

## Saggi e studi

---

### *L'eruzione del vulcano Tambora nel 1815: le conseguenze sul clima, l'ambiente e l'uomo\**

di Clive Oppenheimer

*Io feci un sogno, che non fu solo un sogno.  
Spento era il sole splendente, le stelle  
Vagavano buie nello spazio eterno  
Senza raggi né via; la terra gelida  
Ruotava cieca e s'abbuiava nel cielo senza luna;  
Veniva ed andava il giorno, e venendo non recava  
La luce, e nel terrore di tanta desolazione  
Gli uomini scordavano le passioni e i cuori  
Freddi e egoisti, pregavano per la luce<sup>1</sup>*

### Introduzione

Due delle più importanti correnti della vulcanologia contemporanea riguardano la riduzione del rischio e la relazione tra vulcanismo e sistema terrestre. Naturalmente questi due vasti campi di interesse comprendono una grande varietà di percorsi di indagine, ma è certo che essi costituiscono il fulcro di molta ricerca vulcanologica. Negli ultimi 20-30 anni sono stati fatti progressi

\* *Climatic, Environmental and Human Consequences of the Largest Known Historic Eruption: Tambora Volcano (Indonesia) 1815*, in "Progress in Physical Geography", 2003, n. 2, pp. 230-259; traduzione dall'inglese di Paola Redaelli.

1. Tratto da G.G. Byron, *Il Buio*, in Id., *Pezzi domestici e altre poesie*, a cura di Cesare Dapino, Torino, Einaudi, 1986 [ediz. orig. *Darkness*, 1817].

significativi nella descrizione teorica e sperimentale dei processi vulcanici, per esempio nella fisica delle eruzioni esplosive, e nel trasporto atmosferico e nella deposizione delle ceneri. Essi hanno dato buoni frutti, per lo meno in quanto forniscono una base certa per lo sviluppo di modelli di inversione dei dati geologici relativi alle passate eruzioni, permettendo così stime quantitative di alcuni importanti parametri di eruzione. Nello stesso periodo, il progresso dei sistemi di sorveglianza (per esempio la sismologia, la geodesia, la geochimica, il telerilevamento satellitare) e delle capacità computazionali ha reso possibile tarare e convalidare quanto elaborato a livello teorico. Per esempio, le osservazioni satellitari dell'eruzione del Pinatubo (Filippine, 1991) hanno fornito molte informazioni circa la risposta del sistema atmosferico-climatico alle eruzioni esplosive ad alto contenuto di zolfo (McCormick *et al.*, 1995; Hansen *et al.*, 1997; Robock, 2000). In ogni caso, la moderna registrazione strumentale dà conto soltanto di una gamma ridotta di intensità, contenuto di zolfo e durata delle eruzioni. Per cogliere la portata dei rischi e delle conseguenze climatiche di eruzioni significativamente maggiori di quella del Pinatubo, dobbiamo analizzare i dati relativi al vulcanismo storico e preistorico. A questo proposito, la maggiore eruzione vulcanica conosciuta (nella storia), quella del vulcano Tambora (Indonesia), nel 1815, ci offre elementi di conoscenza fondamentali.

Una volta il Tambora era probabilmente la montagna più alta delle Indie Orientali. Navigando verso oriente, dopo essersi lasciati alle spalle Bali, esso si profilava all'orizzonte e sembrava alto come il monte Rinjani nell'isola di Lombok (3726 m), sebbene fosse molto più distante. Stothers (1984) ritiene che superasse i 4300 m di altezza. Non lo sapremo mai con certezza perché il cono collassò in seguito alla (maggiore) eruzione (mai registrata nella storia). Gli eventi ad essa connessi provocarono il più alto numero di morti attribuibile a un'eruzione vulcanica (Tanguy *et al.*, 1998) e la portata globale delle conseguenze climatiche dell'eruzione è stata considerata una delle cause dell'«Ultima grande crisi di sussistenza del mondo occidentale» (Post, 1977). L'obiettivo di questo articolo è di riesaminare gli avvenimenti e le conseguenze dell'eruzione del 1815 e di discuterne le implicazioni

per valutare l'impatto che potrebbero avere future eruzioni esplosive di questa dimensione.

## L'eruzione

Pochi anni prima dell'eruzione, il luogotenente-governatore di Giava, passata nel 1811 sotto il controllo britannico, era sir Thomas Stamford Raffles. Questi nutriva un profondo interesse per la cultura e la storia naturale dell'isola e dell'arcipelago indonesiano, e molto di quello che sappiamo sull'eruzione del Tambora è giunto a noi attraverso la sua *History of Java*<sup>2</sup> e il suo *Memoir*<sup>3</sup>. Queste due opere e altri documenti e lettere pubblicati in "*The Asiatic Journal and Monthly Register for British India and Its Dependencies*" (un'interessante miniera di informazioni di intelligence, recensioni letterarie, notizie sulla regione, che vide la luce nel 1816) ci offrono interessanti elementi di comprensione circa la natura dell'eruzione e le conseguenze che essa ebbe. I resoconti coevi sono stati attentamente analizzati da Stothers (1984), e da Sigurdsson e Carey (1992); poiché non è molto facile accedere ai documenti originali, nei prossimi paragrafi ne abbiamo riprodotto degli estratti. Altre importanti fonti di informazione sull'eruzione del Tambora sono Post (1977), Stommel (1979) e Stommel (1983), Harrington (1992).

### *Le prime esplosioni*

Il Tambora forma la penisola di Sanggar, che si trova a Sumbawa, una delle isole in prevalenza vulcaniche che sorgono nel Mar di Flores, in Indonesia. Sembra che esso fosse considerato

2. T.S. Raffles, *The History of Java*, London, Black, Parbury and Allen, 1817.

3. Id., *Memoir of the Life and Public Services of Sir Thomas Stamford Raffles, F.R.S. &C., Particularly in the Government of Java 1811-1816, and of Bencoolen and Its Dependencies 1817-1824: with Details of the Commerce and Resources of the Eastern Archipelago, and Selections from His Correspondence*, London, John Murray, 1830.

spento (persino che potesse essere un montagna non di origine vulcanica) fino al 1812, quando cominciò a rombare e a emettere piccole nubi di cenere, segno evidente che il magma stava cominciando a salire in superficie. Tre anni dopo, la sera di mercoledì 15 aprile, incominciò la prima eruzione importante, che si protrasse per 2 ore (strato F-2 nella Figura 1). Nel *Memoir* di Raffles leggiamo il seguente resoconto:

In questa isola le prime esplosioni si udirono la sera del 5 aprile, si avvertirono da ogni parte e continuarono a intervalli fino al giorno seguente. Sulle prime il rumore fu pressoché universalmente attribuito a un cannone che sparava in lontananza; tant'è vero che un distaccamento di truppe si mise in marcia da Giacarta pensando che una postazione lì vicina si trovasse sotto attacco, e a due riprese si mandarono delle imbarcazioni lungo la costa alla ricerca di un'ipotetica nave in difficoltà.

La mattina seguente, tuttavia, una leggera caduta di ceneri eliminò ogni dubbio sulle cause del rumore, e val la pena di sottolineare che, col protrarsi dell'eruzione, dava l'impressione di essere così vicino che in ciascun distretto si pensò che si producesse a distanza ravvicinata e lo si attribuì a un'eruzione, vuoi del Marapi, vuoi del Gunung Kloot, vuoi del Gunung Bromo<sup>4</sup>.

Il cruiser *Benares* dell'Onorevole Compagnia [la Compagnia delle Indie Orientali, *n.d.t.*] il 5 aprile si trovava a Makassar (Ujung Pandang, Solawesi), a 350 km a nord-nord est del Tambora. Il brano di una lettera personale scritta dal suo comandante recita: «Il 5 aprile a Macassar si udirono dei colpi di cannone: il rumore pareva provenire da sud, e continuò in modo intermittente per tutto il pomeriggio. Intorno al tramonto le detonazioni sembrarono farsi molto più vicine: di tanto in tanto sembravano cannonate ed erano intervallate da altre più leggere»<sup>5</sup>.

Analizzando attentamente il modello di dispersione dei frammenti litici (clasti accidentali, provenienti dall'erosione del condotto e della bocca del vulcano piuttosto che da nuovo magma) nello strato di tefra prodottosi in seguito a questo evento, Sigur-

4. *Ibidem*.

5. "The Asiatic Journal", August 1816, n. 2, p. 165.

sson e Carey (1989) ritengono che l'intensità dell'eruzione sia stata superiore ai 108 kg s<sup>-1</sup> e che la colonna eruttiva abbia raggiunto i 33 km al di sopra del livello del mare; la grandezza (la massa totale) dell'eruzione sarebbe stata di 1.11 x 10<sup>12</sup> kg.

Gli abitanti della zona circostante il vulcano mandarono dei delegati alle autorità governative di Bima, chiedendo che li aiutassero a fare indagini sull'eruzione. In risposta le autorità inviarono un uomo di nome Israel che giunse in loco il 9 aprile.

## L'eruzione catastrofica

Dopo una pausa nell'attività, una seconda grande eruzione ebbe inizio intorno alle 19.00 (ora locale) di lunedì 10 aprile (strato F-4 nella Figura 1). L'evento si protrasse per meno di 3 ore ma fu più forte, con un tasso eruttivo stimato di circa 3 x 10<sup>8</sup> kg s<sup>-1</sup> e una nube eruttiva alta 43 km (Sigurdsson e Carey, 1989). Si ritiene che questa altezza nei due millenni passati possa essere stata superata solo dall'eruzione "ultra-pliniana" del Taupo (Nuova Zelanda) del 181 d.C. (che si calcola abbia raggiunto i 51 km; Sigurdsson e Carey, 1989). La testimonianza più attendibile su questa fase dell'eruzione è forse quella del luogotenente Owen Philipps, inviato da Raffles a Sumbawa con dei carichi di riso e il compito di «cominciare e metterne a punto la distribuzione, e allo stesso tempo accertare per quanto possibile il portato del vulcano a livello locale»<sup>6</sup>. Durante il soggiorno a Dompu, Philipps incontrò il rajah di Sanggir, miracolosamente scampato all'eruzione:

Poiché il Rajah aveva assistito in prima persona all'ultima eruzione, la seguente descrizione fattami da lui è probabilmente più affidabile di qualsiasi altra. Verso le 7 del pomeriggio del 10 aprile, tre diverse colonne infuocate eruppero vicino alla sommità del monte Tomboro (apparentemente tutte dall'interno della bocca del cratere) e, dopo essersi innalzate separatamente a una grandissima altezza, congiunsero le loro cime in aria in modo turbolento e caotico<sup>7</sup>.

6. Raffles, *Memoir of the Life and Public Services...*, cit.

7. *Ibidem*.

Fino a quel momento, era stato estruso solo circa  $1,8 \text{ km}^3$  (di DRE, roccia densa equivalente) di magma,  $1,18 \text{ km}^3$  del quale prodotti dalla fase F-4 (Figura 2 (a)). Seguì, poco prima delle 20.00, il collasso gravitazionale a “fontana” della colonna eruttiva convettiva centrale probabilmente appena la bocca eruttiva si allargò e il contenuto d’acqua del magma diminuì. Una forte «tromba d’aria», probabilmente consistente in uno o più flussi piroclastici, raggiunse rapidamente Sanggar e distrusse il villaggio. Nei successivi 3-4 giorni circa  $50 \text{ km}^3$  (di DRE) di magma si riversarono dalla montagna sotto forma di flussi di pomice, distruggendo il villaggio di Tambora, e generando immense nubi co-ignimbriche di tipo Phoenix (Figura 2 (b)). Il 40% della massa del deposito che ne derivò è da attribuirsi alla ricaduta delle ceneri di queste nubi (Sigurdsson e Carey, 1989). Israel, l’emissario del governo regionale, fu tra i morti in questa fase. Pilipps annotò quanto segue del suo colloquio con il rajah<sup>8</sup>:

In poco tempo l’intera montagna vicino a Sang’ir assunse l’aspetto di una massa di fuoco liquido, dilagante in ogni direzione. Le fiamme e le colonne infuocate continuarono a imperversare con furia incessante fino a che, verso le 8 di sera, non vennero oscurate dalle tenebre provocate dal materiale che cadeva. A quell’ora a Sang’ir caddero fitti dei sassi, alcuni dei quali grandi come due pugni, ma in generale non più grossi di noci.

Tra le 9 e le 10 incominciarono a cadere le ceneri, e subito dopo seguì una violenta tromba d’aria che rase al suolo quasi tutte le case del villaggio di Sang’ir portandosi via gli ataps o i tetti, e gli elementi più leggeri delle case. Nella zona di Sang’ir a ridosso del Tomboro gli effetti della tromba d’aria furono molto più violenti: essa sradicò alberi enormi, li sollevò per aria insieme a uomini, cavalli, bestiame e qualsiasi altra cosa si trovasse nel suo raggio d’azione.

