

Pliocene Panamian Gateway tectonics and climate change at 3.3 Ma: palynological and Mg/Ca analysis of MIS M2 at Caribbean ODP Site 999

Van Renterghem Cédéric

Vakgroep Geologie en Bodemkunde, Universiteit Gent
E-mail: cederic.2010@hotmail.com

Inleiding en literatuurstudie

Het Plioceen (5.33-2.59 Ma) staat gekend als een periode van ingrijpende klimaatveranderingen (Wrenn *et al.*, 1999). Tegen een achtergrond van globale afkoeling vonden achtereenvolgens Marien Isotopenetage M2 (MIS M2) en de midden-Plioceen Warme Periode plaats, rond respectievelijk 3.30 Ma en 3.29-2.97 Ma. MIS M2 komt overeen met een uitgesproken glaciaal interval (Lisiecki en Raymo, 2005), terwijl de midden-Plioceen Warme Periode temperaturen kende die enkele graden hoger waren dan vandaag (Dowsett *et al.*, 2009). De globale afkoeling, die reeds startte tijdens het Vroeg-Cenozoïcum, culmineerde dan finaal in de Noordelijke Hemisfeer Glaciatie, ongeveer 2.65 Ma geleden.

Als verklaring voor deze ingrijpende veranderingen wordt vaak verwezen naar de Panama-istmus. Een opening of sluiting van de landengte veroorzaakt namelijk opmerkelijke wijzigingen in oceaan- en atmosfeercirculatie, waaronder het transport van warmte en waterdamp naar de hogere latitudes. Ondanks het belang van deze tektonisch constructie bestaan er tegenstrijdige opinies betreffende het netto effect op het globale klimaat; gaande van het veroorzaken van de Noordelijke Hemisfeer Glaciatie (Bartoli *et al.*, 2005; Driscoll en Haug, 1998; Haug en Tiedemann, 1998; Haug *et al.*, 2001; Keigwin, 1982; Prentice en Matthews, 1991; Weyl, 1968), over het in vraag stellen van een dergelijke invloed (Lunt *et al.*, 2008), tot het suggereren van het volledig tegenovergesteld effect (Berger en Wefer, 1996; Klocker *et al.*, 2005; Naafs *et al.*, 2010). Het relatieve belang van een verhoogde precipitatie versus een verhoogd warmtetransport tijdens een sluiting van de Panama-engte is grotendeels ongekend, hetgeen automatisch leidt tot onzekerheid.

Het doel van dit onderzoek is om een beter inzicht te verkrijgen in de rol die de landengte speelde tijdens MIS M2. Dit glaciaal interval werd gekenmerkt door een extreme zeespiegellaagstand van meer dan 60 m (Dwyer en Chandler, 2009) en vond plaats net voor de midden-Plioceen Warme Periode. Om oceanische veranderingen nabij de engte te bestuderen zowel voor, tijdens als na MIS M2, werd Ocean Drilling Program (ODP) kern 999 uit de Caraïbische Zee onderzocht op dinoflagellatencystenasssemblages, aangevuld met Mg/Ca paleothermometrie op planktonische foraminiferen.

Caraïbische en Pacifische hydrografie

De moderne hydrografie van de Caraïbische Zee en het oostelijke deel van de Pacifische Oceaan wordt gekenmerkt door een verschil van temperatuur en saliniteit op eenzelfde diepte. Opwelling van dieptewater langs de kust van Peru en de evenaar reduceren de diepte van de Pacifische thermocline tot minder dan 50 m (Mitchell en Wallace, 1992), hetgeen leidt tot een temperatuurcontrast met de Caraïben van ongeveer 5 °C. Daarnaast bestaat er ook een saliniteitsverschil van meer dan 1 ‰ als gevolg van excessieve verdamping in de Caraïben. Deze waterdamp verplaatst zich vervolgens richting Pacifische Oceaan als gevolg van de heersende Passaatwinden, waardoor langs beide zijden van Centraal-Amerika een saliniteitsgradiënt ontstaat (Broecker en Denton, 1989).

