

**Arwyn Edwards, Sara M. Rassner,
Tristram D.L. Irvine-Fynn, Hefin Wyn
Williams & Gareth Wyn Griffith.**

**Darogan cyfraniadau
rhwlifoedd olaf
Eryri i gylchredoedd
carbon Cyfnod y
Dryas Diweddaraf ar
sail modelau amrwd o
ecosystemau rhewlifol y
cyfnod hwyr-rewlifol.**

Gwerddon

CYFNODOLYN ACADEMAIDD CYMRAEG

Golygydd Yr Athro Ioan Williams

Darogan cyfraniadau rhewlifoedd olaf Eryri i gylchredoedd carbon Cyfnod y Dryas Diweddaraf ar sail modelau amrwd o ecosystemau rhewlifol y cyfnod hwyr-rewlifol.

Arwyn Edwards, Sara M. Rassner, Tristram D.L. Irvine-Fynn, Hefin Wyn Williams & Gareth Wyn Griffith.

Talfyriadau

CC: Cynhyrchiad Cynradd

CDD: Cyfnod Dryas Diweddarach

CEN: Cynhyrchiad Ecosystem Net

GDGT: Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraether

MGD: Model Gradd Dydd

R: Cyfradd Resbiradaeth

1.1 Rhagarweiniad

1.1.1 Rhewlifoedd a hinsawdd

Ar hyn o bryd, mae dros 80 y cant o gyfaint y biosffer cyfan yn barhaol oer (hynny yw, â thymheredd cyfartalog blynyddol dan 0-5 °C (Prisco & Christner, 2004, Cavicchioli, 2006). Gellir diffinio'r gofod hwn fel y cryosffer (Gr. *cryo* = oer), diffiniad a fyddai hefyd yn cynnwys yr atmosffer uchel a'r cefnforoedd dwfn ond fe ddefnyddir y term yn arferol i gynnwys y llenni iâ a'r silffoedd iâ, yn ogystal â rhewlifoedd a thir wedi'i rewi, neu wedi'i orchuddio gan bac eira. Mae'r cydrannau hyn sydd ar wyneb y ddaear bellach wedi eu cyfyngu i eithafion lledredol ac uchderol yn bennaf a bu tipyn o bryderu am eu dyfodol yn sgil newid hinsawdd cyfoesol, yn enwedig o ystyried cyfraddau uchel o gynhesu yn y lledredau pegynol (Polyakov et al., 2002).

Ni fydd dadmer pac iâ cefnfor yr Arctig yn arwain at godiad sylweddol yn lefel y môr (heblaw drwy ehangiad thermol) ond mae effaith gostyngiad albedo yn arwain at amsugniad uwch o wres yr haul, gan gynhesu'r cefnfor a'r Arctig (Screen & Simmonds, 2010). Mae hyn yn barod yn cael effaith fechan ond dirnadwy ar lefel y môr (Jacob et al., 2012) gan fod rhewlifoedd a chapiau iâ yn rhyddhau oddeutu 148±30Gt y flwyddyn o'u mäs (Jacob et al., 2012). Gan fod y dŵr tawdd yn amlwg yn ddŵr croyw ceir pryderon am ei effaith ar gylchrediadau thermohalaidd y cefnforoedd ac felly hinsawdd byd-eang. Rhaid hefyd ystyried y pryder am y newid hinsawdd cyfoes o fewn cyd-destun hinsoddau hanesyddol ein planed, sydd yn cynnwys cyfnodau cynnes ac oer.

Mae sawl llwybr o dystiolaeth yn awgrymu fod y cyfnod Neoproterosoaidd hyd at 542 miliwn o flynyddoedd yn ôl wedi ei ddominyddu gan gyfnod o rewlifant dwys a orchuddiodd, ar adegau, y rhan fwyaf o'r ddaear, sef y rhewlifant byd-eang. Er y bu tipyn o ddadlau ynglŷn ag union ystod y rhewlifoedd hyn (Hoffman et al., 1998), gwyddom hefyd y bu pedwar rhewlifant diweddarach o fewn y 500,000 mlynedd diwethaf (Petit et al., 1999), gan gynnwys y rhewlifant Defensaidd a ddaeth i ben cyn lleied â 11,700 o flynyddoedd yn ôl (Walker et al., 2008).

Ceir dystiolaeth geomorffolegol gynhwysfawr o ystod eang y llen iâ yn ardal ynysoedd Prydain yn ystod y rhewlifant Defensaidd (Clark et al., 2004), a'r awgrymiad ei fod wedi cyfrannu hyd at 2-2.5 metr (o gyfartaledd dŵr) at lefel y môr wrth iddo ddadlaith (Clark et al., 2004; Hubbard et al., 2009). Trwy ddefnydd o fodolau thermomecanig soffistigedig, mae modd ail-greu ymlediad a diflaniad y llenni iâ (Hubbard et al., 2009) dros nifer o gylchredoedd o ehangu a chrebachu gan arwain at eu colled tua 14,000 o flynyddoedd cyn y cyfnod presennol oherwydd cynhesiad sydyn (Rose, 1985); daeth y cyfnod cynnes hwn i ben tua 14,700 mlynedd cyn y presennol yn sgil cyfnod byr o rewlifant yn y Dryas Diweddaraf. Daeth y cyfnod hwn o rewlifant i'w derfyn tua 12,900 mlynedd cyn y presennol (Rasmussen et al., 2006). Felly, digwyddodd rhewlifoedd olaf Cymru (Gray, 1982; Hughes, 2002; Bendle & Glasser, 2012) yn ystod y Cyfnod Dryas Diweddarach (CDD). Mae eu sgil-ffeithiau ar dirwedd Eryri mor amlwg heddiw ag yr oedd dros ganrif a hanner yn ôl i Charles Darwin pan oedd yn teithio drwy Gwm Ogwen. Nododd ef: *'...a house burnt down by fire did not tell its story more plainly than did this valley. If it had still been filled by a glacier, the phenomena would have been less distinct than they now are'* (Darwin, 1842).

Serch i hyn ddylanwadu ar ei gysyniadau o fewn ei waith biolegol ar esblygiad drwy ddedol naturiol (Darwin, 1859), nid oes dim cofnod fod Darwin wedi ystyried effaith uniongyrchol rhewlifant olaf Eryri ar fiota yr ardal, er enghraifft y rhywogaethau creiriol o blanhigion, megis *Lloydia serotina* L. (Reichenb.) (lili'r wyddfa) neu anifeiliaid *Salvelinus alpinus* L. (torgoch) a geir ar fryniau a llynnoedd Eryri (Webster, 1889; Maitland et al., 2007). Ceir astudiaethau gan eraill o hanes naturiol llystyfiant Eryri yn dilyn y rhewlifant CDD (Ince, 1996; Rhind & Jones, 2003), ond hyd yn hyn, yn ein tyb ni, ni chafwyd trafodaeth o unrhyw fath o fiota Eryri yn ystod rhewlifant CDD.

1.1.2. Rhewlifoedd fel ecosystemau gweithgar

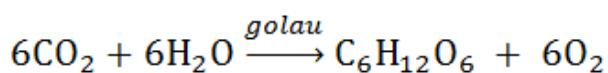
Yr olwg glasurol ar rewlifoedd yw eu bod fel systemau ffisegol pur, anfiotig. Serch hynny, yn ddiweddar, ceir dystiolaeth gref o gylchrediad maetholynnau (Hodson et al., 2005) a charbon (Hodson et al., 2007; Anesio et al., 2009; Boyd et al., 2010) gan gymunedau fioamryw o ficrobau ar wyneb, oddi mewn ac oddi tan (Miteva & Brenchley, 2005; Bhatia et al., 2006; Edwards et al., 2011) rewlifoedd, capiau a llenni iâ, gan arwain at esblygiad y cysyniad o ecosystemau rhewlifol (Hodson et al., 2008).

Mae ymchwil pellach yn awgrymu fod modd i'r ecosystemau rhewlifol ddylanwadu'n sylweddol ar ecosystemau eraill, gan gynnwys rhai daearol (Kastovska et al., 2005); cefnforol (Raiswell et al., 2006; Hood & Scott, 2008; Hood et al., 2009) ac atmosfferig (Anesio et al., 2009; Boyd et al., 2010) ac iddynt arwyddocâd byd-eang. Er enghraifft,

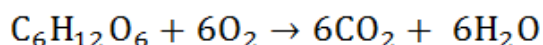
amcangyfrifir llif crynswth carbon (hynny yw, cynhyrchiad cynradd + resbiradaeth) llen iâ y Lasynys oddeutu 10-100 Gt y flwyddyn (Hodson, et al., 2010b) gan awgrymu pwysigrwydd cydbwysedd carbon y llen iâ, yn ogystal â phwysigrwydd amlycach cydbwysedd mäs y llen iâ (Hanna et al., 2008; Hubbard, 2011). O ganlyniad i arsylwadau o'r fath, dylid ystyried cydbwysedd carbon rhewlifant olaf Cymru, yn ogystal â'i effeithiau ar dirwedd (Gray, 1982) ac ar newid lefel y môr (Clark et al., 2004; Hubbard et al., 2009).

Ceir nifer o brosesau biogeocemegol ar rewlifoedd sydd yn dylanwadu ar gylchredu carbon. Yn bennaf, ceir ffotosynthesis, resbiradaeth a methanogenesis (Hodson et al., 2007; Anesio et al., 2009; Boyd et al. 2010; Anesio & Laybourn-Parry, 2012).

Ar wyneb y rhewlif, mae cymunedau microbaidd yn derbyn egni o'r haul ac o'r deunydd organig eolaidd ceir amryw ffurfiau o fywyd ffotoawtotroffig a heterotroffig gan arwain at weithgaredd ffotosynthesis (Hafaliad 1) a hefyd resbiradaeth (Hafaliad 2) o'r deunydd organig a ffurfiwyd gan ffototroffiaid o fewn y tyllau cryoconite (Hodson et al., 2007) neu drwy drosglwyddiad deunydd organig eolaidd (Stibal et al., 2008) fesul:

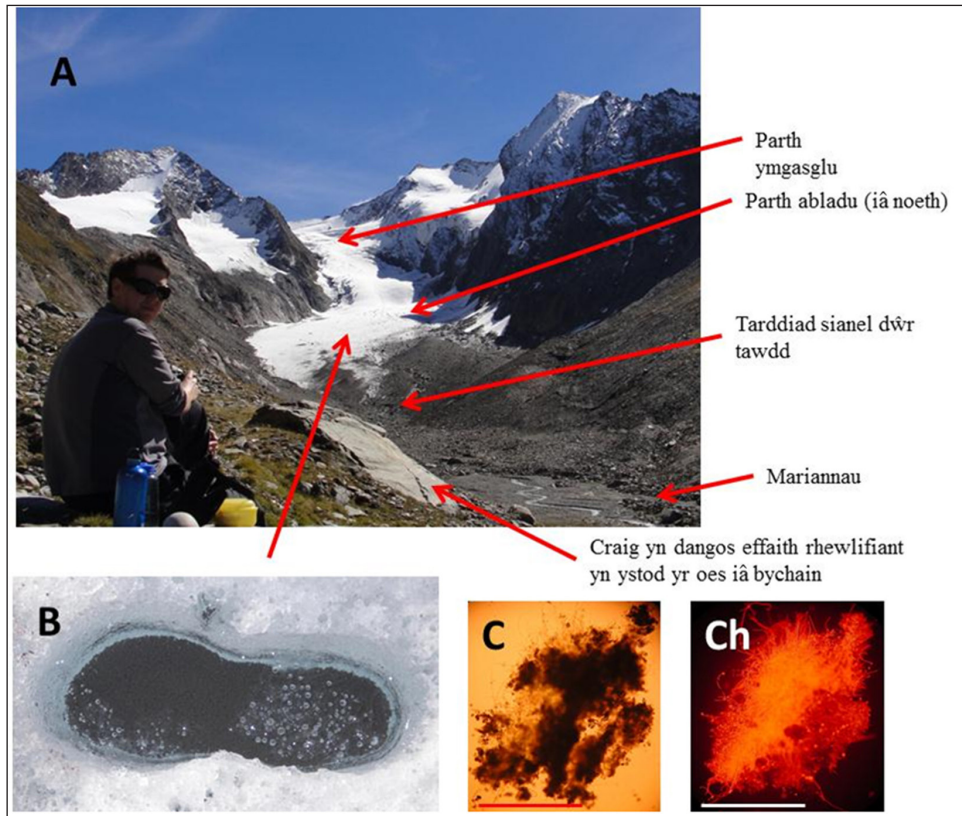


Hafaliad 1



Hafaliad 2

Mae'r broses hon yn arwain at sefydlogi neu ryddhau carbon deucosid oddi wrth ac i mewn i'r atmosffer. Ar y rhewlifoedd cyfoes, ceir cyfraddau sylweddol o gylchu carbon o fewn cynefinoedd bychain ar wyneb y rhew a elwir yn dyllau cryoconite (Gr. = llwch oer). Mae'r tyllau hyn (Ffig. 1b) yn datblygu wrth i lwch a graean mân gasglu mewn pyllau bach a chael eu poblogi gan gymunedau o ficrobau, sef cyanobacteria, algâu, ffyngau, bacteria, archaea, yn ogystal â rhai anifeiliaid bach (rotifferau ac eirth dŵr (*Tardigrada*) yn bennaf). (Sävström et al., 2002; Christner et al., 2003; Edwards et al., 2011). Ymysg yr agregiadau hyn o fwynau a microbau, ceir pigmentau ffotosynthesis a sylweddau hwmig yn lleihau albedo yr iâ ac yn arwain at ddadmer cyflymach a'r pyllau'n dyfnhau fwyfwy i ffurfio tyllau mwy sylweddol. Ledled y rhewlif, ceir effaith sylweddol ar gyllideb egni arwyneb y rhewlif, a cheir dadleuon o effaith sylweddol ar gyfradd dadmer rhewlifoedd cyfoesol ledled y byd gan gryoconite (Takeuchi et al., 2001; Takeuchi, 2002; Fountain et al., 2004; Oerlemans et al., 2009; Takeuchi, 2009; Takeuchi et al., 2010).



Ffigur 1: Cydrannau ac ecosystemau rhewlifol cyfoes

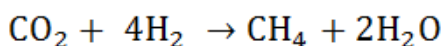
- a) Rhewlif cyfoes (Gaißbergferner, Alpau Tyrol), gan dynnu sylw at nifer o'i briodoledau sydd o bwys i ecoleg rhewlifoedd a chyd-destun y papur hwn.
- b) Twll cryoconite (Foxfonna, Svalbard) tua 35 cm o hyd. Gellir gweld y gronynnau tywyll o gryoconite ar waelod y twll, yn ogystal â swigod o nwy oddi ar ffotosynthesis a resbiradaeth wedi eu dal gan gaead tenau o rew a ffurfiwyd dros nos.
- C & Ch) Gronyn sengl o cryoconite o dan olau gweladwy a fflwroleuol gan ddangos deunydd hwmig ac awtoffloroleuad cloroffyl a phigmentau tebyg yn eu trefn; bar=200 µm

Credir y byddai cryoconite yn gynefin pwysig o dan amodau eithafol rhewlifant byd-eang y Neoproterosoaid (Vincent et al., 2000; Vincent & Howard-Williams, 2000) gyda'r ddamcaniaeth fod llwch arwynebol ar rewlifoedd wedi galluogi'r planed i ddianc o'r rhewlifant (Abbot & Pierrehumbert, 2010).

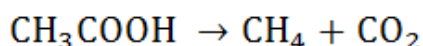
Ar wely'r rhewlif, ymhell o ddylanwad egni'r haul, ceir cynefinoedd tra gwahanol. Mae organebau byw yn dibynnu ar ddŵr (sef hylif ac nid iâ) ac, yn yr ecosystemau is-rhwlifol, effaith cynhesu geothermol, ffrithiant rhwng y llen iâ a'r creigiau ac effeithiau pwysedd uchel oherwydd trwch yr iâ sydd yn arwain at ffurfio dŵr. Ceir sawl math o rewlif, sef rhai 'oer' sydd wedi eu ffurfio gan rew islaw ei bwynt dadmer dan bwysau, ac felly heb fod yn cynnwys hylif, rhai polythermol, sydd yn gymysgedd cymhleth o rew cynnes ac oer (Irvine-Fynn et al., 2011) ac felly yn cynnwys dŵr fel hylif, yn ogystal â rewlifoedd

tymherus. Mae rhewlifoedd polythermol a thymherus yn medru cynnal cynefin microbaidd is-rewlifol, gyda'r cynefin hwn yn sefydlog ar draws y flwyddyn (Anesio & Laybourn-Parry, 2012) oddeutu'r rhewbwynt. Serch hynny, mae'r cynefin is-rewlifol yn medru cynyddu neu leihau yn ei faint ar draws canrifoedd gan ymateb i newidiadau yn y gyfundrefn thermol oherwydd newidiadau mewn cydbwysedd mäs (Glasser & Hambrey, 2001; Hambrey et al., 2005).

Felly, lle ceir dŵr ar ffurf hylif ar wely'r rhewlif, mae bywyd microbaidd sydd â'r gallu i ddefnyddio strategaeth lithotroffig yn medru goroesi (Skidmore et al., 2000; Tranter et al., 2002; Skidmore et al., 2005) gan ddadelfennu deunydd organig hynafol wedi'i orchuddio gan y rhewlif yn ogystal â'r graean i gynnal resbiradaeth (Hafaliad 2) gan ficrobau heterotroffig, rhydwythwyr haearn a sylffad, gan arwain at ormodedd o garbon deuocsid a lleihad yn y crynodiad ocsigen. Wrth i'r cynefin isrewlifol felly ddatblygu yn fwy anocsig, mae'r amodau yn berffaith i Archaea methanogenig ddefnyddio'r gormoddedd o garbon deuocsid ac asidau organig fel derbynwyr terfynol o electronau i ffurfio methan fesul:



Hafaliad 3



Hafaliad 4

Ceir tystiolaeth o gyfraddau sylweddol o fethanogenesis o fewn graean isrewlifol, hyd at 51 fmol g⁻¹ yr awr (Boyd et al., 2010), ac felly ceir pryderon am y posibilrwydd o'i rôl fel mwyhadur o newid hinsawdd gan fod methan yn nwy tŷ gwydr pwerus (Weitemeyer & Buffett, 2006; Wadham et al., 2008). Mae data cymhareb isotopig D/H CH₄ o iâ'r Lasynys yn awgrymu fod methan o'r eigion wedi aros yn sefydlog yn ystod y trawsnewid o'r CDD, gan awgrymu ffynhonnell amgen ar gyfer y cynnydd yn y crynodiad atmosfferig methan (Sowers, 2006).

Felly, drwy ystyried tystiolaeth bywyd microbaidd y cryosffer a'i gyfraniadau i gylchredoedd carbon cyfoes yn ogystal â lled-rewlifiant y gorffennol, bwriad y papur hwn yw cynnig amcangyfrifiad amrwd o gyfraniadau at gylchrediad carbon yn ystod y CDD gan ddau baleo-rewlif ymhlith rhewlifoedd olaf Eryri. Drwy wneud hyn, gobeithir gwella ein dealltwriaeth o ecosystemau baleo-rewlifol a denu sylw ehangach iddynt yn y cyd-destun Cymreig.

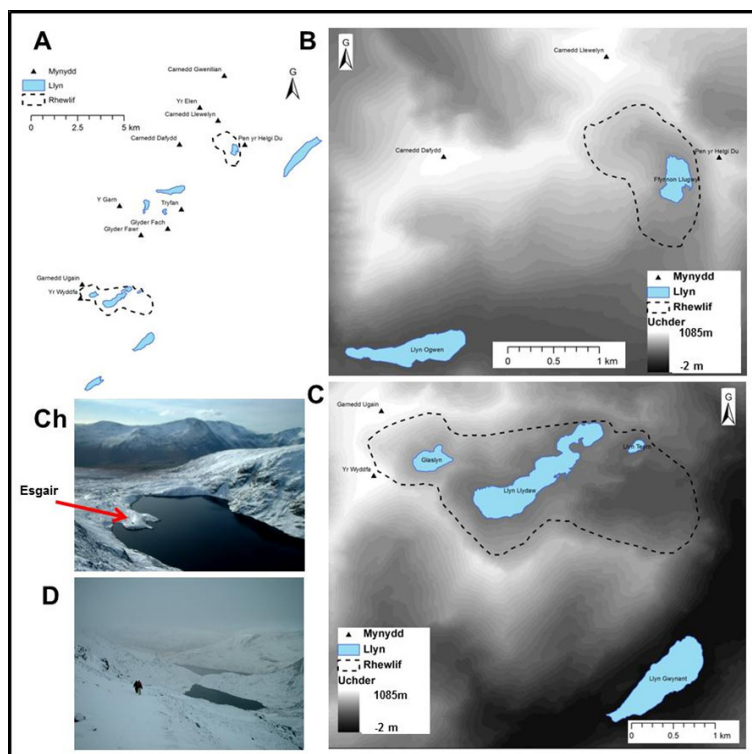
2. Dulliau a Defnyddiau

2.1 Llain yr astudiaeth

Mae Eryri ei hun yn ymestyn dros ardal eang o ogledd-orllewin Cymru (o leiaf 200 km²), gan gynnwys tri phrif fassif, hynny yw y Carneddau, y Glyderau a'r Wyddfa sydd yn ymestyn hyd at 1,085 metr uwch lefel y môr (Ffig. 2). Yn ystod uchafbwynt y rhewlifiant olaf, dim ond copaon uchaf y mynyddoedd hyn (>850 metr), (McCarroll & Ballantyne,

2000) wnaeth osgoi gorchudd gan rew gan ffurfio *nunataks* (Clark et al., 2004), ond, yn dilyn yr uchafbwynt hwn, ceir tystiolaeth geomorffolegol amlwg o rewlifant, gan gynnwys enghreifftiau o gafnau ffurf U-bedol, peirannau uchel, sgwriannu'r craigwely gan rew, mariannau ac esgeiriau i'w gweld ar dirlun Eryri.

Mae dadansoddiad o'r tirffurfiau hyn wedi arwain at o leiaf ddwy ymdrech i restru rhewlifoedd olaf Eryri. Cynigiodd Gray (1982) dystiolaeth ar gyfer 35 rhewlif yn ymestyn hyd at 17.5km² tra i waith diweddar gan Bendle & Glasser (2012) awgrymu rhestr o 38 rhewlif yn Eryri yn ystod y CDD, gan orchuddio 20.7 km². Ar sail y ddwy astudiaeth hyn, dewiswyd y ddau baleo-rewlif mwyaf o fewn y rhestrau ar gyfer trafodaeth bellach, sef paleo-rewlif Cwm Dyli / paleo-rewlif Llydaw (*sensu* Gray, 1982 a *sensu* Bendle & Glasser, 2012), yn eu tro, a elwir, felly, yn baleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw yng ngweddill y papur hwn) a phalaeo-rewlif Ffynnon Llugwy.



Ffigur 2: Llain yr astudiaeth

- Llinfap gan ddangos Eryri a lleoliad y paleo-rewlifoedd a welir yn –
- Paleo-rewlif Ffynnon Llugwy a –
- Paleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw

Ceir B&C ar gefndir model digidol uchder PROFILE (hawffraint y Goron /hawl bas data © 2012, gwasanaeth a ddarparwyd gan EDINA/Arolwg Ordnans); ailgrëwyd y rhewlifoedd ar sail Gray (1982).

Gwelir tystiolaeth o gyn rewlifant ar dirffurfiau yn y cylch yn lluniau Ch & D o Ffynnon Llugwy a Cwm Dyli; noder yn enwedig yr esgair ger Ffynnon Llugwy.