Fino alle 11 circa, quando la tromba d’aria cessò, non si udirono esplosioni. Queste invece continuarono senza sosta da mezzanotte fino alla sera dell’11, dopo di che diminuirono di violenza e le si udì solo a intervalli, ma non cessarono completamente fino al 15 luglio.

Sembra che anche l’equipaggio di un vascello salpato da Timor sia stato testimone della fase parossistica dell’eruzione, poiché po-

8. *Ibidem.*

té vedere le pendici del vulcano avviluppate dalle fiamme e la cima circondata da nubi scure, da cui si sprigionavano fuoco e fiamme. A Bima regnò il buio più completo fino a mezzogiorno del 12 aprile e la caduta di ceneri fu così pesante che la maggior parte dei tetti crollò, incluso quello dell'abitazione del residente<sup>9</sup>. Stranamente questi sembra collocare le esplosioni più spaventose – come se «un mortaio pesante [gli] sparasse vicino all'orecchio»<sup>10</sup> – nella notte del 14 aprile. Ciò potrebbe far pensare che si trattasse della fase culminante dell'eruzione, anche se sembra improbabile, visto che ci sono testimonianze provenienti da varie zone sul fatto che le concussioni si fecero sentire nella notte tra il 10 e l'11 aprile.

Dopo aver lasciato Bima, il 23 aprile, il Benares passò vicino al Tambora e [il comandante, *n.d.t.*] fornì questa descrizione dell'aspetto del vulcano dopo le convulsioni:

Passandoci davanti a circa sei miglia di distanza, non se ne poteva vedere la cima perché era avvolta da nubi di fumo e ceneri e i fianchi della montagna fumavano in parecchi punti, a quanto pare per la lava che, non essendosi raffreddata, era fluiva verso il basso; vari fiumi di lava avevano raggiunto il mare, uno dei quali, molto consistente, diretto verso il nord-nord ovest della montagna; il suo tracciato era chiaramente distinguibile sia per il colore nero della lava, che contrastava con quello delle ceneri depositate su entrambi i suoi lati, sia per il fumo che si levava da ogni sua parte<sup>11</sup>.

## Gli effetti a distanza

L'eruzione provocò sbalorditivi effetti a grande distanza. La notte tra lunedì 10 e martedì 11 aprile le esplosioni vennero udite a Bekulen (distante 1800 km), a Mukomuko (2000 km) e probabilmente a Trumon (2600 km) nell'isola di Sumatra. La relazione che segue giunse da Fort Marlborough (Sumatra) nel maggio 2015:

9. "The Asiatic Journal", August 1816, n. 2, p. 167.

10. *Ibidem*.

11. Ivi, pp. 165-167.

Recentemente, su questo tratto di costa, si è verificato un fatto di una certa rilevanza. Contemporaneamente, in diverse postazioni che si trovano tra i 2°30' e i 5°30' di latitudine sud, si udì un rumore come di colpi di arma da fuoco.

Il rumore venne udito da alcune persone di questo insediamento la mattina dell'11 aprile. Nel corso di quella giornata alcuni delegati (o capi) dei villaggi situati a notevole distanza vicino alle colline, scesero a valle e riferirono di aver udito sin dai primi albori un pesante e ininterrotto cannoneggiamento. Temevamo che qualche faida tra villaggi dell'interno fosse sfociata in un conflitto vero e proprio. Mandammo delle persone a indagare, ma verificammo che tutto era tranquillo.

I nostri capi-villaggio che si trovavano qui immediatamente decisero che si trattava solo di una rissa tra Jin (il demonio in persona), accompagnato da qualcuno della sua squinternata combriccola, e le anime dei loro antenati defunti che avevano superato il periodo di prova sulla montagna e stavano dirigendosi in paradiso.

La via più naturale per risolvere il dilemma è forse quella di ipotizzare che ci debba essere stata una violenta eruzione di uno dei numerosi vulcani che sorgono tra le nostre stupende montagne, a metà strada tra Moco-Moco e Semanco. Se così fosse, forse non sapremo mai i particolari, poiché abbiamo pochi mezzi di comunicazione con gli abitanti delle montagne e ancora meno li conosciamo (sebbene si dica che alcuni di loro siano uomini di Lord Monboddo<sup>12</sup>, e abbiano la coda), come del resto non conosciamo la regione in cui abitano<sup>13</sup>.

Nei distretti orientali di Giava tutti rimarcarono che le esplosioni furono tremende, di una violenza sufficiente a far vacillare le case. Solo, il residente di Surakarta, annotò:

Martedì 11 le detonazioni furono più violente e frequenti per tutto il giorno; una delle più potenti avvenne nel pomeriggio, circa alle 2, e fu seguita per circa un'ora da movimenti ondulatori della terra, evidenziati

12. James Burnett, lord Monboddo (1714-1799), giurista scozzese e pioniere dell'antropologia, studiò le origini del linguaggio e della società e anticipò alcuni principi dell'evoluzionismo darwiniano. La sua opera più importante, *Of the Origin and Progress of Language*, contiene un vasto corpo di curiose leggende relative agli usi e ai costumi dei popoli primitivi, e ne percorre lo sviluppo verso lo stato sociale. Alcune idee di Monboddo gli valsero la reputazione di eccentrico. Per esempio egli riteneva che i bambini nascono con la coda [n.d.t.].

13. "The Asiatic Journal", August 1816, n. 2, p. 164.

chiaramente dalla vibrazione dei telai delle grandi finestre; un'altra esplosione relativamente violenta si produsse nel tardo pomeriggio, ma la caduta di polvere fu scarsamente percepibile. L'atmosfera sembrava satura di uno spesso vapore: si riusciva di rado a vedere il sole e soltanto per brevi intervalli esso appariva confusamente dietro una sostanza semitrasparente<sup>14</sup>.

Un corrispondente di Gresik (che si trova nella parte occidentale di Surabaya) scrive:

Durante il mio giro per il distretto, il 13, le manifestazioni [dell'eruzione *n.d.t.*] venivano descritte in modo ben poco diverso da come l'ho fatto io, e tutti mi hanno detto che nessuno ricorda – né è menzionata dalla loro tradizione orale – un'eruzione così spaventosa. Alcuni ritengono che sia la premonizione di un prossimo cambiamento, per esempio il reinsediamento del precedente governo, altri la spiegano semplicemente rifacendosi alle credenze superstiziose delle loro leggende e dicono che la venerata Nyai Loroh Kidul ha sposato uno dei suoi figli e per l'occasione ha fatto sparare salve di saluto alla sua artiglieria soprannaturale. Essi pensano che le ceneri siano i residui delle sue munizioni<sup>15</sup>.

A Banyuwangi, all'estremità orientale di Giava, gli effetti dell'eruzione furono pesanti, e lo strato di ceneri raggiunse i 23 cm. Il passo che segue, tratto da una lettera scritta da questa città, testimonia della dimensione straordinaria dell'evento:

Tutte le testimonianze concordano nell'affermare che, stando ai ricordi degli abitanti più vecchi o alla tradizione, un'eruzione così violenta ed estrema non si è mai verificata. Parlano di effetti simili, ma meno gravi, quando circa sette anni fa si ebbe un'eruzione del vulcano Carang Assum a Bali; sulle prime si pensò che, anche in questo caso, la sede dell'eruzione fosse quella montagna. I balinesi attribuirono quell'evento a una recente contesa tra i due Raja di Bali Baliling, che si concluse con la morte del più giovane dei due Raja voluta dal fratello<sup>16</sup>.

14. Raffles, *The History of Java...*, cit.

15. Ivi, pp. 242-243.

16. Ivi, pp. 243-244.

I leggeri venti monsonici che soffiavano da sud est a circa 6 m s<sup>-1</sup> spiegano la maggiore caduta di ceneri a occidente del Tambora. Molti luoghi nel raggio di 600 km rimasero nella più profonda oscurità per uno o due giorni, durante i quali la temperatura dell'aria si abbassò drasticamente. Il residente di Surakarta rilevò:

Il 12 l'abbondante caduta di polvere provocò una notevole oscurità, tale da rendere quasi impossibile compiere al chiuso qualsiasi attività che richiedesse una buona illuminazione. Non occorre che descriva l'oscurità causata dalla caduta di polvere "Udshan abu" dal momento che essa fu identica in ogni parte dell'isola interessata dall'emissione. Può essere degno di nota il fatto che per tutta la giornata del 12 si avvertì un'insolita sensazione di freddo; essa era in gran parte (anche se con ogni probabilità non esclusivamente) causata dalla temperatura: alle 10 del mattino il termometro segnava 75.5 gradi Fahrenheit<sup>17</sup>.

Presumibilmente lo stesso Raffles visse l'evento in prima persona, visto che scrisse: «le ceneri caddero a Buitenzorg, la residenza del governatore, a 30 miglia a sud di Batavia»<sup>18</sup>. Il comandante del *Benares*, sempre all'ancora a Macassar, testimoniò:

Durante la notte dell'undici, i colpi si sentirono ancora, ma molto più deboli; e verso mattina le detonazioni si susseguirono rapidamente e a volte era come se tre o quattro cannoni sparassero insieme e così forte da scrollare le navi, come era successo per le case nel forte. Alcune delle detonazioni sembravano così vicine che mandai degli uomini in cima all'albero per prestare attenzione ai bagliori, e appena spuntò il giorno levai l'ancora e mi diressi a sud, allo scopo di accertarne la causa<sup>19</sup>.

All'aurora, il capitano avvistò una nave che si avvicinava da sud e le mandò incontro un drappello di uomini per raccogliere maggiori informazioni su quanto stava succedendo. Anche l'olandese al comando di quella nave aveva udito le detonazioni per tutta la notte, e anche il 5 aprile quando era stato all'isola Salajer. All'inizio i soldati presero le concussioni per un attacco di

17. Raffles, *Memoir of the Life and Public Services...*, cit.

18. "The Asiatic Journal", February 1816, n. 1, p. 117.

19. "The Asiatic Journal", August 1816, n. 2, p. 165.

pirati, e si precipitarono ai posti di combattimento nel forte ma, visto che non compariva alcuna nave, ipotizzarono che dovesse essersi verificata un'eruzione a Sumbawa. Il comandante del *Benares* scese a terra per incontrare il capitano Wood, il residente di Macassar, la cui casa era stata sconquassata da alcune detonazioni. Alle 8 il cielo divenne sempre più scuro e l'equipaggio della nave dovette far fronte a una pesante caduta di ceneri:

Evidentemente era successo qualcosa di straordinario. Il cielo a sud e a ovest si era fatto molto lugubre e cupo ed era molto più scuro che al sorgere del sole. Sulle prime sembrava che fosse in arrivo una forte burrasca, o una tempesta, ma questa, una volta avvicinatasi, divenne rosso scuro e continuò a diffondersi molto velocemente per il cielo. Verso le 10 era così buio che potevo a fatica distinguere la nave dalla costa che pure era a meno di un miglio di distanza. Allora tornai a bordo.

A quel punto era palese che si era verificata l'eruzione di un qualche vulcano e che l'aria era satura di ceneri o polvere vulcanica, che già incominciavano a cadere sui ponti. Alle undici tutto il cielo divenne scuro ad eccezione di un piccolo tratto vicino all'orizzonte verso est. Il vento che soffiava da quella direzione impedì per un po' di tempo l'arrivo delle ceneri; quel tratto di cielo sembrava una striscia di luce all'aurora e, mentre le montagne di Celebes erano chiaramente visibili, tutto il resto dell'orizzonte era avvolto dal buio. Allora le ceneri incominciarono a precipitare a rovesci. L'insieme era veramente spaventoso e allarmante. A mezzogiorno la luce ancora rimasta nella parte orientale dell'orizzonte sparì e il giorno si oscurò completamente: i ponti della nave presto furono ricoperti dal materiale che cadeva; furono stesi teloni a poppa e a prua per impedire per quanto possibile che esso scendesse sotto, ma era così leggero e sottile che si infiltrò in ogni parte della nave.

Le tenebre rimasero così fitte per tutto il resto della giornata che mai vidi niente di simile nelle notti più buie; non si riusciva a vedersi la mano quando la si alzava vicino agli occhi. Le ceneri continuarono a cadere senza sosta per tutta la notte. Alle sei del mattino, quando si sarebbe dovuto vedere il sole, continuava a essere sempre buio; ma alle sette e mezzo mi accorsi con sollievo che le tenebre diminuivano sensibilmente, e alle otto potei distinguere confusamente degli oggetti sul ponte. Da quel momento si fece chiaro molto rapidamente, e alle nove e mezzo si poteva distinguere la costa, sebbene le ceneri continuassero a cadere in gran quantità, anche se meno forte di prima. L'aspetto della nave, quando ritornò la luce del giorno, era davvero strano, poiché gli alberi, il sartame, i ponti erano ricoperti del materiale che cadeva;

quest'ultimo si presentava come pietra pomice calcinata, di un colore simile alla cenere del legno; era depositato in cumuli alti un piede in molte parti del ponte, e sono convinto che ne fossero precipitate a bordo parecchie tonnellate; sebbene mentre cadeva avesse la consistenza di polvere o cenere assolutamente impalpabile, una volta che si compattava aveva un peso notevole; un dosatore della capacità di una pinta riempito di quel materiale pesava 12 onces; esso era assolutamente insapore, e non irritava per niente gli occhi; aveva un leggero odore di bruciato, ma in nulla simile allo zolfo<sup>20</sup>.

