

Afrikan sahelsavannin kuivuus ja sen taustat

HEIKKI SEPPÄ

Maantieteen laitos, Luonnonmaantieteen laboratoriot, Helsingin yliopisto.



Heikki Seppä (1993). Afrikan sahelsavannin kuivuus ja sen taustat (The Sahel drought and its background). Terra 105: 3, pp. 151–165.

Sahel, the driest form of savanna and the southern margin of Sahara desert, is notorious for its periods of extreme aridity. As the consequences of the aridity have often been catastrophic, it has caused a lot of political debating. Very often the aridity has been connected to the recent human-induced changes on the ground, e.g. to over-grazing and deforestation. However, the peoples of Sahel have been suffering from the sudden dry periods for several centuries. Also the latest climatological research is stressing the global atmospheric changes as the ultimate cause of the dry periods. It appears very obvious that the precipitation in Sahel is connected by climatological teleconnections to the changes in the world sea surface temperatures and, possibly, to the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) frequency.

Heikki Seppä, Department of Geography, Laboratory of Physical Geography, P.O. Box 9 (Siltavuorenpenger 20 A), SF-00014 University of Helsinki, Finland.

Afrikan kuivat alueet kuuluvat maapallon herkimpiin ekosysteemeihin. Sekä luonnolliset että ihmistoiminnasta johtuvat muutokset vaikuttavat siellä usein nopeasti ja dramaattisesti. Etenkin päiväntasaajan pohjoispuoliset kuivat savannit ovat tulleet tunnetuiksi kuivuuskatastrofeistaan, joiden seurauksena jopa miljoonia ihmisiä on menehtynyt. Afrikan tilanne on ollut vilkkaan, ajoittain kiivaankin keskustelun aihe. Keskustelu on ollut luonteeltaan useimmiten poliittista, toisinaan eettis – moraalista, harvemmin Suomesa kuitenkaan luonnontieteellistä. Tuntuu siltä, että Afrikan tilanne on tarjonnut länsimaiden ihmisille tilaisuuden toisaalta henkiseen itseruokintaan ja toisaalta länsimaisen elämäntyylin ja globaalin kapitalistisen valtaeliitin arvosteluun.

Vaikka molempiin on varmaan aihetta, olisi hyvä, mikäli keskustelu perustuisi mahdollisimman paljon tosiasioihin. Koska julkisuudessa käydyssä keskustelussa viileä objektiivisuus – tieteellisen lähestymistavan tunnusmerkki – on usein unohtunut, on aiheellista *Terran*kin sivuilla yrittää esittää, millä lailla luonnontieteellinen näkökulma voi auttaa ymmärtämään Afrikan savannialueiden ongelmia.

Afrikan savannien ekologisesti herkimpiä osia ovat kuivimmat sahelsavannit, joiden kautta savanni vaihettuu lähes kasvittomaksi autiomaaksi, Saharaksi. Sahel on siis kahden globaalin suurbiomin, savannin ja autiomaan, ekologista vaihtumisvyöhykettä, ekotonia. Se lasketaan kuitenkin kuuluvaksi savannibiomiin. Tällaiset

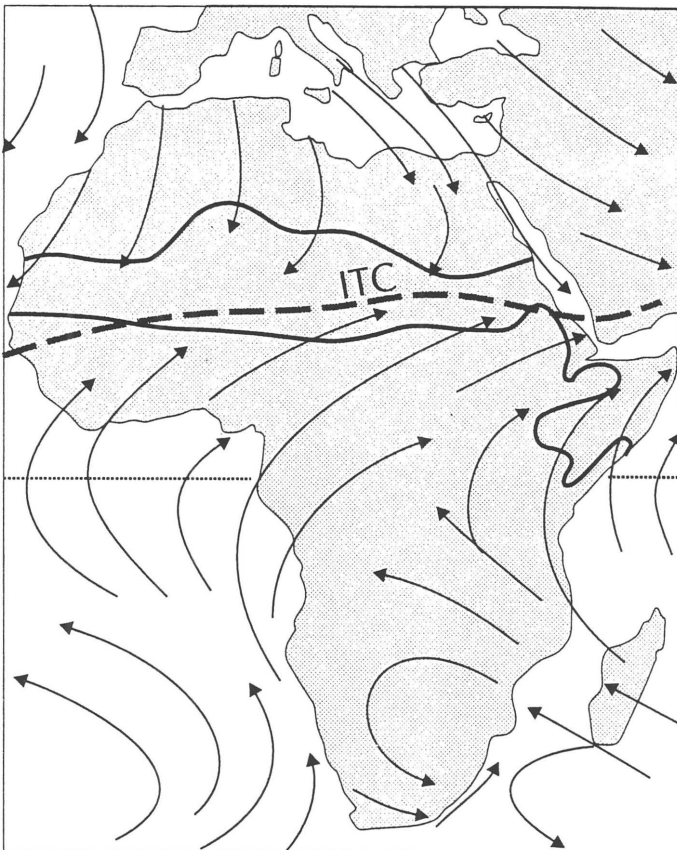
ekotonit ovat erityisen herkkiä reagoimaan ilmaston muutoksiin, ja siten otollisia kohteita ilmaston ja kasvillisuuden välisten vuorovaikutussuhteiden tutkimiseen. Toisaalta Sahelin ongelmat eivät ole luonteeltaan pelkästään luonnontieteellisiä, vaan kuivuuden seuraukset ovat vähintään yhtä paljon sosiologiaa, taloustieteitä ja politiikkaa (Goudie 1991). Nykyisin Sahelin kuivuus ja sen tausta on maapallon akuuteimpia ja vaikeimpia ympäristökysymyksiä. Siitä, etteikö kuivuus olisi Sahelissa ongelma, ei ole erimielisyyttä. Erilaisia käsityksiä esitetään sen sijaan siitä, onko kuivuus muiden ongelmien syy vai seuraus, tai onko ilmaston kuivuus väliaikaista vai pysyvää. Myöskään menetelmistä toimia kuivuuden tuhoa vastaan ei ole yksimielisyyttä.

Tässä kirjoituksessa on tarkoituksena tutkia Sahelin aluetta, lähinnä sen ilmaston kehitystä, sekä pitkällä että lyhyellä aikavälillä. Pitkän aikavälin tarkastelu osoittaa laajemman luonnontieteellisen taustan ja lyhyen aikavälin tarkastelu, asian todellinen ydin, vastaa ainakin osittain akuutteihin kysymyksiin. Koska kirjoituksessa Sahelin ongelmia tarkastellaan nimenomaan

luonnontieteelliseltä kannalta, on tarpeellista selvittää myös jonkin verran savannibiomin klimatologisia ja ekologisia perusteita, jotta olisi mahdollista ymmärtää paremmin kuivuuden savanneille aiheuttamaa uhkaa ja sahelsavannin muuttumista ympäristöolojen, lähinnä ilmaston, muuttumisen myötä.

Sahelin alue – luonnonmaantieteellinen tausta

Sahel-nimitystä käytetään tässä kirjoituksessa Saharan autiomaan ja savannien välisestä vaihtumisvyöhykkeestä, savannin kuivimmasta variantista. Usein tässä yhteydessä on lähes samassa merkityksessä käytetty englanninkielessä sanaa *sub-Sahara* (esim. Druyan 1991). Sahel ulottuu n. 10–20° N leveyspiirien välissä läntisestä Afrikasta, Atlantin valtameren rannalta itään Sudaniin ja Etiopiaan asti, (kuva 1). Usein tosin Saheliksi käsitetään nimenomaan läntisen Afrikan savannien kuivimmat osat.



Kuva 1. Afrikan mantereen kesäaikainen ilmavirtaustilanne ja intertrooppisen konvergenssivyöhykkeen ITCZ:n (katkoviiva) sijainti kesällä (Mountjoy & Hilling 1988). Sademäärää 50–500 mm/vuosi rajaavat isohyetit on merkitty karttaan yhtenäisellä viivalla.

Fig. 1. The summer atmospheric circulation and the summer location of the intertropical convergence zone (ITCZ) in Africa. The isohyets show the area between 500 and 50 mm/y (Mountjoy & Hilling 1988).

Ilmastolliset olot

Afrikassa ilmasto-oloja ja sitä kautta myös kasvillisuuden luonnetta ohjaa ratkaisevasti ilmakehän suuri virtaussysteemi. Vaikuttavia tekijöitä ovat auringon säteily, maapallon akselikallistuma ja coriolis -efekti. Mallimaisessa perustilanteessa auringon säteilyä tulee eniten päiväntasaajavyöhykkeelle, jossa lämpenevä ilma kohoaa ylöspäin. Päiväntasaajavyöhykkeellä on näin pysyvä matalapaine ja runsaiden konvektiosateiden ja korkean lämpötilan ansiosta kasvillisuus on trooppista sademetsää. Päiväntasaajavyöhykkeen pohjois- ja eteläpuolella, n. 30° N ja S leveyttä, ylös kohonnut ilma painuu kuivempaan ja viileämpään alaspäin, jolloin muodostuu pysyvä, vähäsateinen korkeapaineen alue, jossa ovat maapallon suuret trooppiset autiomaat. Korkeapaineen alueilta ilma virtaa pasaatituulina takaisin päiväntasaajan matalapaineen alueelle. Tätä trooppisen ilman kiertoliikettä kutsutaan Hadleyn soluksi.

Todellisuudessa tilanne ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen, sillä maapallon akselikallistuman takia aurinko ei ole päiväntasaajalla aina zenitti-asemassa, vaan zenitti-asema muuttuu maapallon kiertäessä auringon ympäri. Matalapaine ja siihen liittyvät konvektiosateet siirtyvät auringon zenitti-aseman mukana siten, että ne ovat elokuussa pohjoisessa kravun kääntöpiirillä ja helmikuussa etelässä kauriin kääntöpiirillä. Liikkuvaa matalapaineen vyöhykettä kutsutaan intertrooppiseksi konvergenssivyöhykkeeksi, ITCZ:ksi. ITCZ:n sijainnista johtuu, että lähes koko vuoden sademäärä Sahelissa saadaan kesäheinä- ja elokuun aikana (kuva 1).

Huomion arvoista on, että ITCZ ulottuu Afrikan pohjoisosassa selvästi pohjoisemmaksi kuin savannikasvillisuus, Saharan autiomaan puolelle. Kesän pohjoisimmassa asemassa ITCZ:hen ei siis liity runsaita konvektiosateita. Tämän ilmiön syitä ei tarkkaan tunneta, mutta ainakin osittain se johtunee kahden eri ilmamassan konvergensistä ITCZ:n pohjoisasemassa. ITCZ:n matalapainealueelle tulee lähinnä Atlantin valtamereltä ja Guineanlahdelta puhaltavan monsuunituulen mukana viileää, kosteaa ilmaa. Se kohtaa ITCZ:ssä Saharan pohjoisosan korkeapainealueen kuumaa ja kuiva ilma nousee kevyempänä ylöspäin, monsuunivirtauksen päälle. Tässä tilanteessa jo kuivemmaksi muuttunut ja vertikaalista syvyyttään menettänyt monsuunivirtaus ei pysty tuottamaan ITCZ:ssä riittävän syviä cumulonimbus-pilviä, ja konvektiosateet jäävät tulematta (Trewartha 1961).

