

MICHELE PAVOLINI

RISISTEMAZIONE GENETICA E TIPI MORFOLOGICI DELLE CASCATE DEL MONDO

Premessa. – In accordo con Davis (1884) e con Schwarzbach (1967), una prima sistemazione genetica dei salti d'acqua esistenti sulla superficie della Terra può iniziare dalla suddivisione in due grandi gruppi di cascate: quelle «distruttive» e quelle «costruttive», in riferimento alla loro diversa evoluzione. Del primo fanno parte, secondo gli autori citati, le cascate che, nel corso della loro evoluzione, tendono a ridurre il proprio dislivello fino a trasformarsi in salti di più modesta altezza e, successivamente, in tratti di cateratte e rapide. Al secondo appartengono invece quelle che, per effetto di depositi, tendono, una volta formatesi, ad aumentare la propria altezza.

Secondo Davis e Schwarzbach le cascate di tipo distruttivo possono essere a loro volta suddivise in due grandi gruppi: quelle «conseguenti», formatesi cioè su dislivelli creati dall'azione degli agenti morfogenetici e quelle «susseguenti» dove, invece, il dislivello su cui si è impostato il salto è dovuto a una discontinuità litologica del substrato portata alla superficie dall'azione erosiva del corso d'acqua. Con il presente articolo ci si propone, una volta definiti tali tipi, di fornire una classificazione delle principali cascate secondo il processo morfogenetico che ne ha determinato la formazione.

Le cascate conseguenti sono, come si è detto, quelle che si sono create su dislivelli già determinati dall'azione dei processi morfogenetici al momento dell'impostazione del corso del torrente o del fiume. Secondo Schwarzbach appartengono a tale categoria i seguenti tipi di salti d'acqua: cascate determinate da sbarramento del corso d'acqua (per effetto di colate laviche o di frane); cascate determinatesi a seguito di un taglio di meandro; cascate poste nel punto di giunzione tra valli poste a diverse altezze; cascate originate da processi di tipo tettonico; infine quelle dovute a processi vulcanici.

La categoria delle cascate susseguenti, sempre secondo Schwarzbach, comprende invece i seguenti tipi di salti d'acqua: quelli caratterizzati da alternanze, nelle loro pareti, di strati di roccia di diversa erodibilità; quelli ori-

ginatisi nel punto di discontinuità litologica tra rocce più dure poste a monte e rocce più tenere a valle (come nel caso di discontinuità dovute ad azione vulcanica, oppure alla presenza di una faglia o a un'azione di tipo erosivo di corsi d'acqua). Talvolta, comunque, appare difficile una chiara distinzione tra cascate conseguenti e susseguenti, in particolar modo nelle cosiddette «cascate a gradinata» (ted. *Wasserfall-Treppen*) (1) e nelle cascate del tipo «a copertura rocciosa» (ingl. *cap-rock waterfalls*), caratterizzate da forte azione dell'erosione regressiva con perdita dell'originaria conseguenza e trasformazione in cascate susseguenti secondarie.

Nella categoria delle cascate costruttive rientrano quelle originate da processi di deposito, in particolare i salti d'acqua dovuti alla sedimentazione del carbonato di calcio. Per questo tipo è stato coniato il termine «auto-consequente» in riferimento alla capacità di determinare la formazione del dislivello. Secondo Schwarzbach, che inserisce nella categoria delle auto-conseguenti pure i mini-salti d'acqua dovuti al deposito di SiO_2 posti nella valle di Reykholt nell'Islanda occidentale, è possibile una distinzione tra quelle formatesi a seguito del processo di deposito di CaCO_3 su pendii o alla confluenza tra valli e cascate travertinose determinatesi a seguito dello sbarramento di una valle, spesso con formazione a monte di laghi.

Secondo Pavolini (1982 b) è comunque possibile una ulteriore divisione genetica dei salti d'acqua, basata soprattutto sui processi che determinano la formazione delle cascate.

Cascate dovute a fenomeni carsici. – In merito al primo gruppo delle conseguenti è infatti da notare che si possono considerare altre cause morfogenetiche per la loro formazione: ad esempio, mentre Schwarzbach si limita a ricordare genericamente che i salti d'acqua possono essere dovuti a *knick-points* causati da fenomeni carsici (come quelli della regione norvegese dello Svartisen), Pavolini esamina quattro diversi modi di formazione di salti in zone carsiche (risorgenze, inghiottitoi, doline, sistemi ipogei). Tra quelle da risorgenza hanno importanza anche alcune in Italia, come lo Zompo lo Schioppo (100 m) in Val Roveto, nel punto di contatto tra strati di breccia calcarea e calcarei neocretacei. Nelle Alpi francesi la maggiore cascata di risorgenza è quella di Moulin Marquis, la più alta del mondo di questo tipo con 400 m di dislivello, mentre in Austria si segnala la cascata di Golling (Gollinger Wasserfall), formata dal torrente Schwarzbach che in due salti supera un dislivello di 62 m e interessante per i fenomeni di erosione (2), e in Slovenia quelle della Savica (70 m) e soprattutto della Boka (104 m) presso Plezzo.

(1) Esistono molti esempi di cascate a gradinata, caratterizzate da una tendenza alla susseguenza. Tra le maggiori le Fjallfoss (100 m) nell'Islanda nord-occidentale e l'Aysgarth Force sul fiume Ure nella parte superiore del Wensleydale.

(2) Tra questi l'arco naturale tra i due salti, dovuto all'azione erosiva del torrente. La presenza di tali forme di erosione è abbastanza comune presso cascate (tra cui quelle di Stuiben,

Cascate da risorgenze, tutte di tipo conseguente, sono piuttosto comuni nelle varie regioni carsiche: in Libano si nota quella del fiume Adonis, in Marocco le cosiddette Quaranta Sorgenti all'origine dell'Oum er Bia e, nella California settentrionale, le Twin Falls, con portata media di $11,5 \text{ m}^3/\text{sec}$. La recente esplorazione italiana dell'Auyan Tepuy ha permesso alla comunità scientifica di acquisire una maggiore conoscenza di questo massiccio, noto per la presenza del Salto Angel: la cascata della risorgenza del sistema idrico ipogeo Aonda (alta circa 100 m), può essere considerata tra le maggiori del mondo di questo tipo.

Anche le cascate dovute a inghiottitoi sono per lo più classificabili come conseguenti, dato che il punto di rottura è generalmente preesistente rispetto all'azione del corso d'acqua, pure importante nel determinare l'approfondimento. Sono abbastanza comuni nelle zone carsiche: la più alta del mondo di questo tipo è quella del Fell Beck, che precipita nell'inghiottitoio del Gaping Gill Hole (Monti Pennini) da un'altezza di circa 110 m; tra le più suggestive è quella di Mahahavy nel Madagascar settentrionale, che presenta lungo l'apertura, di forma ellittica, un dislivello variante tra i 15 e i 30 m.

Doline. Cascate connesse alla presenza di doline sono invece rare: si ricorda comunque quella della Reka che, poco a monte dell'inghiottitoio della grotta di San Canziano, forma una serie di cinque salti scendendo dalla Piccola alla Grande Voragine. Recentemente è stata segnalata una piccola cascata da dolina nei pressi di Pokhara, nel Nepal (Waltham, 1996, p. 18).

Cascate ipogee. Cascate ipogee, all'interno di grotte, sono numerose in varie zone carsiche del mondo: anche in Italia ne abbiamo esempi significativi, come quella della Balma di Rio Martino (53 m), quelle dell'Antro del Corchia, quella del Lago Ernestina (9 m) nella grotta di Bossea, i due salti di 6 metri nella grotta di Pastena, e altri dei sistemi idrici ipogei delle grotte di Val di Varri e di Luppa (provincia dell'Aquila). In Europa sono numerose in Svizzera (cascata del Beatusbach nella grotta del Beatusberg, con portata di $0,72 \text{ m}^3/\text{sec}$), in Slovacchia, in Inghilterra, in Francia e in Germania. Tra le maggiori cascate sotterranee del mondo si notano quelle della Mammoth Cave, quelle del fiume Quashies in Giamaica e quella detta Secunda Muralla (circa 100 m) sul sistema idrico della *sima* e della risorgenza Aonda dell'Auyan Tepuy.

Vi possono comunque essere altre situazioni che favoriscono la formazione di cascate in zone carsiche: a questo proposito sembra soprattutto interessante notare come l'approfondimento di fessure o fratture possa determinare la formazione di salti d'acqua (3).

l'Oferufoss e delle Marmore): circa le relazioni tra ponti naturali e salti d'acqua si veda il dibattito riportato da Thornbury (1969) sulla genesi e l'evoluzione dell'arco naturale della Virginia.

(3) La cascata Trick nel Montana, che si trova su rocce calcaree, offre un esempio importante a questo proposito. Il torrente ha trovato un passaggio per le sue acque lungo una serie di diaclasi a monte della cascata e riappare, dopo un percorso sotterraneo, alla base di questa

Cascate da sbarramento. – In accordo con Schwarzbach esaminiamo l'origine di cascate dovute a sbarramento con interruzione dell'alveo del fiume: si tratta di salti che possono essere di natura vulcanica (colate laviche) o collegati a frane e a morene. E' possibile operare una distinzione tra salti d'acqua posti sull'orlo dello sbarramento verso valle e salti che si trovano nel punto in cui il fiume raggiunge una valle principale dopo lo sbarramento. Inoltre, in accordo con Schwarzbach e con Pavolini, è da osservare che sono da inserire in questa categoria i salti d'acqua che si trovano nel punto in cui il fiume raggiunge il suo vecchio corso a valle dello sbarramento.