Alla fine, a mezzogiorno di mercoledì 12 aprile, riapparve il sole, anche se penetrava con difficoltà attraverso l'atmosfera fosca e immobile, ancora satura di ceneri. Questa per lo più fu la situazione fino al 15 aprile. Nel frattempo l'equipaggio del *Benares* cominciò a preparare la nave per rimettersi in viaggio: «Ci vollero parecchi giorni per sgomberare la nave dalle ceneri; quando le si mescolava con l'acqua formavano una melma viscosa, difficile da lavare via. Il mio cronometro si fermò, penso a causa alcuni granelli di polvere che vi si erano infiltrati»<sup>21</sup>.

In base alle stime effettuate sulla sua magnitudo e durata, l'intensità media di questa fase ignimbratica dell'eruzione deve essere stata di  $5 \times 10^8 \text{ kg s}^{-1}$ . Woods e Wohletz (1991) hanno calcolato che essa avrebbe dovuto spingere le nubi co-ignimbratiche (di tipo Phoenix) a circa 23 km sopra il livello del mare, un'altezza modesta se si pensa all'intensità dell'eruzione, ma che corrisponde alla minore efficienza termica delle colonne di tipo Phoenix rispetto alle colonne pliniane (in termini di trasporto d'aria e scambio di calore tra clasti caldi e aria stessa).

20. Ivi, pp. 165-166. Si noti che il resoconto citato dà come misura della densità della cenere non compattata  $0,6 \text{ kg m}^{-3}$ , un valore tipico dei depositi di cenere fresca.

21. Ivi, p. 166.

## *Lo tsunami*

Il flusso di pomice sommerse la penisola Sanggar e attraversò il mare, raggiungendo la piccola isola di Moyo proprio a ovest del vulcano. Lo tsunami si produsse quando i flussi piroclastici entrarono in mare e, nella notte tra il 10 e l'11 aprile, lo si osservò da molte parti. A Sanggar, verso le 22, le onde raggiunsero il picco di 4 metri di altezza e sommersero il litorale: «Il mare si alzò di quasi dodici piedi più di quanto mai a memoria d'uomo fosse successo, e devastò completamente le uniche piccole risaie che si trovavano a Sang'ir, spazzando via le case e qualsiasi cosa incontrasse»<sup>22</sup>.

Secondo quanto riferì il residente al comandante del *Benares*, anche a Bima si segnalavano danni notevoli:

Non tirò vento per tutta la notte, ma il mare fu insolitamente agitato. Le onde si rovesciarono sulla costa e le acque invasero il piano terra delle case fino a un piede di altezza; le imbarcazioni di tutti i tipi furono strappate dagli ormeggi, e spinte a terra; parecchie grosse imbarcazioni ora giacciono sulla terraferma a una considerevole distanza, al di sopra del livello dell'alta marea<sup>23</sup>.

Lo tsunami, con onde alte 1-2 m, a mezzanotte colpì Besuki, a 500 km di distanza nella parte orientale di Giava (spostandosi pertanto a circa  $70 \text{ m s}^{-1}$ ), e Surabaya, e scaraventò le imbarcazioni nell'entroterra<sup>24</sup>.

I depositi di flusso devono aver notevolmente modificato la linea costiera della penisola di Sanggar, formando dei delta di materiale piroclastico, come si è recentemente osservato nel caso dell'eruzione del vulcano Soufrière Hills nell'isola caraibica di Montserrat. I numerosi tronchi d'albero che è possibile rinvenire conservati nei depositi testimoniano l'alta temperatura dei flussi di pomice. In alcune aree costiere, i depositi di flusso ospitano depressioni circolari di parecchie centinaia di metri di diametro,

22. Cfr. il resoconto di O. Philipps, in Raffles, *Memoir of the Life and Public Services...*, cit.

23. "The Asiatic Journal", August 1816, n. 2, p. 167.

24. "The Asiatic Journal", February 1816, n. 1, p. 117.

probabilmente residui di crateri di esplosione formati quando i flussi caldi si mescolarono con l'acqua del mare. Dal momento che il vulcano Tambora è quasi completamente circondato dal mare, è probabile che l'interazione tra i flussi caldi e l'acqua marina abbia prodotto a suo tempo una cortina di ceneri quasi circolare di 40 km di diametro. Sulla terraferma, i depositi da flusso si sono saldati insieme.

### *Le zattere di pomici*

Enormi zattere di pomici e tronchi d'albero, alcune delle quali di diversi chilometri, galleggiavano nel Golfo di Saleh e nel Mar di Flores. Alcune zattere di pomice misuravano quasi 5 km e, ancora tre anni dopo l'eruzione, intralciavano la navigazione tra Moyo e Sanggar. Il *Benares* vi si imbatté quando si avvicinò per la prima volta Sumbawa, e ben presto si trovò in difficoltà:

La mattina del quindici salpammo da Macassar con un vento molto debole, e il diciotto giungemmo all'isola di Sumbawa. Nell'avvicinarci alla costa passammo attraverso grandi ammassi di pietra pomice galleggianti sul mare, che a prima vista sembravano delle secche; tant'è vero che mi fermai e mandai una barca ad esaminarne una che a meno di un miglio di distanza avevo preso per un banco di sabbia asciutta, lungo più di tre miglia, con rocce nere disseminate in parecchi punti; conclusi che era stata lanciata durante l'eruzione. Si rivelò una vera e propria massa di pomice galleggiante nel mare con incorporati un gran numero di grossi fusti d'albero e tronchi che sembravano bruciati e spezzati, come colpiti dal fulmine. L'imbarcazione ebbe molte difficoltà a farsi strada; e fino a che non imboccammo l'entrata della baia di Bima, il mare fu sempre letteralmente coperto da banchi di pomice e legname galleggiante.

Il diciannove giungemmo nella baia di Bima; mentre stavamo arrivando all'ormeggio, al largo della città di Bima ci arenammo su un banco poiché il fondo, che era di otto braccia, si alzò improvvisamente. Con l'alta marea ci disincagliammo di nuovo senza alcuna difficoltà o rischio. Immagino che l'ancoraggio a Bima debba essersi notevolmente modificato, dal momento che, dove ci incagliammo, il cruiser *Ternate*, qualche mese prima, aveva dato fondo in sei braccia. Le rive della baia avevano un aspetto estremamente tetto, essendo interamente ricoperte di ceneri fin sulla cima delle montagne. Ho constatato che lo spessore delle cene-

ri, misurato in verticale nei dintorni della città di Bima, era di tre pollici e tre quarti<sup>25</sup>.

Le zattere di pomice erano sospinte dagli alisei sudorientali e dalla corrente sudequatoriale. La nave *Fairlie* dell'Onorevole Compagnia, attraversando l'Oceano Indiano in rotta per Calcutta, incontrò delle zattere tra l'1 e il 3 ottobre 1815, a circa 3600 km a ovest di Tambora, anche se l'equipaggio le attribuì erroneamente all'eruzione di un vulcano sottomarino che si trovava nelle vicinanze:

Il 1° ottobre a mezzogiorno, alla latitudine di S 13°25' e alla longitudine di E 84°0', osservammo grandi quantità di materiale galleggiante sulla superficie dell'acqua, che a noi sembrava essere alghe, ma che ci accorgemmo con stupore essere cenere, evidentemente vulcanica. Il mare ne fu ricoperto per i due giorni successivi<sup>26</sup>.

### *Le conseguenze*

Il Tambora continuò a rombare in modo intermittente almeno fino all'agosto 1819. La fase parossistica dell'eruzione svuotò rapidamente la camera magmatica e si accompagnò al collasso del vulcano: l'alta cima del Tambora, che prima raggiungeva i 4000 m (forse più di 4300, secondo Stothers, 1984) sprofondò creando una caldera larga 6 km e profonda 1 km. Oggi il bordo del cratere raggiunge solo i 2850 m sul livello del mare, di gran lunga superati dal vulcano Rinjani nella vicina isola di Lombok. Un piccolo cono vulcanico e una colata lavica, di nome Doro Afi Toi, eruttarono all'interno della caldera in un momento imprecisato tra il 1847 e il 1913. Questa attività potrebbe essere correlata con un forte terremoto registrato il 13 gennaio 1909. Non ci sono prove di eruzioni più recenti.

25. "The Asiatic Journal", August 1816, n. 2, p. 166.

26. Ivi, p. 161.

## **L'impatto sul clima e l'atmosfera**

La massa di zolfo immessa nella stratosfera dall'eruzione del Tambora è stata stimata secondo svariati metodi indipendenti, tra cui la modellizzazione delle concentrazioni di solfati nelle carote di ghiaccio polare, le misurazioni petrologiche del tefra del 1815 e l'analisi dei fenomeni ottici nell'atmosfera (Tabella 1, Figura 3). L'ordine di grandezza dei risultati varia ma, escludendo le stime più alte e più basse, le cifre si aggirano in media attorno ai 60 Tg [teragrammi, *n.d.t.*] di zolfo, vale a dire sei volte la quantità di zolfo immessa nell'atmosfera dall'eruzione del Pinantubo del 1991 (Read *et al.*, 1993). È difficile ripartire questa cifra totale tra le differenti fasi dell'eruzione, come è difficile, in particolare, determinare le frazioni derivanti dalle nubi pliniane o dalle nubi di tipo Phoenix. Si può senza dubbio ritenere che questa quantità di zolfo abbia avuto un forte impatto sul clima della regione e globale.

Nell'estate del 1815 a Londra si osservarono crepuscoli e tramonti spettacolari. Le luci del tramonto erano arancioni o rosse vicino all'orizzonte, mentre più sopra andavano dal viola al rosa, e di tanto in tanto ad esse si sovrapponevano strisce scure divergenti. Nella primavera e nell'estate 1816 nel Nord Est degli Stati Uniti si osservò una "nebbia secca" persistente. A New York si segnalò che la nebbia colorava il sole di rosso e lo schermava, di modo che si potevano vedere a occhio nudo le macchie solari. Né il vento né la pioggia dispersero quella "nebbia", e ciò permette di identificarla come un velo stratosferico di aerosol di solfati. Si dice che alcune opere di questo periodo del pittore J.M.W. Turner, in cui compaiono cieli di un livido arancione e rossi, furono ispirate dai fenomeni ottici indotti nella stratosfera dall'attività vulcanica. Ci sono anche parecchie prove della situazione meteorologica estrema determinatasi nel 1816, specialmente in primavera e in estate, nelle regioni nordorientali dell'America settentrionale e in gran parte dell'Europa. I racconti sull'"anno senza estate", il 1816, tramandati di generazione in generazione, riscuotono ancora un diffuso interesse negli Stati Uniti nordorientali. Baron (1992) ha analizzato i dati meteorologici dell'epoca in quella regione, comprendenti i valori relativi alla temperatura, alle preci-

pitazioni e alla direzione del vento. Il 4 giugno 1816 nel Connecticut si registrarono delle gelate, entro il giorno successivo la maggior parte del New England fu investita da un fronte freddo. Il 6 giugno nevicò a Albany, New York, e Dennysville (Maine), e si ebbero devastanti gelate a Fairfield (Connecticut). Il giorno dopo le forti gelate si estesero a sud fino a Trenton (New Jersey). Questi fenomeni si ripresentarono in tutti e tre i mesi successivi, accorciando drasticamente la stagione agricola e di conseguenza determinando il fallimento quasi totale di quasi tutti i principali raccolti. Un quadro attendibile di quelle perturbazioni è documentato nelle registrazioni meteo di Williamstown (Massachusetts), redatte da Chester Dewey, all'epoca professore di Matematica e Filosofia naturale al Williams College (Ma):

Le gelate qui sono estremamente rare in entrambi i mesi estivi; ma quest'anno ce ne sono state ogni mese [...] il 6 giugno, con una temperatura di circa 44' durante il giorno, nevicò parecchie volte [...] il 7 nessuna gelata, ma si ghiacciarono il terreno e, in molti posti, l'acqua [...]. Il terreno umido era ghiacciato per uno spessore di mezzo pollice e lo si sarebbe potuto tirare su tutto intorno al mais facendoci passare in mezzo le piante di mais che sarebbero rimaste in piedi. L'8 giugno si vide un po' di ghiaccio al mattino [...] la terra molto poco ghiacciata [...] il vento ancora forte e proveniente da nord ovest. I cetrioli e le altre verdure quasi distrutti [...]. Il 10 giugno, forte gelata al mattino [...]. Dieci giorni dopo la gelata, gli alberi sulle pendici delle alture, per molte miglia, apparivano strinati. Il 29 e 30 giugno qualche gelata. Il 9 luglio, gelata che uccise parte dei cetrioli. Il 22 agosto, cetrioli morti per la gelata. Il 29 agosto, forte gelata. Alcuni campi di mais nelle zone pianeggianti vennero distrutti, mentre quelli sui rilievi rimasero indenni. Nella regione pochissimo mais giunse a maturazione<sup>27</sup>.