Sahelissa, kuten muuallakin maapallon kuivilla

alueilla, vuotuisen sademäärän suuri vaihtelevuus on tunnusomaista. Vaihtelevuutta voidaan kuvata yksinkertaisella indeksillä:

$$\text{VAIHELEUVUUS (\%)} = \frac{\text{KESKIPOIKKEAMA}}{\text{KESKIARVOSTA}} \cdot 100$$

$$\text{VAIHELEUVUUS (\%)} = \frac{\text{KESKIARVOSTA}}{\text{KESKIARVO}} \cdot 100$$

Maapallon kuivilla alueilla sateen vaihtelevuus on monesti jopa yli 200 %. Saharan eteläosissa ja Sahelissa se on 30–150% (Goudie 1987). Yhtenä vaihtelevuusindeksin suuruuteen vaikuttavana tekijänä ovat rankkasateet, joiden vuoksi kuivilla alueilla yhden vuorokauden sademäärä saattaa jopa ylittää keskimääräisen vuotuisen sademäärän. Tällaiset myrskyt johtavat usein tuhoisiin tulviin. Suurin osa Afrikan kuivien alueiden sateista on kuitenkin intensiteetiltään normaaleja, esim Länsi-Afrikan kuivilla alueilla keskimääräinen sadepäivän sateen määrä on 9,75 mm, mikä vastaa monien keskileveyksien kosteiden alueiden ilmastoasemien lukemia (Goudie 1987).

Kasvillisuuden vyöhykkeisyys Päiväntasaajan pohjoispuolisessa afrikassa

Savanni, johon Sahelkin siis luetaan, on jokseenkin epämääräinen kasvimaantieteellinen käsite (Niemelä 1988). Afrikassa sillä voidaan laajassa mielessä tarkoittaa käytännöllisesti katsoen kaikkia kasvillisuustyyppisiä, jotka sijoittuvat ikivihantien sademetsien ja autiomaiden väliin. Savanni on tämän mukaan siis kasvillisuuden vaihtumisvyöhykettä kahden ääripään välillä. Savannien luonne vaihtelee sademäärän mukaan: runsasasteisilla alueilla savannikasvillisuus muistuttaa sademetsien kasvillisuutta, vähäsateisilla taas puoliautiomaiden. Kuitenkin savanneilla on yleensä hyvin tunnusomainen kasvillisuus.

Saharan autiomaan ja Guineanlahden sekä Zairen altaan trooppisten sademetsien välissä voidaan erottaa selvä savannikasvillisuuden vyöhykkeisyys, jonka aiheuttaa sademäärän vaihtelu. Kosteim tyypin on paikoin aivan Guineanlahden tuntumaan ulottuva guineasavanni, joka on tyyppillistä metsäsavannia. Sen pohjoispuolella kulkee leveä sudansavannivyöhyke, jonka metsäkasvillisuus on jo harvempaa. Kuivin savannityyppi Saharan eteläpuolella on sahelsavanni, jossa keskimääräinen sademäärä on 150–500 mm (Lézine 1987). sahelin eteläosassa on harvapuustoista ruohostokasvillisuutta, mutta pohjoisempaan, lähempään Saharan autiomaata, vallitsee puoliautiomaan ruohosto. Puuvartist kasvit ovat useimmiten piikkisiä: vallitsevaa kasvillisuutta onkin matala piikkipensassavanni. Tyyppillisiä sahelsavannin puita ovat harvassa kasvavat akaa-

siat, esim. *Acacia raddiana* ja *A. laeta* sekä eteläosissa kookas apinanleipäpuu (*Adansonia digitata*). Ruohosto koostuu useista kookkaista, jopa yli 1,5 m korkeista monivuotisista ruohoista.

Koko trooppisen Afrikan ilmastosysteemi on yleisesti ottaen vakaa. Siihen voivat aiheuttaa muutoksia lähinnä valtamerten suurten merivirtausysteemien muutokset tai, vielä pidemmällä aikavälillä, mannerliikunnot. Tällä perusteella voidaan olettaa, että Afrikan kasviekologiset vyöhykkeet ovat hyvin vanhoja, vaikka niiden rajat ovatkin dynaamisia. Tästä on saatu myös todisteita, sillä mm. Atlantin syvänmeren pohjasta on todettu Saharan alueelta peräisin olevia eolisia sedimenttejä useita miljoonia vuosia vanhoista kerrostumista (esim. Goudie 1983).

Ilmaston pitkän aikavälin kehitys Pohjois-Afrikan kuivilla alueilla

Sahelin sijainti päiväntasaajan läheisyydessä aiheuttaa sen, että säteilymäärä on aina suuri. Astronomiset muutoksetkaan eivät muuta säteilymäärää niin paljon, että ilmaston lämpeneminen tai jäähtyminen aiheuttaisi suuria ekologisia muutoksia. Säteilymäärän vaihtelut ovat pitkäläkin aikavälillä tarkasteltuna olleet suhteellisen vähäiset, joten myöskään lämpötilan vaihtelut eivät ole olleet suuria. Sahelin osalta oleellista tietoa ovat kosteuden vaihtelut. Kosteus kuvastaa sadannan ja haihdunnan suhdetta. Mikäli lämpötilan vaihtelut ovat olleet suhteellisen vähäisiä, on potentiaalinen haihduntakin ollut melko vakio. Tästä seuraa, että sademäärä ja sen muutokset ovat tärkein ilmastollinen tekijä Afrikan savannialueilla – Sahel on vaihtumisvyöhyke nimenomaan sademäärän suhteen, ei lämpötilan.

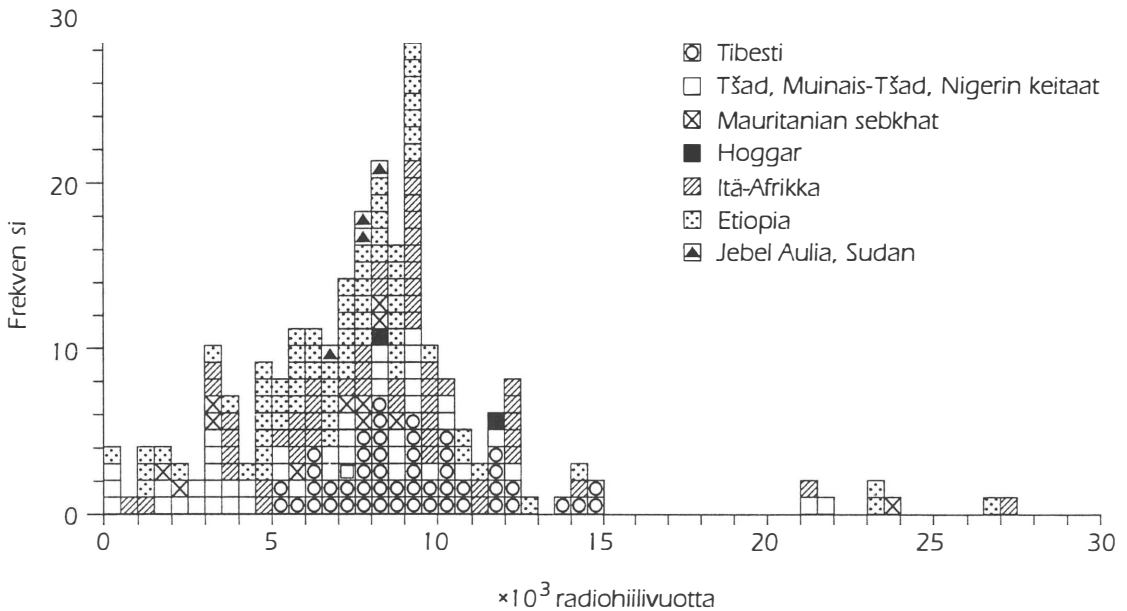
Vaikka mittauksiin ja historialliseen aineistoon perustuvaa tietoa ei Afrikan savannialueilta olekaan yhtä pitkältä ajalta kuin esim. Euroopasta, on tietoa Afrikan savannialueiden ilmasto-olojen kehityksestä luonnollisesti saatavissa monilla muilla tavoilla. Yksi käytetyimmistä metodeista on paleoekologisen tiedon käyttö. Rekonstruoidulla kasvillisuuden tilalla tuhansia vuosia taaksepäin saadaan tietoa myös ilmastosta. Sahelin alueella tällaista tutkimusta on kuitenkin tehty toistaiseksi huomattavasti vähemmän kuin monilla muilla alueilla. Eräänä syynä tähän on esim. siitepölyanalyysiin sopivien näytteenottoapaikkojen vähäisyys Sahelissa (Lézine 1987). Erinomaisiksi paleoklimatologiseksi tutkimuskohteiksi Afrikassa ovat kuitenkin osoittautuneet aavikoiden ja savannien järvet.

Järvien vedenpinnan vaihteluita on tutkittu runsaasti nimenomaan Afrikassa. Tämä johtuu

siitä, että Afrikassa on poikkeuksellisen paljon paleohydrologiseen tutkimukseen sopivia järvi-altaita. Tällaisen altaan tulee ensinnäkin mieluiten olla laskujoeton, jolloin järviällä reagoi erittäin herkästi siihen laskevien jokien virtaamien muutoksiin: virtaamien kasvaessa kosteiden ilmastovaiheiden aikana vedenpinta nousee, kunnes järven pinta-ala on kasvanut niin suureksi, että haihdunta järvestä on tasapainossa siihen tulevan veden määrän kanssa. Ääritapauksissa vedenpinnan vaihtelun amplitudi voi olla useita kymmeniä metrejä. Jotta järviällä reagoisi tällä tavalla, se ei saa olla topografialtaan liian jyrkkäreunainen. Toisaalta hyvin loivapiirteiset järvi-altaat kuivuvat helposti kokonaan. Tutkimuksen kannalta on luonnollisesti tärkeää, että järven vedenpinnan tason vaihteluista jää merkkejä, joita voidaan tulkita joko järvien pohjasedimenteistä tai muinaisrannoista. Yleisimmin käytetyt menetit ovat sedimentin kemiallinen analyysi (esim. Finney & Johnson 1991; Pachur & Hoelzmann 1991) ja piileväanalyysi (esim. Richardson *et al.* 1978; Gasse 1980) sekä muinaisrantojen määrittäminen maastotutkimusten ja ilmakuvien avulla (esim. Street-Perrott & Harrison 1985).