Cascate da sbarramento di origine vulcanica: colate laviche. L'Islanda presenta numerose cascate dovute a sbarramento per colata lavica, come la scenica Svartifoss, la Bruarfoss e la Baulufoss. Queste ultime due, secondo Schwarzbach, sono di tipo susseguente, in quanto la colata è stata attaccata solo successivamente dall'erosione fluviale. Pure la Godafoss va inserita in questo tipo, segnalandosi per l'elevata portata massima (615 m³/sec), con un'età di 8000 anni.

Cascate da colate laviche sono abbastanza comuni in aree vulcaniche, come il Massiccio Centrale francese (Ray Pic, 53 m; Grande Cascade, 35 m), nel Camerun nord-orientale (Ekom, 70 m), negli Stati Uniti nord-occidentali (Shoshone, 64 m e Twin, 40 m, sullo Snake). Tutte queste cascate sono di tipo conseguente (4).

Sills. In questo tipo l'origine è dovuta alla presenza di *sills* vulcanici, che hanno creato cascate nel Wyoming (Upper e Lower Falls del fiume Yellowstone, di 33 e 95 m), nel Sudafrica (Howick, 93 m) e in Inghilterra (Caldron Snout, 60 m e High Force, 21 m, sul Tees, dovute al grande *sill* di Whin). Tutti questi salti sono chiaramente di tipo susseguente.

Cascate dovute a deviazioni del corso d'acqua (fenomeni idrologici). 1) Per deposito di sedimenti. Schwarzbach le inserisce nella categoria di quelle poste nel punto in cui il fiume ritrova, dopo una deviazione, il suo antico alveo. Vi rientra quindi anche la cascata del Reno presso Sciaffusa (alta tra 15 e 21 m e larga circa 150 m), la cui origine è dovuta all'ostruzione del paleo-alveo da parte di sedimenti fluvio-glaciali (5). La cascata, la cui formazione risale a circa 15.000 anni fa (Hoffmann, 1985, p. 15) è comunque susseguente, in quanto è stato il Reno stesso a erodere la superficie calcarea e a portare alla luce il banco del Malm, un tempo parete

con una sorta di enorme fontana. In tempo di magra le cascate sono secche essendo svuotate completamente da questo canale. Il processo di erosione si sta approfondendo e con il tempo la cascata sparirà completamente.

(4) Anche le cascate Tisisat (= cascata dell'Arcobaleno) sul Nilo Azzurro (altezza, 42 m; larghezza circa 250 m) sono un esempio importante di salto conseguente da sbarramento lavico: il *fall-maker* è qui uno strato di basalto sovrastante uno più debole di tufo con lapilli di ossidiana.

(5) La prima interpretazione corretta dell'origine delle cascate del Reno, dovuta a Leopold Württenberger, risale al 1871.

sinistra della paleogola che costituisce attualmente il *fall-maker* della cascata, la cui portata media annuale è di 320 m³/sec (6). 2) Per inondazione. A questo tipo appartengono le cascate originate da deviazioni dell'alveo a seguito di inondazioni. Un esempio si è avuto nel 1952 a Lynmouth, ma si tratta di cascate effimere, con *knick-points* generalmente abbandonati dopo un certo periodo.

Cascate da morene (origine glaciale). Le forme di deposito glaciale, al contrario di quelle di erosione, non sono in grado, salvo casi particolari, di formare cascate, data l'erodibilità del materiale. Si hanno, tuttavia, due esempi di cascate islandesi dovute a sbarramento morenico, come quella di Thverà a sud di Akureyri.

Per frane (da modellamento dei versanti). Cascate originate dallo sbarramento di alveo fluviale a opera di frane sono piuttosto rare, data l'erodibilità e l'asportabilità del materiale franato: tra queste si ricordano quella del Saut de la Drôme nel Delfinato, alta circa 50 m e creata da una frana risalente al XVI secolo e quella di Tortum nella zona di Erzurum (Turchia nord-orientale), alle cui spalle si trova un lago di circa 8,5 km di lunghezza. Anche la cascata dell'Acquacheta nell'Appennino forlivese è, come vedremo in seguito, in parte legata a una frana, mentre un altro esempio di cascata dovuta a sbarramento franoso è quella del salto della Saale creatosi presso Bernburg con il movimento dell'estate del 1933.

Altri tipi di modellamento dei versanti: per retrocessione di scarpata. L'esempio più importante di cascata dovuta a retrocessione di scarpata (che ha determinato anche catture fluviali) è nella catena dei Drakensberg, dove il Tugela forma in cinque salti (quello superiore ha un dislivello di 411 m) la seconda cascata del mondo per altezza (948 m). L'esistenza del fiume è dovuta alla captazione di corsi d'acqua che anticamente scorrevano verso l'Orange, ma il dislivello e la forma della cascata, di tipo susseguente, sono collegati al fenomeno di arretramento della parete del sistema montuoso per effetto dell'azione esercitata dai vari agenti morfogenetici al tasso medio di circa 1 cm in 6 anni (la retrocessione è stata di 225 km, in 140 milioni di anni).

Cascate dovute a domi di esfoliazione. Sulla Terra esistono alcuni esempi di cascate legate alla presenza di domi di esfoliazione: i due più significativi sono i salti (di 610 e 300 m) dei domi di El Sentinel e di El Capitan nella Valle di Yosemite. Si tratta comunque di cascate temporanee, il cui dislivello è peraltro legato alla maggior escavazione del ghiacciaio della valle del Merced, per cui presentano evidenti analogie con le molte da valle sospese tipiche della zona.

(6) Il banco calcareo di 29 m di spessore è stato eroso per circa 13 m sulla riva destra e per circa 8-9 su quella sinistra. E' sormontato da tre scogli (*Felsen*) erosi per circa un terzo verso monte, la cui stabilità è stata studiata nell'inverno 1985, quando sono state rinvenute tipiche forme carsiche nella massa rocciosa e fratture orientate in senso nord-sud.

Cascate dovute a fenomeni idrologici. – L'azione dei corsi d'acqua, come abbiamo visto anche nel precedente caso di salti dovuti a deviazione dell'alveo, ha creato moltissime cascate e, più in generale, sono numerosissime quelle collegate a fenomeni idrologici, con molti tipi.

Catture fluviali. Alla categoria di cascate create da deviazioni del corso d'acqua, comportanti spesso (ma non nel caso di quelle di Sciaffusa) una riduzione del percorso del fiume, appartengono anche i salti d'acqua dovuti a catture fluviali. Un esempio importante è quello dell'Orlegna (50 m), torrente che scorreva verso l'Inn e che è stato captato dalla regressione della testata della valle del Mera, causata dall'erosione di questo fiume e dei suoi affluenti.

Cascate da erosione differenziale. L'azione erosiva di un corso d'acqua si esplica, con formazione di dislivello, qualora a una roccia più resistente faccia seguito una più facilmente erodibile, oppure quando un banco di roccia più dura ne attraversi l'alveo.

Gli esempi di cascate di questo tipo sono molteplici: in Italia quella del Metauro presso Sant'Angelo in Vado (altezza 10 m; larghezza 60 m) supera un banco di calcari marnosi disposto a reggipoggio; in Francia si segnalano quelle di Sautadet sulla Ceize (10 m) e quelle di Hérisson (7), negli Stati Uniti quelle della Fall Line, e anche quelle di Khone sul Mekong, che sono le maggiori del mondo per larghezza del fronte (10,8 km) e per portata d'acqua (11.200 m³/sec), appartengono a questa categoria.

Cascate da erosione differenziale su colate laviche. L'erosione differenziale si attua anche su colate laviche di diversa litologia e resistenza: l'esempio più significativo è quello del Jökulsà a Fjöllum nell'Islanda nord-orientale, interrotto, nel suo corso inferiore, da cinque imponenti cascate disposte in successione. I *fall-makers* sono strati di basalto, alla cui base sono lave più erodibili in quattro casi su cinque e tillite per le Vigabergs, il salto più a valle. Le cascate principali sono l'Hafrargils (27 m) e soprattutto la Dettifoss (44 m) che, anche per la portata media di 193 m³/sec, è una delle maggiori d'Europa. Il corso del fiume si è impostato in un *Graben* e i bordi dei salti sono collegati anche a faglie, ma i fattori tettonici sono stati secondari per la formazione delle cascate, la cui età è stimata in circa 6000 anni. Anche le cascate di Glenariff sul bordo orientale dell'Altopiano di Antrim hanno questa origine genetica, con l'escavazione dei bordi facilitata dalla scarsa resistenza dei margini delle colate contrapposta alla compattezza delle zone interne (Holmes, 1978, p. 338).

Cascate da erosione laterale. L'erosione laterale del San Lorenzo può aver influito sulla formazione della cascata di Montmorency (82 m),

(7) Le cascate di Hérisson nel Giura francese sono formate da 7 salti di altezza variabile da 3 a 65 m lungo un tratto di circa 2,5 km, con dislivello totale di 280 m. I *fall-makers* sono strati suborizzontali di calcari disposti talvolta in serie sovrapposte, come nel caso del salto inferiore dell'Éventail, il maggiore per altezza.

che precipita dalla scarpata sulla riva sinistra (8).