A dar conto delle esperienze personali relative alle abnormi condizioni meteorologiche del 1816 ci sono anche dei diari. Chauncey Jerome, di Plymouth (Connecticut), scrivendo nel 1860, ricordava:

27. C. Dewey, *Results of Meteorological Observations Made at Williamstown, Massachusetts*, in "Memoirs of the American Academy of Arts and Sciences", 1821, vol. IV, pp. 387-392.

Rammento bene il 7 giugno [...] ero tutto vestito di pesanti indumenti di lana e sopra indossavo un cappotto. Le mani mi diventarono così fredde che fui costretto a lasciar giù i miei attrezzi e a infilare un paio di muffole [...]. Il 10 giugno mia moglie ritirò il bucato che, rimasto steso per terra tutta la notte prima, era irrigidito dal gelo come se fosse stato inverno (Stommel e Stommel, 1983).

Anche il Canada fu interessato dal tempo avverso e dalla stessa ondata di freddo che colpì gli Usa. A Montreal il 6 e l'8 giugno cadde la neve. La neve caduta dal 6 al 10 giugno, vicino alla città di Quebec, raggiunse i 30 cm.

Briffa e Jones (1992) hanno analizzato i dati meteorologici e le dendrocronologie per ricostruire la temperatura, la pressione e i modelli delle precipitazioni nell'Europa del 1816. Essi hanno dimostrato che quell'estate si segnala come eccezionalmente fredda, la più fredda dal 1750, data d'inizio delle loro registrazioni, e per giunta si colloca in un decennio già freddo. Le temperature estive in gran parte dell'Europa centrale e occidentale furono di 1-2° C inferiori alla media del periodo 1810-1819 e fino a 3° C inferiori alla media del periodo 1951-1970. Anche le piogge nell'estate del 1816 furono anormalmente abbondanti nella maggior parte d'Europa, fatta eccezione per l'Europa mediterranea orientale.

Le condizioni meteorologiche registrate in Irlanda sono perfettamente coerenti con il raffreddamento estivo e il riscaldamento invernale prevedibili come reazione ai veli più consistenti di aerosol di solfati dell'emisfero settentrionale:

Nel 1816 la primavera giunse insolitamente tardi, l'estate e l'autunno furono eccessivamente piovosi, freddi e nuvolosi: la pioggia caduta quell'anno, misurata con il pluviometro, fu di circa 31 pollici, un evento forse senza precedenti in questo paese; ci furono 142 giorni di pioggia, principalmente nei mesi estivi e autunnali. La temperatura media in primavera, in estate e in autunno fu di 3 gradi inferiore a quella dell'anno precedente [...] l'inverno 1816 fu insolitamente mite. Quanto a pioggia e freddo, l'anno 1817 fu fuori dalla norma quasi come il precedente<sup>28</sup>.

28. W. Harty, *An Historic Sketch of the Causes, Progress, Extent, and Mortality of the Contagious Fever Epidemic in Ireland during the Years 1817, 1818 and 1819*, Dublin, Hodges and McArthur-London, Hurst, Robinson, and Co. F. and G. Underwood, Burgess and Hill, and John Callow, London, 1820.

Successivi e più recenti studi dendrocronologici condotti da Briffa *et al.* (1998) hanno confermato questi raffreddamenti estivi su entrambe le sponde dell'Atlantico (Figura 4). Nella ricostruzione che essi fanno delle temperature estive nell'emisfero settentrionale, il 1816 è uno degli anni più freddi degli ultimi sei secoli, secondo solo al 1601 (l'anno dopo l'eruzione dell'Huaynaputina in Peru). Nell'emisfero settentrionale anche le estati del 1817 e del 1818 sono fredde in modo anomalo (occupano rispettivamente il quinto e il ventiduesimo posto nella serie di dati che copre 600 anni). Il clima rigido sembra non aver interessato, nel 1816, il Nord America occidentale (Lough, 1992; Briffa *et al.*, 1998). Briffa *et al.* (1998) hanno stimato le anomalie medie della temperatura superficiale terrestre e marina nell'emisfero settentrionale per le estati del 1816, del 1817 e del 1818 rispettivamente in -0,52, -0,44 e -0,29 K [kelvin, *n.d.t.*]. Questi valori climatici hanno una coerenza accettabile con la modellizzazione del clima effettuata da Vupputuri (1992), che ha calcolato che nel 1816 si è verificato un picco del raffreddamento superficiale a livello globale di 1 K (Figura 5).

Sembra che, almeno in alcune zone dell'Europa, si siano avuti, oltre che un'estate più fredda, anche inverni più tempestosi. Dawson *et al.* (1997) si sono avvalsi di un'ampia serie di dati meteorologici raccolti a Edimburgo a partire dal 1770 per verificare la correlazione tra la frequenza delle tempeste e le eruzioni vulcaniche di grande ampiezza. Essi hanno definito «giorno di burrasca» una giornata in cui la velocità del vento, rilevata a 10 m di altezza, per un periodo di almeno 10 minuti, è uguale a – o maggiore di – 34 nodi. Quella serie di dati, la più lunga di questo genere di cui si disponga per l'Europa, evidenzia un incremento della tempestosità invernale conseguente alle eruzioni sia dei vulcani Krakatoa ed El Chichón, sia del Tambora (la registrazione di cui gli autori si sono avvalsi arriva fino al 1990, pertanto essi non hanno potuto accertare quale sia stato l'impatto sulla Scozia dell'eruzione del Pinatubo).

La composizione chimica dei ghiacci polari fornisce ulteriori informazioni sugli impatti atmosferici delle eruzioni. Laj *et al.* (1993) hanno analizzato il ghiaccio della Groenlandia e hanno osservato che, dopo le eruzioni sia del Tambora sia del Katmai (1912), la percentuale del deposito di NO<sub>3</sub> dall'inverno alla pri-

mavera aumentò. Essi hanno attribuito il fenomeno alla condensazione e all'eliminazione di  $\text{HNO}_3$  stratosferico dalla stratosfera artica durante l'inverno e a una minore formazione di quest'ultimo durante l'estate come risultato dell'eliminazione di OH attraverso l'ossidazione di  $\text{SO}_2$ . Esaminando la stratigrafia chimica delle campionature di ghiaccio estratte in Antartide, Delmas *et al.* (1992) non hanno trovato prove che si siano verificati mutamenti nella quantità di cloro atmosferico in relazione all'eruzione del Tambora e ciò suggerisce che la massiccia quantità di cloro che si ritiene sia stata rilasciata dall'eruzione (100 Tg) sia stata rapidamente ed efficientemente scaricata nella troposfera durante l'ascesa delle nubi eruttive.

## La tragedia umana

È difficile immaginare gli effetti devastanti di un'eruzione di quella dimensione – a tanta distanza di tempo ci mancano prove certe su chi siano state e quante siano state le vittime, ma disponiamo di alcune importanti fonti coeve all'eruzione che illustrano gli eventi terribili che colpirono non solo Sumbawa, ma la vicina isola di Lombok, e forse Bali e oltre. Non ci si rese conto delle conseguenze che essi ebbero per la popolazione locale fino a che alcune navi non arrivarono nei porti di Sumbawa. Il *Benares* gettò l'ancora a Bima il 19 aprile, seguita dal *Dispatch* che, in rotta per Ambon, arrivò a Bima il 22 aprile.

### *Gli impatti a livello locale e regionale*

I primi a riscontrare le devastazioni prodottesi a Sanggir furono i membri dell'equipaggio del *Dispatch*. Avevano confuso la baia di Sanggir con quella di Bima e, dopo essersi ancorati con difficoltà, avevano mandato una barca a riva. Un ufficiale della nave incontrò il rajah di Sanggir e venne a sapere che

la maggior parte della città era stata cancellata e parecchia gente uccisa dall'eruzione; che tutto il suo paese era completamente in rovina

e i raccolti distrutti. [...] poiché fino a una distanza considerevole dalla costa esso era completamente ricoperto di pomici, cenere, tronchi e legname; le case erano rase al suolo e sommerse dalle ceneri<sup>29</sup>.

A Sumbawa Besar gli uomini dell'equipaggio di un'altra nave, scesi a terra per rifornirsi d'acqua, furono testimoni di altre distruzioni. Trovarono barche disseminate dallo tsunami nell'entroterra e molti cadaveri. Stavano prendendo il largo quando furono bloccati per tutta la notte del 12 aprile da una zattera di pomice spessa 60 cm.

Il luogotenente Philipps, mentre stava compiendo la sua missione umanitaria e di inchiesta per Sumbawa, spostandosi da Bima a Dompo deve essersi trovato di fronte a una scena di inimmaginabile desolazione:

Nel mio viaggio verso la parte occidentale dell'isola attraversai quasi tutta Dompo e buona parte di Bima. Era scioccante vedere lo stato miserabile in cui era ridotta la popolazione. Ai lati della strada c'erano ancora i resti di parecchi cadaveri e si potevano notare i punti in cui molti altri erano stati sepolti: dato che i villaggi erano quasi completamente abbandonati e le case crollate, gli abitanti sopravvissuti si erano sparpagliati in cerca di cibo<sup>30</sup>.

La scarsa igiene, la contaminazione delle fonti di approvvigionamento idrico e la malnutrizione della popolazione portarono alla diffusione di malattie tra i sopravvissuti. Avviene di frequente, infatti, che dopo le eruzioni vulcaniche ci sia un incremento delle malattie diarroiche, spesso dovuto alla contaminazione dell'acqua per la caduta della cenere:

A Dompo, da qualche tempo, l'unico mezzo di sussistenza degli abitanti sono stati il cuore di diverse specie di palma e i fusti della papaya e della piantaggine.

Dal momento dell'eruzione, una violenta dissenteria imperversa a Bima, Dompo e Sang'ir, e si è portata via tantissima gente. Gli indigeni

29. "The Asiatic Journal", February 1816, n. 1, p. 167.

30. Raffles, *The History of Java...*, cit.; Raffles, *Memoir of the Life and Public Services...*, cit.

ritengono che ciò sia dovuto al fatto di bere acqua satura di ceneri; e anche i cavalli sono morti di una malattia simile, in gran numero.

Il Rajah di Sang'ir, il giorno 3, è venuto a incontrarmi a Dampo. Stando alle sue parole, le sofferenze della gente di là sembra che siano ancora più grandi che a Dampo. La carestia è stata così grave che persino una delle sue figlie è morta di fame. Gli ho fatto dono, a nome vostro, di tre coyang di riso per i quali si è mostrato davvero molto grato. Un messaggero tornato ieri da Sambawa riferisce che la caduta di cenere è stata più pesante a Sambawa che da questa parte del Golfo, e che un numero immenso di persone è ridotto alla fame: vendono i loro cavalli e i loro bufali per metà o per un quarto di rupia di riso o mais. Tuttavia confido che l'indigenza ora sia stata alleviata, dal momento che il brigantino proveniente da Giava con sessantatre coyang di riso è arrivato a Sambawa il giorno in cui egli stava partendo<sup>31</sup>.

Sigurdsson e Carey (1992) hanno calcolato che l'eruzione abbia liberato circa 100 Tg di cloro (sotto forma di HCl) e 70 Tg di fluoro (sotto forma di HF). Il fluoro è stato prontamente adsorbito dalle particelle di cenere e verosimilmente è fluuito nel terreno, disponibile per essere assorbito dalla vegetazione. È possibile che si sia verificato un avvelenamento generalizzato da fluoro del bestiame e degli esseri umani. L'inalazione di cenere sottile probabilmente ha anche causato la diffusione di malattie respiratorie nelle aree colpite da una forte caduta di ceneri. Dopo l'eruzione del Pinatubo, parecchie centinaia di persone sfollate morirono di varie malattie nei campi profughi. Nelle prime 12 settimane dopo l'eruzione ci furono 349 morti, principalmente per morbillo (31%), diarrea (29%) e infezioni delle vie respiratorie (22%) (Surmieda *et al.*, 1992). Da affezioni simili deve essere stata colpita un'alta percentuale della popolazione di Sumbawa in seguito all'eruzione del Tambora, e probabilmente con una mortalità molto più elevata. Le stime sul numero di vittime variano considerevolmente e non sono disponibili dati veramente affidabili. Philipps ha cercato di raccoglierne alcuni:

Tra tutti i villaggi di Tomboro, quello di Tempo, abitato da circa quaranta persone, è l'unico rimasto. A Pekáté non c'è più traccia di case:

31. *Ibidem*.

delle persone che si trovavano a Sumbawa in quel momento, ne sono scampate solo 26. Dalle indagini più approfondite che sono riuscito a fare a Tomboro e Pekáté, quando si verificò l'eruzione, c'erano certamente non meno di 12.000 persone, delle quali solo 5 o 6 sono sopravvissute. In tutto il lato settentrionale e occidentale della penisola, gli alberi e la vegetazione erbacea di ogni tipo sono stati completamente distrutti, eccetto che su un'altura vicino al luogo dove sorgeva il villaggio di Tomboro: là sono rimasti ancora alcuni alberi. Sono venuto a sapere che nella notte dell'eruzione due uomini e due donne si sono rifugiati lì e si sono salvati. Ho mandato a cercarli, ma non sono ancora riuscito a contattarli; nessuno ha ancora messo piede sul lato orientale della collina<sup>32</sup>.