Yr oedd rhewlif Cwm Dyli-Llydaw yn debyg o ymestyn dros adain ddwyreiniol yr Wyddfa (Ffig. 2c), gan orchuddio llynnoedd cyfoesol Llydaw a Glaslyn a gadael mariannau i'r de-

dwyrain o Lyn Llydaw, gan awgrymu llif dwyreiniol drwy Gwm Dyli dros raddiant oddeutu 950m-300m uwch lefel y môr. Yr oedd paleo-rewlif Ffynnon Llugwy yn gorchuddio Cwm Llugwy, i'r de o brif-gefyn y Carneddau rhwng Carnedd Dafydd a Charnedd Llywelyn (Ffig. 2b). Arweiniodd hyn at ffurfiant llyn peiran (hynny yw, Ffynnon Llugwy) ac yr oedd y paleo-rewlif yn llifo o'r gogledd i'r de gan adael mariannau ymgiliol i'r de o Ffynnon Llugwy. Mae ymchwilyr eraill eisoes wedi arsylwi esgair yn deillio o'r llyn peiran presennol (Bendle & Glasser, 2012).

Casglwyd data ar ffiniau a dosbarthiad uchder-ardaledd y ddau rewlif fesul is-ddosbarthiadau ardaledd wedi eu diffinio drwy uchder ar haenau dilyniannol o 50 m uwch lefel y môr ar sail adluniad Gray ac yn ei gadarnhau drwy gymhareb ag adluniad tebyg Bendle & Glasser (2012) o'r ddau baleo-rewlif.

2.2 Modelu hinsawdd lleol a chydbwysedd-mäs y paleo-rewlifoedd

Mae prosesau biogeocemegol sydd yn deillio o weithgareddau ecosystemau uwch-rewlifol yn bennaf ddibynnol ar helaethrwydd iâ noeth; hynny yw, arwynebedd rhewlif heb ei orchuddio gan bac eira. Serch y dystiolaeth am weithgaredd microbaidd o fewn pac eira rhewlifoedd yr Arctig (Hodson et al., 2008) mae gan y cyfraddau o weithgaredd o fewn cynefinoedd sydd yn ddibynnol ar iâ noeth a chyswllt uniongyrchol ag egni'r haul, megis tyllau cryoconite yn uwch i fyny (Sävström et al., 2002). Felly, dylid cyfyngu cyfraddau o fflycsau biogeocemegol i'r ardalaedd o iâ noeth drwy ddiffinio tymor tyfiant fesul is-ddosbarth uchder. Er mwyn cyfrifo'r tymor tyfiant, mae angen felly amcangyfrif cydbwysedd-mäs y rhewlif, sydd ei hun yn ddibynnol ar hinsawdd lleol.

Defnyddiwyd model gradd-dydd syml (MGD) er mwyn damcaniaethu tymheredd cyfartalog fesul dydd ar draws blwyddyn gyfartalog, drwy ddsbarthu tymheredd cyfartalog blwyddyn ar draws cromlin sine gan ddilyn model Brugger (2006):

$$T_d = A_y \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda - \Phi}\right) + T_a$$

Hafaliad 5

Mae'r T_d yn dangos tymheredd dyddiol; A_y , hanner yr amrediad tymheredd blynyddol; d , y dydd o'r flwyddyn; λ , hyd y flwyddyn (365 dydd), Φ ar gyfer yr ongl raddol (1.93), gan adlewyrchu mai mis Ionawr yw mis oeraf y flwyddyn (Hughes, 2009); ac yn olaf T_a i gynrychioli'r tymheredd cyfartalog blynyddol.

Er mwyn defnyddio'r MGD syml yma (Hafaliad 5), mae angen i) amrediad tymheredd blynyddol er mwyn diffinio A_y a ii) tymheredd cyfartalog y flwyddyn, T_a . Ceir amrediad tymheredd blynyddol mawr yn ystod y CDD yn lleol yn ôl Isarin et al. (1998), hyd at 30-34 °C, ac ar sail dosbarthiad *Coleoptera* yn Llanillid yn ne Cymru, amcangyfrifwyd tymheredd cyfartalog o 10-11 °C yn ystod mis Mehefin yng Nghymru ar adeg y CDD gan Walker et al. (2003). Felly, gan gymryd yr uchafbwynt o 10.5 °C ym mis Mehefin a'i ddsbarthu ar draws yr amrediad o 30 °C, gellir awgrymu tymheredd cyfartalog dros y flwyddyn o -4.75°C. Gan ddefnyddio'r paramedrau hyn, gellir diffinio tymheredd cyfartalog lefel y môr ar gyfer

pob dydd (ar gyfartaledd) o'r flwyddyn. Er mwyn trosglwyddo'r MGD i'r paleo-rewlifoedd, addaswyd T_d gan gynnwys cyfradd pall (*lapse rate*) cyfartalog o $0.006^\circ\text{C m}^{-1}$, yn ôl arfer Hughes (2002) a Bendle & Glasser (2012), rhwng 0 m a 1100 m uwch lefel y môr i ddiffinio $T_d(0m)$ hyd at $T_d(1100m)$.

Gan gymryd y dyodiad blynyddol ar gyfartaledd o 2500 mm (cyfartaledd dŵr) ar sail tebygolrwydd o ddyodiad tebyg i'r presennol neu yn sychach (Borisova, 1997), defnyddiwyd yr MGD syml i ddsbarthu dyodiad ar draws y flwyddyn, yn arwain at ddyodiad o 6.8 mm d^{-1} (D_d , dyodiad dyddiol) ar gyfartaledd. Gan ddefnyddio'r MGD er mwyn canfod y dyddiau gradd cadarnhaol ($d_{>0^\circ\text{C}}$) ar gyfer bob is-ddosbarth uchder, cyfrifwyd y dyodiad fel glaw (D_g , mm bl^{-1} cyfartaledd dŵr) ac eira (D_e , mm bl^{-1} cyfartaledd dŵr) fel a ganlyn:

$$D_G = D_{>0^\circ\text{C}} \times D_d$$

Hafaliad 6

$$D_E = (\lambda - D_{>0^\circ\text{C}}) \times D_d$$

Hafaliad 7

Mae hyn yn arwain at fesur amrwd o groniant eira ar gyfer pob is-ddosbarth uchder ar sail D_e . Er mwyn cyfrif cydbwysedd mäs, mae angen paramedr cyfatebol o ddadmer. Defnyddiwyd ffactor Braithwaite (B , (Braithwaite et al., 2006; Braithwaite, 2008) o 4 mm (cyfartaledd dŵr) K^{-1} o ddadmer a'r cyfanswm o raddau cadarnhaol y flwyddyn ($G_{>0^\circ\text{C}}$) yn deillio o'r MGD i amcangyfrif dadmer cyfatebol dros y flwyddyn (M). Felly, diffiniwyd cydbwysedd mäs ar gyfer yr is-ddosbarthiadau yn syml drwy dynnu'r cyfanswm dadmer oddi wrth y cyfanswm eira, gan gyrraedd cydbwysedd felly:

$$D_E - M = 0$$

Hafaliad 8

2.3 Modelu'r tymor tyfiant arwynebol ar y paleo-rewlifoedd

Er mwyn amcangyfrif y tymor tyfiant arwynebol cyfartalog (hynny yw, dyddiau o iâ noeth), T_p , ar gyfer pob is-ddosbarth uchder, cymerwyd y cyfanswm o raddau cadarnhaol, gan dynnu y graddau sydd yn angenrheidiol i ddadmer y pac eira damcaniaethol, G_m , fel a ganlyn:

$$G_m = \left(\sum G_{>0^\circ\text{C}} \right) - \frac{D_E}{B} = 0$$

Hafaliad 9

Gan gymryd $G_m > 0$ fel y graddau cadarnhaol ar ddyddiau iâ noeth, a hynny'n arwain at amcangyfrif y dyddiau sy'n angenrheidiol i gyrraedd hyn, sef D_0 ac yna'i dynnu oddi wrth y cyfanswm o ddyddiau gradd cadarnhaol, gellir diffinio'r tymor tyfiant fel a ganlyn:

$$T_t = D_{>0^{\circ}\text{C}} - D_0$$

Hafaliad 10

2.4 Modelu'r cynefin is-rewlifol

Y brif ffactor sydd yn effeithio ar lefel resbireiddiad microbau isrewlifol yw cyfundrefn thermol y rhewlif. O dan rewlifoedd 'polythermol' ceir dŵr ar ffurf hylif, oherwydd trwch yr iâ a'r pwysedd uchel ar waelod y rhewlif gyda rhew 'cynnes' uwchben ei bwynt dadmer dan bwysau ac felly modelwyd y cynefin is-rewlifol damcaniaethol ar gyfer rewlifoedd a oedd yn debyg o gyfateb i'r amodau hyn. Defnyddiwyd tir-ffurfiau arwyddocaol, yn enwedig esgeiriau fel tystiolaeth o sianelau mewn- ac is-rewlifol (sianelau Røthlisberger, 1972) er mwyn cyfyngu ardaledd y cynefin damcaniaethol (Brennand, 1994). Dylid nodi y gellir ffurfio esgeiriau gan sianelau uwch-rewlifol o dan amodau anarferol yn Antarctica (Fitzsimons, 1991), felly nid yw bodolaeth esgair yn cyfateb yn uniongyrchol i gyn-fodolaeth sianel Røthlisberger; serch hynny, mae'r fath dirffurf yn dystiolaeth gref o dan amodau'r paleo-rewlifoedd yn yr astudiaeth hon.

Gan ystyried data radar treiddio-daear ar gyfer rewlifoedd is-Arctig gogledd Sweden (er enghraifft Storglaciären) o dan hinsawdd cyfoesol cymharol (neu fymryn yn oerach) i'r hinsawdd a fodwyd ar gyfer Eryri yn ystod y CDD sydd yn cynnig fod >90% o ardaledd is-rewlifol yn gynnes (Holmlund, 1988) gellir awgrymu fod oddeutu 90 y cant o ardaledd gwely'r rhewlif y tu ôl i'r esgair yn gynnes. Defnyddiwyd yr amcangyfrif fod y rhewlif yn erydu 0.1-1 mm o'r craigwely bob flwyddyn (Alley et al., 1997) dros gyfnod ei fodolaeth o fewn y CDD cyfan (1200 blwyddyn), er mwyn amcangyfrif cyfaint y graean gwlyb is-rewlifol. Yn olaf, ar sail Truffer et al. (2000), tybiwyd fod dwysedd y graean oddeutu 2 g cm⁻³.

2.5 Amcangyfrif fflycsau nwyon biogenig i'r atmosffer

Er mwyn modelu cyfraniad ecosystemau rhewlifol i gylchredoedd carbon y CDD, defnyddiwyd tybiaethau gan Anesio et al. (2009) a Boyd et al. (2010) ar gyfer fflycsau cyfoesol o nwyon biogenig a grëwyd trwy weithgaredd microbaidd ar ben a hefyd oddi tan rewlifoedd. Cynigiwyd gan Anesio et al. (2009) fod tua 2 y cant o arwyneb iâ noeth rhewlif wedi ei orchuddio gan gryoconite, ac felly dwysedd o 25 g m⁻² o gryoconite ar iâ noeth ar gyfartaledd ledled y byd (gan eithrio Antarctica); ceir amcangyfrifon o orchuddiaeth cryoconite rhwng 1-6 y cant o ardaledd iâ noeth (Hodson et al., 2007; Irvine-Fynn et al., 2010; Irvine-Fynn et al., 2011) felly mae tybiaeth o orchuddiaeth o 2 y cant yn un ceidwadol yn ôl Anesio et al. (2009). Felly, defnyddiwyd cyfraddau o weithgaredd gan Anesio et al. (2009), sef cyfradd cynhyrchiant cynradd o 7.35 µg C g⁻¹ yr awr a chyfradd resbiradaeth o 0.95 µg C g⁻¹ yr awr. Cymerwyd fod cynhyrchiant cynradd yn ddibynnol ar gyfnod o haul 12 awr y dydd (noder fod hyn yn llai na'r gwir gyfnod o haul yn ystod canol yr haf, ond amcangyfrifwyd fod yna leihad yn nerbyniad haul uniongyrchol oherwydd gogwydd y rhewlif a dadmer tyllau cryoconite yn y bore ac yn y blaen), tra gall heterotroffig yn y cryoconite gynnal resbiradaeth ar hyd y nos yn ogystal â'r dydd.