Järvi-altaiden vedenpinnan vaihteluiden tutkimusta on tehty myös muualla maapallon kuivilla alueilla, esim. USA:ssa, Australiassa ja Aasian keskiosissa. Englantiin, Oxfordin yliopiston maantieteen laitoksen yhteyteen, perustettiin 1980-luvun alussa erityinen trooppisten paleoympäristöjen tutkimusryhmä, joka on nimenomaan keskittynyt maapallon kuivien alueiden järvi-altaiden tutkimiseen. Tutkimusryhmä on koonnut mm. erinomaisen tietopankin laskujoettomien järvi-altaiden kehityshistoriasta (Street-Perrott & Harrison 1985). Tietopankkiin on valittu vain sellaisia kohteita, joista on ¹⁴C-ajoituksia, ajoitettuja tefrakerroksia tai luotettavaa historiallista ajoitustietoa. Ylivoimaisesti suurin osa näistä kohteista on Afrikasta.

Vanhimpien Afrikan savannialueilla tehtyjen tutkimusten mukaan Afrikan ilmastohistoriassa oli pleistoseenikaudella havaittavissa samankaltainen rytmikka kuin korkeilla leveyksillä. Afrikassa pleistoseenikauden jäätiköitymis- eli glasiaalikausia vastasivat vain kosteat periodit ja jäätiköitymisten välisiä lämpimiä interglasiaalikausia kuivat periodit. Tämä vuosikymmeniä vallitsevassa asemassa ollut teoria on sittemmin osoittautunut yksinkertaistetuksi ja jopa suorastaan vääräksi. Lisääntynyt tutkimusaineisto ja erityisesti ajoitusmenetelmien kehittyminen ovat muuttaneet ratkaisevasti kuvaa Afrikan kuivien alueiden tilasta viimeisten kymmenien tuhansien vuosien aikana.



Kuva 2. Radiohiiliajoitusten (238 kpl) perusteella laadittu histogrammi päiväntasaajan pohjoispuolisen Afrikan kuivilta alueilta. Kukin ajoitus (=yksi neliö) viittaa korkeaan tai keskikorkeaan vedenpinnan asemaan. Kostein vaihe ajoittuu noin 10 000–7000 BP (Street–Perrott & Grove 1976).

Fig. 2. A Histogram constructed on the basis of 238 ^{14}C dates from arid Africa. Each square points to high or intermediate lake level. The most humid period dates to 10 000–7 000 BP (Street–Perrott & Grove 1976).

Viime vuosikymmeninä useilta Afrikan kuivien alueiden järvilta saatu tutkimusaineisto (kuva 2) osoittaa, kuinka ennen viime glasiaalijan (Pohjois-Euroopan Veiksel) maksimivaihetta, yli 20 000 BP, useiden järvien vedenpinta oli korkealla, mutta laski Saharan eteläosissa ja Sahelissa jäätiköitymisen maksimijankohtana, n. 18 000 BP. Vedenpinnan tason voimakas lasku koski nimenomaan Saharan eteläpuolisia järviä. Sahelin alueella ilmasto oli tähän aikaan selvästi nykyistä kuivempi (Street–Perrott & Grove 1979). Myös geomorfologinen aineisto, erityisesti savannialueiden nykyisin stabiilit dyynit, viittaavat autiomaiden olleen nykyistä laajempia jääkauden maksimiaikoina. Stabiiloituneita, kasvillisuuden peittämiä dyynejä on löydetty savanneilta, kaukaa nykyisten aavikoiden rajojen ulkopuolelta. Niiden on osoitettu vastaavan iältään viimeisen jäätiköitymisen maksimiaikaa (Grove 1969; Goudie 1985). Dyynien syntymäalueella ei sada enempää kuin 100–300 mm vuodessa. Samaa aikaan trooppisten sademetsien ja savannien pinta-ala Afrikassa oli ilmeisesti selvästi nykyistä pienempi.

Veiksel-jääkauden maksimijaksolla kuivuutta lisänneeksi tekijäksi mainitaan usein merenpinnan laskusta seurannut Afrikan sisäosien lisääntynt

ilmaston kontinentaalisuus (esim. Goudie 1983). N. 40 000–30 000 BP merenpinnan taso Afrikan länsirannikolla oli ilmeisesti likimain sama kuin nykyisin (Giresse 1978; ks. myös Roche 1991). Tästä alkoi merenpinnan nopea regressio kasvavien jäätiköiden sitoessa yhä enemmän vettä. Maksimaalisen jäätiköitymisen aikana merenpinta Afrikan rannikolla oli peräti 120 m nykytasoa alempana. Atlantin valtameri on kuitenkin niin syvä Afrikan länsirannikolla, ettei rantaviiva siirry edes 120 m merenpinnan laskun jälkeenkään merkittävästi kauemmas nykyisestä asemastaan eikä merenpinnan lasku ainakaan yksin riittäne selittämään maksimijäätiköitymisen aikaista kuivuutta. Koko maapallon ilmastollinen systeemi oli maksimijäätiköitymisen aikana täysin toisenlainen nykyiseen verrattuna eikä Afrikan kuivuuden perimmäisiä syitä voi arvioida sen nykyisen suurilmastollisen tilanteen pohjalta.

Nykyisen ilmastoproblematiikan kannalta olennaisempaa on, kuinka ilmaston kuivat ja kosteat vaiheet ovat vaihdelleet jääkauden jälkeen, viimeisen n. 10 000 vuoden aikana. Edelleen luotettavimman tutkimuskohteen tarjoaa paleohydrologinen aineisto, ts. järvien vedenpinnan tason vaihtelut (kuva 2). Jääkauden loppuvaiheessa, 15 000–13 000 BP, ilmasto Länsi-Afrikassa oli

kuiva ja järvien vedenpinta alhaalla. Likimain samaan aikaan, kun ilmasto korkeilla leveysillä jääkauden jälkeen alkoi lämmentä, alkoi myös ilmasto Afrikassa muuttua kosteammaksi. Sademäärä Sahelin alueella kasvoi, ja järvien vedenpinta kohosi. Laajoja suoalueita alkoi muodostua nykyisin kuiville seuduille (Petit-Maire *et al.* 1991).

Kosteinta aikaa oli 9000–8000 BP. On arvioitu, että tällöin sademäärä Itä-Afrikassa, jossa suurin osa laskujoettomista järvi-altaita on, oli n. 50 % nykyistä suurempi ja Sudanissa ja Mauritaniassa, Sahelin alueella, peräti 100 % nykyistä suurempi (Street & Grove 1976). Lähes kaikkien tutkittujen Afrikan järvien vedenpinnat olivat korkealla (kuva 2). Parhaan esimerkin tästä kosteasta ajasta tarjoaa keskellä Sahelia oleva Tšadjärvi, jonka pinta-alaksi holoseenikauden alkuajana on muinaisrantojen avulla laskettu peräti yli 300 000 km², kun se nykyisin on vain 10 000–25 000 km². Järven valuma-alueen sademääräksi jääkauden jälkeisen ajan ensimmäisellä puoliskolla 10 000–5 000 BP on arvioitu 650 mm/a, kun nykyinen sademäärä on yli 300 mm vähemmän (Kutzbach 1980). Haihdunnan määrästä tänä aikana ei luonnollisestikaan ole tarkkaa tietoa. Kutzbach (1980) oletti haihdunnan olleen saman kuin nykyisin, mutta Grove & Pullanin (1963) mukaan se oli nykyistä pienempi. On mahdollista, että esim. lisääntynyt pilvisuus on laskenut hieman keskilämpötiloja. Butzer *et al.* (1972) arvioivat keskilämpötilan olleen Itä-Afrikassa n. 2° C nykyistä alemman.

Myös paleoekologinen evidenssi on hyvin sopusoinnussa järvi-altaiten kehityshistoriasta saadun tiedon kanssa. Lézinen (1987, 1991) mukaan Saharan autiomaan eteni etelään päin Veiksel-jäätiköitymisen maksimiaikana. 18 000 BP autiomaan ulottui 10° N leveyspiirille asti. Afrikan jääkauden jälkeisen ajan runsaimman kosteuden aikana, n. 9000–8000 BP, savannikasvillisuus levisi vastaavasti voimakkaasti pohjoiseen. Tällöin Länsi-Afrikan kostein savannityyppi, guineasavanni, ulottui Tšadjärvelle, nykyiselle sahelisavannille, saakka. Nykyisin hyperarideilla alueilla Saharan keskiosissakin oli savannikasvillisuutta. Tämä on edellyttänyt ainakin 300–500 mm:n vuotuista sademäärää alueilla, joissa nykyisin sataa alle 5 mm/a: kyse on siis valtavasta ilmastomuutoksesta (Ritchie *et al.* 1985; Spaulding 1991). Tämä ns. pluviaalivaihe oli aikaa, jolloin biologinen tuotanto ja biomassa Afrikassa kasvoivat suuresti. Sahara oli laajalti savannimetsien peitossa ja savannien kookkaat nisäkkäät, elefantit, virtahevot, kirahvit ja antiloopit liikkuivat Saharassa. Kasvittomat autiomaat olivat tällöin hyvin pieniä, reliktimäisiä muodostumia (Street

& Grove 1976). Lisääntynyt sademäärä ja järvien vedenpinnan nousu johti suurten jokiverkostojen syntyyn nykyisessä autiomaassa. Saharan keskiosien vuoristoista, Ahaggarista (Hoggar) ja Tibestistä virranneet vedet muodostivat järviä mm. Libyan eteläosiin. Varhaisen holoseenin tiheän jokiverkoston ansiosta koko Pohjois-Afrikan kalakanta on edelleen systematiikaltaan hyvin samankaltainen (Goudie 1985). Relikteinä tältä ajalta tavataan Saharan keitailla mm. eristäytyneitä krokotiili- ja antilooppipopulaatioita.

Kehitys kohti kuivuutta alkoi n. 7000 BP (Petit-Maire *et al.* 1991). Postglasiaaliajan jälkimmäisellä puoliskolla järvien vedenpinnan taso oli laskussa, tosin esim. 3500–3000 BP laajalla alueella Sahelissa ja Saharassa oli melko kosteaa. Viimeisen 3000 vuoden aikana monet Afrikan järvet ovat kuivuneet tai muuttuneet suolaisiksi (Street & Grove 1976). Samanaikaisesti järvien vedenpinnan laskun kanssa kasvillisuusvyöhykkeet siirtyivät lisääntyvän kuivuuden takia etelämmäksi, mutta 3000–4000 BP, jälleen synkronisesti järvi-altaiten vedenpinnan nousun kanssa, tapahtui melko lyhytaikainen savannikasvillisuuden siirtyminen pohjoiseen. 2000 BP nykyinen kasvillisuuden vyöhykkeisyys vakiintui Sahelin alueelle (Lézine 1987).