Zollinger (1855) arrivò alla conclusione che circa 10.000 persone morirono durante l'eruzione, probabilmente per i flussi piroclastici, altre 38.000 morirono di inedia a Sumbawa. Egli stimò che ci siano stati altri 10.000 morti per malattie e fame a Lombok. Le statistiche più ampiamente citate oggi sono tratte dal lavoro di Petroeshevsky (1949), che ha stimato in 48.000 le vittime di Sumbawa e in 44.000 quelle di Lombok, rispettivamente circa il 35% e il 23% della popolazione totale delle isole. Tuttavia, Tanguy *et al.* (1998) hanno contestato le cifre di Petroeshevsky, sostenendo che, in particolare quelle relative a Lombok, risultano «del tutto infondate» in quanto basate su fonti non verificabili. Ritengono che i dati di Raffles e di Zollinger siano i più affidabili, ma sottolineano che a Bali e anche nella zona orientale di Giava possono esserci stati molti altri morti causati da carestia e malattie. Essi avanzano a titolo interlocutorio le cifre di 11.000 morti causati da ricadute di ceneri e flussi, e 49.000 per carestie ed epidemie. Se accettiamo il bilancio di Philipps come il più vicino all'evento e il più preciso, modificandolo di poco si può far salire a 12.000 il numero di coloro che furono uccisi direttamente dall'eruzione. La cifra totale di 61.000 morti fa dell'eruzione del Tambora la più esiziale mai vista nella storia. Nel database dei disastri causati da eruzioni vulcaniche redatto da Tanguy *et al.* (1998), che vede al primo posto quella del Laki nel 1783 e all'ultimo quella del Monserrat nel 1997, il Tambora risulta re-

32. *Ibidem.*

sponsabile di quasi il 30% del totale dei morti mai causati da eruzioni.

Semmai è verosimile che le cifre relative alle vittime citate qui sopra siano inferiori a quelle reali, dal momento che è probabile che ci siano stati molti morti a Bali e forse anche nella zona orientale di Giava, sulla quale però ci sono informazioni contraddittorie:

I tetti delle case di Bangeewanzee [Banyuwangi, *n.d.t.*] crollarono sotto il peso delle ceneri [...]. La maggior parte degli abitanti di Sumbawa che non è rimasta sepolta deve esser ridotta alla fame ed è destinata a patire ancora molto, visto che le colture di Bali e della parte orientale di Giava sono andate distrutte<sup>33</sup>.

A Banyuwangi e nell'area adiacente dell'isola, dove la nube di ceneri si è completamente scaricata, i danni furono più estesi. Una grande quantità di riso fu totalmente distrutta e più o meno tutta la piantagione subì dei danni. Anche 126 cavalli e 86 capi di bestiame morirono, principalmente perché non ci fu foraggio per un mese dopo l'eruzione<sup>34</sup>.

I danni furono notevoli anche a Moressa (vicino a Ujung Pandang, Sulawesi, oppure forse nell'isola di Moresa, al largo della costa sudoccidentale di Kalimantan). Il comandante del *Benares* annotò:

Approdamo a Moressa vidi il suolo coperto da uno strato di cenere di un pollice e un quarto. Erano molto preoccupati per il raccolto del riso ancora nel campo perché le piantine erano state completamente schiacciate e sommerse dalle ceneri; negli stagni di Moressa i pesci erano morti e galleggiavano in superficie, e molti piccoli uccelli giacevano morti per terra<sup>35</sup>.

Più lontano, a Giava, le colture furono risparmiate perché «dappertutto i coltivatori presero la misura precauzionale di scrollare via dal riso che stava crescendo le ceneri mentre cade-

33. Lettera datata agosto 1815, in "The Asiatic Journal", April 1816, n. 1, pp. 322-323.

34. Raffles, *Memoir of the Life and Public Services...*, cit.

35. "The Asiatic Journal", August 1816, n. 2, p. 166.

vano»<sup>36</sup>. Anche le pesanti piogge del 17 aprile contribuirono a lavar via la cenere. Questo «evitò molti danni alle colture, e scongiurò la diffusione di un'epidemia che stava incominciando a prender piede. Ciò accadde soprattutto a Batavia dove, nei due o tre giorni prima che iniziasse a piovere, molte persone furono assalite dalla febbre»<sup>37</sup>.

### *Gli impatti a livello globale*

Ben oltre l'Indonesia, la gravità dell'epidemia di tifo che infuriò per l'Europa sudorientale e il Mediterraneo orientale tra 1816 e 1817 è stata attribuita al modello di anomalie climatiche di cui abbiamo parlato. Sempre nel 1816-1817 scoppiò in Bengala la prima grande epidemia di colera. Lamb (1995) è giunto alla conclusione che, considerando tutte queste epidemie e carestie, il periodo 1816-1817 vide uno dei maggiori disastri mondiali associati a un cambiamento climatico. Ma questa asserzione regge a un esame approfondito?

Le micidiali gelate in New England del 1816 distrussero quasi completamente le principali colture. Più a sud, nella Carolina del Nord, vicino al cuore della produzione americana di grano, il bilancio della stagione del raccolto, al 1° di settembre, fu il seguente:

Il tempo molto freddo e secco in primavera e in estate danneggiò gravemente i nostri campi e fu con il cuore gonfio di tristezza e inquietudine che facemmo il secondo taglio del fieno e la raccolta del mais: erano così scarsi che ne raccogliemmo solo un terzo di quanto normalmente facciamo, e ci chiedevamo come avremmo potuto tirare avanti fino al raccolto dell'anno successivo (Fries, 1947).

Durante l'inverno 1816-1817 nel New England molto bestiame morì per mancanza di foraggio. Baron (1992) ricorda che quella regione era probabilmente particolarmente esposta alle calamità perché, soprattutto nel Nord del New England, l'agricoltura già

36. Raffles, *Memoir of the Life and Public Services...*, cit.

37. *Ibidem*.

veniva praticata su terreni marginali dal punto di vista climatologico e subiva una concorrenza crescente da parte del Midwest degli Stati Uniti e del Canada centrale.

In Canada, malgrado le condizioni meteorologiche avverse, la popolazione sfuggì a una grave emergenza sociale grazie all'embargo posto sull'esportazione di cereali tra il luglio e il settembre 1816, e grazie al favorevole rapporto tra popolazione e risorse (Post, 1977). Nel frattempo, in Europa, anche quella del 1816 fu un'estate infelice: ne è un riflesso la poesia *Il Buio* di Lord Byron (una parte della quale è citata all'inizio di questo articolo). Byron la scrisse mentre si trovava a Ginevra e meditava cupamente sulla piega sanguinaria presa dalla storia europea durante le guerre napoleoniche. Si dice che la sua compagna Mary Shelly si sia ispirata a quei tempi drammatici nello scrivere *Frankenstein*. Le temperature fresche e le pesanti piogge causarono i pessimi raccolti di parte delle Isole britanniche occidentali, e in Galles le famiglie percorrevano lunghe distanze, come fossero profughi, alla ricerca di qualcosa da mangiare. La carestia fu più diffusa nel Nord e nel Sud Ovest dell'Irlanda, in seguito ai magri raccolti di grano, avena e patate. Ne furono colpite però anche molte altre zone d'Europa:

Da ogni parte del Continente sono giunte notizie sconcertanti sull'insolita piovosità della stagione; di conseguenza le proprietà agricole sono state mandate in rovina dalle inondazioni e dai danni irreparabili prodotti ai vigneti e alle colture di mais. In parecchie province dell'Olanda, i ricchi pascoli sono sommersi completamente dall'acqua, e ovviamente si prevedono e si paventano scarsità e aumento dei prezzi. L'interno della Francia ha patito enormemente per le inondazioni e le pesanti piogge<sup>38</sup>.

Se mai l'attuale tempo piovoso continuasse, il mais dovrà inevitabilmente essere buttato e gli effetti di una simile calamità in questo momento non possono essere altro che rovinosi per gli agricoltori e anche per la popolazione in generale<sup>39</sup>.

38. "The Norfolk Chronicle", 20 July 1816.

39. "The Times", 20 July 1816.

Post (1977) definisce quella del 1816-1817 come l'ultima grave crisi di sussistenza del mondo occidentale – nel 1816-1817 si assistette alla peggiore carestia verificatasi da più di un secolo. Utilizzando i prezzi dei cereali come indicatori dell'andamento dei raccolti nella seconda metà degli anni Dieci dell'Ottocento, egli ha dimostrato che essi raddoppiarono tra il 1815 e il 1817. Ciò colpì duramente la popolazione, poiché il prezzo del pane – la voce principale dei bilanci popolari – crebbe al di sopra delle possibilità anche della maggioranza degli occupati con un salario normale (Post, 1977). Pur riconoscendo il ruolo delle nuove forze economiche e politiche, e l'influenza dei mutamenti prodotti dal conflitto e del riassetto conseguente alle guerre napoleoniche, nel favorire la catastrofe, egli ha risolutamente sostenuto che gli sconvolgimenti climatici dell'emisfero hanno fatto precipitare la carestia e la penuria di cibo del 1816-1817, dando il via al panico finanziario e alla depressione dei due anni successivi. «I fallimenti dei raccolti del 1816 giunsero nel momento meno opportuno, e fecero sì che una crisi di sussistenza si sovrapponesse non solo a un'economia in stagnazione ma anche a una società, quella occidentale, ancora sconvolta per gli anni di guerra» (Post 1977).

La crisi fu pesante nei territori tedeschi, soprattutto nelle campagne e nel Sud Est, dove i prezzi del cibo superarono quelli delle aree urbane e settentrionali. Carl von Clausewitz, che fece un viaggio nella Prussia renana nella primavera del 1817, si trovò di fronte panorama desolante:

L'autore che viaggiava a cavallo nella regione di Eifel nella primavera 1817, pernottando nei villaggi e nelle cittadine, spesso ebbe un'immagine straziante di questa miseria, poiché in queste aree abitavano le classi più povere della regione. Vide figure macilente riconoscibili a fatica come esseri umani aggirarsi per i campi alla ricerca di qualcosa da mangiare, tra le patate lasciate nel terreno e già mezze marce che mai erano giunte a maturazione (Von Clausewitz, 1922).

La reazione popolare a quella disastrosa situazione si esplicò tra l'altro in manifestazioni nei mercati dei cereali e di fronte alle panetterie e, in alcune regioni, in tumulti, saccheggi e incendi dolosi (Post, 1977). Nel mese di maggio 1816, scoppiarono dei tu-

multi in varie parti dell'East Anglia, tra cui a Norfolk, Suffolk, Huntingdon e Cambridge. Le azioni di protesta inclusero la distruzione di trebbiatrici e l'incendio di fienili e granai. La sollevazione culminò nella formazione di gruppi di predoni rivoltosi, armati di massicci bastoni costellati di punte di ferro e muniti di vessilli con la scritta "Pane o sangue". Si varò una legge anti-sommossa che prevedeva la pena di morte e i disordini vennero sedati.

Freddo e umidità, mancanza di igiene e infestazioni di pidocchi si associano da sempre alle epidemie di tifo; anche la guerra e la carestia sono da sempre tipici fattori che favoriscono l'insorgere di violente epidemie di tifo. Un dottore che lavorava al Belfast Fever Hospital, W. Harty, in una lettera scritta nell'aprile 1818 descrisse accuratamente, dal punto di vista epidemiologico, la diffusione del tifo in Irlanda:

Ritengo che i fattori predisponenti dell'attuale epidemia siano stati la grande e generalizzata indigenza delle classi più povere, dovuta alla penuria che seguì al cattivo raccolto del 1816, e lo stato di depressione del commercio e della produzione in tutte le attività manifatturiere. Le cattive condizioni di salute derivanti dalla carenza e dalla cattiva qualità del cibo; la mancanza di pulizia dei poveri sia a livello personale che nelle abitazioni [...]. Ritengo che il contagio sia stato rapidamente diffuso dalle numerose persone che vagavano in cerca di qualcosa da mangiare e anche dal fatto che le istituzioni che distribuivano ai poveri minestra o altri viveri erano affollate da masse di persone, molte delle quali probabilmente provenienti da abitazioni infettate o ai primi stadi della malattia<sup>40</sup>.