Cascate originate da gole fluviali. Altre cascate, quasi sempre conseguenti, legate all'azione delle acque correnti, sono quelle il cui dislivello è dovuto al maggior approfondimento della valle principale, con formazione di gole. Tra i maggiori esempi di questo tipo, quella di Multnomah (189 m) nella gola del fiume Columbia (Washington), dove si trovano dodici cascate in 17 chilometri, quelle laterali delle gole di Liechtenstein e di Kitzloch in Austria, dell'Aar nell'Oberland Bernese, e quelle di Ouzoud in Marocco (circa 100 m in due salti). Di quest'ultima, comunque, appare chiara l'attuale forma susseguente essendo retrocessa verso monte di circa 1,5 km rispetto al punto di caduta originario sulla parete sud del *canyon* dell'Oued el Abid. Anche la cascata del Plitvički Potok (torrente di Plitvice), al termine della serie dei laghi, è una cascata da parete di gola fluviale, creata dall'azione erosiva del sottostante fiume Korana. La cascata, alta in due salti 76 m, non è in alcun modo da confondersi geneticamente con quelle di sbarramento travertinoso che hanno dato origine al sistema lacustre e che saranno esaminate più avanti.

Alla escavazione fluviale di valli principali possono essere solo parzialmente collegate geneticamente cascate di altra origine: sono infatti da risorgenza carsica quelle del versante sinistro della Via Mala, mentre quelle delle Thousand Springs nel *canyon* dello Snake sono essenzialmente legate alla presenza di queste sorgenti che si sviluppano per circa 800 m, con portata media di 14 m³/sec.

Cascate da sorgenti poste su dislivelli. Anche le curiose Hraun (età di circa 1200 anni), più che all'escavazione, sono da mettersi in relazione alla presenza di rocce laviche fratturate, da cui fuoriescono sotto forma di sorgenti precipitando poi nel sottostante letto del torrente. Sorgenti non carsiche poste in posizione sopraelevata possono quindi dare origine a cascate rilevanti: quelle di Shiraito (Shiraito-no Toki) nell'isola di Honshu si segnalano per il curioso aspetto (fili d'argento), oltre che per la larghezza di circa 130 m e l'altezza di 26 m. Questo tipo presenta salti conseguenti.

Cascate dovute alla perdita d'acque. Si possono creare (o comunque mantenere) *knick-points* anche in mancanza di erosione regressiva a seguito di infiltrazioni e perdite di portata in terreni permeabili o per presenza di fratture, talvolta di origine carsica.

La cascata di Crois presso Tarcento sul torrente Torre potrebbe quindi essere interpretata geneticamente come un *knick-point* legato alla scomparsa delle acque nel letto a valle ed egualmente il salto nella forra del Torano (Massiccio del Matese) potrebbe essere collegato alla perdita d'acque per presenza di fratture nelle rocce calcaree.

(8) La portata media è di 35 m³/sec e la retrocessione rispetto al punto iniziale di caduta è di 450 m. Secondo Schwarzbach la genesi delle cascate, di tipo susseguente, è legata a una faglia.

Cascate originate da taglio di meandro. Nel caso esista un dislivello tra le due anse di un meandro, si può determinare una cascata in caso di rottura: un esempio di questo tipo è quella del Neckar presso Lauffen.

Cascate dovute a fenomeni glaciali. – L'azione dei ghiacciai, come già ricordava Davis, è geneticamente responsabile di moltissime cascate, sia nelle aree interessate dagli *inlandsis* pleistocenici sia, in misura ancora maggiore, nelle catene montuose.

Salto dovuti a *knick-points* da *inlandsis*. La morfologia creata dalle grandi calotte pleistoceniche è, come noto, spesso accidentata anche nei bassopiani e negli altopiani, con gradini che possono costituire improvvisi punti di rottura non ancora eliminati nel profilo dei corsi d'acqua.

In Europa gli esempi principali di questo tipo sono le cascate del Lule Alv nella Lapponia svedese, che sono però state tutte eliminate (compresa quella grandiosa di 75 m di Harspranget) per la produzione di energia elettrica. La maggiore rimasta (sia pure con sottrazione di una parte della portata) quasi allo stato naturale è quella di Stora Sjöfallet (= grandi cascate del lago), dove il primo salto permane subverticale, data la presenza di strati milonitici che formano un angolo pronunciato con quello di caduta delle acque. Cascate di questo tipo sono anche le Alexandra del fiume Hay in Canada (33 m), le cascate di Jagala in Estonia e quelle del fiume Indals nello Jämtland (Tännfors, Ristafallet). Le cascate di Tänn, alte 36 m, con salto singolo di 26 m e portata massima di 700 m³/sec, sono formate da un blocco quarzítico: sono conseguenti le altre di questo tipo, ma con tendenza a forma susseguente, ormai definitiva nel caso della Stora Sjöfallet.

Cascate da depositi di glaciazione continentale. Forme di deposito (cordoni morenici) da *ice-cap* hanno dato origine, soprattutto nell'Europa settentrionale, a cascate importanti: gli esempi principali sono quelli di Trollhättan sul Göte Alv in Svezia e di Imatra sul Wuoksi in Finlandia. L'azione erosiva di potenti fiumi ha frazionato il dislivello (rispettivamente di 33 e 18 m) su più salti, da cui la definizione di rapide (Pollog, 1935, p. 131) anche se, in entrambi i casi, il salto singolo più alto supera i 5 m. Le cascate, nella forma attuale, sono diventate di tipo susseguente, a causa dell'azione erosiva che si è esercitata su materiali in parte incoerenti.

Cascate da valli sospese. Le più tipiche cascate da glaciazione alpina sono quelle da valle sospesa: i dislivelli possono essere altissimi (Mongefoss, 774 m; Yosemite, 736; Sutherland, 579 m; rispettivamente le più alte d'Europa, dell'America Settentrionale e dell'Oceania) e si tratta quasi sempre di cascate conseguenti, dato che sono formate da torrenti affluenti, di portata modesta e quindi non in grado di approfondire l'alveo. Vi sono centinaia di cascate da valle sospesa, tra le quali quelle di Lauterbrunnen nell'Oberland Bernese, di Romsdal e di Odda in Norvegia. In Italia gli esempi più tipici sono quelli della Val di Genova (fig. 1).

Si sono comunque create anche situazioni diverse quando la forza erosi-



Fig. 1 – *Cascata dell'Acqua Fraggia in Val Bregaglia*

Di tipo conseguente da valle sospesa su un banco di anfiboliti

va del torrente è stata sufficiente per frazionare il dislivello su più salti, modificando la forma delle cascate, diventate di tipo susseguente. nelle Alpi ne esistono diversi esempi: tra questi le cascate della gola della Diosaz presso Sallanches, quelle della Dora di Verney nell'orrido di Pré-Saint-Didier, quella del Varone (9) presso Riva del Garda e quelle del Rio di Riva (Rainbach) alla confluenza della Valle Aurina, dove i *fall-makers* sono tre banchi di resistente tonalite (Casati, 1994, p. 122; Menara, 1980, p. 161). L'esempio più significativo è però quello delle cascate del Trümmelbach sul versante destro della Valle di Lauterbrunnen, detta Valle delle Cascate proprio a causa

(9) La cascata del Varone, formata da due salti, ha presentato un tasso medio di retrocessione di 4 mm l'anno nei calcari giurassici.



Fig. 2 - *Grande Cascade di Gavarnie (Francia)*

Salto conseguente, su pareti di circo glaciale. Altezza totale, m 442; salto principale, m 315

dei molti salti d'acqua che la caratterizzano, anche paesaggisticamente. Le cascate del Trümmelbach presentano un frazionamento su una decina di salti principali del dislivello complessivo di 290 m. L'azione del torrente, che scorre in un bacino di 25 km² ricco di ghiacciai e ha una portata massima di 20m³/sec, è stata agevolata dal molto materiale solido trasportato, valutato in 20.200 t all'anno.

Spalle glaciali. Oltre le pareti principali delle valli a U, anche spalle glaciali possono originare cascate: esempi sono la cascata superiore di Nardis, subito a monte del salto maggiore e quelle superiori del Mürrenbach nella Valle di Lauterbrunnen, con le quali si raggiunge il dislivello complessivo di 600 m, il massimo di tutte le Alpi.

Gradini sui fondivalle glaciali. I gradini di origine glaciale sui fondivalle costituiscono un altro importante tipo di *knick-point* nelle aree di

montagna. In Italia la Val di Genova si segnala per quattro salti di questo tipo sul Sarca, ma in Europa gli esempi maggiori sono in Norvegia (Rjukanfoss, 104 m) e in Spagna, nella valle di Ordesa (Estrecho, 100 m). Cascate di questo tipo, tutte conseguenti, sono anche quelle di Badgastein (148 m), la Nevada Fall (181 m) e la Vernal Fall (95 m) nella valle di Yosemite. Appartengono a questa categoria anche le due maggiori cascate distruttive dell'Appennino settentrionale: quella dell'Acqua Caduta sul Torrente Baricello, dove il gradino glaciale subverticale è di circa 90 m e quelle vicine del Dardagna, dove però l'azione erosiva del torrente può aver creato forme già di tipo susseguente. Un'analogia tendenza verso forme susseguenti dei salti è rinvenibile alle cascate di Cauterets nei Pirenei francesi, dove si notano forme d'erosione fluviale evidenti sui gradini di origine glaciale.