Nykyisin on ilmastomuutoksen tutkimuksessa alettu yhä enemmän painottaa astronomisen ilmastovaihteluteorian merkitystä keskipitkän aikavälin ilmastomuutosten selittäjänä. Se selittää korkeilla leveysasteilla glasiaali-interglasiaalisyyden ja Afrikan osalta kuivien ja kosteiden periodien vaihtelun (esim. Imbrie & Imbrie 1979). Astronomisen ilmastovaihteluteorian mukaan ilmastovaihtelut ovat seurausta maapallolle tulevan auringon säteilymäärän muutoksista. Varhaisholoseenin aikana pohjoiselle pallonpuoliskolle tuli kesäaikana 7 % (Kutzbach 1981) tai 8 % (Berger *et al.* 1984) enemmän säteilyä kuin nykyisin. Päiväntasaajan pohjoispuolisessa Afrikassa tämä johti lämpötilan nousuun, ITCZ:n siirtymiseen pohjoisemmaksi ja, ennen kaikkea, Afrikan mantereeseen lämpenemisestä johtuneeseen mantereeseen ja meren välisen ilmanpainegradientin kasvuun. Seurauksena oli monsuuni-ilmiön voimistuminen ja ulottuminen kauas Saharaan asti. Koska laskelmat ja ilmastomallit osoittavat säteilymaksimin ja monsuuni-ilmiön voimistumisen tapahtuneen juuri 9 000–6 000 BP (COHMAP 1988) on varhaisholoseenin kostea ilmastovaihe johtunut siis Guineanlahdelta ja itäiseltä Atlantilta tulleiden monsuunituulten voimistumisesta ja ulottumisesta nykyistä kauemmas.

Toisaalta kuivien vaiheiden ei tarvitse välttämättä johtua ainakaan yksinomaan säteilymäärän pienentymisestä ja sitä seuraavasta monsuuni-il-

miön intensiteetin heikkenemisestä. Esim. pasaatituulten vaihtelut voivat johtaa huomattaviin ilmastollisiin muutoksiin Länsi-Afrikassa. Monesti on esitetty, että Atlantin merivirtasysteemin muutokset ovat olleet syynä varsinkin holoseenin aikaisiin kuivuuskausiin. Afrikan länsirannikolla koillis-pasaati aiheuttaa kylmän veden kumpuamista Atlantin syvemmistä kerroksista samaan tapaan kuin Perun rannikolla. Pintaan noustuaan kylmä vesi johtaa pilvisyyden lisääntymiseen, mutta vähentää sateita ja laskee lämpötilaa: juuri tästä ilmiöstä johtuu nykyisinkin savannin ulottuminen sademetsien keskelle ns. Dahomeyn käytävän kohdalla, Guineanlahden rannalla (esim. Morley & Hays 1979).

On kuitenkin vielä syytä painottaa, että Afrikan suuret aavikot, Sahara pohjoisella pallonpuoliskolla sekä Namib ja Kalahari eteläisellä pallonpuoliskolla, ovat pitkälläkin aikavälillä tarkasteltuna pysyviä ekosysteemejä, eivät viimeisten vuosituhansien aikana ilmastomuutoksen tai ihmistoiminnan vaikutuksesta syntyneitä.

Viimeaikainen ilmaston kehitys

On siis kiistämätöntä, että Länsi-Afrikassa on ollut useita kuivuuskausia, joiden seurauksena Sahara on levinnyt kauas nykyisen savannin puolelle. Tämä tieto, niin arvokas kuin se tieteellisesti onkin, ei kuitenkaan paljoakaan auta Sahelin nykyisiä ongelmia pohdittaessa. Oleellisempaa on tarkastella ilmaston nykyisiä, geotieteellisessä mielessä lyhytaikaisia kehityssuuntia ja niiden syitä. Myös tässä aikaskaalassa järvien vedenpinnan tasoista ja geomorfologisesta aineistosta saatava ilmastollinen tieto on käyttökelpoista, mutta kuitenkin luonteeltaan epätarkkaa ja -suoraa. Arvokkaampaa tietoa viime vuosisadoilta Afrikan kuivilta alueilta tarjoaa historiallinen aineisto ja tältä vuosisadalta myös suora, mittauksiin perustuva ilmastotieto.

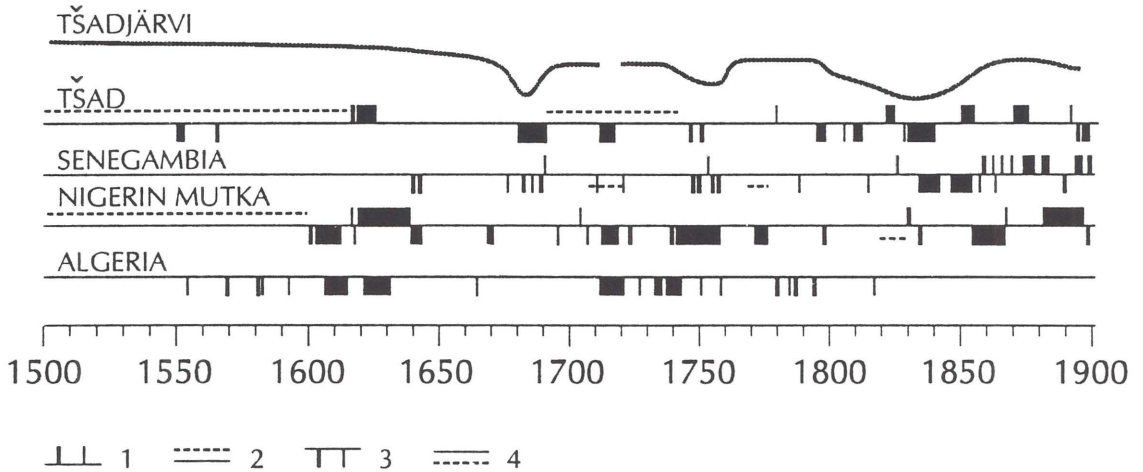
Pienen jääkauden (n. 1550–1850) ajalta Pohjois-Afrikan kuivilta alueilta on melko paljon luotettavaa paleoklimatologista tietoa. Ennen kaikkea historiallista tietoa tältä ajalta on runsaasti. Nicholson (1978, 1989) totesi monipuolisen tutkimusaineiston perusteella, että pienen jääkauden alkuaika, n. 1500–1650 oli pääasiasa kosteaa ja suotuisaa aikaa Sahelissa. Tšadjärven vedenpinta nousi 1570–1650 neljä metriä 1900-luvun keskiveden yläpuolelle (Maley 1977). Tšadjärven lähialueilla historiallisen tiedon perusteella aika oli poikkeuksellisen suotuisaa eikä kuivuuskausia ollut. Myös idempänä sademäärä oli korkea päätellen Niilin suurista tulvista – Niilin tulvien korkeus on riippuvainen Sinisen Nii-

lin virtaamasta, jota taas säätelee sen yläjuoksun, Etiopian vuoristoalueen, sademäärä (Nicholson 1978).

Pohjois-Afrikan kuivien alueiden ilmastossa tapahtui 1600-luvun lopulla äkillinen muutos kohti kuivuutta. Varsinkin 1680-luvulla oli useita peräkkäisiä kuivia vuosia. Pitkän kostean vaiheen jälkeen kuivuudella oli tuhoisa vaikutus alueen asukkaiden elinoloihin. Tätä todistaa, että kuivuuskausi muistetaan yhä mm. Tšadin ja Sudanin alkuperäisasukkaiden kansanperinteessä nimellä »seitsemän vuoden kuivuus». Tätä ei tosin voi tulkita kirjaimellisesti, sillä raamatullinen tarina Josefin seitsemästä laihasta ja seitsemästä lihavasta vuodesta on vaikuttanut tämänkaltaiseen suulliseen kansanperinteeseen (Nicholson 1978). Kuivuus ulottui koko Sahelin alueelle, itäosia myöten. Tšadjärven vedenpinnan taso laski nopeasti ja on 1600-luvun lopusta lähtien ollut laskussa, tosin vaihdellen (kuva 3)

1700-luvun puolivälin tienoilla, ilmeisesti 1738–1756, koko Länsi-Afrikkaa kohtasi toinen, vaikutuksiltaan ehkä koko historiallisen ajan draaattisin kuivuus (Rognon 1984). Keskisessä Sahelissa, nykyisen Nigerin paikkeilla, kuivuus-tuhot olivat ennennäkemättömät: mm. legendaarisen Timbuktun kaupungin asukkaista puolet kuolivat (Nicholson 1978). Kuivuus ulottui Senegalista ainakin Tšadiin asti. Ilmasto oli myös 1800-luvulla pääasiassa kuiva, erityisiä kuivuuskausia oli 1830- ja 1850-luvuilla. Tšadjärven vedenpinta oli alhaalla. 1800-luvun lopulla ilmasto muuttui kosteammaksi kaikilla Sahelin alueen ilmastoasemilla ja Tšadjärven vedenpinta kohosi. Samaan aikaan pieni jääkausi oli loppumassa pohjoisella pallonpuoliskolla.

Tšadjärven lisäksi Länsi-Afrikassa ei ole muita suuria järviä, joiden vedenpinnan vaihteluita tutkimalla olisi saatu tietoa ilmaston kosteudesta tai kuivuudesta. Sitäkin enemmän on tutkittu Itä-Afrikan hautavajoaman pohjalla olevien laskujoettomien järvien historiaa. Vaikka ne ovat selvästi Sahelin eteläpuolella, ne kertovat kuitenkin Sahelin itäosien ilmaston kehityksestä todennäköisesti enemmän kuin Länsi-Afrikan järvet. On myös todettu, että koko Saharan eteläpuolisen savannialueen järvet käyttäytyvät yleensä hyvin samankaltaisesti, sillä ne ovat riippuvaisia samoista suurilmastollisista perustekijöistä. Niinpä esim. Tšadjärven ja Kenian Turkanajärven kehityshistoriat ovat suurpiirteittäin samankaltaisia, vaikka niillä on välimatkaa n. 2 300 km. Raja, jonka eteläpuolella savannialueen järvien ilmastollinen reagointi ja kehityshistoria muuttuu, kulkee hyvin jyrkkänä hieman päiväntasaajan eteläpuolella (Finney & Johnson 1991).



Kuva 3. Kosteusolojen ja nälkävuosien kehitys 1500-luvulta lähtien päiväntasaajan pohjoispuolisessa Afrikassa historiallisen tiedon mukaan. 1 = runsassateinen vuosi, 2 = vaurauden aikaa, 3 = kuiva vuosi, 4 = kuiva ajanjakso. Yllä Tsadjärven vedenpinnan tasoa kuvaava käyrä. Viime vuosisatojen äkilliset kuivuusperiodit etenkin 1700- ja 1800-luvun puolivälissä erottuvat selvästi (Nicholson 1978).