Thermohaliene circulatie

Een fundamenteel element in het klimaatstelsel is de thermohaliene circulatie, een transportmechanisme dat warmte en waterdamp over de hele planeet verdeelt (Broecker, 1991; Broecker en Denton, 1989; Haug *et al.*, 2004). Aan de basis van deze circulatie ligt het temperatuur- en saliniteitsverschil tussen de Caraïbische Zee en het oostelijke deel van de Pacifische Oceaan. Deze warme en saliene Caraïbische watermassa vloeit via de Noord-Atlantische Oceaan richting hogere breedtegraden, waar het in contact komt met koude luchtmassa's. Dit resulteert in een koude en zoute, dus dense, watermassa die naar de zeebodem zinkt. Het gevormde Noord-Atlantisch Diepwater keert vervolgens in zuidwaartse richting terug op een diepte van 2-4 km. De diepwaterstroming bereikt opnieuw de oppervlakte in de Indische en Pacifische Oceaan als gevolg van opwaartse, wind gedreven circulatiecellen, waarna het terugvloeit in de richting van de Atlantische Oceaan en zo de lus vervolledigt (Ruddiman, 2008).

Sluiting van de Panama-istmus

Ondanks het feit dat zeespiegelfluctuaties tijdens het Quartair de opening of sluiting van de istmus van Panama beïnvloedden, blijft de lange termijn tektonische evolutie de voornaamste oorzaak van de opheffing van de landbrug. De tektonische geschiedenis begint bij de opening van de Noord- en Zuid-Atlantische Oceaan, hetgeen resulteerde in de vorming van de Caraïbische Plaat (Burke, 1988). Drie belangrijke daaropvolgende evoluties bepaalden de huidige configuratie van de landbrug (Coates *et al.*, 2004): (1) de ontwikkeling van een vulkanische boog tijdens het Laat-Krijt als gevolg van de subductie van de Farallon, Cocos en Nazca Plaat, (2) opheffing tijdens het Midden-Mioceen door de botsing met de Zuid-Amerikaanse Plaat, en (3) subductie van de Cocos Rug veroorzaakte de volledige sluiting van de Panama-engte tijdens het Plioceen.

Gedetailleerde analyses, voornamelijk gebaseerd op verschillen in Caraïbische en Pacifische eigenschappen van de watermassa, werden gebruikt om korte termijn variaties in de tektonische geschiedenis te achterhalen en om uiteindelijk de sluitingsouderdom te verfijnen. De hierbij gebruikte proxies kunnen onderverdeeld worden in drie grote groepen: (1) verspreidingspatronen van vertebraten tussen Noord- en Zuid-Amerika (Marshall, 1988; Savin en Douglas, 1985; Webb, 1976), (2) microfossielenassemblages aan beide zijden van de istmus (Kameo en Sato, 2000; Keller *et al.*, 1989; McDougall, 1996), en (3) geochemische analyses op microfossielen (Groeneveld, 2005; Haug en Tiedemann, 1998; Haug *et al.*, 2001; Steph, 2005; Steph *et al.*, 2006). Een combinatie van deze proxies leert dat een eenduidige, volledige sluitingsouderdom niet voorhanden is en varieert tussen 6.7 en 1.8 Ma. Bovendien is het onderscheid tussen zuiver tektonische processen en wijzigingen gerelateerd aan zeespiegelfluctuaties soms moeilijk te maken.

Methodologie

Uit ODP kern 999 werd een totaal van 63 monsters genomen uit het interval tussen 104.38 en 107.61 meter onder de zeebodem. Een 20 cm³ volumestaal elke 2 tot 5 cm vertegenwoordigt een temporele resolutie van ongeveer 1000 jaar. De monsters werden gespoeld met water en nat gezeefd op een 63 µm zeef. De scheiding tussen de fijne en de grove fractie diende respectievelijk voor Mg/Ca paleothermometrie en dinoflagellatencystenanalyse.