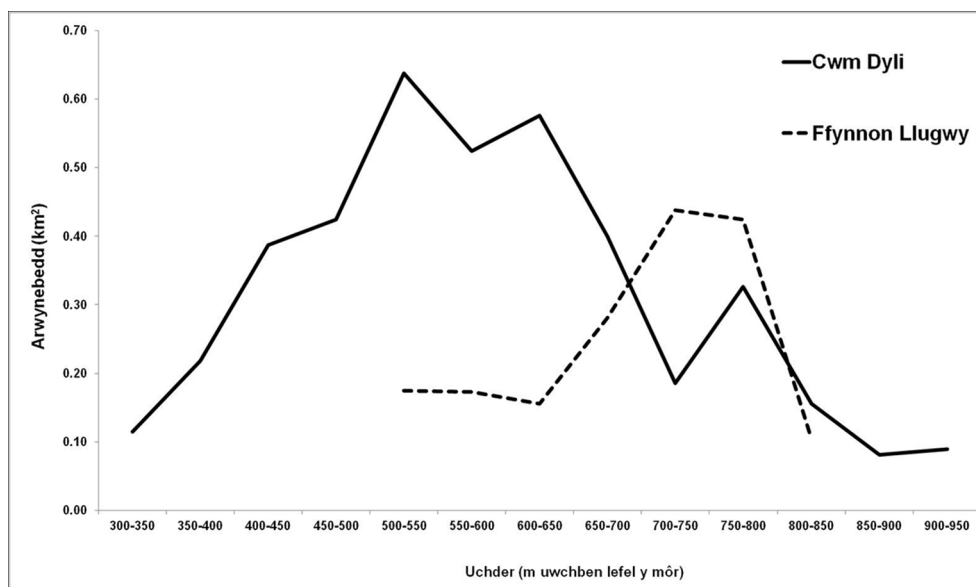
Canfu Boyd et al. (2010) gyfradd methanogenesis (Hafaliadau 3 & 4) rhwng 0.1 a 0.6 pg C g⁻¹ (pwysau sych) gan raeau is-rewlifol oddi tan rewlif Robertson yn nhiriogaeth Kananaskis,

Alberta, Canada. Gan ddefnyddio'r cyfradd hwn, awgrymodd Boyd et al. (2010) drosiad o ~2 Pg o fethan yn ystod y cylch rhewlifol olaf. Hwn yw'r amcangyfrif gorau ar hyn o bryd gan ei fod wedi'i seilio ar gyfraddau o fethanogenesis is-rewlifol o'r maes yn hytrach na modelau yn y labordy gan Wadham et al. (2008) neu fodelau rhifyddol (Weitemeyer & Buffett, 2006). Yn wir mae hwn yn amcangyfrif ceidwadol o'i gymharu â'r amcangyfrif gan Wadham et al. (2008) o ryddhad o ≤ 63 Pg o fethan yn ystod yr un cyfnod o 73,000 o flynyddoedd.

3. Canlyniadau

3.1 Adluniad o ardaledd y paleo-rewlifoedd

Er mwyn diffinio'r cynefinoedd microbaidd fyddai'n gysylltiedig â phaleo-rewlifoedd olaf Eryri, dewiswyd y ddau baleo-rewlif mwyaf ar sail tystiolaeth geo-morffolegol a arweiniodd at adluniadau gan Gray (1982). O ran ardaledd, y mwyaf oedd paleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw (oddeutu 4.12 km²) a'r ail fwyaf oedd paleo-rewlif Ffynon Llugwy (oddeutu 1.75 km²) gan orchuddio rhan sylweddol o'u dalgylch yn ystod y CDD (Ffig. 2 b&c); Yr oedd adluniad Gray yn cyfateb yn agos i'r adluniad diweddar gan Bendle & Glasser (2012), felly defnyddiwyd adluniad Gray o gyfaint y paleo-rewlifoedd er mwyn amcangyfrif is-ddosbarthiadau uchder fesul 50 m ar hyd y rhewlif (Ffig. 3). Gellir gweld fod gan baleo-rewlif Ffynon Llugwy ffin derfynol uwch na phalaeo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw, a thuedd gref i ardaledd y rhewlif gael ei ddosbarthu yn uwch yn y cwm. Yn sicr byddai hyn yn rhwystro'r tymor tyfiant posibl yn y cryoconite o'i gymharu â phaleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw, lle ceir yr is-ddosbarthiadau ardaledd mwyaf yn is yn y cwm (<600 m). Golyga hyn dymor tyfiant hirach o bosib, ond mae'n debygol i baleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw brofi cydbwysedd mäs negyddol yn gyflym wrth i'r CDD ddod i ben, gan arwain at ymgiliad cyflym.



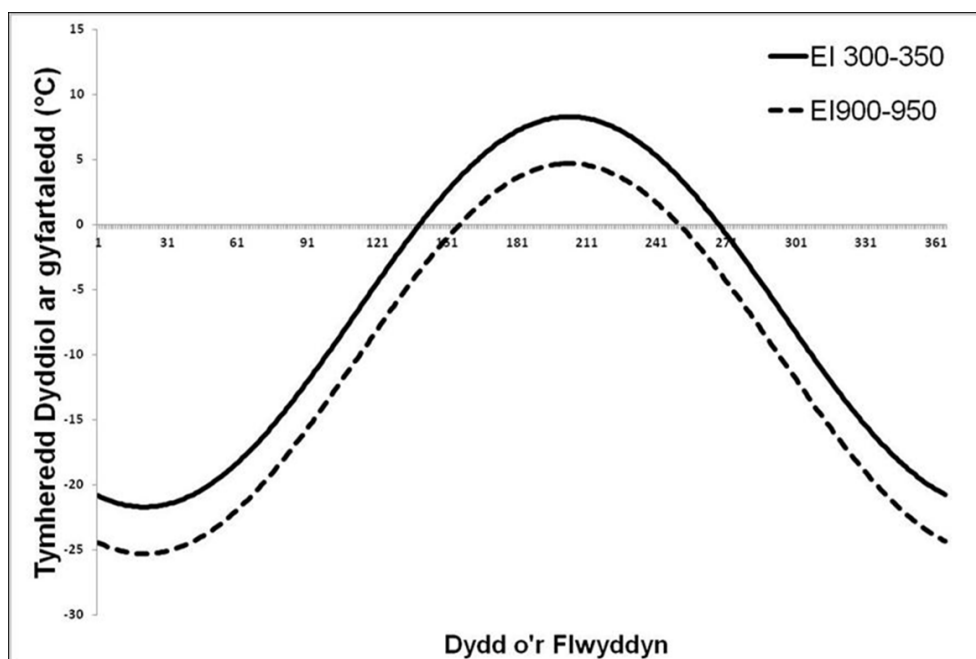
Ffigur 3: Ardaledd is-ddosbarthiadau uchder y ddau baleo-rewlif ar sail Gray (1982).

Er ei bod yn llwyr bosibl i baleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw brofi cyfundrefn thermol polythermol neu dymherus yn ystod ei oes, ar y llaw arall, ceir tystiolaeth gref o gyfundrefn thermol o'r math hwn ar gyfer paleo-rewlif Ffynon Llugwy ar ffurf esgair (Ffig. 2; OSGB SH694626) gan gynnig amodau gwlyb ar wely'r rhewlif am gyfnod o'i oes, oherwydd dyodiad graean

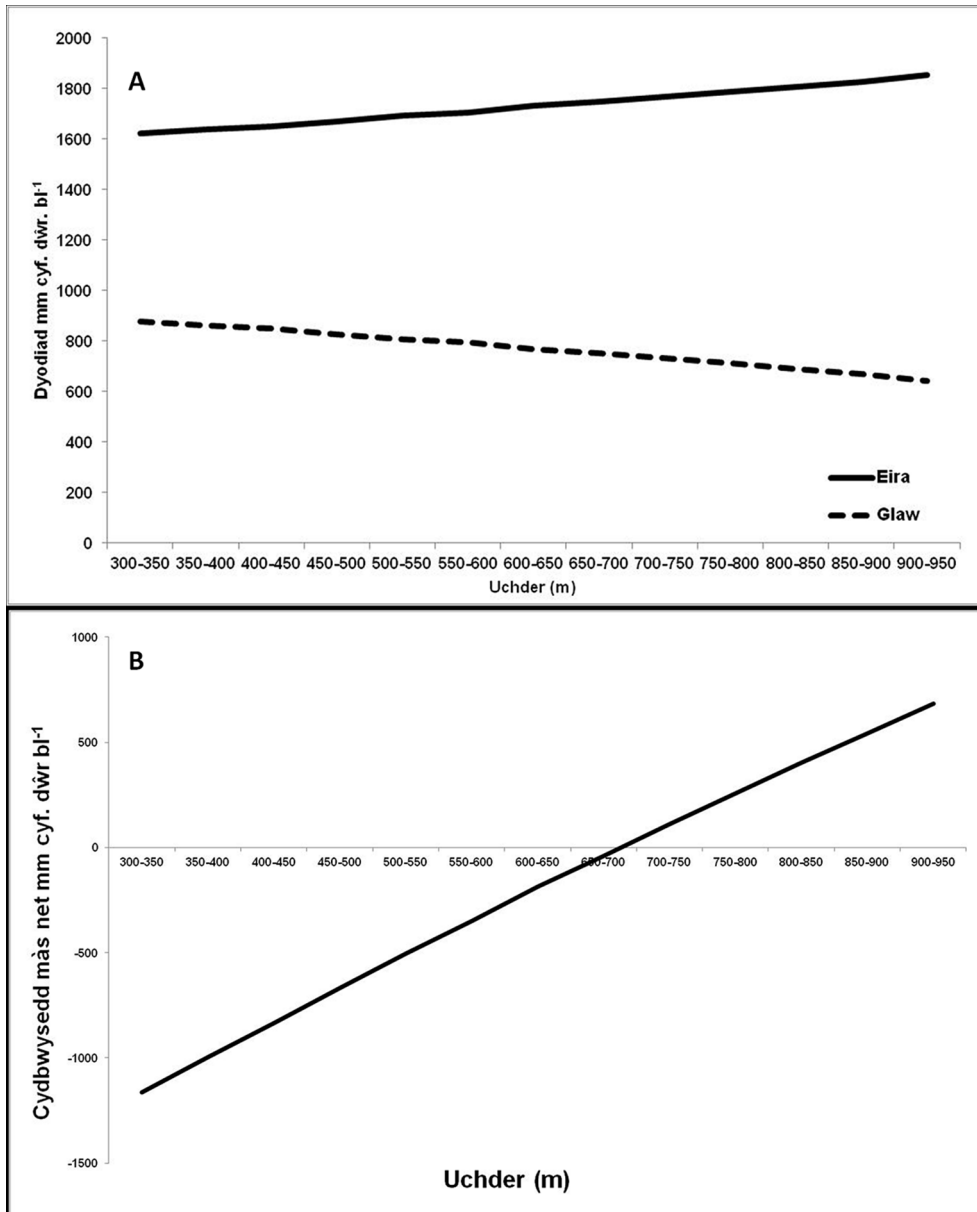
gan sianel Röhrlisberger. O ystyried lled yr esgair (tua 9.8 m ar ei man mwyaf llydan, gan awgrymu trawstoriad oddeutu 37 m²), mae'n debyg y byddai hyn yn galluogi draeniad eang o'r parth isrewlifol. Mae hyn yn cefnogi'r tybiad y byddai rhan sylweddol neu gyfanwydd y rhewlif yn cynnwys rhew dros ei bwynt dadmer dan bwysau ac yn debyg felly i rewlifoedd cyfoes yr Alpau, neu hyd yn oed yr is-Arctig. Felly defnyddiwyd esiampl o'r data radar treiddio daear ar gyfer Storglaciären (Holmlund, 1988) i gynnig isafswm o 90 y cant o ardaledd y paleo-rewlif hyd at ffin yr esgair o dan amodau 'cynnes', gan arwain at ardaledd o 1.26 km² a fyddai ar gael i alluogi microbau is-rewlifol i ymgartrefu.