Fig 3. The development of famine and drought in northern Africa from 1500 to 1900. 1 = a rainy year, 2 = period of prosperity, 3 = a dry year, 4 = dry period. (Nicholson 1978).

Pienen jääkauden loppuaikana viime vuosisadan lopulla Afrikan savannialueilla oli lyhyt kostea ilmastovaihe. Sademäärät kasvoivat suuresti Atlantin rannikolta Itä-Afrikkaan saakka. Ilmastomuutos oli äkillinen ja voimakas: tämä ilmenee kuvasta 4, jossa on kuvattu seitsemän Afrikan järven vedenpinnan tason vaihteluita 1800-luvulta lähtien. Kosteaa vaihe näyttää alkaneen hyvin samanaikaisesti 1860-luvulla erittäin laajalla alueella. Muutamassa vuodessa vedenpinta nousi 5–10 m. Yhtä nopea ja selvä on ollut kostean vaiheen päätyminen 1880-luvulla. Kuitenkin Tšadjärvellä ja Chew Bar -järvellä korkea vedenpinnan asema on jatkunut hieman kauemmin. Tältä ajalta on myös muuta tietoa, joka todistaa selvästi kosteasta periodista. Nigerin ja Niilin virtaamat kasvoivat, samoin kuin sademäärät niillä harvoilla ilmastoasemilla, joita tähän aikaan Afrikan kuivilla alueilla oli. Myös Sahelin alkuperäisasukkaat tuaregit muistavat tämän suotuisan ilmastovaiheen. Heiltä saatujen tietojen perusteella sademäärät kasvoivat Saharan sisäosia myöten ja satomäärät olivat hyviä (Nicholson 1978).

Sahelin ilmaston viimeaikaisin kehitys on luonnollisesti ollut suurimman tieteellisen ja populaarin kiinnostuksen kohteena. Usein asiat on esitetty suoraviivaisesti ja rohkeasti yleistäen. Tavallista on ollut, että faktoina esitetyt käsitykset ovat perustuneet enemmän esim. poliittisiin

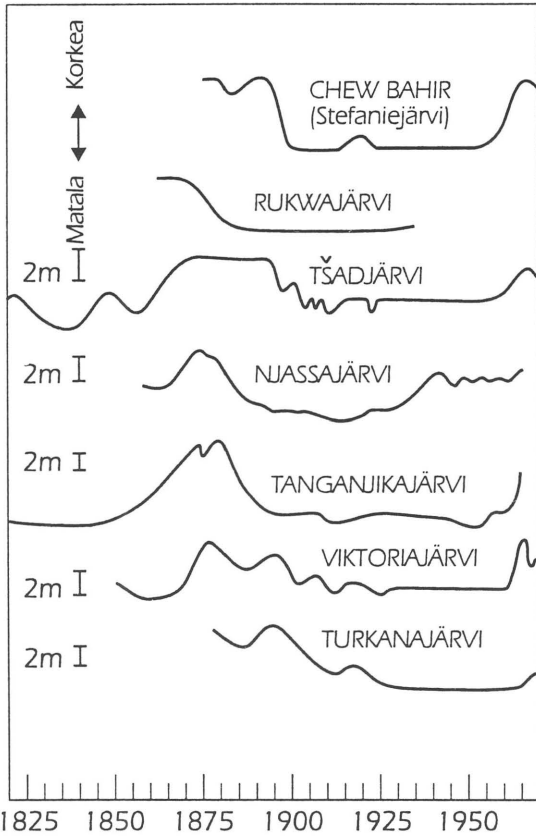
tarkoitukseen kuin tieteellisiin perusteisiin. Keskeisimmät kysymykset ovat olleet:

1) Onko ilmasto Sahelin alueella muuttunut tai muuttumassa selvästi kuivemmaksi vai onko kyse vain lyhytaikaisista kuivuusperiodeista?

2) Jos ilmasto on muuttunut tai muuttumassa pysyvästi kuivemmaksi, ovatko syynä ilmakehän suurten ilmavirtaussysteemien muutokset vai onko ihminen luonnonoloja muuttamalla aiheuttanut sateiden vähenemisen?

Vaikka ilmastoasemia Länsi-Afrikassa on edelleen liian vähän, on Sahelistakin saatavissa useilta paikoilta lähes koko 1900-luvun kattavia sademäärätietoja. Tällä vuosisadalla Sahelin alueella on ollut kolme kuivuuskautta (kuva 5). Ensimmäinen niistä oli vuosina 1910–1916. Vaikka kuivuuskausi oli lyhyt, oli sillä huomattavia vaikutuksia. Sahelin tuaregit muistavat yhä vuoden 1913 kuivuutta seuranneen nälänhädän. Kuivuudesta todistaa myös se, että Sahelissa liikkuneet tutkimusmatkailijat joutuivat ylittämään jalan paikkoja, jotka ennen oli voitu ylittää veneillä (Rognon 1991). Toinen kuivuuskausi sattui toisen maailmansodan aikana, 1941–1945. Sekin aiheutti nälänhätää, erityisesti Nigeriassa.

Nyt läntisen Sahelin alueella jatkuva kuivuuskausi alkoi dramaattisesti 1968–1973 aiheuttaen Sahelin ensimmäisen kansainvälisen uutiskynnyksen ylittäneen kriisitilanteen. Kuivuus näytti

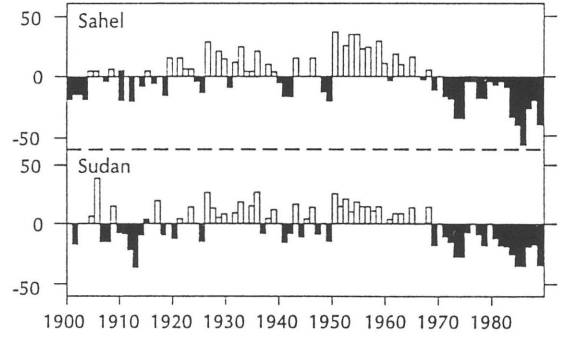


Kuva 4. Seitsemän Afrikan järven vedenpinnan vaihtelut 1800- ja 1900-luvuilla (Nicholson 1978). Järvien vedenpinnan voimakas lasku ajoittuu 1800-luvun loppuun.

Fig. 4. Variations of water levels of seven African lakes from 1825 (Nicholson 1978).

jäävän vuosisadan muiden kuivuuskausien tapaan noin viiden vuoden mittaiseksi. Muutaman koston vuoden jälkeen ilmasto muuttui vuonna 1976 kuitenkin uudelleen kuivaksi ja on sellaisena pysynyt. Äärimmäisen kuiva kausi oli 1981–1984. Alussa kuivuutta oli Sahelissa, pohjoisessa Afrikassa ja myös osissa eteläistä Afrikkaa. Seuraavana vuonna kuivuus paheni ja koetelti lähes koko sademetsien ulkopuolista Afrikkaa. Sademäärät nousivat hieman vuonna 1983, mutta vuosi oli kuitenkin kuiva läntisessä Sahelissa kuten lähes koko Afrikan mantereella. Kuivuus jatkui vielä hieman lievempänä lähes vuosikymmenen loppuun asti: vasta 1988 sademäärät olivat samaa luokkaa kuin 1970-luvun puolivälissä.

Sahelin itäosissa sademäärän kehitys tällä vuosisadalla on ollut melko samankaltainen kuin län-



Kuva 5. Sademäärien viimeaikaisin kehitys Sahel- ja Sudansavannin alueella ilmaistuna prosentuaalisina poikkeamina pitkäaikaisesta keskiarvosta (Goudie 1991).

Fig. 5. The recent rainfall trends in Sahelian and Sudanian savanna region expressed as a percentage departure from the long-term mean (Goudie 1991).

nempänä. Sudanissa vuosisadan alku oli sateinen. Ensimmäinen kuiva periodi oli 1910–1920. Toinen, voimakkaampi kuivuus, alkoi vuonna 1966 ja on jatkunut näihin aikoihin asti. Tämä periodi on selvästi havaittavissa myös muualla Sudanissa (Hulme 1988). Erityisen kuivia olivat vuodet 1982 ja 1984, Sahelin itäosan tuhoisat kriisivuodet. Myös vuosi 1983 oli Keski-Sudanissa vähäsateinen. Sudanissa tehdyt laajat klimatologiset tutkimukset viittaavat selvästi siihen, että alueella vallitsee kuiva ilmastotrendi. Sademäärän vähenemistäkin selvempää on ollut sadepäivien määrän väheneminen. Aivan viime vuosina sademäärät ovat vaihdelleet suuresti.

Sekä Sahelin itä- että länsiosissa näyttää siis 1960-luvun lopulla alkaneen selvä ja pitkä kuiva ilmastovaihe. Tämä käy ilmi lähes kaikkien Sahelin ja sen lähialueiden ilmastoasemien sademäärien kehityksistä jaksoilla 1950–1959 ja 1970–1984. Sademäärän väheneminen on ollut hyvin tasaisesti n. 50%. Huomion arvoista on, että sademäärien pieneneminen on koskenut myös Sahelia reunustavia runsassateisimpia alueita (Nicholson 1989).

Muualla Afrikan savannialueilla kuivuus ei ole ollut yhtä selvää. Itä-Afrikan savanneilla, Keniassa ja Tansaniassa, kehitys on ollut suotuisampaa. Myöskään koko Länsi-Afrikka ei ole kärsinyt kuivuudesta viime vuosikymmeninä. Esim. Nigeriassa, sudansavannin ja sahelisavannin eteläisimmässä osassa, viime aikojen sademäärät ovat olleet kohtalaisia (Hare 1983).

On siis kiistämätöntä, että suurimmassa osassa Sahelia ilmasto on muuttunut kuivemmaksi. Tämä koskee koko vuosisataa ja erityisesti kol-

mea viimeistä vuosikymmentä. Dramaattiset kuivuuskaudet kuuluvat siis mitä ilmeisimmin luonnollisena osana Sahelin alueen ilmastoon. Kuitenkin on monesti esitetty, että vasta kolonialismin aikana ja erityisesti toisen maailmansodan jälkeen, maailman talousrakenteen muututtua paikallistalouksista kohti globaalia markkinataloutta, kuivuusperiodit ovat alkaneet aiheuttaa nälkäkatastrofeja. Kuten edellä on käynyt ilmi, ei tämä vastaa historiallisia tietoja Sahelistä. Äkilliset kuivuuskatastrofit ovat johtaneen myös inhimillisiin katastrofeihin jo vuosisatoja sitten.