Cascate da pareti di fiordi. Anche le cascate che precipitano da pareti di fiordi sono geneticamente da valle sospesa, ma in un contesto morfologico diverso dal semplice truogolo. Si segnalano esempi importanti nel Milford Sound (Nuova Zelanda), con le Bowen Falls (164 m) e le Stirling Falls (154 m) e, più ancora, in Norvegia, con quelle del Geiranger Fjord e la Langfoss dell'Akrafjord (700 m), la maggiore del mondo di questo tipo, che presenta cascate di tipo conseguente.

Cascate da pareti di laghi glaciali. Anche in questo caso si tratta di salti da valli sospese, che però interessano pareti di laghi di origine glaciale: esempi l'Utigardsfoss (610 m in più salti) presso il Lago di Loen, le Tysestrengene (533 m) e le Skyeggedalsfoss presso il Lago di Ringedals, tutte in Norvegia, e le cascate del Lago di Oo (273 m) nei Pirenei francesi. Gli esempi citati sono tutti di cascate conseguenti, mentre le famose cascate del Giessbach, sulle sponde meridionali del Lago di Brienz, sono ormai di tipo susseguente, in quanto il corso d'acqua ha frazionato il dislivello di 299 m in 14 salti su strati calcarei del Dogger e del Malm di diversa resistenza e spessore.

Cascate su circhi glaciali. Le cascate originatesi su pareti di circhi glaciali sono frequenti soprattutto nei Pirenei, dove il maggiore esempio è la Grande Cascade del Cirque de Gavarnie, alta in due balzi 442 metri, principale salto dei numerosi che scendono dalle pareti del grande anfiteatro calcareo (fig. 2). In Spagna si notano le cascate dei circhi di Cotatuero (250 m) e di Barrosa (300 m); anche le cascate di Mardals nella regione norvegese di More e Romsdal possono essere considerate *knick-points* da circo glaciale (la Mardalsfoss ovest ha un dislivello di 468 m, la Mardalsfoss est di 514 m in due salti).

Cascate da soglia di circo. Le soglie di circo possono portare alla formazione di cascate di un certo interesse: un esempio è quello della soglia del circo di Gavarnie, all'origine del Gave de Pau.

Cascate da soglia valliva. Là dove una valle glaciale si allarga o si approfondisce in presenza di una soglia, si possono ugualmente originare

cascate: l'esempio più importante per questo tipo è la Stigfoss, con altezza di 180 m, nei pressi della «Strada dei Trolls» (More e Romsdal).

Cascate da morene. Per le cascate dovute a morene, si veda il paragrafo dedicato ai salti da sbarramento.

Cascate dovute alla presenza di ghiacciai. 1) Posizione del ghiacciaio. La stessa posizione dei ghiacciai può originare salti d'acqua, localizzati sui dislivelli incontrati dei torrenti subglaciali. La cascata di Gietroz nel Vallese, una delle più alte dell'Europa meridionale, con complessivi 500 m di altezza, è ad esempio dovuta alla posizione del ghiacciaio sovrastante. 2) Retrocessione di ghiacciaio. Le cascate alle sorgenti del Rodano sono dovute alla retrocessione del Rhonegletscher, che ha causato il deflusso delle acque sulla parete rocciosa. 3) Cascate in pozzi glaciali. Sono localizzate dove le acque superficiali di fusione precipitano in pozzi o fratture dei ghiacciai. Si segnalano esempi sul ghiacciaio del Mandrone, nel massiccio dell'Adamello-Presanella, e sull'Hofjökull in Islanda.

Cascate dovute a fenomeni vulcanici. – Nel paragrafo dedicato alle cascate create da sbarramenti dell'alveo, sono state esaminate quelle dovute a colate laviche e a *sill*, ma fenomeni vulcanici di altri tipo possono ugualmente creare salti d'acqua.

Cascate dovute a edifici vulcanici. I dislivelli dovuti a edifici vulcanici possono essere responsabili di formazione di cascate, come quelle di Carbet in Guadalupa: si tratta di tre salti (il maggiore è quello superiore, di 121 m) sul versante occidentale del vulcano.

Cascate in caldere o forme depresse. Un esempio significativo è quello delle cascate Risco, a più salti, che precipitano dai fianchi della Lagoa das Furnas presso la località Furnas nell'isola di São Miguel nelle Azzorre. Anche le cascate di Waialeale nell'isola di Kauai nell'arcipelago delle Hawaii sono da mettersi in relazione con forme depresse legate al vulcanismo.

Cascate dovute a fratture di sprofondamento. L'esempio più importante, interessante anche dal punto di vista scenico, è la curiosa cascata di Oefaerufoss, che si è creata circa 1000 anni fa sul lato occidentale della frattura di sprofondamento di Eldjå. Questa cascata presenta due salti, con strati basaltici che fungono da *fall-makers*, per circa 100 metri di altezza. L'erosione delle acque ha portato a una forma ormai prevalentemente susseguente.

Fratture in campo lavico. Si hanno talvolta piccole cascate sotterranee dovute alla presenza di fratture in campo lavico: Schwarzbach riporta l'esempio di quelle di Brekkuà.

Cascate dovute a fenomeni tettonici. – Fenomeni di tipo tettonico sono all'origine di un gran numero di cascate in varie regioni della Terra. Alcune

di esse sono tra le più imponenti del mondo e si sono create in zone fratturate, spesso al margine di altopiani o di superfici litologicamente dissimili.

Cascate in zone di frattura o faglie ai margini di altopiani. Le cascate Vittoria e dell'Iguaçu sono considerate, insieme a quelle del Niagara, le più belle della Terra, sia per i dislivelli considerevoli (rispettivamente 122 e 82 m) sia per la grande portata (Vittoria, 1090 m³/sec; Iguaçu, 1720 m³/sec) e la larghezza del fronte (1700 e 2700 m). La loro origine va individuata in zone fratturate al margine di altopiani, che sono state attaccate dall'erosione regressiva di imponenti fiumi, ancora in fase attiva sulla soglia della cascata: rocce basaltiche per le Vittoria e melafiro per quelle dell'Iguaçu. Le cascate sono susseguenti, in quanto l'attuale dislivello e la forma del bordo dei salti è frutto dell'azione di escavazione di corsi d'acqua. Appartiene a questo tipo anche la Gullfoss sul fiume Hvítà (Islanda sud-occidentale) creatasi circa 10.000 anni fa e retrocessa verso monte a un tasso medio di circa 25 cm all'anno (10).

In alcune cascate la zona di debolezza può essere senz'altro individuata in una faglia, con creazione di gole longitudinali (e non trasversali come per le cascate Vittoria e quelle dell'Iguaçu) rispetto al bordo delle cascate: in America Meridionale l'esempio più evidente è quello delle cascate Paulo Afonso (83 m) sul Río San Francisco, in Africa quelli delle cascate Ruacana (129 m) sul Cunene in Namibia e delle cascate Augrabies (147 m) sull'Orange in Sudafrica, dove il fiume (portata media 580 m³/sec) ha approfondito una frattura nella massa di granito. Questa cascata, come altre tra le principali dell'Africa meridionale, segna il punto di passaggio tra superfici di erosione poste a diversa altitudine.

Cascate dovute a faglie. La presenza di faglie non ai bordi di altopiani ha originato ugualmente salti di acqua. Fornisco due esempi: le cascate Prince of Wales sul fiume Rideau proprio entro l'abitato di Ottawa e quelle dello Spot of Snow (Sgwd yr Eyr) nel Galles (21 m).

Cascate da fossa tettonica. Cascate impostatesi su parete di fossa tettonica non sono frequenti, ma una di esse è in Italia: si tratta di quella di circa 50 metri di altezza dell'Orta presso Caramanico Terme sulle falde occidentali del massiccio della Maiella. Un esempio più significativo è comunque quello delle cascate Kalambo in Tanzania che precipitano dal bordo della Rift Valley da 211 metri di altezza. Nonostante che l'azione erosiva del fiume abbia intaccato la parete modificando in parte la forma del salto, la cascata rimane di tipo conseguente.

Cascate da fessura di trazione. L'Öxararfoss nei pressi del Lago Thingvallavatn (Islanda sud-occidentale) offre un esempio di cascata do-

(10) La portata media del fiume è di 123 m³/sec. La cascata, alta in due salti più di 30 m, è dovuta a banchi basaltici e, nella attuale posizione, si è impostata lungo una faglia che rappresenta il bordo del salto inferiore del fiume.



Fig. 3 - *Cascata Superiore di Krimml nel Salisburghese (Austria)*

Serie di grandi salti (altezza totale m 381) dovuti a sollevamento delle Alpi, con arresto dell'erosione regressiva alla base delle pareti

vuta a una fessura di trazione collegata a un altopiano basaltico: è quindi interessante dal punto di vista genetico (appartiene alla categorie delle conseguenti), nonostante l'altezza (30 m in due salti) e la portata modesta.

Cascate da *sima*. L'Auyan Tepuy presenta, come forma tettonica particolare, le *sima*, grandi cavità di forma allungata a perimetro chiuso originate da fratture nella massa d'erosione delle formazioni Guaiquinima. Una cascata esemplificativa di questo tipo è quella della Sima Churun.

Creazione di *knick-points* per sollevamento di aree montane. Molte importanti cascate, soprattutto nelle Alpi ma anche in altre catene montuose, sono connesse a processi tettonici in modo diretto, essendosi formate su *knick-points* dovuti a fasi di sollevamento relativamente recenti, con incapacità, da parte dell'erosione regressiva, di eliminarli.

