vento rompe le dune attraverso dei varchi chiamati *blow-out*

La sabbia invade l'entroterra attraverso i *blow-out*, formando dune paraboliche

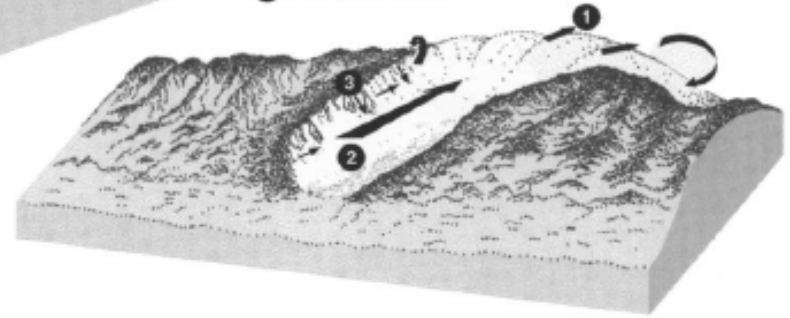
Se la spiaggia arretra ancora, le dune vengono intaccate dal moto ondoso, erodendosi e favorendo l'esondazione



BLOWOUT



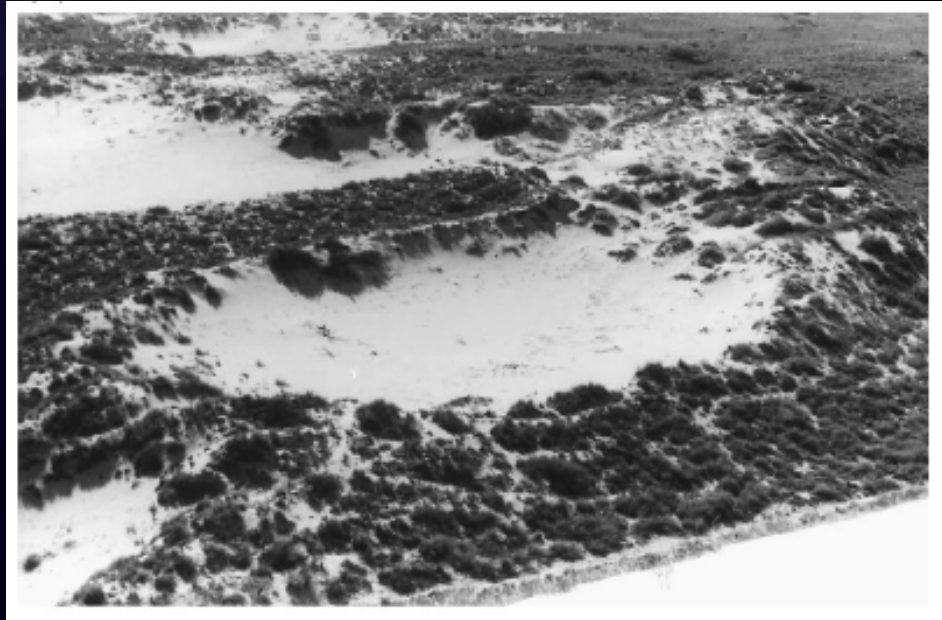
- 1 Depositional lobe
- 2 Deflation basin
- 3 Erosional walls



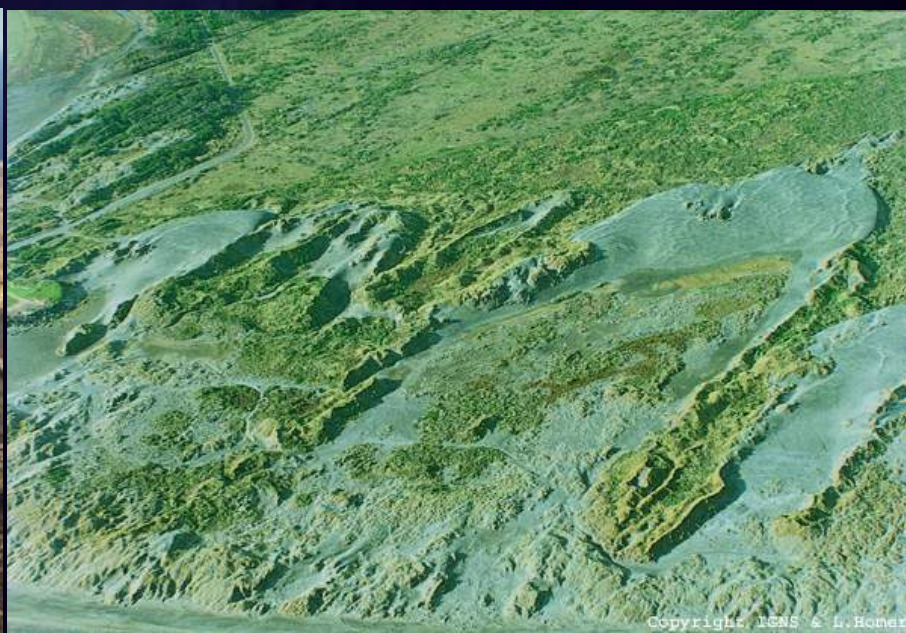
Copyright P. Resp








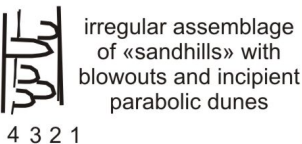


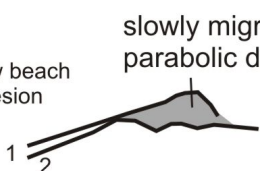
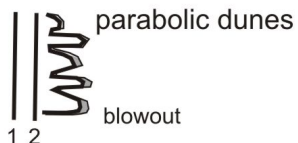
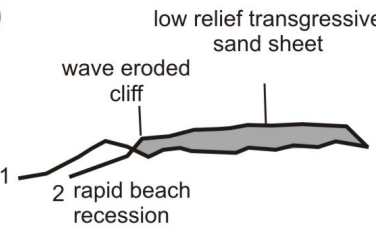

Copyright P. Resp



DUNE PARABOLICHE



Mettendo insieme più fattori di controllo...

	PLAN VIEW	BEACH SAND BUDGET	WIND ENERGY	VEGETATION
(a) beach ridges 	 beach ridge crests 4 3 2 1 shoreline position	positive	low	effective sand trapping
(b) parallel foredune ridges 	 foredune ridge crests 4 3 2 1	positive	higher	effective trapping
(c) irregular hummocky dunes 	 irregular assemblage of «sandhills» with blowouts and incipient parabolic dunes 4 3 2 1	positive	moderate	ineffective trapping
(d) 	shoreline  high foredune ridge crest 1 2 3	steady state supply to beach balanced by transfer to dune	moderate	effective
(e) slowly migrating parabolic dunes slow beach recession 	shoreline  parabolic dunes blowout 1 2	slightly negative	moderate	effective but damaged by beach recession
(f) low relief transgressive sand sheet wave eroded cliff rapid beach recession 	 transgressive sandsheet 1 2	negative	high	effective but damaged by beach recession

Da Pye (1990) ridisegnato