Ei kuitenkaan ole syytä epäillä, etteikö Sahelin talousjärjestelmä olisi muuttunut alttiimmaksi kuivuuden suhteen. Sahelin alkuperäisväestö on perinteisesti ollut erinomaisesti sopeutunut elinympäristöönsä, nimenomaan sen vaihtelevuuteen ja epävakaisuuteen. Sahelin paimentolaiskansojen liikkuvuus on ollut yksi tapa sopeutua kuivuusperiodeihin, samoin kyky säädellä ja käyttää karjaa monipuolisesti. Paimentolaisten taito löytää vettä kuivilta alueilta hämmästytti aikoinaan eurooppalaisia. Viime vuosikymmeninä tilanne on kuitenkin muuttunut. Sahelin alueella viime vuosikymmeninä tapahtunut demografiaa ja yhteiskuntarakennetta koskettanut muutos on mitä ilmeisimmin yksi syy alueen moniin ongelmiin. Monet vanhat laidunmaat ovat nykyisin ravahiljelymaina. Esim. Nigerissä maapähtkinän, tyyppillisen rahakasvin, viljelypinta-ala kuusinker-taistui 1934–1968 (Goudie 1991). Perinteinen paimentolaisuus on joutunut vaikeuksiin valtiolisten rajojen takia. Rajojen ohella nykyaikaistumiseen liittynyt asutuksen vakioiminen on vähentänyt paimentolaisten kykyä sopeutua ympäristön nopeisiin muutoksiin. Enää ei ole mahdollista lähteä karjan kanssa liikkeelle, pois kuivuudesta kärsiviltä alueilta.

Kuivuuden syyt

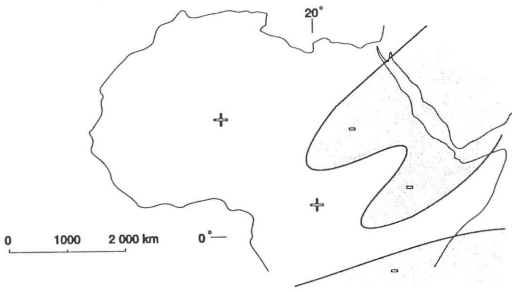
Viime vuosina vahvistunut teoria siitä, että Afrikan kuivuuden syyt ovat suurilmastollisia ja ihmistoiminnasta riippumattomia, on ristiriidassa usein esitetyn biogeofysikaalisen mallin kanssa, jonka mukaan Afrikan lisääntynyt kuivuus johtuu ensisijaisesti ihmistoiminnasta. Tämän teorian ensimmäisenä esittäneen Charneyn (1975) mukaan ihmisen tuhotessa kasvillisuutta auringon tulosäteilyn albedo maanpinnalla kasvaa. Albedon kasvu muuttaa ilmakehän energiatasetta siten, että troposfäärin yläosassa lisääntyvät alaspäin suuntautuneet ilmavirtaukset nostaen ilmanpainetta maan pinnalla. Korkea ilmanpaine ja alaspäin kulkevat ilmavirrat johtavat tunnetusti vähäsaateisiin oloihin. Myös Mannin (1990) mu-

kaan kasvillisuuden tuhoamisen vaikutus olisi suurempi kuin globaalien ilmavirtaussysteemin muutosten vaikutus. Hän kuvaa vaikuttavasti ihmisen aiheuttaman muutoksen tuhoisuutta: »Puiden poisto vähentää päivisin tulosäteilyn absorptiota, päivällä ilman ja maaperän lämpötila nousee, tuulen nopeudet kasvavat, maaperän rakenne huononee, maaperän kosteus vähenee, lisää tulosäteilyä heijastuu takaisin troposfääriin kulu-neesta maasta, maaperän yläosan eroosio kiihtyy ja ilmakehän pölypitoisuus kasvaa johtaen sateen muuttumiseen yhä satunnaisemmaksi ja määräl-tään vähäisemmäksi.»

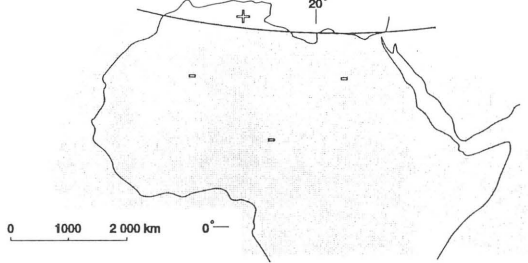
Tutkimukset eivät kuitenkaan ole osoittaneet selvää yhteyttä albedon ja kuivuuden välillä Sahelissa (Courel *et al.* 1984). Kuivuus 1970-luvun alussa johti albedon kasvuun 1972–1973. Mikäli albedo olisi kuivuuden syy, olisi sademäärä jatkuvasti laskenut niillä alueilla, jossa albedo oli alkanut kasvaa. Kuivuutta seurasi kuitenkin kosteampia vuosia 1970-luvun puolivälissä, jolloin kasvillisuus lisääntyi ja vähensi albedoa. Vuosikymmenen lopulla palannutta kuivuutta edelsi siten vähäisen albedon aika. Albedon merkitystä voidaan tarkastella myös toisella, kuvassa 6 esitetyllä tavalla. Kuivuuden tai kosteuden alueellinen kattavuus on erittäin suuri: kun Sahelissa on kuivaa, kattaa kuivuus yleensä lähes koko Sahelin ja Saharan. Kosteina vuosina sademäärät ovat suuria yhtä laajalla alueella (Nicholson 1986). Tällainen alueellinen kattavuus ei viittaa albedon kaltaiseen paikalliseen ilmiöön kuivuuden synnä, vaan osoittaa pikemminkin suurten ilmavirtaussysteemien vaihteluiden merkitystä kuivien tai kosteiden kausien aiheuttajina. Tutkimustulokset eivät siis tue käsitystä lisääntyneestä albedosta kuivuuden aiheuttajana tai edes sen merkittävänä lisääjänä, vaan ennemminkin viittaavat albedon kasvavan kuivuuden seurauksena (Druyan 1989).

Toinen teoria liittyy monsuuni-ilmiöön. On havaittu, että kuivina vuosina Sahelin alueelle elintärkeät kosteutta tuovat lounaiset, matalat ilmavirtaukset ovat heikenneet. Myös troposfäärin yläosan ilmavirtauksen on esitetty heikentyneen. Tällainen muutos lisäisi itäisten, kuivien tuulten voimaa ja vähentäisi kosteiden ilmavirtausten merkitystä. Hyvin luonnollista olisi myös liittää Sahelin kuivuus intertrooppisen konvergenssi-vyöhykkeen ITCZ:n sijainnin muutoksiin. Mm. Philanderin (1986) mukaan vuoden 1984 äärimäinen kuivuus johtui ITCZ:n jäämisestä tavanomaista etelämmäksi. Tämäkään teoria ei kuitenkaan sovi selittämään kaikkia kuivuusvuosia. Esim. 1982 ja 1983 olivat myös kuivuusvuosia, vaikka ITCZ ulottui huomattavasti pohjoisemmaksi kuin 1984 (Druyan 1989). On myös ky-

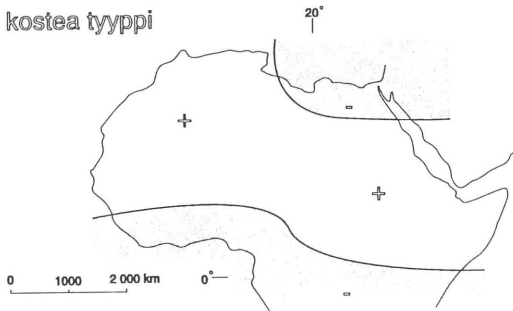
kosteaa tyyppi



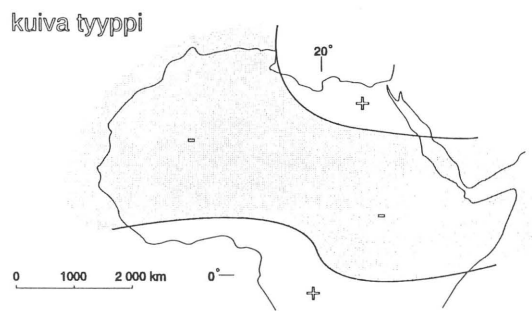
kuiva tyyppi



kosteaa tyyppi



kuiva tyyppi



Kuva 6. Kuivien ja kosteiden vuosien keskimääräiset alueelliset kattavuudet Pohjois-Afrikassa. Laaja alueellinen kattavuus viittaa suurilmastollisiin tekijöihin kuivien tai kosteiden vuosien aiheuttajina (Nicholson 1986).

Fig. 6. The areal coverage of drought and rainy years in northern Africa. The frequent widespread spatial coherence shows that large-scale climatic factors determine the annual rainfall over north Africa (Nicholson 1986).

seenalaista, onko ITCZ:n sijainti yleensäkin riittävä selitys äärimmäisille kuivuusvuosille, sillä suurimmat sademäärän erot Sahelissa johtuvat Nicholsonin (1986) mukaan sateen intensiteetin muutoksista, eivät sadekauden pituudesta.

Edellä esitetyt teoriat eivät myöskään ole varsinaisia selityksiä Sahelin kuivuuden syistä. Ne ovat pikemminkin kuivuuden aiheuttavia mekanismeja, seurauksia mutteivät syitä: esim. ITCZ:n sijainti ei vaihtelee sattumanvaraisesti, vaan sen täytyy olla yhteydessä laajempaan klimatologiseen kokonaisuuteen. Tästä syystä viime aikoina ratkaisua Sahelin kuivuuteen on alettu hakea yhä kauempaa, yhä suuremmista ilmastomalleista ja yhä monimutkaisemmilla metodeilla. Erittäin todennäköistä on, että Sahelin sademäärät ovat voimakkaasti riippuvaisia maapallon merialueiden veden pintalämpötilan ja trooppisen ilmavirtaussysteemin muutoksista.

On todennäköistä, että tapahtumat toisella puolella maapalloa, Tyynellä valtamerellä, saattavat olla yhteydessä Afrikan kuivuuteen. Uusimmis-

sa tutkimuksissa on alettu kiinnittää huomiota Tyynen valtameren merivirtojen muutoksen, El Niño -ilmiön, vaikutukseen maapallon mantereiden sääteluihin. El Niño tarkoittaa tilannetta, jossa Etelä-Amerikan länsirannikolla, päiväntasaajavyöhykkeessä, valtameren normaalisti hyvin kylmän pintaveden lämpötila äkillisesti kohoaa. Tämä johtaa kalastuksen kannalta katastrofaalisiin seurauksiin Etelä-Amerikan rannikolla ja viileämpää vettä Tyynen valtameren itäosiin tuovan Walkerin sirkulaation lakkaamiseen Tyynellä valtamerellä (Lockwood 1984). El Niño ei kuitenkaan sekään ole erillinen paikallinen ilmastollinen ilmiö. Sen on havaittu olevan yhteydessä eteläisen pallonpuoliskon merialueet lähes kokonaan kattavaan ilmaston eteläiseen oskillointiin (Southern Oscillation). Eteläisen oskilloinnin yhteydessä ilmanpaine Tyynen valtameren kaakkoisosissa Tahitin tienoilla nousee ja vastaavasti laskee Intian valtameren koko eteläosassa ja erityisesti Darwinin kaupungin edustalla Pohjois-Australiassa. Molemmilla alueilla lämpötila las-

kee. Syklonin ja antisyklonien väliin jäävää Australia kärsii tavallisesti ankarasta kuivuudesta.