Harty calcolò che in Irlanda l'epidemia colpì circa 800.000 persone e che circa 44.300 «morirono per l'aggressione combinata di carestia, dissenteria e febbre». L'epidemia di tifo afflisse quasi ogni città e villaggio dell'Inghilterra e fu segnalata in molte città della Scozia (Post, 1977). L'Europa nel 1816, dopo 25 anni di guerra, stava già vivendo un'emergenza sociale ed economica, non da ultimo per l'improvviso affacciarsi sul mercato del lavoro di svariati milioni di uomini in seguito alla smobilitazione degli

40. Harty, *An Historic Sketch...*, cit., pp. 158-159.

eserciti. Questi sconvolgimenti determinarono una situazione di vulnerabilità, e il sommarsi del cattivo tempo con la migrazione dovuta alla carestia e con la malnutrizione della popolazione si sarebbe rivelato un presupposto estremamente favorevole allo sviluppo di un'epidemia. Sembra plausibile che l'eruzione del Tambora e gli effetti globali che essa ebbe sul clima abbiano effettivamente svolto un ruolo nella comparsa di tifo, dissenteria e di altre malattie nel periodo 1816-1819. Tuttavia, le prove a favore dell'esistenza di una connessione tra il cambiamento climatico e lo scoppio del colera in Bengala sono deboli. Secondo Pant *et al.* (1992), il 1816 sembra sia stato un anno di normali piogge monsoniche e in quel paese non furono segnalate né siccità né inondazioni. Per di più, è convinzione generale che l'epidemia si sia propagata in seguito a dei movimenti di truppe in India che costrinsero le persone ad andarsene dai luoghi dove la malattia era endemica, e che l'epidemia non raggiunse l'Europa prima del 1831-1832 (Pollitzer, 1959).

## Una contestualizzazione dell'eruzione del Tambora

L'eruzione del Tambora del 1815 è classificata come la più grande eruzione *conosciuta* da 2000 anni a questa parte. In termini di magnitudo si colloca tra la più grande eruzione dell'Ignimbrite campana, prodotta dalla caldera dei Campi Flegrei in Italia ( $2,7 \times 10^{14}$  kg)  $\approx 40.000$  BP [*Before Present*, prima del tempo presente, *n.d.t.*], e l'eruzione "minoica" di Santorini ( $3,3 \times 10^{13}$  kg) del  $\approx 36.000$  BP. Tra gli eventi paragonabili a quello del Tambora in termini di dimensione si annoverano l'eruzione del Baitou sul confine tra Corea e Cina settentrionale del  $\approx 970$  d.C., quella del Kikai (Giappone) del  $\approx 6300$  BP, e quella del Mount Mazama (Oregon), meglio noto come Crater Lake, del  $\approx 7600$  BP. Decker (1990) rileva che gli eventi di grandezza uguale o maggiore a quella del Tambora si verificano con una frequenza di 2-4 per millennio. Tuttavia, se si considerano le eruzioni note, di grandezza dai  $5 \times 10^{13}$  kg in su, verificatesi negli ultimi 2000 anni, se ne dedurrebbe una frequenza più vicina a 1 ogni 1000 anni (Pyle,

1995). Ma non tutte le eruzioni sono state identificate. In particolare, i dati forniti dai carotaggi indicano un massiccio strato di solfati per il 1259: si tratta del più forte marker di attività vulcanica degli ultimi 7000 anni presente negli archivi del Gisp2 (Greenland Ice Sheet Project 2) (Zielinski, 1995). Non si conosce il vulcano che lo ha prodotto, ma è certamente plausibile che si sia trattato di un'eruzione della dimensione di quella del Tambora. Se si combinano queste informazioni, e si tiene conto delle incertezze nella valutazione della grandezza delle eruzioni, si giunge a una stima più attendibile della frequenza degli eventi di  $>5 \times 10^{13}$  kg, vale a dire di 1-2 ogni 1000 anni.

Le anomalie dendrocronologiche correlate con altri dati climatologici evidenziano parecchie estati fredde nell'emisfero settentrionale, che sono probabilmente la conseguenza di eruzioni vulcaniche. Come abbiamo visto, nell'emisfero settentrionale l'eruzione del Tambora fu seguita da estati fredde. Tuttavia, diversamente da quanto ci si potrebbe aspettare, il grafico mostra che l'estate più fredda si ebbe nel 1600, l'anno successivo all'eruzione del vulcano Huaynaputina in Perù. Quest'ultima, benché sia stata di grandezza inferiore a quella del Tambora e si sia verificata a una latitudine più alta (nell'emisfero meridionale), sembra responsabile di un pronunciato raffreddamento estivo, di circa 0,8 K, nell'emisfero settentrionale. Molti dei valori che vengono comparati nella Tavola 2 si basano su entrambe le serie di dati [menzionate sopra, *n.d.t.*]. La Tavola 2 evidenzia in particolare la dimensione e la portata dell'impatto sull'uomo dell'eruzione del Tambora. Per raffronti tra le alterazioni del clima di origine vulcanica e quelle dovute ad altri fattori – per esempio, aumento del gas serra, variabilità del sole (Hansen *et al.*, 1997; Crowley, 2000).

## Sintesi e implicazioni

I racconti dei testimoni oculari forniscono un quadro nitido della terrificante devastazione prodottasi a Sumbawa e nelle isole vicine durante e dopo l'eruzione. Si stima che 61.000 persone persero la vita solo a Sumbawa e Lombok. La violenta eruzione di

magma intermedio carico di gas di 50 km cubici di DRE (roccia densa equivalente) immise circa 60 Tg di zolfo nella stratosfera. Ciò si tradusse in un picco del carico di aerosol di solfati nella stratosfera che raggiunse i 200 Tg e che a quel tempo venne osservato in tutto il globo sotto forma di vari fenomeni ottici atmosferici. Prove che collegano l'eruzione agli eventi meteorologici estremi registrati in Europa e in Nord America si trovano nel modello di clima osservato nell'emisfero settentrionale (più freddo durante l'estate e più caldo e tempestoso durante l'inverno). È degno di nota che alcuni di coloro che misero per primi in discussione che il freddo degli anni Dieci dell'Ottocento andasse attribuito a un'attività vulcanica, ritennero che l'inverno caldo delle zone settentrionali nel 1816 e le basse temperature predominanti prima dell'eruzione costituissero una prova contraria all'eziologia vulcanica dei cambiamenti climatici. Oggi noi constatiamo che il modello spaziale e temporale delle temperature superficiali nel periodo 1815-1817 è coerente tanto con le recenti osservazioni successive all'eruzione del Pinatubo quanto con i risultati della modellizzazione (Kirchner *et al.*, 1999). Il clima freddo prima del 1815 può anche essere stato causato in parte da un velo di aerosol nella stratosfera, di dimensione analoga a quello del Krakatoa, dovuto a un'eruzione sconosciuta prodottasi all'equatore nel 1809 (Dai *et al.*, 1991; Chenoweth, 2001). Ciò solleva la questione della possibilità o meno che ripetute eruzioni ad alto contenuto di zolfo siano in grado di sconvolgere il sistema climatico per un periodo più lungo di 1-2 anni, cioè della durata dei raffreddamenti osservati dopo singole eruzioni, come quella del Krakatoa nel 1883 o del Pinatubo nel 1991. Questa sovrapposizione di effetti, in particolare, si ritiene sia stata un importante fattore di influenza della variabilità climatica su scala decennale durante la Piccola glaciazione (Crowley, 2000), specialmente nel corso del diciassettesimo secolo, quando alcune eruzioni non identificate risulta abbiano causato significativi episodi di raffreddamento estivo, evidenziati dalla registrazione dendrocronologica relativa all'emisfero settentrionale.

Esistono solide argomentazioni a sostegno di una connessione tra le condizioni meteorologiche estreme verificatesi in parti dell'emisfero settentrionale, gli scarsi raccolti del 1816 e la con-

seguinte impennata dei prezzi dei cereali in Europa e in America. Gli sconvolgimenti economici, demografici e politici seguiti alle guerre napoleoniche determinarono situazioni che esacerbarono la crisi agricola, ingenerando carestia, malattie epidemiche ed altre calamità sociali in molte parti del mondo occidentale. Post (1977) si spinge oltre e suggerisce che la serie di disordini prodottisi a livello sociale ed economico in quegli anni diede il via a uno spostamento politico a destra, specialmente in Francia e in Germania: «Le poche fragili soluzioni di stampo liberale affacciatesi timidamente nel 1815-1816 svanirono in un clima di diffidenza e paura nel 1818-1820». Egli conclude che la reazione politica dei governi europei alle epidemie, alla depressione dei commerci, alla disoccupazione, alla fame, ai disordini, all'accattonaggio e al vagabondaggio diffusi, e all'emigrazione su vasta scala «può essere considerata l'ultimo anello di una catena di eventi che cominciò con gli effetti meteorologici delle nubi di polvere vulcanica del 1815».

È diffusa l'idea che sia improbabile che oggi le eruzioni vulcaniche abbiano conseguenze così spaventose, perché la comunità internazionale dispone di modalità di risposta collettiva ai disastri. Tuttavia, basta solo considerare l'elenco delle recenti carestie che hanno afflitto molte regioni africane, e la lenta e spesso inefficace risposta internazionale, per rendersi conto che il mondo moderno è lungi dall'essere immune agli effetti potenzialmente catastrofici di grandi eruzioni vulcaniche come quella esplosiva del vulcano Tambora nel 1815. Il traffico aereo regionale potrebbe venir interrotto per giorni o settimane durante e in seguito a un'eruzione del genere e, in particolare, la cenere sia a terra che in aria impedirebbe di raggiungere l'area colpita intorno al vulcano. L'impatto economico derivante da un disastro simile su scala regionale potrebbe anche avere ripercussioni a livello globale.

Di che tipo potrebbero essere i fenomeni precursori di un evento futuro della dimensione di quello del Tambora? Conviene notare che l'eruzione critica del Tambora, nel 1815, fu preceduta da tre anni di attività precursoria, che annoverò estrusioni minori di cenere. Purtroppo non disponiamo quasi per nulla di informazioni circa l'esistenza o meno di una progressione in questi segnali, per esempio in termini di frequenza e ampiezza dell'attività e-

splosiva, di terremoti avvertiti, o di modalità o composizione delle emissioni di gas. Tre anni costituiscono un periodo abbastanza lungo, più lungo per esempio delle varie settimane di attività precursoria registrata per il Pinantubo nel 1991. Una delle partite aperte della vulcanologia è l'elaborazione di metodi affidabili per prevedere la natura e i tempi delle eruzioni e insieme ciò che occorre per comunicare in modo efficace le strategie di gestione del rischio alle persone interessate. È molto difficile valutare come una popolazione potrebbe far fronte a diversi anni di incertezza che sfociassero in un evento potenzialmente devastante dell'ampiezza di quello del Tambora. Altrettanto problematico è determinare le probabili diverse dimensioni delle eruzioni che si potrebbero verificare in un vulcano in agitazione. Quello che possiamo dire è che c'è un 10% di probabilità che un'eruzione dell'ampiezza di quella del Tambora si verifichi da qualche parte nei prossimi 50 anni e che è verosimile che ciò avvenga in Indonesia piuttosto che in qualsiasi altro paese.

## **Ringraziamenti**

Sono grato a Owen Tucker che ha prodotto la maggior parte dei grafici di questo saggio, a David Pyle per i nostri stimolanti dibattiti e ai referees anonimi per i commenti sul manoscritto originale. Questo articolo è dedicato alla memoria di Dick Chorley (1927-2002), uno studioso poliedrico e un collega generosissimo e allegro.

Tab. 1

**Stime del contenuto di zolfo dell'eruzione del Tambora del 1815**

<b>Metodo</b>	<b>Contenuto di zolfo</b>	<b>Riferimenti bibliografici</b>
Petrologico*	10	Devine J.D. <i>et al.</i> , 1984
Petrologico*	43	Sigurdsson H., Carey S., 1992
Stime della profondità ottica basate su osservazioni astronomiche	60	Stothers R.B. (1984)
Carota di ghiaccio antartico	>49	Legrand M., Delmas R.J., 1987
Carota di ghiaccio antartico	120	Langway C.C., Jr., Clausen H.B., Hammer C.U., 1988
Carota di ghiaccio antartico	100	Delmas R.J., 1992
Carota di ghiaccio della Groenlandia	60-80	Clausen H.B., Hammer C.U., 1988
Carota di ghiaccio della Groenlandia	28	Zielinski G.A., 1995
Estrapolazione di dati petrologici sperimentali	98	Scaillet B. <i>et al.</i> , 1998

\*Contenuto differenziale di zolfo in matrice vetrosa e inclusioni magmatiche, in relazione alla magnitudo dell'eruzione.