La cascata della Frua sul Toce, nell'alta Val Formazza, alta 143 m e posta a 1675 m di altezza, è un esempio significativo, dato che le altre rotture di pendenza a valle sono state parzialmente annullate dall'erosione regressiva e, al loro posto, incontriamo gole lungo il corso del fiume.

Quasi tutte le maggiori cascate per portata delle Alpi, che sono state interessate da un sollevamento in epoca recente, devono la loro origine a questo fenomeno, che ha creato grandi dislivelli verso le testate delle valli principali, su corsi d'acqua non affluenti e quindi più ricchi d'acqua. Le cascate di Krimml (381 m; fig. 3) e di Stuiben (160 m) in Austria, del Serio (315 m), del Rutor (260 m) e dell'Engstligenbach (400 m in due salti) nell'Oberland Bernese sono di questa origine (11).

Anche al di fuori del sistema alpino, si segnalano cascate di questo tipo, dette anche di «valle in valle», in Islanda (Hengifoss, 121 m, Haifoss, 120 m) e nelle Ande, dove si nota il salto di Tequendama (137 m) su una parete di arenaria presso Bogotá. Recentemente piccole cascate di tipo tettonico dovute a sollevamenti in epoca terziaria con ringiovanimento del corso d'acqua sono state segnalate sui torrenti Badu 'e Ludu e Sa Entale nella Sardegna nord-occidentale (Panizza e Cannillo, 1994, p. 556).

Cascate dovute a ringiovanimento del corso d'acqua principale. – Il sollevamento di un'area o l'abbassamento del livello di base determina una fase di ringiovanimento del corso d'acqua principale, che approfondisce il *Talweg* creando dislivelli laterali (morfologicamente simili a quelle delle gole d'erosione). Cascate di questo tipo genetico si hanno sugli affluenti del Colorado nel Grand Canyon, noto esempio di anteposizione per abbassamento del livello di base. La cascata del Deer Creek (37 m), attualmente susseguente per azione erosiva del torrente, è l'esempio più tipico, mentre quelle dell'Hawasu Creek, tra cui la Money Fall, pur essendo collegate al fenomeno, sono salti di tipo autoconseguente.

Cascate da falesie marine. – L'azione erosiva delle onde ha portato alla formazione di cascate creando falesie, dove i fiumi che sfociano in mare rimangono sospesi e si origina un *knick-point*.

Anche se distanti attualmente più di 5 km dalla nuova linea di costa, sono cascate da falesia marina la Skogafoss (61 m) e la Seljalandsfoss (61 m) nell'Islanda meridionale, su corsi d'acqua alimentati dal ghiacciaio di Myrdals (Schwarzbach, 1967, p. 395). Esempi di questo tipo sono abbastanza frequenti sulla costa sud-occidentale della Gran Bretagna (Little Water, Ecclesbourne Glen, Walpen Wet nell'Isola di Wight) e interessanti sono anche le Düden su Şelalesi presso Antalya in Turchia e le cascate della Lobé (12-15 m) in Camerun. Per la particolarità di essere risalite dal flusso dell'alta marea della Baia di Fundy si ricordano anche le Reversing Falls del fiume

(11) Le cascate di Krimml sono le principali delle Alpi e costituiscono quindi il maggior esempio di questa tipologia. Il dislivello complessivo è di 381 m, superato con tre cascate principali. Appare evidente il controllo litologico sulla forma e l'origine dei salti: la cascata superiore (145 m) e quella inferiore (140 m) sono dovute a gneiss, mentre le zone mediane (con la sola cascata intermedia, di circa 50 m) e il sottostante bacino dove si trova il paese di Krimml sono formate da scisti. Il Krimmler Ache, che fino alla cascata ha un corso di 17 km, presenta una portata massima di 39 m³/sec.

Saint John (altezza 4,5 m), mentre le più alte sono quelle di Raknibedu (140 m) nell'isola di Iturup delle Curili (12).

Cascate originate da forme strutturali. – Il termine forme strutturali è qui utilizzato per indicare quelle dovute a fenomeni orogenetici i cui dislivelli, responsabili dell'origine di cascate, non sono quindi generalmente imputabili all'azione delle acque correnti. Tuttavia, nel caso delle cascate del Niagara, il processo di retrocessione della parete del salto dovuto all'erosione regressiva esercitata su strati orizzontali ha portato alla creazione di una cascata secondariamente susseguente.

Scarpata di *cuesta*. L'esempio nettamente più importante è quello del Niagara, primariamente impostata su una *cuesta* antistante il Lago Ontario. Dall'età della formazione le cascate sono retrocesse di circa 11 km a un tasso medio annuale di 1,06 m (Phillbrick, 1974) che è variato in relazione alla forma del bordo e, in particolare, alla presenza del ferro di cavallo o di una intaccatura più pronunciata (Phillbrick, 1970, pp. 3728-3729). Le cascate sono le più tipiche tra quelle a copertura rocciosa, con uno strato di Dolomite Lockport che ne sovrasta uno di più deboli scisti,

Scarpata di altopiano. In questo caso il *knick-point*, spesso di notevole dislivello, è causato dalla scarpata che delimita un altopiano, senza intervento decisivo di fenomeni tettonici, come nei casi esaminati in precedenza. Le cascate di Kaieteur sul fiume Potaro in Guyana sono un altro esempio di *cap-rock waterfall* con arenarie e conglomerati che giacciono su scisti più erodibili. Per altezza (247 m di cui 226 m in unico salto) e per portata media (655 m³/sec) questa cascata è tra le maggiori nel mondo, seguendo da vicino le tre principali (Iguaçu, Vittoria, Niagara). Il margine orientale del massiccio della Guyana offre altri importanti esempi di cascata da scarpata di altopiano, come la King George VI del fiume Utshi e la Marina dell'Ipobe (152 m), dal bordo a ferro di cavallo (13). Sono geneticamente interpretabili come cascate di questo tipo le grandi Gersoppa Falls (Jog Falls) (253 m) e quelle di Sivasamudram sul Cauvery, entrambe nella penisola del Deccan e alcune della Grande Catena Divisoria in Australia, come la Wallaman nel Queensland, dove la scarpata orientale costituisce l'elemento principale del paesaggio, e quelle di Wollomombi, alte 335 m, nel Nuovo Galles del Sud (Bridges, 1993).

Cascate dovute a *tepuy*. Un'altra forma di tipo strutturale, i *tepuy*, sono causa dell'origine di alcune tra le più alte cascate del mondo, da-

(12) Il tasso di retrocessione della cascata su falesie della costa sud occidentale dell'Isola di Wight è stato formalizzato secondo questa equazione: $W^b = f(CR/SP) = f(CR/AS^{0.5})$. Con W^b = altezza della cascata; CR = tasso di retrocessione della falesia, SP = potere del corso d'acqua; A = area del bacino; S = pendenza dell'alveo (Flint, 1982, p. 229).

(13) La forma a ferro di cavallo è tipica delle cascate dove l'azione erosiva è stata prevalente verso la zona centrale del bordo. Schwarzbach riporta anche altri tipi: quello ad anfiteatro e quello aggettante.

ta la presenza di fianchi verticali e di sommità semipianeggianti, sufficientemente ampie per permettere lo sviluppo di corsi d'acqua perenni (14). L'esempio più importante è ovviamente il Salto Angel (979 m, di cui 807 in singolo salto), che è la più alta cascata del mondo sia come somma totale dei salti sia come dislivello del maggiore di essi. Altri esempi significativi, sempre nel Venezuela sud-orientale, sono la cascata principale che scende dal Cerro Roraima (457 m) e quella del Tepuy Kukenam, secondo salto singolo del mondo, con 609 m di altezza. Inoltre, sulla base di recenti esplorazioni, cascate ancora più alte potrebbero essere situate nella zona del Cerro Marahuaca (Perlotto, 1993, p. 278). Questi salti sono di tipo conseguente, anche se, specialmente presso il Salto Angel, si notano modifiche nella parte superiore, a causa dello scavo, per azione erosiva, di un'intaccatura nella parete di circa 100 m di altezza.

Cascate dovute ad altre forme strutturali. – Altre cascate dovute a forme di tipo strutturale non tipologicamente classificabili tra le precedenti sono quelle della Llovosina (altezza tra 15 e 20 m, larghezza circa 1 km, portata massima 17.000 m³/sec) sul Rio Caroni presso la confluenza con l'Orinoco (Garner, 1966). Anche altri salti importanti della regione della Gran Sabana, come quello dell'Aponguao (105 m) vanno inseriti in questo tipo, mentre in Italia si notano quelli delle zone sommitali dell'Aspromonte (tra cui quelli dell'Aposcipo, 80 m), dove i corsi d'acqua superano i «petti», ripide scarpate formatesi nei processi orogenetici che hanno sollevato il massiccio in epoca paleozoica (15).

Cascate da inselberg. Le cascate, però effimere, dato che si formano solo dopo forti piogge, dell'Ayers Rock costituiscono un esempio di salti d'acqua originati dalla presenza di un *inselberg*.