3.2 Adluniad o'r tymor tyfiant uwchrewlifol

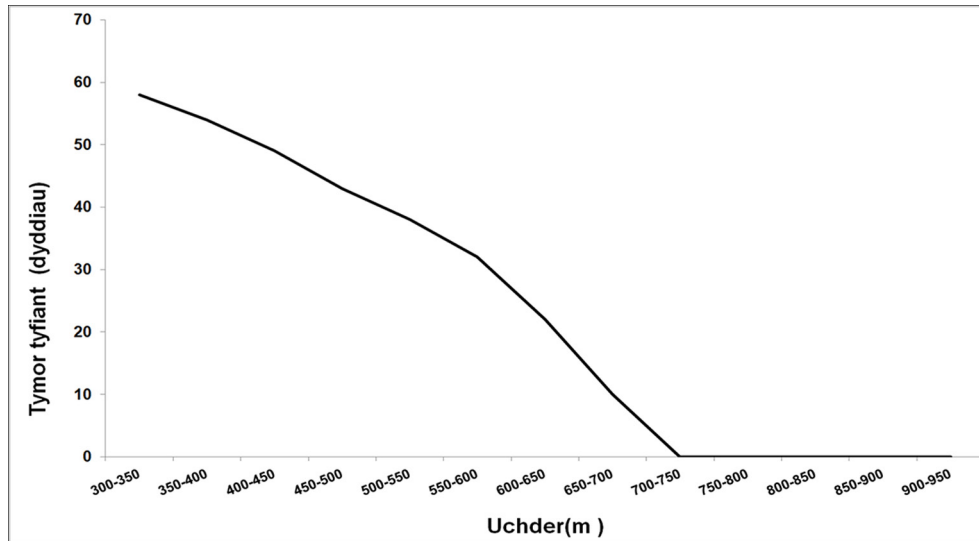
Dosbarthwyd tymheredd cyfartalog blynyddol ar draws y flwyddyn gan ddefnyddio'r paramedrau a'r model gradd dydd syml yn ôl Hafaliad 5. Caniataodd hyn ddarogan tymheredd cyfartalog ar gyfer pob dydd o flwyddyn gyfartalog yn ystod y CDD yn lleol; addaswyd hyn i uchderoedd y paleo-rewlifoedd gan gymryd cyfradd newid cyfartalog o 0.006 °C m⁻¹ i ystyriaeth (Ffig. 4). Ceir uchafbwynt o 8.3 °C ar gyfer yr is-ddosbarth uchder 300-350 m, ac isafbwynt o -25.3 °C ar gyfer yr is-ddosbarth uchder 900-950 m. Felly, mae gan uchder ddylanwad pwysig ar dymheredd, ac felly cydbwysedd mäs. Ailgrëwyd dyodiad ar sail glaw ac eira a'i ddosbarthu ledled y model gradd-dydd (*degree-day*) (Ffig. 5a) ac felly drwy'r model amrwd yn Hafaliad 7 (sydd yn anwybyddu effaith ailddosbarthiad eira drwy wynt) i gynnig cydbwysedd mäs amrwd (Ffig. 5b) ar gyfer pob is-ddosbarth uchder. Fel y disgwylir, mae uchder yn effeithio'n drwm ar y math o ddyodiad a hefyd felly gyfradd ymgasgliad a dadmer. Ceir adborth pellach oherwydd y gyfradd pall gan leihau'r derbyniad o raddau cadarnhaol ynghlwm wrth uchder, gan arwain at y tebygolrwydd o orchudd parhaol gan eira uwchlaw 700-750 m ar flwyddyn gyfartalog. Gellir darparu felly y cromlin sydd yn disgrifio adluniad y tymor tyfiant cyfartalog (Ffig. 6). Ar ei hiraf, mae'r tymor tyfiant yn parhau deufis (58 dydd) ynghanol haf ar is-ddosbarthiadau isaf y rhewlifoedd, tua phedwar diwrnod yn llai na'r tymor tyfiant byd-eang a awgrymwyd gan Anesio et al. (2009).



Ffigur 4: Allbwn model gradd-dydd wedi ei addasu ar gyfer yr is-ddosbarth uchder isaf (EI300-350) ac uchaf (EI900-950) ar y paleo-rewlifoedd.



Ffigur 5: Adluniad amrwd o ddyodiant (A) ac felly gydbwysedd mäs net (B) drwy dddosbarthu dyodiant ar draws model gradd dydd syml gan gymryd dyodiant ar ddyddiau gradd gadarnhaol pan geid glaw neu eira.



Ffigur 6: *Adluniad o'r tymor tyfiant uwch-rewlifol lle ceir iâ noeth ar wyneb y rhewlif gan ategi gweithgaredd microbaidd o fewn y tyllau cryoconite*

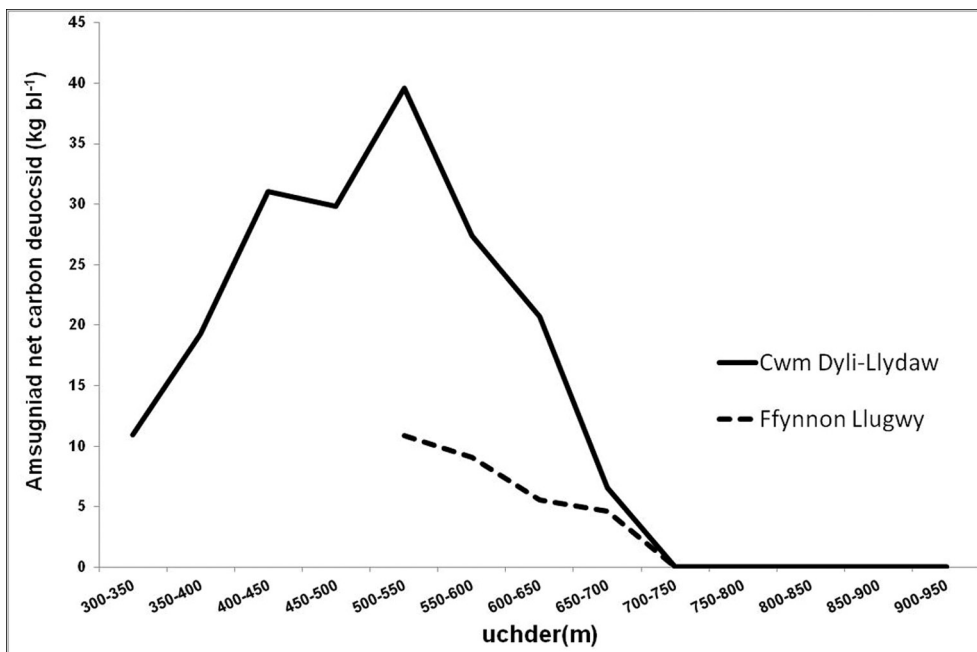
3.3. Adluniad o gylchred carbon uwchrewlifol y ddau baleo-rewlif

Drwy gyfyngu ardaledd yr is-ddosbarthiadau uchder ynghyd â hyd y tymor tyfiant ar gyfartaledd ar gyfer pob is-ddosbarthiad uchder, a defnyddio'r cyfraddau ar gyfer cynhyrchiant cynradd (CC), resbiradaeth (R) a chynhyrchiant ecosystem net (CEN) yn ôl Hodson et al. (2010c), dyma a geir:

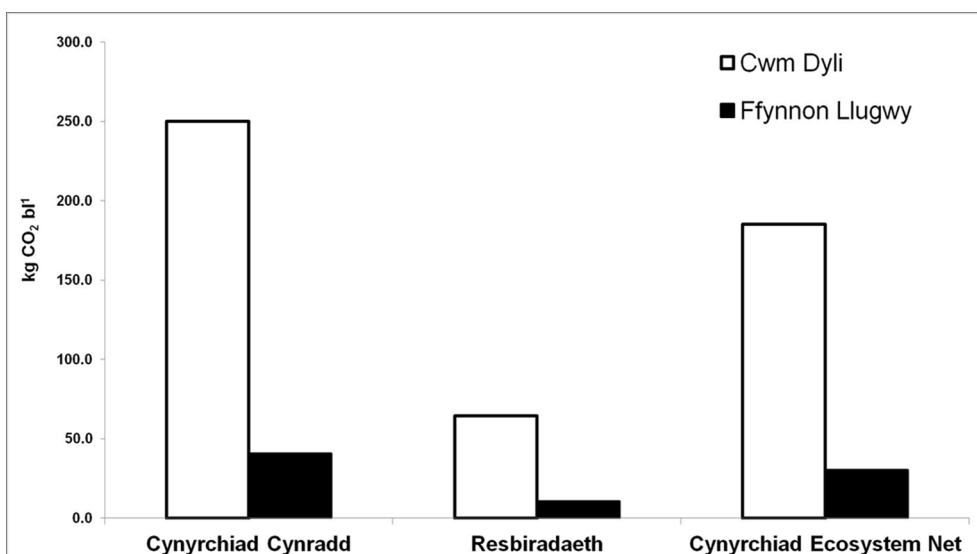
$$\text{CEN} = \text{CC} - \text{R}$$

Hafaliad 11

Gan ddilyn cynllun Anesio et al. (2009) o orchuddiant o 25 g cryoconite m⁻², ceir sefydlogiad net o garbon gan gynefinoedd uwchrewlifol y ddau baleo-rewlif ledled yr is-ddosbarthiadau uchder lle ceir iâ noeth (Ffig. 7). Ar gyfartaledd mae sefydlogiad net o garbon deuocsid hyd at 185 kg C y flwyddyn ar baleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw a 30 kg C y flwyddyn ar baleo-rewlif Ffynon Llugwy yn y cyfnod pan oedd rhewlifant y CDD yn ei anterth (Ffig. 8).



Figur 7: Adluniad o'r amsugniad net o garbon deuocsid uwchrewlifol fesul is-ddosbarth uchder ar y ddau baleo-rewlif.



Figur 8: Fflwcs net a chryswth carbon deuocsid uwchrewlifol ar y ddau baleo-rewlif.

Wrth ystyried dosbarthiad biomas cryoconite ac felly gyfraddau cynhyrchiad cynradd a resbiradaeth ar gyfer is-ddosbarthiadau ardaledd penodol, mae'n debyg y byddai paleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw wedi cadw rhan helaeth o'r gweithgaredd microbaidd ar ôl uchafbwynt rhewlifant y CDD gan fod geometreg arwynebedd y rhewlif yn golygu fod y biomas wedi'i gadw ar lethrau canolog y rhewlif, gan sicrhau ei sefydlogrwydd wrth i'r rhewlif ymgilio tan i'r is-ddosbarthiad mwyaf gael ei ddifa. Ar y llaw arall, mae'r tueddiad cynyddol tuag at ogledd-ddwyrain mewn dosbarthiad llinellau cydbwysedd yn golygu fod dosbarthiad biomas paleo-rewlif Ffynnon Llugwy o dan berygl gynt gan ei fod yn agos at ffin

derfynol y rhewlif ar ei uchafbwynt. Felly, er i'r adluniad o'r ecosystemau uwch-rewlifol a ddarparwyd yn y gwaith hwn gael ei gyfyngu i ddsbarthiad a gweithgaredd cryoconite ar uchafbwynt rhewlifant yn ystod y CDD, gellir cynnig y rhagdybiaeth y byddai yna wahaniaethau amserol yng nghylchred carbon uwch-rewlifol y ddau baleo-rewlif yn sgil newidiadau mewn cydbwysedd màs ac yn y pen draw, ymgiliad y rhewlifoedd.