*Tab. 2*  
**Comparazione tra alcune eruzioni vulcaniche  
 dei due millenni passati**

Anno eruzione e vulcano	Altezza colonna (km) <sup>a</sup>	Magnitudo (kg) <sup>b</sup>	Contenuto di zolfo (Tg S) <sup>c</sup>	Anomalia della temperatura estiva nell'emisfero settentrionale (K) <sup>d</sup>	Vittime <sup>e</sup>
≈181 Taupo	51	$7.7 \times 10^{13}$	≈6,5	?	Improbabili
≈969 Baitoushan	25	$5.8 \times 10^{13}$	>2	?	?
≈1258 Ignoto	?	?	>100	?	?
≈1452 Kuwae	?	$>8 \times 10^{13}$	≈40	0,5	?
1600 Huaynaputina	46	$2,1 \times 10^{13}$	23	-0,8	≈1400
1815 Tambora	43	$1,4 \times 10^{14}$	28	-0,5	>61.000
1883 Krakatoa	25	$3,0 \times 10^{13}$	15	-0,3	36.600
1902 Santa María	34	$2,2 \times 10^{13}$	11 <sup>f</sup>	Nessuna anomalia	7000-13.000
1912 Katmai	32	$2,5 \times 10^{13}$	10	-0,4	2

1980 Sant'Elena	19	$7,1 \times 10^{11}$	0,5	Nessuna anomalia	57
1982 El Chichón	32	$3,0 \times 10^{12}$	3,5	Nel rumore	>2000
1985 Nevado del Ruiz	27	$4,5 \times 10^{10}$	0,35	Nessuna anomalia	23.000
1991 Pinatubo	34	$1,3-1.8 \times 10^{13}$	10	<0,5	1202

### Note

<sup>a</sup> Massime altezze della colonna eruttiva nella fase pliniana, stimate da Carey e Sigurdsson (1989), eccetto che per il Pinatubo, il Baitoushan e lo Huanaputina, per i quali si vedano rispettivamente Holasek *et al.* (1996), Horn e Schmincke (2000) e Adams *et al.* (2001).

<sup>b</sup> Magnitudo totale dell'eruzione nelle molteplici fasi dell'eruzione e combinando la caduta di ceneri della nube pliniana e di tipo Phoenix e i depositi di flusso piroclastico associati, ove possibile; la maggior parte dei dati sono tratti da Carey e Sigurdsson (1989), e da Pyle (2000), e dai riferimenti forniti per l'altezza della colonna. Per il Kuwae, si veda anche Monzier *et al.* (1994).

<sup>c</sup> Contenuto di zolfo della stratosfera stimato - per le eruzioni dal 1980 in poi - sulla base dei dati del Total Ozone Mapping Spectrometer, e - per le eruzioni precedenti - sulla base dei dati forniti dai carotaggi del ghiaccio e dalle osservazioni astronomiche riferiti da Zielinski (1995) e De Silva e Zielinski (1998); si noti che il valore che qui viene riportato per il Tambora è quello citato da Zielinski (1995) per coerenza con gli altri presenti in questa tabella, ma al proposito si rimanda al testo e alla Tabella 1.

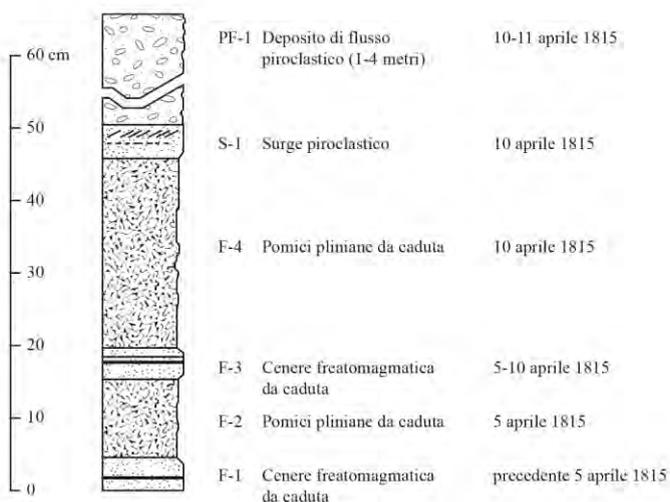
<sup>d</sup> Stima dell'anomalia della temperatura estiva nell'emisfero settentrionale ricavata dalle dendrocronologie riportate da Briffa *et al.* (1998) per le eruzioni precedenti a quella del Sant'Elena; si noti che altri rilevamenti indicano per il 1903 un raffreddamento della temperatura nell'emisfero settentrionale di  $\approx 0,2$  K.

<sup>e</sup> Stime combinate della mortalità per varie cause di morte sulla base della compilazione di Tanguy *et al.*; ciò vale per tutte le eruzioni eccetto che per quella del Tambora (per la quale si veda il testo) e per quella dello Huaynaputina, per il quale sono utilizzate le cifre citate da Simkin e Siebert (1994).

<sup>f</sup> Il 1902 fu un anno memorabile per il vulcanismo: ci furono le due grandi eruzioni del vulcano La Pelée (Martinica), del Soufrière Hills (isola di Montserrat) e quella del Santa María (Guatemala), dunque il marker dei solfati di origine vulcanica nei dati forniti dai carotaggi può rappresentare una ricaduta di una qualsiasi combinazione dei veli di aerosol di queste diverse eruzioni.

Fig. 1

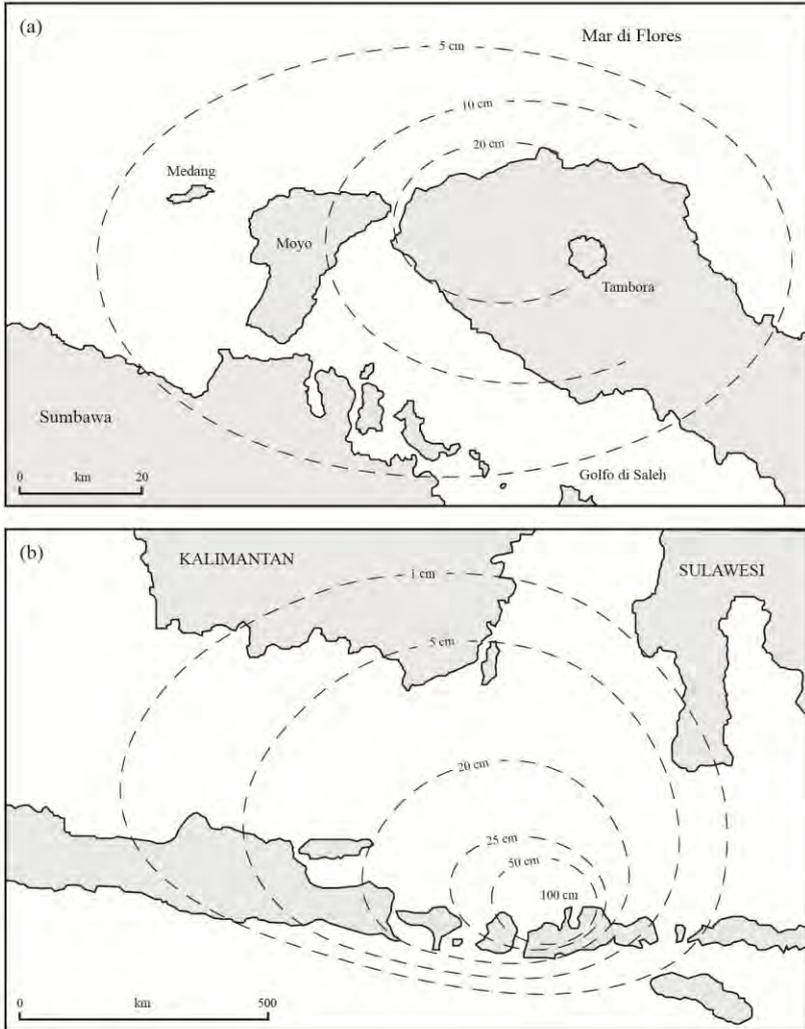
Stratigrafia dei depositi di tefra relativi all'eruzione del Tabora registrati a Gambah, a 25 km dalla cima del vulcano.



Fonte: Rielaborazione da Sigurdsson e Carey, 1989, con l'autorizzazione di Springer-Verlag GmbH.

Fig. 2

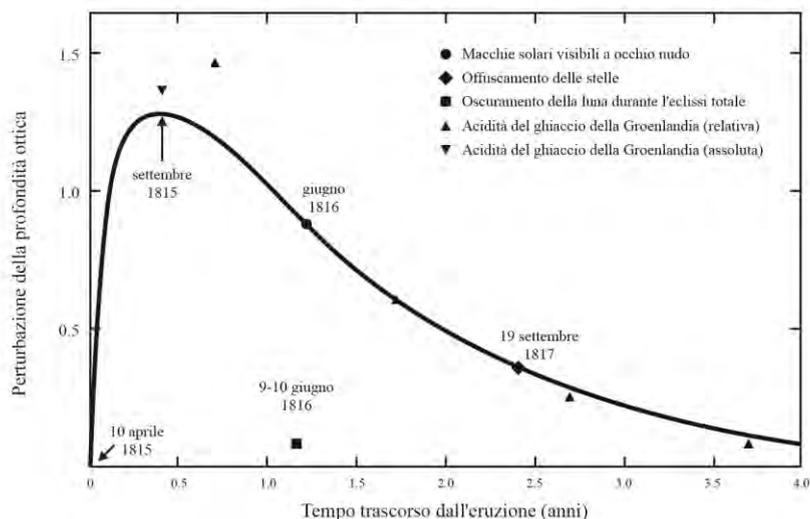
Carte delle isopache: (a) carta delle isopache dei depositi di caduta pliniani e co-ignimbrici dell'eruzione del Tambora 1815, F-4 (in centimetri); (b) carta delle isopache della caduta di ceneri a lungo raggio dalla nube di tipo Phoenix, sulla base dei resoconti coevi sugli effetti dell'eruzione.



Fonti: (a) Rielaborazione da Sigurdsson e Carey, 1989, con l'autorizzazione di Springer-Verlag GmbH; (b) rielaborazione da Self, Rampino, Newton Wolff, 1984, con l'autorizzazione della Geological Society of America.

Fig. 3

Andamento nel tempo, dopo l'eruzione, delle profondità ottiche nella banda visibile (rispetto allo sfondo) alle latitudini settentrionali, basata su osservazioni astronomiche e sul deposito di solfati nel ghiaccio.

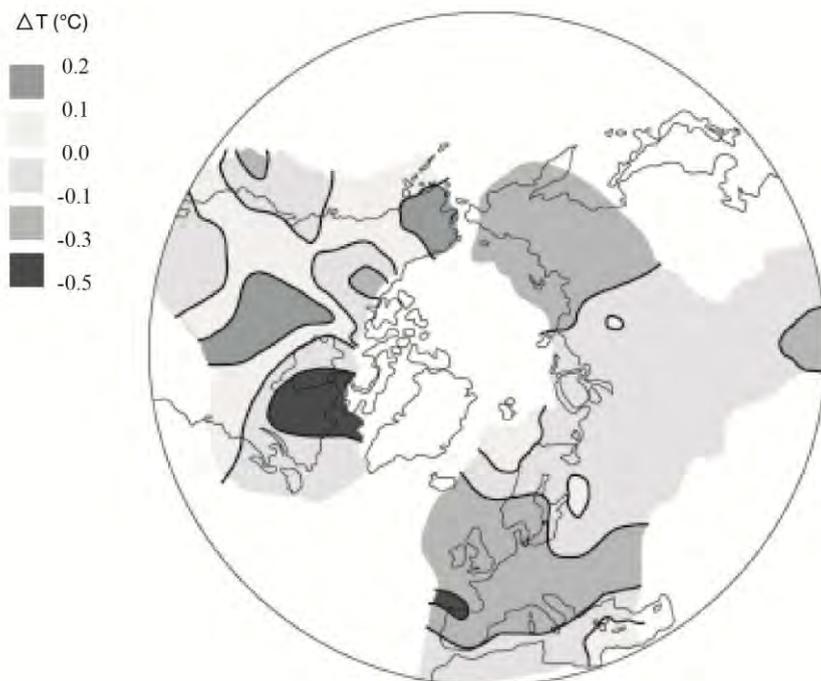


Nota: Zielinski (1995) stima un range più ridotto di profondità ottiche, da 0.14 a 0.35, sulla base dei dati forniti dai carotaggi del Gisp2 (Greenland Ice Sheet Project 2).

Fonte: Stothers (1984), con l'autorizzazione di "Science".