Cascate da falesie lacustri. Le cascate di Huskvarna (110 m), sulla sponda orientale del Lago Vättern, costituiscono un esempio significativo di salto d'acqua da falesia lacustre, anche se attualmente utilizzate per la produzione di energia elettrica

Cascate di origine antropica (artificiale). – L'uomo è responsabile con la sua azione della creazione di diverse cascate di tipo artificiale, soprattutto nell'Appennino centrale, dove le due principali, quelle dell'Aniene a Tivoli e delle Marmore, presentano questa origine.

Le cascate di origine antropica possono essere distinte in: 1) salti dove il dislivello è direttamente creato dall'uomo con sbarramento dell'alveo; 2)

(14) L'Auyan Tepuy, dal cui versante nord-occidentale scende il Salto Angel e che abbiamo già ricordato per altri tipi di cascate (da *simá*, ipogee, da risorgenza carsica), ha un'altitudine massima di circa 2800 m e una superficie di 77,7 km². Le precipitazioni, a quota 2100 m, sono state misurate in 2987 mm annui.

(15) Il mantenimento di diversi *knick-points* (si segnalano anche le cascate di Forgiarelle e di Maesano) sui torrenti dell'Aspromonte può essere messo in relazione al processo di sollevamento che interessa questo rilievo.



Fig. 4 - Salto di un ramo dell'Ambleve a Coe (Ardenne belghe)

Dovuto a deviazione di una parte delle acque del fiume nel secolo XVII

salto dove una deviazione porta il corso d'acqua a formare una cascata su un punto di rottura preesistente all'intervento dell'uomo.

Del primo tipo è la cascata di Ponte Alto sul Fersina presso Trento (due salti per complessivi 53 m), dovuta a una chiusa costruita dal vescovo Clezio nel 1537 per ridurre la velocità del torrente e difendere la città dalle inondazioni. Anche le cascate dell'Aniene a Tivoli (la principale è la cascata grande, alta in due salti 160 m) sono state create, nella forma attuale, per proteggere l'abitato dalle piene del fiume. La cascata grande è stata formata mediante la diversione del fiume in due tunnel sotto il monte Catillo, ma il dislivello è in questo caso di origine naturale. Inoltre, sia pure in forma molto diversa dall'attuale, le cascate dell'Aniene erano presenti a Tivoli ancor prima dell'intervento antropico e risultano il prodotto sia dell'azione umana sia di fenomeni naturali, tra cui la prevalenza di fasi di deposito di travertino e di erosione per abbassamento del livello di base (Mongini, 1973). Per la ricostruzione dell'evoluzione delle cascate è risultato utile anche l'esame dei cinque terrazzi principali riconoscibili nel profilo della valle (Mongini, 1973, p. 66).

La cascata delle Marmore (165 m in tre salti principali, portata media 49 m³/sec; min 30 m³/sec; max 285 m³/sec) è anch'essa, come noto, il prodotto di una deviazione fluviale, risalente al 271 a.C. Il dislivello è comunque di origine naturale, essendo stato creato dalla maggiore escavazione delle ac-

que del Nera, con formazione di gola fluviale in rocce calcaree e di valle sospesa tronca. L'evoluzione della cascata è il risultato sia di interventi antropici (Galletti Gualtieri, 1936) che di processi di erosione del Velino e soprattutto di deposito di sedimenti travertinosi (Mattioli, 1972).

Altra cascata di origine artificiale, ma con dislivello determinato da fatti naturali, è quella di Coe sull'Ambleve (Ardenne belghe; fig. 4). Il salto, di circa 15 m, è stato originato dal taglio di un meandro incassato, eseguito nel XVII secolo (Pavolini, 1982, p. 249). Un esempio di cascata artificiale ipogea è fornito da quella della Waterfall Cave nella zona della forra di Cheddar in Inghilterra.

Cascate di origine dovuta a più fenomeni. – In diversi casi, oltre che in quello delle cascate da valle sospesa diventate susseguenti per effetto dell'azione di escavazione dei corsi d'acqua, più di un fattore morfogenetico è stato implicato nella formazione di salti d'acqua.

La cascata dell'Acquacheta al confine tra le province di Firenze e Forlì (42 m) si presenta a prima vista come quella di un torrente affluente in una gola maggiormente scavata da un corso d'acqua principale. In realtà, le forme poco incise a monte del salto hanno fatto pensare a uno sbarramento vallivo recente, che è stato identificato in una frana nel periodo altomedievale. La cascata, pertanto, può essere considerata geneticamente di doppia origine, perché sia la maggiore azione erosiva del torrente principale che la frana hanno concorso alla formazione del dislivello.

La cascata di Vøringsfoss (fig. 5), una delle maggiori della Norvegia con altezza in tre salti di 183 m (salto singolo principale di 161 m), non è una cascata da valle sospesa, in quanto il fiume Bjoreia piomba dall'altopiano di Hardanger in una valle disposta trasversalmente, chiusa, subito nei pressi della cascata, da una imponente parete rocciosa (Måbødal). Nella formazione della cascata appaiono implicati diversi fattori: tettonici, con presenza di una linea di faglia; glaciali, con produzione di un primo dislivello durante il Pleistocene; di erosione delle acque, cioè quella del torrente subglaciale e quella più recente del Bjoreia.

La piccola cascata dell'Acqua Pazza nel parco della villa «Il Vittoriale» a Gardone Riviera, sulla sponda destra del Lago di Garda, fornisce un altro curioso esempio di origine mista: il primitivo dislivello è dovuto all'azione dei ghiacciai, con creazione di un primo salto conseguente, ma la cascata si è formata per erosione differenziale su un banco di roccia più resistente (salto susseguente) e l'attuale forma è legata al processo di deposito di travertino (trasformazione verso una cascata autoconseguente). Anche le famose cascate del fiume Dunn a Ocho Rios in Giamaica sono cascate dovute a dislivello strutturale, ma ormai praticamente di tipo autoconseguente per formazione di barriere travertinose.

Della situazione in cui sorgenti sono poste su pareti di gola fluviale si è già discusso: gioverà qui ricordare la presenza di cascate di questo tipo nella gola della Jökulsà á Fjöllum presso la cascata di Hafrangils.



Fig. 5 - *Vøringsfoss* sul fiume *Bjoreia*, che scende per m 183 dall'altopiano di *Hardangervidda* (Norvegia)

Cascata ormai susseguente per azione congiunta di erosione fluviale, glaciale e subglaciale su un preesistente *knick-point* di origine tettonica (foto W. Cohen, Aachen)

Cascate costruttive o autoconseguenti. – Come accennato, si tratta di cascate dove si ha tendenza ad aumento del dislivello per effetto del deposito di CaCO_3 . Sono definite costruttive o autoconseguenti proprio per la loro capacità di «costruire» da sole il salto.

Anche se il loro numero è molto più limitato di quello delle cascate distruttive, dove i *knick-points* tendono verso una progressiva riduzione, esse sono abbastanza frequenti nelle zone calcaree, specialmente nelle regioni mediterranee piuttosto aride. Le condizioni dei corsi d'acqua più adatti per la loro formazione sono: un grado di alcalinità compreso tra 1 e 4 HD (16), una velocità della corrente tra 0,5 e 1,5 m/sec e la presenza di organismi

(16) Si forniscono i gradi di alcalinità di fiumi della Croazia che presentano alcune tra le principali cascate travertinose del mondo: Laghi di Plitvice 3,6/5,2; fiume Krka 2,8/3,6; fiume Trebizat 3,7/4,0; fiume Una 3,7/4,0; fiume Pliva 3,0/3,1; fiume Mrzenica 3,5/3,8 (Friganovic 1984, p. 19).

animali e vegetali, in particolare alghe del tipo *byrum* e cianoficee (Brnek-Kostic, 1985, pp. 19-24) (17).

Come ricordato nella parte introduttiva, le cascate autoconseguenti possono essere divise, in accordo con Schwarzbach, in: 1) cascate dovute a terrazzi di travertino lungo pendii o fianchi vallivi, spesso in vicinanza di sorgenti; 2) cascate da sbarramento travertinoso lungo il corso di fiumi, spesso con formazione di laghi e bacini a monte.

Per il primo tipo si segnalano la cascata di Urach (37 m) nel Giura Svevo, con un'età di circa 100.000 anni, quella di Dreimühlen nello Eifel (17 m), quella di Saturnia in Toscana (altezza 8 m, portata 0,5 m³/sec) e quella di Santa Maria presso Labante in provincia di Bologna. In Marocco si segnalano le cascate a più gradini di Ras el Oued, emissario della grotta di Chiker e quelle di Imouzzèr des Ida Outanane a nord di Agadir. Queste ultime si sono prodotte in travertini di formazione complessa, a strati successivi: solo quelli più antichi risalgono a circa 70.000 anni fa, ma la maggior parte è di età olocenica (inferiore a 10.000 anni) con un tasso di accrescimento tra i 3 e i 4 mm all'anno (Muxart, 1981, p. 192) (18).

Le cascate autoconseguenti del secondo tipo sono di maggiori dimensioni e quindi di maggior interesse scenico e turistico. In Italia l'esempio più importante è il Salto di Borrato sull'Elsa presso Colle (altezza circa 10 m), ma, a livello mondiale, ve ne sono di molto più significativi. In Messico si segnalano El Salto e le magnifiche cascate dell'Agua Azul nel Chiapas, con una serie di sbarramenti travertinosi sui sette chilometri della risorgenza sino alla confluenza con l'Usumacinta e, in Croazia, le cascate dei Laghi di Plitvice (esclusa quella del Plitvički Potok che, come abbiamo visto, è dovuta a gola fluviale) e quelle del Krka. In questi casi, la formazione della barriera e quindi delle cascate può essere considerata un sistema dinamico a retroazione positiva (fig. 6).