3.4 Adluniad o'r ecosystem is-rewlifol

O ystyried yr esgair a ffurfiwyd gan baleo-rewlif Ffynnon Llugwy, gellir cynnig y tebygolrwydd ei fod yn dystiolaeth o system ddraeniad is-rewlifol ac felly gynefin is-rewlifol yn y gofod rhwng y craigwely a rhow gwaelodol y rhewlif. Defnyddiwyd esiampl Storglaciären yn yr is-Arctig fel analog i awgrymu y byddai'n debygol bod >90 y cant o'r rhew uwch ei bwynt dadmer ar y cyfnod yma (Holmlund, 1988), a chyfradd Alley et al. (1997) i gynnig fod yna isafswm o erydiad o 0.1 mm y flwyddyn, gan ffurfio trwch o 120 cm o raean dros y CDD. Dylid nodi fod cyfraddau uwch o erydiad yn bosibl (Alley et al., 1997), ac o gofio bod y CDD yn dilyn cyfnod mwyn byr ar ôl y prif-rewlifant Defensaidd, mae'n debygol y gallai'r haen raean is-rewlifol fod dipyn yn fwy trwchus, dylid felly ystyried yr amcangyfrif o gyfaint yr ecosystem is-rewlifol yn un ceidwadol ei natur.

Ceir data cadarn ar gyfer methanogenesis o fewn cynefin gwaelodol rhewlif alpaidd ym mynyddoedd y Rockies gan Boyd et al. (2010) a defnyddiwyd y data yma eisioes i gynnig ffurfiant o ~2 Pg o fethan yn ystod y rhewlifant olaf. Drwy ddefnyddio'r cyfraddau hyn yng nghyswllt yr ardaledd a'r dyfnder uchod, gellir amcangyfrif fflwcs tebygol o fethan oddi wrth y gymuned is-rewlifol (Tabl 1); amcangyfrifir fod hwn rhwng 0.03 a 0.2 gram C o CH₄ yr awr, ac felly rhwng 0.26 a 1.59 kg C o CH₄ y flwyddyn.

Is-ddosbarth (m)	Gofod y cynefin is-rewlifol damcaniaethol			Cyfradd cynrychiad CH ₄ yr awr	
	ardaledd (km ²)	ardaledd gwlyb (km ²)	màs gwlyb (t)	0.1 pg g ⁻¹	0.6 pg g ⁻¹
500-550	0.18				
550-600	0.17				
600-650	0.16	0.14	3×10 ⁴	3×10 ⁹	2×10 ¹⁰
650-700	0.28	0.25	6×10 ⁴	6×10 ⁹	4×10 ¹⁰
700-750	0.44	0.39	9×10 ⁴	9×10 ⁹	6×10 ¹⁰
750-800	0.42	0.38	9×10 ⁴	9×10 ⁹	5×10 ¹⁰
800-850	0.10	0.09	2×10 ⁴	2×10 ⁹	1×10 ¹⁰
Cynrychiad CH ₄ yr awr (pg)				3×10 ¹⁰	2×10 ¹¹
Cynrychiad blynyddol CH ₄ (g)				265	1591
Cynrychiad CH ₄ dros y CDD (kg)				318	1909

Tabl 1: Amcangyfrifiad o briodweddau ecosystem isrewlifol paleo-rewlif Ffynnon Llugwy a'i fflwcs methan cytras. Ceir amcangyfrif trwy ddilyn y ddwy gyfradd gan Boyd et al. (2010) o'r cynhyrchiad methan fesul gram yr awr (0.1-0.6 pg g yr awr) wedi'i addasu ar gyfer cyfaint y cynefin isrewlifol fesul is-ddosbarthiadau uchder ac fel cyfanswm yr holl rewlif bob awr, blwyddyn a chyfanrwydd y CDD.

4. Trafodaeth

Mae'r datblygiadau diweddar ym maes ecoleg microbaidd rhewlifoedd wedi gorfodi rhewlifegwyr i ailystyried natur rhewlifoedd; mae'n amlwg na ddylent gael eu trin fel systemau ffisegol, anfiotig pur yn unig. Yn ogystal â'r cyfraddau uchel o weithgaredd

microbaidd (Hodson et al., 2007; Anesio et al., 2009; Anesio et al., 2010), ceir bioamrywiaeth microbaidd sylweddol (Bhatia et al., 2006; Simon et al., 2009; Edwards et al., 2011). Mae hefyd yn bosibl fod gweithgareddau'r microbau yn dylanwadu ar ddeinameg rhewlifoedd, gan gyfrannu at eu hymgiliad (Takeuchi et al., 2001; Fountain et al., 2004; Irvine-Fynn et al., 2011) neu drwy gyflymu cyfraddau hindreuliad o dan y rhewlif (Skidmore et al., 2005), gan gyflymu llif rhew a datblygiad tirffurfiau.

Yn yr un modd, ceir trafodaeth eang ar ganlyniadau rhewlifant yn ystod yr oes iâ olaf, gan gynnwys rhewlifoedd y CDD ar dirffurfiau yng Nghymru ac o hinsawdd y CDD (Gray, 1982; Hughes, 2002; Clark et al., 2004; Jansson & Glasser, 2005; Hughes, 2009), ond hyd yn hyn, hyd y gwyddom, ni chafwyd trafodaeth ar ecoleg rhewlifoedd, capiau a llenni iâ Cymru. Pwrpas ein hastudiaeth felly oedd creu braslun o'r cyfraniadau posibl gan gymunedau microbaidd rhewlifoedd olaf Cymru er mwyn annog y fath drafodaeth.

Er i Gray (1982) a Bendle & Glasser (2012) yn eu tro adlunio 35 a 38 paleo-rewlif yn dyddio o'r CDD o fewn cyffiniau Eryri, fe fyddai y tu hwnt i amcanion y papur hwn i adlunio ecosystemau a chyfraniadau at gylchredu carbon yn ystod y CDD ar gyfer pob un o'r rhain, yn enwedig gan eu bod yn amrywio mewn maint, gyda'r rhai lleiaf yn cael eu diffinio fel lleiniau eira parhaol o bosib (Gray, 1982). Felly, cyfyngwyd ein hymdrechion i drafod y ddau baleo-rewlif mwyaf eu maint, sef paleo-rewlif Cwm Dyli-Llydaw a phaleo-rewlif Ffynnon Llugwy. Ceir sail bellach i hyn gan fod y cyfraddau o gynhyrchiant cynradd, resbiradaeth a methanogenesis rhewlifol yn deillio o rewlifoedd cyfoes sydd yn gymharol eu maint neu'n fwy na'r ddau rhewlif hyn. Gan y gall ffactorau sydd yn benodol i rewlifoedd unigol (er enghraifft, cyfundrefn hydrologig a geometreg y rhewlif) effeithio ar strwythur a gweithgaredd eu cymunedau microbaidd (Edwards et al., 2011), byddai'n synhwyrol modelu'r prosesau ar rewlifoedd tebyg.

Darganfyddiad cymharol ddiweddar yw tyllau cryoconite, gan A.E. Nordenskjöld ar ei daith ar draws llen iâ'r Lasynys yn yr 1870au (Gajda, 1958). Er hynny mae tystiolaeth eu bod yn ffenomen hynafol, er enghraifft bodolaeth pell tebyg iawn i cryoconite o fewn gwaddodion ar waelod llynnoedd Arctig Canada yn dyddio o leiaf 3,000-10,000 mlynedd cyn y presennol (Tomkins et al., 2009a; Tomkins et al., 2009b), pwysigrwydd nifer o rywogaethau hynaf y byd, er enghraifft eirth dŵr (*Tardigrada*) sydd yn gyfyngedig i cryoconite yr Alpau (H. Dastych, cyfathrebiad personol) ac sy'n un o'r anifeiliaid di-asgwrn-cefn hynaf (Regier et al., 2010), a'r damcaniaethau ynglŷn â rôl cryoconite fel lloches yn ystod rhewlifant byd-eang, neu fel mecanwaith o ddadmer rhewlifant byd-eang (Vincent et al., 2000; Vincent & Howard-Williams, 2000; Abbot & Pierrehumbert, 2010). Dylid nodi, serch hynny, fod llygredd o'r oes ddiwydiannol wedi effeithio ar cryoconite, er enghraifft olew (Margesin et al., 2002), lludw (Xu et al., 2009) a thrwy ddyodiad nitrogen (Hodson et al., 2010a). Wrth ystyried effaith llygredd nitrogen, yn yr Arctig Uchel a'r Lasynys, ceir mewnbwn sylweddol o nitrogen anthropogenig o'r pac eira sydd yn bodloni anghenion nitrogen tyllau cryoconite gerllaw lle ceir tyllau cryoconite sydd ymhellach o'r pac eira ymgiliol sy'n ddibynnol ar sefydlogiad nitrogen (Telling et al., 2011; Telling et al., 2012). Hefyd, ceir cyfraddau uchel o weithgaredd microbaidd o fewn tyllau cryoconite yr Antarcig, o dan amodau llym, a lle ceir ond ychydig o ddyodiad nitrogen (Tranter et al., 2004; Foreman et al., 2007; Storrie-Lombardi & Sattler, 2009). Felly, mae'n bosibl bod cryoconite wedi medru cyfrannu at gylchredoedd carbon y CDD mewn modd cymharol

i'w gyfraniadau cyfoes fel y mesurwyd hwy gan Anesio et al. (2009).

Efallai ei bod yn bosibl fod yr amcangyfrif o 25 g m⁻² o orchuddiant cryoconite yn un ceidwadol, gan ei bod hi'n bosibl i gyfnod oer a sychach fel y CDD brofi cyfraddau uwch o drawsgludiant llwch eolaidd, hyd at 2-4 gwaith y cyfnod presennol (Mahowald et al., 2006) gan gynorthwyo ffurfiant cryoconite ac felly gynyddu'r gyfradd o sefydlogi carbon deuocsid. Ond ar y llaw arall, ceir crynodiad atmosfferig is o garbon deuocsid (~260 ppm CO₂) o'i gymharu â'r presennol; awgrymir fod hyn wedi effeithio rywfaint ar lystyfiant yn ystod y CDD, gan gynorthwyo esblygiad y llwch eolaidd (Mahowald et al., 2006). Ni cheir data uniongyrchol ar effaith crynodiad is o garbon deuocsid atmosfferig ar gyfyngiad cynhyrchiant cynradd cryoconite, ond mae tystiolaeth o barhad cyfraddau sylweddol o ffotosynthesis o fewn tyllau cryoconite a'r rheiny wedi eu hynysu o'r atmosffer am gyfnod hir yn Antarctica (Tranter et al., 2004), yn cynnig y posibiliad fod cynhyrchiant cynradd cryoconite yn sefydlog ar draws ystod eang o grynodiadau carbon deuocsid.

Wrth ystyried cyfraniad ecosystem rhewlif penodol i'r cylchred carbon, gellir gweld fod yna ddau brif fath o gyfraniad posibl, sef sefydlogi carbon deuocsid ar wyneb y rhewlif, a ffurfiant methan ar waelod y rhewlif. O fewn cyd-destun nwyon tŷ gwydr, felly, mae yna fodd i rewlif weithio un ai fel sinc neu ynteu ffynhonnell o nwyon tŷ gwydr; mae hyn yn ddibynnol ar faint ei gynefin is-rewlifol ac felly ei allu i gynnal gweithgaredd Archaea methanogenig. Efallai bod cyfundrefn thermol rhewlif yn ffactor hynod o bwysig gan mai hwn sydd yn rheoli bodolaeth y cynefin is-rewlifol. Yn yr astudiaeth hon, dadansoddwyd tystiolaeth geomorffolegol o sianelau Röthlisberger er mwyn darogan bodolaeth cynefin is-rewlifol. Gan fod Boyd et al. (2010) wedi canfod lipidau glycerol dialkyl glycerol tetraether (GDGT) fel bio-farcwyr o fionas Archaea methanogenig o fewn graean is-rewlifol cyfoes, ac o weithredu cymhareb rhwng mathau o foleciwlau GDGT fel mesur o hinsawdd hynafol gan eu bod yn sefydlog o fewn ystod eang o waddodion, efallai ei bod yn bosibl profi creiddiau gwaddodion oddi fewn i ddalgylch paleo-rewlifoedd y CDD yn Eryri er mwyn meintioli dosbarthiad a dwysedd yr Archaea yn ogystal â maint y cynefin is-rewlifol ac felly gyfradd rhyddhad methan.