Mg/Ca paleothermometrie

Mg/Ca ratio's in het exoskelet van foraminiferen is een proxy voor vroegere zeewatertemperaturen (Dekens *et al.*, 2002). Experimenten tonen aan dat de Mg/Ca ratio van calciet stijgt met de temperatuur, als gevolg van de thermodynamische respons op de endotherme substitutie van Mg²⁺ in calciet (Lea *et al.*, 1999).

Voor het doel van deze studie werden Mg/Ca metingen uitgevoerd op de planktonische foraminiferen *Globigerinoides sacculifer* en *Neoglobobulina dutertrei*. Beide species leven op een respectievelijke diepte van meer dan 30 en 50 m. Uit de 250-355 µm fractie werden 20 tot 25 specimens achtereenvolgens gepikt, gecrushed en finaal gereinigd volgens het protocol van Barker *et al.* (2003). De concentratie aan magnesium en calcium werd gemeten via een inductief gekoppelde plasma optische emissiespectrometer en nadien omgezet naar zeewatertemperaturen via de formules van Nürnberg *et al.* (2000) en Anand *et al.* (2003).

Dinoflagellatencystenanalyse

Dinoflagellaten zijn mariene algen die cysten vormen als overlevingsstrategie, onder andere tegen ongunstige omstandigheden. De wand van deze cysten bestaat uit het uiterst resistente dinosporine, een substantie verwant aan sporopollenine, en wordt als dusdanig in het sediment opgenomen. Dinoflagellaten zijn uitstekende proxies om onder andere temperatuur, saliniteit en zeestromingen te reconstrueren in het mariene milieu, aangezien de verschillende species bepaalde paleo-ecologische voorkeuren nastreven (Armstrong en Brasier, 2005; Evitt, 1985; Fensome *et al.*, 1996).

Na een standaard palynologische bereiding (De Schepper en Head, 2008) werden per microscoopplaatje een statistisch significant aantal van minstens 250 dinoflagellatencysten gedetermineerd met behulp van een doorvallend-lichtmicroscop. Acritarchen en pollen en sporen werden eveneens in de telling opgenomen.

Resultaten

Ouderdomsmodel

De ouderdom van het bestudeerde interval werd bekomen via lineaire interpolatie tussen voorheen gefixeerde punten, die gekalibreerd waren ten opzichte van de LR04 $\delta 18\text{O}$ bentische stack van Lisiecki en Raymo (2005). Deze punten waren om de twee monsters beschikbaar.

$\delta 18\text{O}$ record

De bentische foraminifeer *Cibicides wuellerstorfi* registreert aanzienlijk hogere $\delta 18\text{O}$ waarden tussen 3.310 en 3.280 Ma, waardoor dit interval gedefinieerd kan worden als MIS M2 in ODP kern

999. Een piekwaarde van 3.44 ‰ ligt op circa 3.295 Ma. Na MIS M2 dalen de waarden als gevolg van de start van de midden-Pliocene Warme Periode. Daarnaast zijn ook andere isotopenetages zoals MG1 (3.320 Ma) en MG2 (3.340 Ma) herkenbaar in de bemonsterde secties.

Paleotemperaturen

Zeewatertemperaturen afgeleid van *Globigerinoides sacculifer* vertonen een licht dalende trend tussen 3.355 en 3.320 Ma. De temperaturen dalen sterk vanaf 3.320 Ma om een negatieve piek van 19.4 °C te bereiken net voor de start van MIS M2. De daaropvolgende stijging mondt uit in een maximale temperatuur van 26.9 °C, circa 3.270 Ma geleden.

Het patroon van *Neoglobobulimina dutertrei* rond MIS M2 is gelijkaardig aan dat van *Globigerinoides sacculifer*. Een minimum waarde van 18.4 °C vindt 3.310 Ma geleden plaats, terwijl rond 3.280 Ma de temperaturen zijn gestegen tot een maximum van 21.7 °C. Daarnaast kunnen nog twee pieken worden geobserveerd: een negatieve piek rond 3.340 Ma en een positieve piek rond 3.320 Ma. Beide hebben dezelfde grootteorde als deze geregistreerd tijdens MIS M2.