Laghi di Plitvice. Si tratta, come noto, di una serie di laghi disposti tra 632 e 522 metri, creata da barriere di travertino su cui si sono formate cascate, con altezza variabile fra 3 e 30 metri. L'accrescimento del travertino è stato qui rapido (tra 1 e 3 cm all'anno) e l'età delle barriere, anche se nella zona sorgentifera del Korana esistono formazioni travertinose di circa 40.000 anni, risale per lo più a 4000 anni fa. Nella formazione delle masse rocciose un ruolo decisivo è stato quello delle alghe cianoficee. L'evoluzione futura, anche sulla base del modello proposto, è quella di un ulteriore sviluppo delle barriere, delle cascate e dei laghi, come indicato dalla forma-

(17) Ciò avviene in quanto a una velocità superiore di 3,5 m/sec inizia l'azione di erosione delle acque correnti. Da osservazioni lungo il corso del Krka si è potuto notare che è importantissima la temperatura dell'acqua, che nei fiumi dinarici in estate varia tra i 10 e i 23 °C, e che il processo di sedimentazione del travertino è favorito da sporgenze lungo il corso dei fiumi ed è più veloce lungo la corrente.

(18) Piccole cascate da terrazzi travertinosi si trovano anche in Provenza, nella Slovacchia orientale presso il confine con l'Ucraina, alle sorgenti del Cuervo (Sierra di Cuenca) e nei Monti Apuseni (Cascata di Slatina).

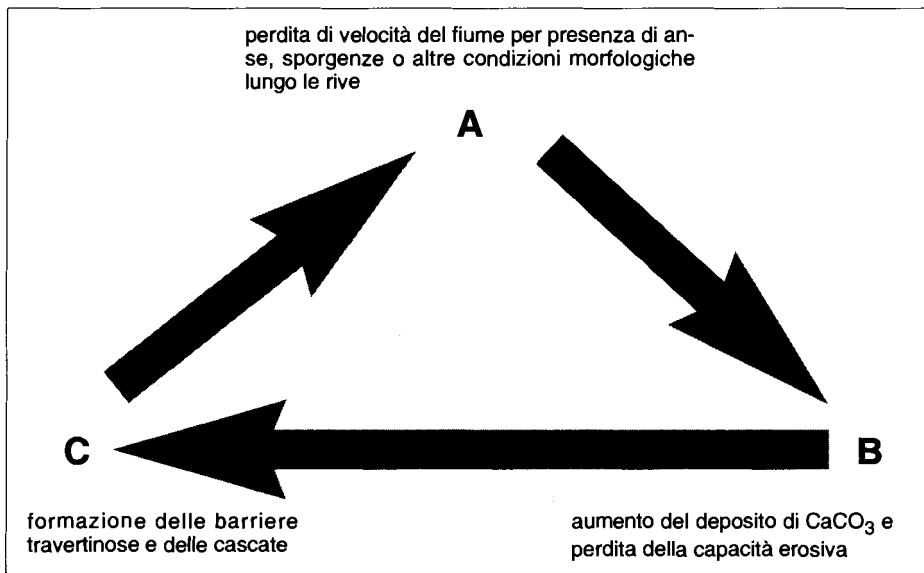


Fig. 6 – *Modello sistemico-diacronico di formazione delle cascate travertinose*

zione di nuovi salti nel *canyon* del Korana a valle delle cascate di Sastavci che, con il tempo, origineranno nuovi laghi (Pavolini, 1987).

Cascate del Krka. Il fiume dalmata Krka presenta un corso di 49 km tra la sorgente, rappresentata dalla cascata di Tupolje (22 m) e quella inferiore di Skradin (Skradinski buk), interrotto da altri dieci salti con altezza variabile tra 4 e 59,6 m (19). Le cascate maggiori sono quella di Manojlovač (due salti di 59,6 m) e di Skradin (45,7 m in 11 salti). Particolarmente interessante è il *canyon* del corso medio, con cinque cascate travertinose e una rapida, che in soli quattro chilometri supera un dislivello di 110 metri. La penultima cascata, quella di Rog (Roski Slap) è formata da dodici salti con altezza massima di 15 m su una lunghezza di 400 m per una caduta complessiva di 25,5 m. La struttura delle cascate di Skradin presenta una lunghezza di circa 400 m e ha una portata media di 43 m³/sec (in agosto 18 m³/sec; in novembre 74 m³/sec). Tipica è la forma aggettante delle barriere travertinose, del resto riscontrabile in molte cascate, ad esempio nei salti inferiori di quella delle Marmore.

La cascata delle Marmore, quella di Tivoli, quella della Pliva a Jaice, quella di Huangghoshu nel Guizhou (20) e molte altre presentano, come abbiamo accennato, formazione di travertino con modifiche della forma e

(19) Tra le particolarità della cascata del Krka è stato osservato che le cascate meno sviluppate presentano una vegetazione idrofila più alta, mentre i salti con maggiore dislivello sono popolati da vegetazione più bassa.

(20) Le cascate, di età valutabile attorno ai 50.000 anni, sono le maggiori della Repubblica Popolare Cinese assieme a quelle di Hukan sullo Huang Ho. La loro altezza è di 81 m, con salto principale di 57 m e larghezza del fronte di 74 m.

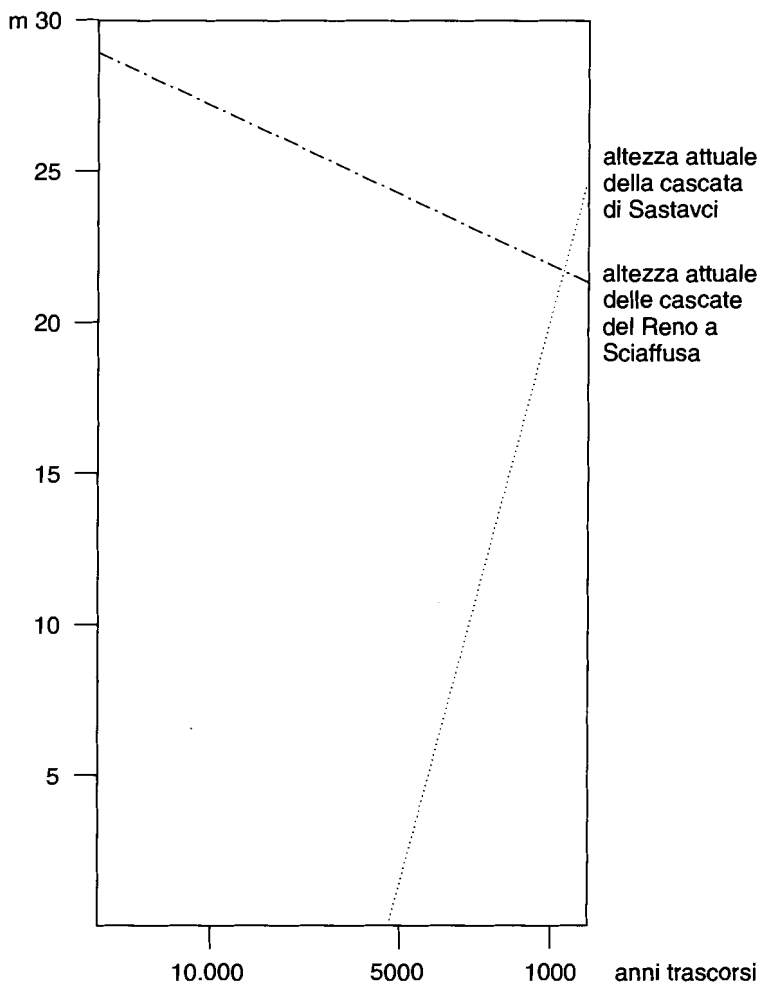


Fig. 7 – Ricostruzione teorica dell'evoluzione del dislivello in età olocenica di cascata distruttiva e costruttiva

dei fenomeni di erosione delle acque, ma geneticamente di origine assolutamente diversa. Tuttavia la loro evoluzione sarà simile a quella di salti auto-conseguenti (21) ed è esprimibile dall'equazione che formalizza l'antinomia esistente tra il processo di deposito di travertino e l'erosione fluviale:

$$AC = TA - PE$$

dove TA = tasso di accrescimento del travertino; PE = potere erosivo del corso d'acqua; AC = altezza della cascata. In questa situazione si verifica $TA > PE$ e la cascata autoconseguente tenderà ad aumentare il dislivello.

(21) Il deposito di carbonato di calcio ha prodotto un rialzo del bordo del salto superiore della cascata delle Marmore di circa 4 metri, quindi valutabile in circa 2 mm/anno.

Al contrario le cascate distruttive tenderanno a evolvere secondo questa equazione:

$$AC = f \left(\frac{PE}{CR} \right)$$

dove AC = altezza della cascata; PE = potere erosivo del corso d'acqua; CR = capacità di resistenza all'erosione del *fall-maker*.

In questo caso PE>CR e l'altezza del salto tenderà a ridursi (fig. 7). La formalizzazione esposta è valida per le cascate stazionarie, mentre quelle che sono caratterizzate da discontinuità litologica della parete (Niagara, Gullfoss) o comunque che tendono alla retrocessione verso monte per presenza di zone di fratture (Vittoria) o altra situazione litologica o tettonica, presenteranno una tendenza al mantenimento del dislivello, ma, come abbiamo visto, diversi tassi di arretramento (22).