El Niñon ja eteläisen oskilloinnin yhä yleisemmin kirjallisuudessa näkyvä yhteisnimitys on ENSO (El Niño – Southern Oscillation). ENSO toistuu keskimäärin viiden vuoden välein. Poikkeuksellinen tilanne kestää yleensä vuoden verran. Laajaa globaalia ilmastollista vuorovaikutusysteemiä, jonka kautta ENSO vaikuttaa jopa Sahelin ilmastoon, kutsutaan telekonnektioksi ruotsalaisen klimatologin Ångströmin antaman termin mukaan. Vielä ei ole selvää, millainen telekonnektio Tyynen meren tapahtumien ja Sahelin kuivuuden välillä vallitsee. On kuitenkin havaittu (Wright 1987), että Guineanlahden meriveden lämpötila korreloi selvästi itäisen Tyynen valtameren veden lämpötilan kanssa. Tämä on erityisen merkittävää, sillä aivan viime aikoina klimatologiassa on alettu painottaa valtamerien pintalämpötilojen anomalioiden (Sea Surface Temperatures Anomalies SSTAs) merkitystä sademäärän muutosten selittäjänä. Negatiivisiin anomaliioihin liittyvät yleensä korkeapaine ja ilmakehän staattiset olot. Folland *et al.* (1986) laskivat tietokoneella maapallon eteläisen ja pohjoisen pallonpuoliskon valtamerialueiden välisen pintaveden lämpötilaeron ja Sahelin kesäsateiden määrän korrelaatiota. Kovin selväksi yhteys ei kuitenkaan osoittautunut. Korrelaatiota pystyttiin parantamaan hieman laskemalla Intian valtameri kokonaan kuuluvaksi eteläiselle pallonpuoliskolle ja »muuttamalla» 0–5° N trooppista Atlanttia eteläisen pallonpuoliskon osaksi. Tällöinkin valtamerien pintalämpötila selitti kuitenkin vain n. 50 % Sahelin sademäärän vaihtelusta.

Kuvassa 7 on vertailltu El Niñon esiintymistä, Länsi-Sahelin sademääriä ja maapallon eteläisen sekä pohjoisen pallonpuoliskon valtamerien pintavesien lämpötilaeroja. Siitä voidaan havaita, että viime vuosikymmeninä El Niño -vuodet ovat olleet kaikki erittäin kuivia vuosia. Myös valtamerien suuri lämpötilaero näyttää viime vuosikymmeninä olleen yhteydessä Länsi-Sahelin kuivuteen. Sitä vastoin vielä 1950-luvulla El Niñolla ja Länsi-Sahelin kuivuudella ei ole ollut yhteyttä.

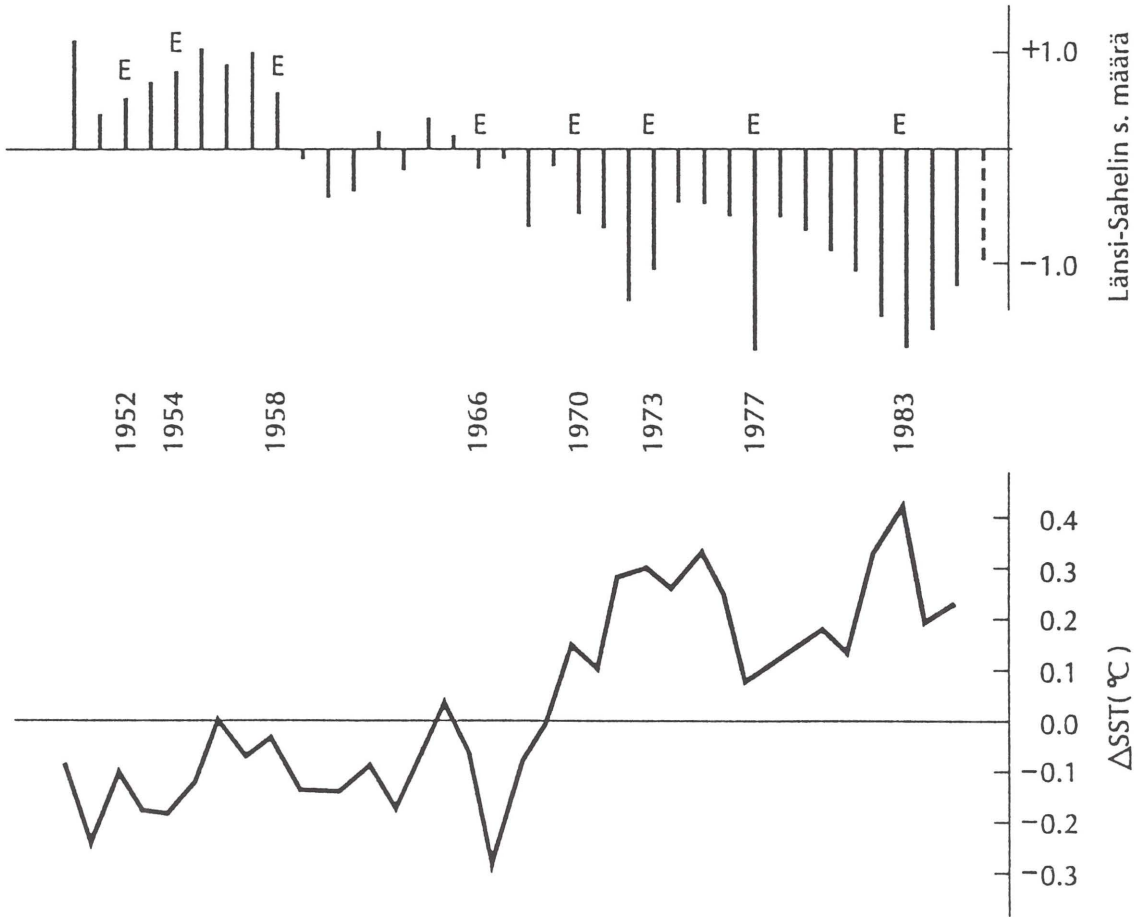
Uusimmissa tutkimuksissa valtamerien veden lämpötilan vaihtelut on yhdistetty kehittyneimpiin ilmastomalleihin. Useimmiten on käytetty GCM -ohjelmaa (General Circulation Model). Ilmastomallien avulla voidaan uudelleen järjestää historialliset tilanteet, ja tutkia, kuinka mallien antama kuva ilmastosta vastaa todellista. Sahelin kuivuuden syytä etsittäessä mallin avulla voidaan muutella eri tekijöiden luonnetta ja intensiteettiä ja yrittää erottaa, mikä tekijä vaikuttaa merkittävimmin. Ongelma kuitenkin on, ettei koe

testaa välttämättä tutkimushypoteeseja vaan itse GCM:n luotettavuutta. GCM:n avulla tehtyjen kokeiden avulla on voitu todeta selvä negatiivinen korrelaatio ($r = -0,95$) etenkin eteläisen Atlantin kevätaikaisen meriveden lämpötilan ja Sahelin kesäsademäärän välillä. Konnektio on melko monimutkainen. Se perustuu sekä meriveden lämpötiloihin että niistä seuraaviin ilmanpaineen eroihin. Kun meriveden lämpötilan muutos Atlantin etelä- ja etenkin kaakkoisosissa on positiivinen ja Atlantin trooppisilla osilla negatiivinen, heikkenee leveyspiirien mukainen ilmanpainegradientti Atlantilla. Tästä seuraa itäisen Etelä-Atlantin tuulten pituuspiirien suuntaisen komponentin heikkeneminen, mikä vähentää kosteiden ilmavirtausten konvergenssiä Sahelissa ja aiheuttaa näin kuivuutta (Drüyan 1991).

Koska valtamerien pintalämpötilan muutoksista ja valtamerien sekä ilmakehän välisistä vuorovaikutussuhteista tiedetään vielä melko vähän, on telekonnektioista johtuvan kuivuuden ennustaminen vaikeaa. Tilanteeseen suhtaudutaan joka tapauksessa vakavasti, ja mm. Etiopian maataloudesta vastaavat viranomaiset ovat olleet yhteydessä USA:n Ilmakehän Tutkimuskeskukseen (US National Center for Atmospheric Research) Coloradossa, joka on erikoistunut ENSOn ja telekonnektioiden tutkimiseen (Cave 1991). Tavoitteena on, että ENSOn keskeisten piirteiden tarkkailu Tyynellä valtamerellä auttaisi ennustamaan kehityksen. Näin ei vielä ole, vaan ennusteet ovat usein epäonnistuneet. Toistaiseksi ei ole edes selvyyttä siitä, mitkä tekijät johtavat El Niñon syntynyt Etelä-Amerikan rannikolla.

Valtamerien pintaveden lämpötilaerojen merkitystä painottavat mallit ovat samansuuntaisia kuin Rognonin (1984) esittämät teoriat yhteydestä Sahelin kuivuuden ja Pohjois-Atlantin kylmyyden välillä. Rognonin mukaan Sahelin kuivuuskautet ovat hyvin usein olleet samanaikaisia kuin Euroopan kylmät ja sateiset kesät. Ainakin 1980-luvun alkupuolen kuivuuden aikana malli piti paikkansa. Esim. kesällä 1984, jolloin itäisen Sahelin alueella sateet jäivät lähes täysin tulematta, oli Etelä-Amerikan ja Länsi-Intian saariston pohjoispuolisen Atlantin pintaveden lämpötila 0,5° C tavallista alempi. Toisaalta Länsi-Afrikan rannikolla ja Guineanlahdella pintavesi oli 1–2° C normaalia lämpimämpää (Rapp 1988). Tällainen tilanne johtanee Saheliin sadetta tuovien monsuunituulien siirtymiseen etelämmäksi.

Uusimmat tutkimukset ovat tuoneet uusia uhkakuvia. Kun Sahelin kuivuuskausien ajoittumista on verrattu maapallon keskilämpötilaan, on havaittu, että Sahelissa on kuivaa sellaisina vuosina, kun maapallon keskilämpötila on korkea (Pearce 1991). Tämä on erityisen huolestuttavaa,



Kuva 7. Yllä Länsi-Sahelin sademäärän kehitys 1952 lähtien (keskipoikkeamina esitettynä) ja sen vertailu El Niño -vuosiin (E). Alla pohjoisen ja eteläisen pallonpuoliskon valtamerien vesien välisen lämpötilaeron kehitys, SST (Druyan 1989).