Dinoflagellatencystenassenblages

Op basis van wijzigende relatieve abundanties van bepaalde indicatorspecies ten opzichte van de totale dinoflagellatencystenassembelage werden zeven dinoflagellatencystenzones onderscheiden.

Dinoflagellatencystenzone 1 (3.357-3.320 Ma) wordt gedomineerd door *Brigantedinium* spp./Round Brown Cysts en in mindere mate door *Ataxiodinium zevenboomii* sensu De Schepper en Head, 2009 met gemiddelde relatieve abundanties rond respectievelijk 40 en 15 %. Minder abundant is *Kallosphaeridium* sp. (10 %), maar dit species volgt nagenoeg dezelfde trend als beide hoger genoemde soorten.

Dinoflagellatencystenzones 2 tot en met 6 (3.320-3.280 Ma) onderscheiden zich door de sterke terugval van *Brigantedinium* spp./Round Brown Cysts, *Ataxiodinium zevenboomii* sensu De Schepper en Head, 2009 en *Kallosphaeridium* sp. tot enkele procenten. De palynomorfenassenblages worden nu gedomineerd door *Polysphaeridium zoharyi*, herwerkte cysten en pollen en sporen. De onderverdeling in verschillende zones heeft betrekking op de sterk fluctuerende relatieve abundanties van de hierboven genoemde componenten.

Dinoflagellatencystenzone 7 (3.280-3.250 Ma) vertoont een nagenoeg identieke assemblagesamenstelling zoals zone 1.

Discussie en conclusie

Zowel de resultaten verkregen van de Mg/Ca metingen als deze van het dinoflagellatencystenonderzoek tonen aan dat tussen 3.355 en 3.320 Ma de Atlantische en Pacifische Oceaan verbonden waren langsheen de Panama-engte. Dalende oppervlaktewatertemperaturen in combinatie met hoge abundanties van (het) heterotrofe *Brigantedinium* spp./Round Brown Cysts wijzen op een instroom van nutriëntrijk, koud en minder salien Pacifisch water. Dit leidde vermoedelijk tot een verzwakking van de Noord-Atlantische Strooming. De Schepper et al. (2009) toonde reeds een zuidwaartse verplaatsing aan vanaf 3.33 Ma, zelfs 23-35 ka voor het globale ijsvolumemaximum van MIS M2. Een verzwakking in noordwaarts warmtetransport leidde tot de uitbreiding van continentaal landijs in de Arctische gebieden en met behulp van positieve feedbackmechanismen, zoals het albedo-effect, kon een uitgesproken glaciële periode worden geïnduceerd.

Vanaf 3.320 Ma reflecteren veranderingen in dinoflagellatencystenassenblages een verondieping van de Panama Landbrug als gevolg van een dalende zeespiegel. Hoge aantallen pollen en sporen, herwerkte dinoflagellatencysten en het verschijnen van *Polysphaeridium zoharyi*, een ondiepe soort die warme en saliene wateren prefereert, ondersteunen deze veronderstelling. De watertemperaturen afgeleid van *Globigerinoides sacculifer* dalen scherp vanaf 3.320 Ma om een minimum te bereiken net voor het begin van MIS M2. Deze glaciële afkoeling van Caraïbische oppervlaktewateren verhinderde volledig het warmtetransport richting polaire regio.

De Panama-engte sloot volledig tussen 3.320 en 3.310 Ma. Vanaf dit punt beginnen de oppervlaktewatertemperaturen opnieuw te stijgen. Het atmosferische transport vanuit de Atlantische richting de Pacifische Oceaan, gecombineerd met de opwelling van koud water langsheen de kust van Peru veroorzaakte een temperatuur- en saliniteitsgradient aan beide zijden van de istmus. In de Caraïben ontstond daardoor een nieuwe 'warmtepoel' die de thermohaliene circulatie terug op gang bracht. Het is vermoedelijk geen toeval dat kort na MIS M2 een uitgesproken warme periode aanbrak, beter gekend als de midden-Pliocene Warme Periode. Het mechanisme van een sterke meridionale circulatie werd reeds meermaals gesuggereerd als oorzaak voor dit interval (Dowsett et al., 1996; Dowsett et al., 2005; Dowsett et al., 2009a; Dowsett et al., 2009b; Mudelsee en Raymo, 2005; Raymo et al., 1996; Williams et al., 2008).