BIBLIOGRAFIA

- AMBERT P., *Chronologie locale et synchronisme paléoclimatique*, in «Bull. Ass. Géogr. Français», Parigi, 1981, pp. 211-217.
- America's Majestic Canyons*, Washington, National Geogr. Society, 1979.
- Andar per laghi, fiumi e cascate*, Novara, Ist. Geogr. De Agostini, 1987.
- ANTONUCCI M., *Terni. Cascata delle Marmore ed i suoi splendidi dintorni*, Terni, Livoni, s.d.
- ARBENZ P., *Die Aareschlucht bei Meiringen*, Meiringen, Brugger, s.d.
- BARGE F. e PONTROUÉ J.-P., *Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido*, Huesca, Provincia de Huesca, 1985.
- BERBOTTO P.L., *Un Eden bianco verde*, in «Bell'Italia», Milano, 1984, 9, pp. 40-47.
- BIANCOTTI A., *Le metamorfosi della Terra*, Firenze, Giunti, 1994.
- BRIDGES E.M., *World Geomorphology*, Cambridge, Cambridge University Press, 1992.
- BRNEK KOSTIC A., MOVCAN J. e SOBAT A., *Plitvice National Park: The World National Heritage*, Zagabria, Graficki Zavod Hrvatske, 1985.
- CASATI P.L., *Le meraviglie delle Alpi*, Milano, BE-MA, 1994.
- CIPRIANI N., MALESANI P. e VANNUCCI S., *I travertini dell'Italia Centrale*, in «Boll. Serv. Geol. d'Italia», Roma, 1977, pp. 85-115.
- DAVIS W.M., *Gorges and Waterfalls*, in «American Journ. of Science», New Haven, 1884, pp. 123-132.
- DERRUAU M., *Précis de géomorphologie*, Parigi, Masson, 1979.
- EASTERBROOK D.O., *Surface Processes and Landforms*, New York, MacMillan, 1993.

(22) Dall'epoca della loro formazione, avvenuta circa 550.000 anni fa, le cascate Vittoria sono retrocesse verso monte di circa 95 km a un tasso medio compreso tra i 16 e i 18 cm all'anno, aumentato negli ultimi 10.000 anni, durante i quali l'arretramento è stato di circa 24 km, quindi a una media di 24 cm/anno.

- EDWARDS W.M., *Niagara Falls*, in «National Geogr. Magazine», Washington, 1963, 4, pp. 574-587.
- FERRARI A. e FERRARI A., *Natura protetta. Venezuela, il regno del giaguaro*, Bergamo, Bolis, 1990.
- FLINT K.E., *Chines in the Isle of Wight: Channel Adjustment and Basin Morphology in Relation to Cliff Retreat*, in «Geogr. Journ.», Londra, 1982, pp. 225-236.
- FRIGANOVIC M., *Parco Nazionale Fiume Krka*, Zagabria, Privredni Vjesnik, 1984.
- GALLETTI GUALTIERI G., *La Cascata delle Marmore attraverso un testo del Settecento*, in «L'Universo», Firenze, 1936, pp. 627-640.
- GARNER H.F., *Derangement of Rio Caroni*, in «Géom. Dynamique», Parigi, 1966, pp. 54-83.
- GATTI A., *Alla ricerca dell'Agua Azul*, in «Mondo in Video», Milano, 1990, pp. 26-27.
- GIBSON O., *Great Waterfalls, Cateracts and Geysers*, Londra, T. Nelson and Sons, 1887.
- HOFFMANN F. e altri, *Der Rheinfall*, Sciaffusa, Karl Augustin, 1986.
- HOLMES D.L., *Principles of Physical Geology*, Sunbury on Thames, s. ed., 1973.
- HUBBARD D., *This is Yosemite*, Redwood City, Five Associates, 1971.
- Krimmler Wasserfälle*, Reutte, Franz Milz Verlag, 1984.
- LAMBIASE S. e RUGGERO A., *La forra del Torano (Matese centrale): un caso di convergenza tra morfogenesi carsica e fluviale*, in «Atti della Soc. Toscana di Scienze Nat.», Firenze, 1980, pp. 171-192.
- MATTIOLI B., *Fenomeni speleologici nei travertini di Marmore*, in «L'Universo», Firenze, 1972, pp. 411-426.
- MENARA H.P., *Süd Tiroler Wasserfälle*, Bolzano, Athesia, 1980.
- MONEY D., *La superficie della Terra*, Bologna, Zanichelli, 1974.
- MONGINI G.M., *Trasformazioni naturali ed umane nelle Cascate di Tivoli*, in «Riv. Geogr. It.», Firenze, 1973, pp. 62-77.
- MUXART T., *Processus de précipitation et mesures*, in «Bull. Ass. Géogr. Français», Parigi, 1981, pp. 189-196.
- MICOD J., *Répartition, classification, relation avec les milieux karstiques et karsification*, in «Bull. Ass. Géogr. Français», Parigi, 1981, pp. 181-187.
- NOYES T., *The World's Greatest Cateracts*, in «National Geogr. Magazine», Washington, 1926, pp. 29-59.
- PANIZZA M., *Geomorfologia*, Bologna, Pitagora, 1992.
- PANIZZA V. e CANNILLO C., *Rilevamento di beni geografico-fisici di tipo geologico e geomorfologico in un'area della Sardegna nord-occidentale*, in «Riv. Geogr. Ital.», Firenze, 1994, pp. 545-576.
- PARISI B., *Aspetti naturali caratteristici delle montagne lombarde*, Milano, CAI, 1976.
- PAVOLINI M., *Le cascate in Italia*, in «Natura e montagna», Bologna, 1982 (a), 4, pp. 53-70.
- PAVOLINI M., *Cascate e loro formazione*, in «Studi e Ric. di Geogr.», Genova, 1982 (b), pp. 239-250.

- PAVOLINI M., *Cascate d'Italia e dell'arco alpino*, in «L'Universo», Firenze, 1983, pp. 329-366.
- PAVOLINI M., *L'evoluzione delle cascate*, in «Sapere», Roma, 1984, 2, pp. 26-30.
- PAVOLINI M., *Cascate d'Italia*, Udine, Lorenzini, 1985 (a).
- PAVOLINI M., *Formazione ed evoluzione dei canyons italiani*, in «La Geogr. nelle Scuole», Trieste, 1985 (b), pp. 1-8.
- PAVOLINI M., *La più importante area protetta della Jugoslavia*, in «La Geogr. nelle Scuole», Trieste, 1988, pp. 101-108.
- PAVOLINI M., *Le forme carsiche*, in «L'Universo», Firenze, 1996, pp. 673-686.
- PENNESI G., *La Cascata delle Marmore*, in «Riv. Geogr. Ital.», Firenze, 1894, pp. 144-163.
- PERLOTTO F., *Montagne d'Amazzonia*, in «Boll. Soc. Geogr. Ital.», Roma, 1993, pp. 267-268.
- PHILLBRICK S.S., *Horizontal Configuration and Rate of Erosion of Niagara Falls*, in «Bull. Geol. Soc. of America», Boulder, 1970, pp. 3723-3732.
- PHILLBRICK S.S., *What Future for Niagara Falls?*, in «Bull. Geol. Soc. of America», Boulder, 1974, pp. 91-98.
- POLLOG C.H., *Ein Stiefkind der physischer Geographie: Wasserfälle. Nebst enigem grundsätzlichen Bemerkungen*, in «Geogr. Annaler», Stoccolma, 1935, pp. 110-120.
- RASLEIGH E.C., *Among the Waterfalls of the World*, Londra, Jarrods, 1935.
- Rheinfall*, Lucerna, Globetrotter, s.d.
- SCHWARZBACH M., *Islandische Wasserfälle und eine genetische Systematik der Wasserfälle überhaupt*, in «Zeitschrift für Geom.», Berlino-Stoccarda, 1967, pp. 378-417.
- SECCI T., *Disegni e stampe della Cascata delle Marmore*, Terni, Umbriagraf, 1981.
- Tepuy 93*, in «Atti e Mem. della Commissione Grotte E. Boegan», Trieste, 1994, suppl., pp. 1-120.
- THORNBURY W., *Principles of Geomorphology*, New York, Wiley, 1967.
- WALTHAM A.C., *Le grotte*, Novara, Ist. Geogr. De Agostini, 1976.
- WALTHAM A.C., *Limestone Karst Morphology in the Himalayas of Nepal and Tibet*, in «Zeitschrift für Geom.», Berlino-Stoccarda, 1996, pp. 1-22.
- Wassers-Sinfonie, Berner Oberland*, s.l., Polygraphic Company, s.d.

GENETIC RE-ARRANGEMENT AND MORPHOLOGICAL TYPES OF THE WATERFALLS OF THE WORLD. – The author suggests, in reference to morphogenetic origin, a classification in 58 types of waterfalls and divides them in relation to the classes of consequent, subsequent, autoconsequent and artificial waterfalls. Some examples of every type, of great and less important waterfalls, are provided. The different origin and evolution of destructive and constructive falls are underlined. In the last paragraph of the paper, the author proposes a mathematical interpretation of the evolution of these kinds of falls, remarking that waterfalls of different origin will have an evolution similar to the autoconsequent type because of the process of deposition of CaCO_3 on their rim.