Mae cymhareb o'r fflwcs methan is-rewlifol (Tabl 1) â'r amsugniad carbon deuocsid uwch-rewlifol (Ffig. 8) yn awgrymu y byddai ecosystemau is-rewlifol paleo-rewlif Ffynnon Llugwy yn tansellio gallu'r rhewlif i leihau allyrion tŷ gwydr, yn enwedig o ystyried pŵer methan fel nwy tŷ gwydr. Yn wir, er na fodelwyd cyfraniadau paleo-rewlifoedd llai Eryri yn ystod y CDD, ac er mai ond y paleo-rewlif hwn sydd wedi gadael tystiolaeth gref o fodolaeth cynefin is-rewlifol (Bendle & Glasser, 2012), mae'n bosibl y byddai gweithgaredd methanogenig wedi bodoli oddi tan rewlifoedd arall yn ystod y CDD (neu adeg yn ystod y CDD). Serch hynny, gan fod ceisio modelu'r paleo-rewlifoedd hyn ar hyn o bryd yn ddibynnol ar dystiolaeth geomorffolegol o ffiniau terfynol y paleo-rewlif, dylid atal trafodaeth ar ganlyniadau anterth rhewlifant y CDD. Efallai ei bod yn amlwg fod y paleo-rewlifoedd yn systemau deinamig ac, felly, wrth ystyried y cyfnod Dryas Diweddaraf yn ei gyfanrwydd, dylid cadw mewn golwg y posibilrwydd bod y gyfundrefn thermol wedi newid mewn ymateb i newidiadau yn y cydbwysedd mäs (Glasser & Hambrey, 2001) yn ystod eu hymgiliad. Felly, yn y dyfodol, dylid cyfyngu modelau o gyfraniadau biogeocemegol gan baleo-ecosystemau rhewlifol o fewn amrywiad amserol; gobeithir, felly, medru defnyddio modelau thermomecanig rhifyddol er mwyn gwneud hyn (Hubbard et al., 2009).

5. Cydnabyddiaeth

Mae Arwyn Edwards yn dymuno cydnabod cefnogaeth gyllidol gan Brifysgol Aberystwyth drwy grant Cronfa Ymchwil y Brifysgol a chyllid gan y *Society for General Microbiology* (SGM PFRV 10/4) sydd wedi ei gwneud yn bosibl ysgrifennu'r papur hwn. Yn ogystal, bu cyllid gan y *Great Britain Sasakawa Foundation* (GBSF#3998) i Arwyn Edwards a Tristram Irvine-Fynn yn fodd i gynnal trafodaethau tra yn y maes. Mae Tristram Irvine-Fynn hefyd yn cydnabod cyllid gan Gonsortiw Newid Hinsawdd Cymru (C3W). Hoffai Arwyn Edwards a Tristram Irvine-Fynn ddiolch i Dr Andrew C. Mitchell a Dr Alun Hubbard, Prifysgol Aberystwyth, a Chymdeithas Wyddonol Gwynedd am drafodaethau adeiladol ar y testun hwn. Yn olaf, mae Arwyn Edwards yn ddyledus i Dr Hywel Griffiths, Prifysgol Aberystwyth, am ei gyngor ar derminoleg. Defnyddiwyd data model uchder digidol PROFILE (hawlfraint y Goron /hawl bas data © 2012, gwasanaeth a ddarparwyd gan EDINA/Arolwg Ordans) wrth baratoi'r erthygl hon. Hoffai'r holl awduron hefyd ddiolch i'r arfarnwyr am eu sylwadau adeiladol.

Llyfryddiaeth

- Abbot, D.S. a Pierrehumbert, R.T. (2010), 'Mudball: Surface dust and Snowball Earth deglaciation', *Journal of Geophysical Research*, 115: D03104.
- Alley, R. B., Cuffey, K. M., Evenson, E. B., Strasser, J. C., Lawson, D. E. a Larson, G. J. (1997), 'How glaciers entrain and transport basal sediment: Physical constraints', *Quaternary Science Reviews*, 16, tt. 1017-38.
- Anesio, A. M. a Laybourn-Parry, J. (2012), 'Glaciers and ice sheets as a biome', *Trends in Ecology & Evolution*, 27, tt. 219-25.
- Anesio, A. M., Hodson, A. J., Fritz, A., Psenner, R. a Sattler, B. (2009), 'High microbial activity on glaciers: importance to the global carbon cycle', *Global Change Biology*, 15, tt. 955-60.
- Anesio, A. M., Sattler, B., Foreman, C., Telling, J., Hodson, A., Tranter, M. a Psenner, R. (2010), 'Carbon fluxes through bacterial communities on glacier surfaces', *Annals of Glaciology*, 51, tt. 32-40.
- Bendle, J. M. a Glasser, N. F. (2012), 'Palaeoclimatic reconstruction from Lateglacial (Younger Dryas Chronozone) cirque glaciers in Snowdonia, North Wales', *Proceedings of the Geologists' Association*, 123, tt. 130-45.
- Bhatia, M., Sharp, M. a Foght, J. (2006), 'Distinct Bacterial Communities Exist beneath a High Arctic Polythermal Glacier', *Applied and Environmental Microbiology*, 72, tt. 5838-45.
- Borisova, O. K. (1997), 'Younger Dryas landscape and climate in Northern Eurasia and North America', *Quaternary International*, 41, tt. 103-9.
- Boyd, E. S., Skidmore, M., Mitchell, A. C., Bakermans, C. a Peters, J. W. (2010), 'Methanogenesis in subglacial sediments', *Environmental Microbiology Reports*, 2, tt. 685-92.
- Braithwaite, R. J. (2008), 'Temperature and precipitation climate at the equilibrium-line altitude of glaciers expressed by the degree-day factor for melting snow', *Journal of Glaciology*, 54, tt. 437-44.
- Braithwaite, R. J., Raper, S. C. B. a Chutko, K. (2006), 'Accumulation at the equilibrium-line altitude of glaciers inferred from a degree-day model and tested against field observations', *Annals of Glaciology*, 43, tt. 329-34.
- Brennand, T. A. (1994), 'Macroforms, large bedforms and rhythmic sedimentary sequences in subglacial eskers, south-central Ontario: implications for esker genesis and meltwater regime', *Sedimentary Geology*, 91, tt. 9-55.
- Brugger, K. A. (2006), 'Late Pleistocene climate inferred from the reconstruction of the Taylor River glacier complex, southern Sawatch Range, Colorado', *Geomorphology*, 75, tt. 318-29.

Cavicchioli, R. (2006), 'Cold-adapted archaea', *Nature Reviews Microbiology*, 4, tt. 331-43.

Christner, B. C., Kvitko, B. H. Reeve, J. N. (2003), 'Molecular identification of bacteria and eukarya inhabiting an Antarctic cryoconite hole', *Extremophiles*, 7, tt. 177-83.

Clark, C. D., Evans, D. J. A., Khatwa, A. et al. (2004), 'Map and GIS database of glacial landforms and features related to the last British Ice Sheet', *Boreas*, 33, tt. 359-75.

Darwin, C. (1842), 'Notes on the effects produced by the ancient glaciers of Caernarvonshire, and on the boulders transported by floating ice', *Philosophical Magazine*, 21, tt. 180-8.

Darwin, C. (1859), *On the Origin of Species* (Llundain: John Murray).

Edwards, A., Anesio, A. M., Rassner, S. M. et al. (2011), 'Possible interactions between bacterial diversity, microbial activity and supraglacial hydrology of cryoconite holes in Svalbard', *ISME J*, 5, tt. 150-60.

Fitzsimons, S. J. (1991), 'Supraglacial eskers in Antarctica', *Geomorphology*, 4, tt. 293-9.

Foreman, C. M., Sattler, B., Mikucki, J. A., Porazinska, D. L. a Priscu, J. C. (2007), 'Metabolic activity and diversity of cryoconites in the Taylor Valley, Antarctica', *Journal of Geophysical Research*, 112, G04S32.

Fountain, A. G., Tranter, M., Nysten, T. H., Lewis, K. J. a Mueller, D. R. (2004), 'Evolution of cryoconite holes and their contribution to meltwater runoff from glaciers in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica', *Journal of Glaciology*, 50, tt. 35-45.

Gajda, R. T. (1958), 'Cryoconite phenomena on the Greenland Ice Cap in the Thule Area', *Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 3, tt. 35-44.

Glasser, N. F. a Hambrey, M. J. (2001), 'Styles of sedimentation beneath Svalbard valley glaciers under changing dynamic and thermal regimes', *Journal of the Geological Society*, 158, tt. 697-707.

Gray, J. M. (1982), 'The last glaciers (Loch Lomond Advance) in Snowdonia, N. Wales', *Geological Journal*, 17, tt. 111-33.

Hambrey, M. J., Murray, T., Glasser, N. F. et al. (2005), 'Structure and changing dynamics of a polythermal valley glacier on a centennial timescale: Midre Lovénbreen, Svalbard', *Journal of Geophysical Research*, 110, tt. 19.

Hanna, E., Huybrechts, P., Steffen, K. et al. (2008), 'Increased Runoff from Melt from the Greenland Ice Sheet: A Response to Global Warming', *Journal of Climate*, 21, tt. 331-41.

Hodson, A., Roberts, T., Engvall, A-C., Holmén, K. a Mumford, P. (2010), 'Glacier ecosystem response to episodic nitrogen enrichment in Svalbard, European High Arctic', *Biogeochemistry*, 98, tt. 171-84.

Hodson, A., Boggild, C., Hanna, E., Huybrechts, P., Langford, H., Cameron, K. a

- Houldsworth, A. (2010), 'The cryoconite ecosystem on the Greenland ice sheet', *Annals of Glaciology*, 51, tt. 123-9.
- Hodson, A., Cameron, K., Bøggild, C., Irvine-Fynn, T., Langford, H., Pearce, D. a Banwart, S. (2010), 'The structure, biogeochemistry and formation of cryoconite aggregates upon an Arctic valley glacier; Longyearbreen, Svalbard', *Journal of Glaciology*, 56, tt. 349-62.
- Hodson, A., Anesio, A. M., Ng, F. et al. (2007), 'A glacier respire: quantifying the distribution and respiration CO₂ flux of cryoconite across an entire Arctic supraglacial ecosystem', *Journal of Geophysical Research*, 112, t. 9.
- Hodson, A. J., Mumford, P. N., Kohler, J. a Wynn, P. M. (2005), 'The High Arctic glacial ecosystem: new insights from nutrient budgets', *Biogeochemistry*, 72, tt. 233-56.
- Hodson, A. J., Anesio, A. M., Tranter, M. et al. (2008), 'Glacial ecosystems', *Ecological Monographs*, 78, tt. 41-67.
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P. a Schrag, D. P. (1998), 'A Neoproterozoic Snowball Earth', *Science*, 281, tt. 1342-6.
- Holmlund, P. (1988), 'An Application of Two Theoretical Melt Water Drainage Models on StorglaciÄaren and MikkaglaciÄaren, Northern Sweden', *Geografiska Annal, Series A, Physical Geography*, 70, tt. 1-7.
- Hood, E. a Scott, D. (2008), 'Riverine organic matter and nutrients in southeast Alaska affected by glacial coverage', *Nature Geosci*, 1, tt. 583-7.
- Hood, E., Fellman, J., Spencer, R. G. M., Hernes, P. J., Edwards, R., D'Amore, D. a Scott, D. (2009), 'Glaciers as a source of ancient and labile organic matter to the marine environment', *Nature*, 462, tt. 1044-7.
- Hubbard, A. (2011), 'The Times Atlas and actual Greenland ice loss', *Geology Today*, 27, tt. 212-5.
- Hubbard, A., Bradwell, T., Golledge, N. et al. (2009), 'Dynamic cycles, ice streams and their impact on the extent, chronology and deglaciation of the British-Irish ice sheet', *Quaternary Science Reviews*, 28, tt. 758-76.
- Hughes, P. D. (2002), 'Loch Lomond Stadial glaciers in the Aran and Arenig Mountains, North Wales, Great Britain'. *Geological Journal*, 37, tt. 9-15.
- Hughes, P. D. (2009), 'Loch Lomond Stadial (Younger Dryas) glaciers and climate in Wales', *Geological Journal*, 44, tt. 375-91.
- Ince, J. (1996), 'Late-Glacial and Early Holocene Vegetation of Snowdonia', *New Phytologist*, 132, tt. 343-53.
- Irvine-Fynn, T. D. L., Bridge, J. W. a Hodson, A. J. (2010), 'Rapid quantification of cryoconite: granule geometry and in situ supraglacial extents, using examples from Svalbard and Greenland', *Journal of Glaciology*, 56, tt. 297-308.