De dinoflagellatencystenassembelage wordt vanaf 3.280 Ma opnieuw gedomineerd door dezelfde soorten als voor 3.320 Ma, hetgeen wijst op een hernieuwde verbinding met de Pacifische Oceaan. De versterkte thermohaliene circulatie zorgde voor een versterkt warmtetransport richting hogere breedtegraden en het grotendeels afsmelten van de ijskappen opgebouwd tijdens MIS M2. De

stijgende zeespiegel veroorzaakte dan op zijn beurt de submersie van de Centraal Amerikaanse Landbrug. De oppervlaktewatertemperatuur in de Caraïben stijgt daarentegen nog verder tot een maximum waarde rond 3.270 Ma, waarschijnlijk als gevolg van de interglaciale opwarming. Nadien dalen de temperaturen echter snel door de steeds groter wordende influx van koeler Pacifisch water.

Eerder onderzoek door Groeneveld (2005), gebaseerd op Mg/Ca analyses op *Globigerinoides sacculifer*, toonde geen duidelijke verandering in Caraïbische oppervlaktewatertemperaturen tussen 5.0 en 2.7 Ma. Enkel vanaf de start van de Noordelijke Hemisfeer Glaciatie, wanneer extreme zeespiegelfluctuaties de verbinding tussen de Pacifische Oceaan en Caraïbische Zee beïnvloedden, was er een wijziging in temperatuur merkbaar. De hoge resolutie bemonstering van ODP kern 999 in deze studie toont echter aan dat een gelijkaardig scenario plaatsvond voor, tijdens en na MIS M2. De vraag blijft echter wat de verbinding tussen de Pacifische en Atlantische Oceaan veroorzaakte voor MIS M2. In de bemonstering werden naast MIS M2 ook de isotopenetages MG1 (3.320 Ma) en MG2 (3.340 Ma) opgenomen. De dinoflagellatencystenasssemblages en de watertemperaturen afgeleid van *Globigerinoides sacculifer* lijken hierdoor echter op het eerste zicht niet beïnvloed. Enkel *Neoglobobulimina dutertrei* vertoont eenzelfde fluctuatie, net als tijdens MIS M2, maar dit kan verklaard worden doordat de diepere zones van de waterkolom nabij de istmus sterker en sneller worden beïnvloed door zeespiegelfluctuaties. De Schepper et al. (2009) suggereerde een tektonische heropening tussen 3.3 en 3.4 Ma als oorzaak voor de verbinding tussen beide oceanen en een verzwakking in noordwaarts warmtetransport. Het uitvoeren van gelijkaardige hoge resolutie analyses tot voor 3.4 Ma kan een eventuele suggestie zijn voor toekomstig onderzoek.

Het onderzoek toont verder ook aan dat dat een zuidwaartse verplaatsing of het volledig stilvallen van de Noord-Atlantische Strooming een vereiste was om een Quartair scenario te bewerkstelligen tijdens MIS M2. De hypothese van een verzwakte meridionale circulatie werd reeds gesuggereerd door verschillende auteurs (De Schepper et al., 2009; Klocker et al., 2005; Lunt et al., 2008; Naafs et al., 2010) en contrasteert met het scenario dat een versterkte thermohaliene circulatie leidt tot een verhoogde precipitatie en vervolgens de opbouw van continentale ijskappen (Bartoli et al., 2005; Driscoll en Haug, 1998; Haug en Tiedemann, 1998; Haug et al., 2001; Keigwin, 1982; Prentice en Matthews, 1991; Weyl, 1968).

Of nu tektonische processen, ofwel zeespiegelfluctuaties, aan de basis liggen van de overstroming of de emersie van de Isthmus van Panama, dit onderzoekproject onderstreept nogmaals het feit dat de Centraal Amerikaanse Landengte een belangrijke invloed uitoefent op het globale klimaatsysteem.