Fig. 4

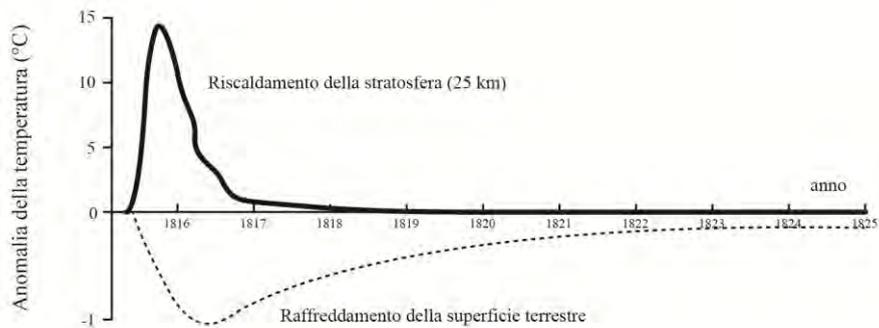
Ricostruzione delle anomalie della temperatura superficiale calcolate sulla base della densità del legno tardivo negli anelli di accrescimento, estate 1816.



Fonte: Briffa *et al.*, 1998.

Fig. 5

**Modellizzazione dei cambiamenti delle temperature della stratosfera e della superficie del globo conseguenti all'eruzione del Tambora.**



Fonte: Dati tratti da Vupputuri, 1992.

## Riferimenti bibliografici

- Adams N.K., de Silva S.L., Self S., Salas G., Schubring S., Permenter J.L., Arbesman K. (2001), *The Physical Volcanology of the 1600 Eruption of Huaynaputina, Southern Peru*, in "Bulletin of Volcanology", vol. 62, n. 8, pp. 493-518. DOI: 10.1007/s004450000105
- Baron W.R. (1992), 1816 in *Perspective: the View from the North-eastern Usa*, in Harington C.R. (a cura di), *The Year without a Summer? World Climate in 1816*, Ottawa, Canadian Museum of Nature, pp. 124-144.
- Briffa K.R., Jones P.D. (1992), *The Climate of Europe during the 1810s with Special Reference to 1816*, in Harington C.R. (a cura di), *The Year without a Summer? World Climate in 1816*, Ottawa, Canadian Museum of Nature, pp. 372-391.
- Briffa K.R., Jones, P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.J. (1998), *Influence of Volcanic Eruptions on Northern Hemisphere Summer Temperature over the past 600 Years*, in "Nature", vol. 393, n. 6684, pp. 450-455. DOI: 10.1038/30943
- Chenoweth M. (2001), *Two Major Volcanic Cooling Episodes Derived from Global Marine Air Temperature, AD 1807-1827*, in "Geophysical Research Letters", vol. 28, n. 15, pp. 2963-2966. DOI: 10.1029/2000GL012648
- Clausen H.B., Hammer C.U. (1988), *The Laki and Tambora Eruptions as Revealed in Greenland Ice Cores from 11 Locations*, in "Annals of Glaciology", vol. 10, pp. 16-22.
- Clausewitz C. von (1922), *Politische Schriften und Briefe*, a cura di Hans Rothfels, Munich, Drei Masken.
- Crowley T.J. (2000), *Causes of Climate Change over the past 1000 Years*, in "Science", vol. 289, n. 5477, pp. 270-277. DOI: 10.1126/science.289.5477.270
- Dai J., Mosley-Thompson E., Thompson L.G. (1991), *Ice Core Evidence for an Explosive Tropical Volcanic Eruption 6 Years Preceding Tambora*, in "Journal of Geophysical Research: Atmospheres", vol. 96, n. D9, pp. 17361-17366. DOI: 10.1029/91JD01634
- Dawson A.G., Hickey K., McKenna J., Foster I.D.L. (1997), *A 200-Year Record of Gale Frequency, Edinburgh, Scotland*:

- Possible Link with High-Magnitude Volcanic Eruptions*, in "The Holocene", vol. 7, n. 3, pp. 337-341. DOI: 10.1177/095968369700700310
- Decker R.W. (1990), *How Often Does a Minoan Eruption Occur?*, in Hardy D.A., Keller J., Galanpoulos V.P., Flemming N.C., Druitt T.H. (a cura di), *Thera and the Aegean World III. Volume 2 (Earth Sciences)*, London, The Thera Foundation, pp. 444-454.
- Delmas R.J., Kirchner S., Palais J.M., Petit J.R. (1992), *1000 Years of Explosive Volcanism Recorded at the South Pole*, in "Tellus", vol. 44B, n. 4, pp. 335-350. DOI: 10.1034/j.1600-0889.1992.00011.x
- De Silva S.L., Zielinski G.A. (1998), *Global Influence of the AD 1600 Eruption of Huaynaputina, Peru*, in "Nature", vol. 393, n. 6684, pp. 455-458. DOI: 10.1038/30948
- Devine J.D., Sigurdsson H., Davis A.N., Self S. (1984), *Estimates of Sulfur and Chlorine Yield to the Atmosphere from Volcanic Eruptions and Potential Climatic Effects*, in "Journal of Geophysical Research: Solid Earth", vol. 89, n. B7, pp. 6309-6325. DOI: 10.1029/JB089iB07p06309
- Fries A.L. (a cura di) (1947), *Records of the Moravians in North Carolina 1752-1879*, Raleigh, NC, State Department of Archives and History, vol. VII, pp. 294-313.
- Hansen J. et al. (1997) *Forcings and Chaos in Interannual to Decadal Climate Change*, in "Journal of Geophysical Research: Atmospheres", vol. 102, n. D22, pp. 25679-25720. DOI: 10.1029/97JD01495
- Harrington C.R. (a cura di) (1992), *The Year without a Summer? World Climate in 1816*, Ottawa, Canadian Museum of Nature.
- Holasek R.E., Self S., Woods A.W. (1996), *Satellite Observations and Interpretation of the 1991 Mount Pinatubo Eruption Plumes*, in "Journal of Geophysical Research: Solid Earth", vol. 101, n. B12, pp. 27635-27655. DOI: 10.1029/96JB01179
- Horn S., Schmincke H.-U. (2000), *Volatile Emission during the Eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD*, in "Bulletin of Volcanology", vol. 61, n. 8, pp. 537-555. DOI: 10.1007/s004450050004

- Kirchner I., Stenchikov G.L., Graf H.F., Robock A., Antuna J.C. (1999), *Climate Model Simulation of Winter Warming and Summer Cooling Following the 1991 Mount Pinatubo Volcanic Eruption*, in "Journal of Geophysical Research: Atmospheres", vol. 104, n. D16, pp. 19039-19055. DOI: 10.1029/1999JD900213
- Laj P., Palais J.M., Gardner J.E., Sigurdsson H. (1993), *Modified HNO<sub>3</sub> Seasonality in Volcanic Layers of a Polar Ice Core: Snow-Pack Effect or Photochemical Perturbation?*, in "Journal of Atmospheric Chemistry", vol. 16, n. 3, pp. 219-230. DOI: 10.1007/BF00696897
- Lamb H.H. (1995), *Climate, History and the Modern World*, London, Routledge [2a edizione].
- Langway C.C., Jr., Clausen H.B., Hammer C.U. (1988), *An Inter-Hemispheric Time-Marker in Ice Cores from Greenland and Antarctica*, in "Annals of Glaciology", vol. 10, pp. 102-108.
- Legrand M., Delmas R.J. (1987), *A 220-Year Continuous Record of Volcanic H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the Antarctic Ice Sheet*, in "Nature", vol. 327, n. 6124, pp. 671-676. DOI: 10.1038/327671a0
- Lough J.M. (1992), *Climate of 1816 and 1811-20 as Reconstructed from Western North American Tree-Ring Chronologies*, in Harington C.R. (a cura di), *The Year without a Summer? World Climate in 1816*, Ottawa, Canadian Museum of Nature, pp. 97-114.
- McCormick M.P., Thomason L.W., Trepte C.R. (1995), *Atmospheric Effects of the Mt. Pinatubo Eruption*, in "Nature", vol. 373, pp. 399-404. DOI: 10.1038/373399a0
- Monzier M., Robin, C., Eissen J.-P. (1994), *Kuwaë (~1425 A.D.): the Forgotten Caldera*, in "Journal of Volcanology and Geothermal Research", vol. 59, n. 3, pp. 207-218. DOI: 10.1016/0377-0273(94)90091-4
- Pant G.B., Parthasarathy B., Sontakke N.A. (1992), *Climate over India during the First Quarter of the Nineteenth Century*, in Harington C.R. (a cura di), *The Year without a Summer? World Climate in 1816*, Ottawa, Canadian Museum of Nature, pp. 429-435.
- Petroeschovsky W.A. (1949), *A Contribution to the Knowledge of the Gunung Tambora (Sumbawa)*, in "Tijdschrift van het K.

- Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap”, Amsterdam Series 2, vol. 66, pp. 688-703.
- Pollitzer R. (1959), *Cholera*, Geneva, World Health Organization.
- Post J.D. (1977), *The Last Great Subsistence Crisis in the Western World*, Baltimore, MD, The Johns Hopkins University Press.
- Pyle D.M. (1995), *Mass and Energy Budgets of Explosive Volcanic Eruptions*, in “Geophysical Research Letters”, vol. 22, n. 5, pp. 563-566. DOI: 10.1029/95GL00052
- Pyle D.M. (2000), *Sizes of Volcanic Eruptions*, in Sigurdsson H., Houghton B.F., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (a cura di), *Encyclopedia of Volcanoes*, San Diego, Academic Press, pp. 257-264.
- Read W.G., Froidevaux L., Waters J.W. (1993), *Microwave Limb Sounder Measurements of Stratospheric SO<sub>2</sub> from the Mt. Pinatubo Eruption*, in “Geophysical Research Letters”, vol. 20, n. 12, pp. 1299-1302. DOI: 10.1029/93GL00831
- Robock A. (2000), *Volcanic Eruptions and Climate*, in “Reviews of Geophysics”, vol. 38, n. 2, pp. 191-219. DOI: 10.1029/1998RG000054
- Scailliet B., Clemente B., Evans B.W., Pichavant M. (1998), *Redox Control of Sulfur Degassing in Silicic Magmas*, in “Journal of Geophysical Research: Solid Earth”, vol. 103, n. B10, pp. 23937-23949. DOI: 10.1029/98JB02301
- Self S., Rampino M.R., Newton M.S., Wolff J.A. (1984), *Volcanological Study of the Great Tambora Eruption of 1815*, in “Geology”, vol. 12, n. 11, pp. 659-663. DOI: 10.1130/0091-7613(1984)12<659: VSOTGT>2.0.CO;2
- Sigurdsson H., Carey S. (1989), *Plinian and Co-Ignimbrite Tephra Fall from the 1815 Eruption of Tambora Volcano*, in “Bulletin of Volcanology”, vol. 51, n. 4, pp. 243-270. DOI: 10.1007/BF01073515
- Idd. (1992), *The Eruption of Tambora Volcano in 1815: Environmental Effects and Eruption Dynamics*, in Harington C.R. (a cura di), *The Year without a Summer? World Climate in 1816*, Ottawa, Canadian Museum of Nature, pp. 16-45.
- Simkin T., Siebert L. (1994), *Volcanoes of the World*, Tucson, AZ, Geoscience Press-Washington, DC, Smithsonian Institution.

- Stommel H., Stommel E. (1979), *The Year without a Summer*, in "Scientific American", vol. 240, n. 5, pp. 176-186. DOI: 10.1038/scientificamerican0679-176
- Id. (1983), *Volcano Weather: the Story of 1816, the Year without a Summer*, Newport, RI, Seven Seas Press.
- Stothers R.B. (1984), *The Great Tambora Eruption in 1815 and Its Aftermath*, in "Science", vol. 224, n. 4654, pp. 1191-1198. DOI: 10.1126/science.224.4654.1191
- Surmieda M.R. et al. (1992), *Surveillance in Evacuation Camps after the Eruption of Mt. Pinatubo, Philippines*, in *CDC Surveillance Summaries, CDC Morbidity and Mortality Weekly Report 41 (SS-4)*, pp. 9-12.
- Tanguy J.C., Ribiere C., Scarth A., Tjetjep W.S. (1998), *Victims from Volcanic Eruptions: a Revised Database*, in "Bulletin of Volcanology", vol. 60, n. 2, pp. 137-144. DOI: 10.1007/s004450050222
- Vupputuri R.K.R. (1992), *The Tambora Eruption in 1815 Provides a Test on Possible Global Climatic and Chemical Perturbations in the Past*, in "Natural Hazards", vol. 5, n. 1, pp. 1-16. DOI: 10.1007/bf00127136
- Woods A.W., Wohletz K.H. (1991), *Dimensions and Dynamics of Co-Ignimbrite Eruption Columns*, in "Nature", vol. 350, n. 6315, pp. 225-227. DOI: 10.1038/350225a0
- Zielinski G.A. (1995), *Stratospheric Loading and Optical Depth Estimates of Explosive Volcanism over the Last 2100 Years Derived from the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core*, in "Journal of Geophysical Research: Atmospheres", vol. 100, n. D10, pp. 20937-20955. DOI: 10.1029/95JD01751
- Zollinger H. (1855), *Besteigung des Vulkans Tamboro auf der Insel Sumbawa und Schiderung der Eruption desselben im Jahren 1815*, Wintherthur, Zurcher and Fürber-Wurster and Co.