Fig 7. The rainfall departures in the western Sahel from 1952. The El Niño years are shown by E. The lower figure depicts the interhemispheric differences in the mean July-September sea surface temperatures (SST) of the global oceans. Indian Ocean is treated as part of the southern hemisphere (Druyan 1989).

sillä maapallon keskilämpötila on ilmeisesti kasvihuoneilmiön voimistumisen vuoksi noussut viime vuosina voimakkaasti. Täytyy muistaa, että kasvihuoneilmiön voimistumisesta johtuva ilmastolämpeneminen ei ole verrattavissa varhaisen holoseenin säteilymäärän lisääntymiseen, joka lisäsi sateita Sahelin alueella. Maapallon vuotuisen keskilämpötilan kehitystä kuvaava käyrä ei kuitenkaan ole täysin yhdenmukainen Sahelin kuivuutta kuvaavan käyrän kanssa, vaan esim. vuonna 1988 Sahelissa oli sateista, vaikka maapallon keskilämpötila oli korkea. Vuoden 1988 jälkeen yhteys on kuitenkin selvä. Vuonna 1990, maapallon lämpimimpänä vuotena vuosisatoihin, Sahelin länsiosissa, Senegalissa, Mauritaniassa,

Burkina Fasossa ja Malissa, sademäärä oli 75 % keskimääräisestä, ja idempänä, Sudanissa ja Etiopiassa, alle puolet keskimääräisestä. Myös lämpötilat olivat epätavallisen korkealla (Pearce 1991). Vuoden 1990 lopulla alettiin maailmanlaajuisesti kiinnittää huomiota kuivuuden aiheuttamiin maatalouden tuhoihin Sahelissa.

On kiistämätön tosiasia, että viimeiset kolme vuosikymmentä ovat Afrikan Sahelsavanneilla olleet hyvin kuivia. Lisäksi on edellä esitettyjen teorioiden valossa todennäköistä, että Sahelin kuivuus jatkuu tai vielä pahenee tulevaisuudessa. Varmaa se ei kuitenkaan ole. Edes sitä, jatkuuko maapallon viime vuosien voimakas lämpeneminen, ei varmasti voida ennustaa. Jos maa-

pallon keskilämpötila jatkaa nousuaan, ei sekään välttämättä vaikuta Afrikassa kuivuutta lisäävästi. Suurin maapallon lämpötilan nousu on ennustettu tapahtuvaksi talvikuukausien aikana, joka ei vaikuttaisi niin voimakkaasti kesällä sateensa saaviin alueisiin kuten Sahel. Yksikään ilmastomalli ei myöskään voi luotettavasti ennustaa, kuinka ilmaston mahdollinen lämpeneminen vaikuttaa valtamerien pintalämpötilaeroihin tai El Niñoon. Sahelin alueella on ennenkin ollut muutaman kymmenen vuoden mittaisia kuivia jaksoja, jotka ovat vaihtuneet muutamassa vuodessa kosteiksi kausiksi. Joka tapauksessa näyttää olevan niin, että Sahelin kuivuuden syynä ovat muutokset maapallon globaalissa ilmakehän kiertosysteemeissä, eivät ihmisen aiheuttamat muutokset Sahelissa, maan pinnalla.

KIRJALLISUUS

- Berger, A.L., J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla & B. Saltzman (eds.). (1984). *Milankovitch and climate. Understanding the response to astronomical forcing*. Reidel, Dordrecht.
- Binns, T. (1990). Is Desertification a Myth? *Geography* 75, 106–113.
- Cave, S. (1991). The El Niño phenomenon and the planet's climate. *Our Planet* 3, 12–13.
- Charney, J. G. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quaternary Journal of Royal Meteorological Society*, 101, 193–202.
- COHMAP Project members (1988). Climatic changes of the last 18 000 years: Observations and model simulations. *Science* 241, 1043–1052.
- Courel, M., R Kandel & S. Rasool (1984). Surface albedo and the Sahel drought. *Nature* 307, 528–531.
- Druyan, L. M. (1989). Advances in the study of sub-Saharan drought. *International Journal of Climatology* 9, 77–90.
- Druyan, L.M. (1991). The sensitivity of sub-Saharan precipitation to Atlantic SST. *Climatic Change* 18, 17–36.
- Finney, B. P. & T. C. Johnson (1991). Sedimentations in Lake Malawi (East Africa) during the past 10 000 years: a continuous paleoclimatic record from the southern tropics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 85, 351–366.
- Folland, C., T. Palmer, D. Parker (1986). Sahel rainfall and worldwide sea temperatures. *Nature* 320, 602–607.
- Gasse, F. (1980). Late Quaternary changes in lake levels and diatom assemblages on the southeastern margin of the Sahara. *Palaeoecology of Africa* 12, 333–350.
- Giresse, P. (1978). Le controle climatique de la sédimentation marine et continentale á la fin Quaternaire – Problèmes de correlations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 23, 57–77.
- Goudie, A. (1983). *Environmental change*. Second edition. 258 s. Clarendon Press, Oxford.
- Goudie, A. (1985). *The Search for Timbuktu. A view of Deserts*. 28 s. Clarendon Press, Oxford.
- Goudie, A. (1987). Change and instability in the desert environments. *Teoksessa* Clark, M. J., K. J. Gregory & A. M. Gurnell (eds.): *Horizons on Physical Geography*, 250–267. Macmillan Education, Hong Kong.
- Goudie, A. (1991). The climatic sensitivity on desert margins. *Geography* 73–76.
- Grainger, A. (1990). *The Threatening Desert. Controlling Desertification*. 369 s. Earthscan Publications, London.
- Grove, A.T. (1969). Landforms and Climatic Change in the Kalahari and Ngamiland. *Geographical Journal* 135, 192–212.
- Grove, A.T. & R.A. Pullan (1963). Some aspects of the Pleistocene palaeogeography of the Chad Basin. *Teoksessa* Howell, F.C. & F. Bourliere (eds.): *African Ecology and Human Evolution*, 230–245. Adeleine, Chicago.
- Hare, F.K. (1983). Climate on the desert fringe. *Teoksessa* Gardner, R. & H. Scoging (eds.): *Mega-geomorphology*. Clarendon Press, Oxford.
- Hulme, M. (1988). The tropical easterly jet and Sudan rainfall anomalies, 1968–1985. *Climate Monitoring* 17, 122–135.
- Imbrie, J. & K. P. Imbrie (1979). *Ice Ages. Solving the Mystery*. 224 s. MacMillan Press, New York.
- Kutzbach, J. E. (1980). Estimates of past Climate at Paleolake Chad, North Africa, Based on a Hydrological and Energy-Balance Model. *Quaternary Research* 14, 210–223.
- Kutzbach, J. E. (1981). Monsoon Climate of the Early Holocene: Climate Experiment with the Earth's orbital Parameters for 9 000 years ago. *Science* 214, 59–61.
- Lézine, A.-M. (1989). Late Quaternary Vegetation and Climate of the Sahel. *Quaternary Research* 32, 317–333.
- Lézine, A.-M. (1991). West African paleoclimates during the last climatic cycle inferred from an Atlantic deep-sea pollen record. *Quaternary Research* 35, 456–463.
- Lockwood, J. G. (1984). *World Climatic Systems*. 292 s. Edward Arnold, London.
- Morley, J. J. & J. D. Hays (1979). Comparison of glacial and interglacial oceanographic conditions in the south Atlantic from variations in calcium carbonate and radiolarian distributions. *Quaternary Research* 12, 396–408.
- Mountjoy, A. B. & D. Hilling (1988). *Africa. Geography and Development*. 462 s. Hutchinson, London.
- Nicholson, S. E. (1978). Climatic variations in the Sahel and other African regions during the past five centuries. *Journal of Arid Environments* 1, 3–24.
- Nicholson, S. E. (1986). The spatial coherence of African rainfall anomalies: interhemispheric teleconnections. *Journal of Climatology and Applied Meteorology* 25, 1365–1380.

- Nicholson, S. E. (1989). Long-term changes in African rainfall. *Weather* 44, 47–56.
- Niemelä, T. (1987). Itä-Afrikan ja eteläisen Keski-Afrikan savannien yleispiirteitä. *Teoksessa* Erkkilä, A. & T. Kuuluvainen (eds.): *Tropiikin metsät*, 93–111. Gummerus, Jyväskylä.
- Pachur, H.-J. & P. Hoelzmann (1991). Paleoclimatic Implications of Late Quaternary Lacustrine Sediments in Western Nubia, Sudan. *Quaternary Research* 36, 257–276.
- Pearce, F. (1991). A sea change in the Sahel. *New Scientist* 2, 31–32.
- Philander, S. (1986). Unusual conditions in the tropical Atlantic Ocean in 1984. *Nature* 322, 236–238.
- Rapp, A. (1988). Klimatfluktuationer i Afrikas savannzoner. *Ymer*, Årgång 108. Svenska Sällskapet för Antropologi och Geografi.
- Richardson, J. L., T. J. Harvey & S. A. Holdship (1978). Diatoms in the history of shallow East African lakes. *Pol. Arch. Hydrobiol.* 25, 341–353.
- Ritchie, J.C., C.H. Eyles & C.V. Haynes (1985). Sediment and pollen evidence for an early to mid-Holocene humid period in the eastern Sahara. *Nature* 314, 352–355.
- Roche, E. (1991). Evolution des paléoenvironnements en Afrique centrale et orientale au Pléistocène supérieur et à l'Holocène. Influences climatiques et anthropiques. *Bulletin de la société géographique de Liège* 27, 187–208.
- Rognon, P. (1984). Les anomalies du climat actuel et les crises climatiques. *Le Courrier du CNRS. Supplément* 57, 60–64.
- Rognon, P. (1991). Les sécheresses au Sahel replacées dans l'évolution climatique des vingt derniers millénaires. *Sécheresse* 2, 199–210.
- Spaulding, W. G. (1991). Pluvial climatic episodes in North America and North Africa: types and correlations with global climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 84, 217–227.
- Street, F. A. & A. T. Grove (1976). Environmental and climatic implications of late Quaternary lake-level fluctuations in Africa. *Nature* 261, 385–389.
- Street – Perrott, F. A. & A. T. Grove (1979). Global maps of lake-level fluctuations since 30 000 BP. *Quaternary Research* 12, 83–118.
- Street – Perrott, F. A. & S. P. Harrison (1985). Lake levels and climate reconstruction. *Teoksessa* Hecht, A.D. (toim.). *Paleoclimatic Analysis and Modelling*, 295–341. Wiley, New York.
- Wright, P.B. (1987). *Variations in Tropical Atlantic Sea-surface Temperatures and their Global Relationships*. Report No. 12, 41 s. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.