Irvine-Fynn, T. D. L., Bridge, J. W. a Hodson, A. J. (2011), 'In situ quantification of supraglacial cryoconite morpho-dynamics using time-lapse imaging: an example from Svalbard', *Journal of Glaciology*. Yn y wasg.

Irvine-Fynn, T. D. L., Hodson, A. J., Moorman, B. J., Vatne, G. a Hubbard, A. L. (2011), 'Polythermal glacier hydrology: A review', *Reviews in Geophysics*, 49, RG4002.

Isarin, R. F. B., Renssen, H. a Vandenberghe, J. (1998), 'The impact of the North Atlantic Ocean on the Younger Dryas climate in northwestern and central Europe', *Journal of Quaternary Science*, 13, tt. 447-53.

Jacob, T., Wahr, J., Pfeffer, W. T. a Swenson, S. (2012), 'Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise', *Nature*. (Blaengyhoeddiad arlein).

Jansson, K. N. a Glasser, N. F. (2005), 'Palaeoglaciology of the Welsh sector of the British-Irish Ice Sheet', *Journal of the Geological Society*, 162, tt. 25-37.

Kastovska, K., Elster, J., Stibal, M. a Santruckova, H. (2005), 'Microbial assemblages in soil microbial succession after glacial retreat in Svalbard (high Arctic)', *Microbial Ecology*, 50, tt. 396-407.

Mahowald, N. M., Yoshioka, M., Collins, W. D., Conley, A. J., Fillmore, D. W., a Coleman, D. B., (2006), 'Climate response and radiative forcing from mineral aerosols during the last glacial maximum, pre-industrial, current and doubled-carbon dioxide climates', *Geophysical Research Letters*, 33, L20705.

Maitland, P. S., Winfield, I. J., McCarthy, I. D., ac Igoe, F., (2007), 'The status of Arctic charr' *Salvelinus alpinus* in Britain and Ireland', *Ecology of Freshwater Fish*, 16, tt. 6-19.

Margesin, R., Zacke, G., a Schinner, F. (2002), 'Characterization of Heterotrophic Microorganisms in Alpine Glacier Cryoconite', *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 34, tt. 88-93.

McCarroll, D. a Ballantyne, C. K. (2000), 'The last ice sheet in Snowdonia', *Journal of Quaternary Science*, 15, tt. 765-78.

Miteva, V. I. a Brenchley, J. E. (2005), 'Detection and isolation of ultrasmall microorganisms from a 120,000-year-old Greenland glacier ice core', *Applied and Environmental Microbiology*, 71, tt. 7806-18.

Oerlemans, J., Giesen, R. H. a van den Broeke, M. R. (2009), 'Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to the accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland)', *Journal of Glaciology*, 55, tt. 729-36.

Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D. et al. (1999), 'Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica', *Nature*, 399, tt. 429-36.

Polyakov, I. V., Alekseev, G. V., Bekryaev, R. V., et al. (2002), 'Observationally based assessment of polar amplification of global warming'. *Geophysical Research Letters*, 29, t. 1878.

- Priscu, J. C., a Christner, B. C. (2004), 'Earth's icy biosphere', *Microbial diversity and bioprospecting*, (Bull AT), tt. 130-45. American Society for Microbiology, Washington D.C., UDA.
- Raiswell, R. Tranter M., Benning, L. G., Siegert M., Deâth, R., Huybrechts, P., a Payne, T. (2006), 'Contributions from glacially derived sediment to the global iron (oxyhydr)oxide cycle: Implications for iron delivery to the oceans', *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, tt. 2765-80.
- Rasmussen, S. O., Andersen, K. K., Svensson, A. M. et al. (2006), 'A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination', *Journal of Geophysical Research*, 111, D06102
- Regier, J. C., Shultz, J. W., Zwick, A. et al. (2010), 'Arthropod relationships revealed by phylogenomic analysis of nuclear protein-coding sequences', *Nature*, 463, tt. 1079-83.
- Rhind, B., a Jones, B. (2003), 'The vegetation history of Snowdonia since the late glacial period', *Field Studies Journal*, 10, t. 276.
- Rose, J. (1985), 'The Dimlington Stadial/Dimlington Chronozone: a proposal for naming the main glacial episode of the Late Devensian in Britain', *Boreas*, 14, tt. 225-30.
- Röthlisberger, H. (1972), 'Water pressure in intra- and sub-glacial channels', *Journal of Glaciology*, 11, tt. 177-203.
- Säwström, C., Mumford, P., Marshall W., Hodson, A., a Laybourn-Parry, J. (2002), 'The microbial communities and primary productivity of cryoconite holes in an Arctic glacier (Svalbard 79°N)', *Polar Biology*, 25, tt. 591-6.
- Screen, J. A. a Simmonds, I. (2010), 'The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification', *Nature*, 464, tt. 1334-7.
- Simon, C., Wiezer, A., Strittmatter, A. W., a Daniel, R. (2009), 'Phylogenetic Diversity and Metabolic Potential Revealed in a Glacier Ice Metagenome', *Applied and Environmental Microbiology*, 75, tt. 7519-26.
- Skidmore, M., Anderson, S. P., Sharp, M., Foght, J., a Lanoil, B. D. (2005), 'Comparison of Microbial Community Compositions of Two Subglacial Environments Reveals a Possible Role for Microbes in Chemical Weathering Processes', *Applied and Environmental Microbiology*, 71, tt. 6986-97.
- Skidmore, M. L., Foght, J. M., a Sharp, M. J. (2000), 'Microbial Life beneath a High Arctic Glacier', *Applied and Environmental Microbiology*, 66, tt. 3214-20.
- Sowers, T. (2006), 'Late Quaternary Atmospheric CH₄ Isotope Record Suggests Marine Clathrates Are Stable', *Science*, 311, tt. 838-40.
- Stibal, M., Tranter, M., Benning, L. G., a Řehák, J. (2008), 'Microbial primary production on an Arctic glacier is insignificant in comparison with allochthonous organic carbon input', *Environmental Microbiology*, 10, 2172-8.

Storrie-Lombardi, M. C., a Sattler, B. (2009), 'Laser-Induced Fluorescence Emission (LIFE): In Situ Nondestructive Detection of Microbial Life in the Ice Covers of Antarctic Lakes', *Astrobiology*, 9, tt. 659-72.

Takeuchi, N. (2002), 'Optical characteristics of cryoconite (surface dust) on glaciers: the relationship between light absorbency and the property of organic matter contained in the cryoconite', *Annals of Glaciology*, 34, tt. 409-14.

Takeuchi, N., (2009), 'Temporal and spatial variations in spectral reflectance and characteristics of surface dust on Gulkana Glacier, Alaska Range', *Journal of Glaciology*, 55, tt. 701-09.

Takeuchi, N., Kohshima, S., a Seko, K. (2001), 'Structure, formation, and darkening process of albedo-reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: a granular algal mat growing on the glacier', *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 33, tt. 115-22.

Takeuchi, N., Nishiyama, H., a Li, Z. (2010), 'Structure and formation process of cryoconite granules on Ürümqi glacier No. 1, Tien Shan, China', *Annals of Glaciology*, 51, tt. 9-14.

Telling, J., Anesio, A. M., Tranter, M., Irvine-Fynn, T., Hodson A., Butler, C., a Wadham, J. (2011), 'Nitrogen fixation on Arctic glaciers, Svalbard', *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 116, G03039.

Telling J., Stibal, M., Anesio, A. M. et al. (2012), 'Microbial nitrogen cycling on the Greenland Ice Sheet', *Biogeosciences*, 9, tt. 2431-42

Tomkins, J., Lamoureux, S., Antoniades, D., & Vincent, W. (2009a), 'Sedimentary pellets as an ice-cover proxy in a High Arctic ice-covered lake', *Journal of Paleolimnology*, 41, tt. 225-42.

Tomkins, J. D., Lamoureux, S. F., Antoniades, D., a Vincent, W. F. (2009b), 'Sedimentology of perennial ice-covered, meromictic Lake A, Ellesmere Island, at the northern extreme of CanadaPolar Continental Shelf Program Contribution 00109', *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46, tt. 83-100.

Tranter, M., Sharp, M. J., Lamb, H. R., Brown, G. H., Hubbard, B. P., a Willis, I. C. (2002), 'Geochemical weathering at the bed of Haut Glacier d'Arolla, Switzerland - a new model', *Hydrological Processes*, 16, tt. 959-93.

Tranter, M., Fountain, A. G., Fritsen, C. H., Berry Lyons, W., Priscu, J. C., Statham, P. J., a Welch, K. A. (2004), 'Extreme hydrochemical conditions in natural microcosms entombed within Antarctic ice', *Hydrological Processes*, 18, tt. 379-87.

Truffer, M., Harrison, W. D., a Echelmeyer, K. A. (2000), 'Glacier motion dominated by processes deep in underlying till', *Journal of Glaciology*, 46, tt. 213-21.

Vincent, W. F., a Howard-Williams, C. (2000), 'Life on Snowball Earth', *Science*, 287, t. 2421.

Vincent, W. F., Gibson, J. A. E., Pienitz, R., Villeneuve, V., Broady, P. A., Hamilton, P. B., & Howard-Williams, C. (2000), 'Ice Shelf Microbial Ecosystems in the High Arctic and Implications for Life on Snowball Earth', *Naturwissenschaften*, 87, tt. 137-41.

Wadham, J. L., Tranter, M., Tulaczyk, S., a Sharp, M. (2008), 'Subglacial methanogenesis: A potential climatic amplifier?', *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB2021.

Walker, M. J. C., Coope, G. R., Sheldrick, C., Turney, C. S. M., Lowe, J. J., Blockley, S. P. E., a Harkness, D. D. (2003), 'Devensian Lateglacial environmental changes in Britain: a multi-proxy environmental record from Llanilid, South Wales, UK', *Quaternary Science Reviews*, 22, tt. 475-520.

Walker, M., Johnsen, S., Rasmussen, S. O. et al. (2008), 'Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records', *Journal of Quaternary Science*, 24, tt. 3-17.

Webster, A. D. (1889), 'Notes on Three Rare Carnarvonshire Plants', *Transactions of the Botanical Society of Edinburgh*, 17, tt. 29-32.

Weitemeyer, K. A., a Buffett, B. A. (2006), 'Accumulation and release of methane from clathrates below the Laurentide and Cordilleran ice sheets', *Global and Planetary Change*, 53, tt. 176-87.

Xu, Y., Simpson, A. J., Eyles, N., a Simpson, M. J. (2009), 'Sources and molecular composition of cryoconite organic matter from the Athabasca Glacier, Canadian Rocky Mountains', *Organic Geochemistry*, 41, tt. 177-86.